刘悦兰, 王云香, 郑鄢燕, 等. 低压静电场处理对杏果实采后黑斑病的抑制作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 386−394. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040270
LIU Yuelan, WANG Yunxiang, ZHENG Yanyan, et al. Inhibitory Effect of Low Voltage Electrostatic Field Treatment on Postharvest *Alternaria* Rot of Apricot Fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 386−394. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040270

· 贮运保鲜 ·

低压静电场处理对杏果实采后黑斑病的抑制作用

刘悦兰[1,2], 王云香[2], 郑鄢燕[2], 左进华[2], 王亚美[1], 蒋　楠[1], 高　哲[1,*]
（1.河北农业大学食品科技学院, 河北保定 071000;
2.北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所, 北京 100097）

摘　要: 为探究低压静电场（low voltage electrostatic field，LVEF）处理对杏果实黑斑病的影响，本文以‘串支红’杏果实为实验对象，损伤接种链格孢菌，贮藏在 25±1 ℃ 和相对湿度 80%~85% 的 1500 V LVEF 环境中。通过测量生理生化指标，探究贮藏过程中 LVEF 处理对杏果实黑斑病的抑制作用。结果表明，LVEF 处理显著抑制了病原菌的侵染进程，使接种发病率（第 6 d）较 CK 组降低 41.18%，病斑直径（第 6 d）减少 31.20%。在氧化应激方面，LVEF 组丙二醛含量（第 2 d）和过氧化氢（第 6 d）含量均显著低于 CK 组，分别降低了 29.41% 和 19.75%，同时，超氧阴离子（第 6 d）产生速率也显著下降，降低了 5.42%。此外，LVEF 处理还抑制了多酚氧化酶的活性，同时使还原性谷胱甘肽（第 4 d）含量提高 1.81%。在抗氧化酶活性调控方面，LVEF 处理显著增强了过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶的活性，同时过氧化物酶和超氧化物歧化酶的活性也明显提升。在抗病方面，苯丙氨酸解氨酶（第 6 d）和几丁质酶（第 6 d）的活性显著升高，分别升高了 5.86% 和 1.17%，总酚（第 6 d）和类黄酮（第 6 d）的含量增加 1.75% 和 4.35%。综上所述，LVEF 保鲜技术能够显著抑制黑斑病的发生，在抑制杏果实采后病害方面展现出良好的应用前景。

关键词: 低压静电场, 杏, 黑斑病, 贮藏, 品质
中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0386−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040270
本文网刊:

Inhibitory Effect of Low Voltage Electrostatic Field Treatment on Postharvest *Alternaria* Rot of Apricot Fruit

LIU Yuelan[1,2], WANG Yunxiang[2], ZHENG Yanyan[2], ZUO Jinhua[2], WANG Yamei[1], JIANG Nan[1], GAO Zhe[1,*]
（1.College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China;
2.Institute of Agri-food Processing and Nutrition, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China）

Abstract: To investigate the effect of low voltage electrostatic field (LVEF) treatment on *Alternaria* rot in apricot fruit, 'Chuanzhihong' apricots were used as the experimental material. The fruits were wound-inoculated with *Alternaria alternata* and stored under a 1500 V LVEF environment at 25±1 ℃ and 80%~85% relative humidity. Physiological and biochemical parameters were measured to evaluate the inhibitory effect of LVEF treatment on *Alternaria* rot development during storage. The results demonstrated that LVEF treatment significantly inhibited the infection process of the pathogen. Compared to the control (CK) group, LVEF treatment reduced the disease incidence by 41.18% and the lesion diameter by 31.20% (day 6). In terms of oxidative stress, the contents of malondialdehyde (day 2) and hydrogen peroxide (day 6) were significantly lower in the LVEF group than in the CK group, decreasing by 29.41% and 19.75%, respectively. Additionally,

收稿日期: 2025−04−22
基金项目: 河北省重点研发计划项目（22327209D）; 北京市农林科学院创新能力建设专项（KJCX20251211）; 国家重点研发计划（2023YFD2201300）。
作者简介: 刘悦兰（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 19935452097@163.com。
*** 通信作者:** 高哲（1979−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品保鲜与加工, E-mail: haugzh@hebau.edu.cn。

the production rate of superoxide anion (day 6) was also decreased significantly, showing a reduction of 5.42%. Furthermore, LVEF treatment suppressed the activity of polyphenol oxidase while increased the content of reduced glutathione by 1.81% (day 4). Regarding antioxidant enzyme activity regulation, LVEF treatment significantly enhanced the activities of catalase and ascorbate peroxidase, while peroxidase and superoxide dismutase activities were also increased. In terms of disease resistance, the activities of phenylalanine ammonia lyase and chitinase significantly increased by 5.86% and 1.17% (day 6), respectively, while the contents of total phenols and flavonoids increased by 1.75% and 4.35% (day 6). In conclusion, LVEF preservation technology could effectively inhibit the disease occurrence of *Alternaria* rot and showed promising application potential for controlling postharvest diseases in apricot fruit.

Key words: low voltage electrostatic field; apricot; black spot disease; storage; quality

杏(*Prunus armeniaca* L.)原产于中亚，主要在地中海、中东、高加索、中亚和中国栽培[1−2]。成熟的杏果实颜色鲜艳，味道酸甜可口，散发着浓郁的果香。同时，它富含维生素、矿物质和多糖在内的多种营养素[3]。但杏果实采后极易被病原菌侵染，其中由链格孢菌(*Alternaria alternata*)诱发的黑斑病已成为杏果实采后的主要病害之一[4]。黑斑病不仅影响果实的外观品质，还会促使果实发生腐烂变质，进而缩短其货架期，最终导致严重的经济损失。尽管传统的采后保鲜方法，例如化学杀菌剂处理，能够在一定程度上控制病害，但长期使用会使病原菌产生耐药性，并将残留物留在果实中，对环境和人体健康构成潜在威胁。因此，开发安全且有效的采后保鲜技术，对于抑制杏果实黑斑病的扩展以及提高果实贮藏品质具有至关重要的意义。

近年来，随着物理保鲜技术的发展，低压静电场(low voltage electrostatic field, LVEF)作为一种新兴的绿色保鲜技术，日益受到广泛关注。它是一种安全有效的物理保鲜方法，具有无毒、无污染和无残留的特点[5]。它不仅能够通过影响果蔬的电荷分布和水分活度，对生物体酶的活性产生影响[6]；还能够使细菌等微生物的细胞膜内外电势发生改变，导致其生长代谢紊乱，从而达到抑制或杀灭微生物的目的[7]。已有研究表明，LVEF 处理在果蔬采后保鲜中具有多重积极作用。例如，LVEF 处理可以有效抑制青梅果实的颜色变化并减少水分流失[8]；将 LVEF 技术应用于爱媛果冻橙的贮藏，能够抑制其贮藏期间青绿霉病和砂皮病的发生[9]；此外，LVEF 结合低温处理可提高樱桃番茄中超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶的活力，以及抗坏血酸含量，并降低樱桃番茄中的活性氧水平[10]。这些研究充分证明了 LVEF 保鲜技术在果蔬保鲜领域展现出重要的应用价值和发展潜力。然而，关于 LVEF 技术在杏果实采后贮藏，特别是抑制黑斑病方面的应用研究，目前尚未见报道。

因此，本研究以‘串支红’杏为研究对象并损伤接种链格孢菌，采用 1500 V LVEF 处理杏果实，并通过测定接种发病率和病斑直径揭示 LVEF 对杏果实黑斑病的抑制效果；同时，测定与氧化应激、抗氧化防御和抗病相关等生理指标，探讨 LVEF 对杏果实品质变化及黑斑病抑制作用的潜在机制。本研究旨在为杏果实采后黑斑病的防控和保鲜提供新的技术手段和理论依据，促进杏产业的可持续发展。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

链格孢菌(*Alternaria alternata*)　中国农业大学提供；‘串支红’杏果实　采自北京延庆杏基地；盐酸(优级纯)、氢氧化钠(分析纯)、甲醇(分析纯)、硫酸(分析纯)　天津市大茂化学试剂厂；丙二醛(malondialdehyde, MDA)检测试剂盒、过氧化氢(hydrogen peroxide, H_2O_2)检测试剂盒、过氧化氢酶(catalase, CAT)检测试剂盒　苏州科铭生物技术有限公司；超氧阴离子(superoxide anion, O_2^-)检测试剂盒、还原型谷胱甘肽(glutathione, GSH)检测试剂盒、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)检测试剂盒、抗坏血酸过氧化物酶(ascorbic acid peroxidase, APX)检测试剂盒、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)检测试剂盒、苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia lyase, PAL)检测试剂盒、几丁质酶(chitinase, CHT)检测试剂盒　北京盒子生工(BOXBIO)。

PAL-1 便携式数显折光仪　日本 ATAGO 公司；Allegra X-30 高速离心机　贝克曼库尔特国际贸易(上海)有限公司；LUX 多功能酶标仪　赛默飞世尔科技公司；A11 基本型研磨机　德国 IKA 公司；DK-8D 型电热恒温水槽　上海一恒科技有限公司；低压静电场发生装置　自制，如图 1 所示。

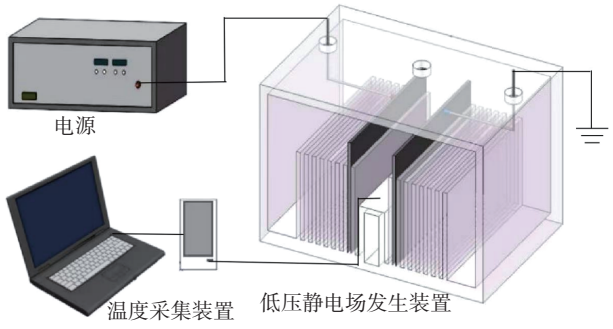


图 1　低压静电场发生装置

Fig.1　Low voltage electrostatic field generator

1.2　实验方法

1.2.1　处理方法　杏果实于 2024 年 7 月 11 日采摘，去除机械损伤及病虫果，选取大小均匀，色泽及成熟度(八成熟)相对一致的杏果实作为试验原料。立即

运回至果蔬采后生理实验室冷库。将挑选好的杏果实置于 PET 保鲜盒内，每盒 9 个果实，对照组 6 盒，处理组 9 盒。对照组（CK）在温度 25±1 ℃、相对湿度 80%~85% 的条件下贮藏；处理组（LVEF）以输出电压 1500 V，电场强度为 2700 V/m 的条件进行持续低压静电场处理，并于温度 25±1 ℃、相对湿度 80%~85% 条件下贮藏。每 2 d 取样并测定相关指标。

损伤接种则参照张亚琳等[4] 的方法稍作修改，在无菌操作环境中，向收集的链格孢菌中加入 10 mL 无菌水，并用已灭菌处理的玻璃棒轻轻刮取表面孢子，将其转移至 100 mL 三角玻璃瓶中，随后，使用漩涡混合器将悬液混匀，并通过纱布进行过滤。将过滤后的悬液浓度用无菌水调节至 1×10^6 个/mL，制备成孢子悬浮液以备使用。在进行损伤接种前，首先用 75% 乙醇溶液擦拭杏果实表面，待果实表面完全干燥后，使用已灭菌的 20 μL 枪头在果实前后表面的赤道中心位置各扎 1 个孔径为 2.5 mm，深度为 4.0 mm 的小孔。接着，向每个孔内注射 20 μL 的孢子悬浮液，对照组与处理组杏果实全部接种。室温下晾干后，将杏果实放在 PET 保鲜盒中，按照以上条件进行贮藏，每 2 d 进行 1 次取样，并测定后续相关指标。

1.2.2 测定指标与方法

1.2.2.1 接种发病率和病斑直径的测定 参照李玲等[11] 方法，单个杏果实一侧的病斑直径超过 4 mm，则将该果实判定为接种发病果，发病率按下式计算；用十字交叉法测定贮藏期杏果实的病斑直径，取平均值。

$$接种发病率(\%)=\frac{接种发病果实数}{总果实数}\times100$$

1.2.2.2 杏果实氧化指标的测定 MDA 含量、H_2O_2 含量、O_2^- 产生速率和 GSH 含量均采用试剂盒测定。

1.2.2.3 杏果实抗氧化酶指标及多酚氧化酶指标的测定 POD、SOD、APX、PPO、CAT 酶活采用试剂盒测定。

1.2.2.4 杏果实抗病相关物质的测定 PAL 和 CHT 活性采用试剂盒测定。

总酚与类黄酮的含量参照曹建康等[12] 的方法，称取 2.0 g 杏果肉，加入少许经预冷的 1% HCl-甲醇溶液，在冰浴条件下研磨匀浆后，转入 20 mL 刻度试管中。用 1% HCl-甲醇溶液冲洗研钵，一并转移到试管中，定容至刻度，混匀，离心条件为 4 ℃，13000×g，离心 20 min 后，取上清液待用。实验重复三次。总酚的相对含量以每克果肉组织在 280 nm 波长处的光密度值来表示；类黄酮物质的相对含量则以每克果肉组织在 325 nm 波长处的光密度值来表示。

1.3 数据处理

各项试验均重复 3 次，结果以平均值±标准差表示。采用 IBM SPSS Statistics25 软件对数据进行显著性差异分析，$P<0.05$ 作为差异显著的判定标准。使用 Origin 2024 软件进行图片的制作。

2 结果与分析

2.1 低压静电场处理对杏果实黑斑病的影响

由图 2 可以看出，LVEF 处理可抑制杏果实黑斑病的发生。图 3(a)可知，在贮藏期间，不同处理组的杏果实接种发病率均呈现持续上升的趋势。在贮藏初期 0~2 d，所有处理组均未出现发病现象。直至贮藏第 4 d，开始出现发病特征，其中 CK 组杏果实接种发病率为 35.98%；而 LVEF 组为 28.42%，较 CK 组显著降低 21.01%（$P<0.05$）。随着贮藏时间延长，贮藏第 6 d 时，CK 组的接种发病率为 66.49%，而 LVEF 组的接种发病率为 39.11%，较 CK 组显著降低 41.18%（$P<0.05$）。由图 3(b)可知，各处理组杏果实在贮藏期间病斑直径不断扩增，其变化趋势与接种

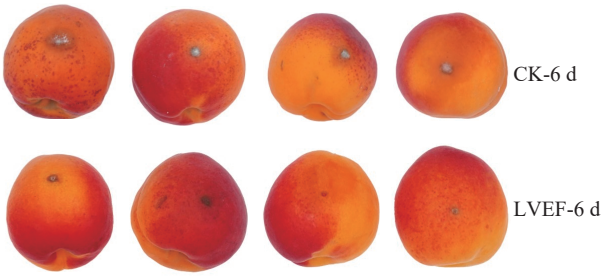


图 2 接种链格孢菌杏果实的外部照片

Fig.2 External photographs of *Alternaria alternata* inoculated apricot fruits

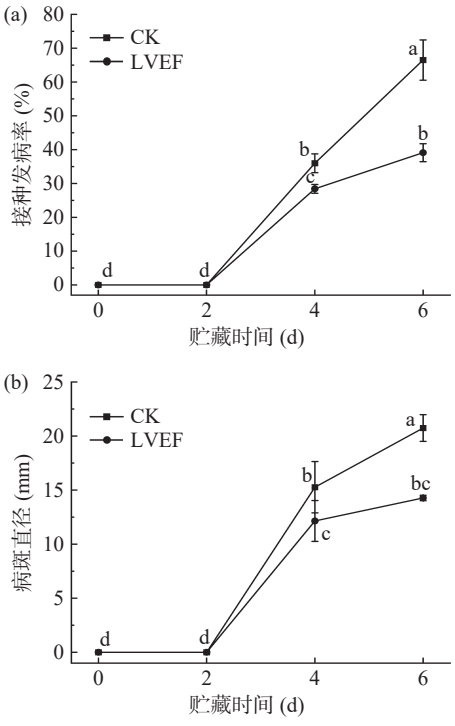


图 3 低压静电场处理对杏果实贮藏期间接种发病率(a)和病斑直径(b)的影响

Fig.3 Effect of low voltage electrostatic field treatment on inoculum incidence (a) and spot diameter (b) of apricot fruit during storage

注：不同小写字母代表同一贮藏期间各组数值差异显著（$P<0.05$）；图 4~图 10 同。

发病率的变化趋势基本一致。贮藏第 4 d 时，CK 组和 LVEF 组杏果实的病斑直径分别为 15.27 mm 和 12.14 mm，LVEF 组较 CK 组显著减少 20.50%（$P<0.05$）。贮藏第 6 d 时，CK 组病斑直径进一步扩大至 20.74 mm，而 LVEF 组仅为 14.27 mm，较 CK 组显著降低 31.20%（$P<0.05$）。同样，Liu 等[13] 研究低压静电场与改良气调包装（MAP）结合处理双孢蘑菇的贮藏过程中发现，LVEF 和 MAP 的协同作用有助于抑制微生物生长。这一结果表明 LVEF 处理不仅能有效抑制病原菌的侵染，降低杏果实的接种发病率，同时还显著延缓病斑的扩展，从而有效维持杏果实在贮藏过程中的品质。

2.2　低压静电场处理对杏果实氧化指标的影响

2.2.1　低压静电场处理对杏果实丙二醛含量的影响　MDA 作为膜脂过氧化的主要终产物，其含量变化能够有效反映细胞膜系统的受损程度[14]。由图 4 可知，在整个贮藏过程中，经 LVEF 处理的杏果实 MDA 含量始终低于 CK 组。贮藏第 2 d 时，CK 组的 MDA 含量达到 5.88 nmol·g^{-1}；而 LVEF 组的 MDA 含量为 4.15 nmol·g^{-1}，较 CK 组显著降低 29.41%（$P<0.05$）。随着贮藏时间的延长，经 LVEF 处理的杏果实 MDA 含量始终低于 CK 组。吴玉婷等[15] 研究发现 LVEF 协同低温处理可以抑制贵妃红桃的 MDA含量。综上所述，LVEF 处理有效降低了杏果实贮藏前期的膜脂过氧化程度，有助于保持细胞膜结构的完整性。

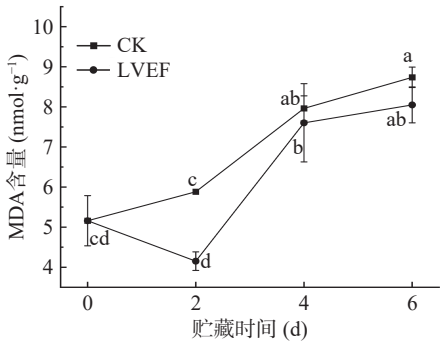


图 4　低压静电场处理对杏果实贮藏期间 MDA 含量的影响

Fig.4　Effect of low voltage electrostatic field treatment on MDA content of apricot fruits during storage

2.2.2　低压静电场处理对杏果实过氧化氢含量和超氧阴离子产生速率的影响　植物氧化应激可刺激产生许多活性氧，导致膜脂质过氧化，除了 MDA 的含量增加以外，H_2O_2 的含量也显著增加，H_2O_2 可被多种生物和非生物诱导剂诱导，并作为调控网络中的信号分子控制植物的各种生理过程[16]。从图 5(a)可以看出，在整个贮藏期间，LVEF 组杏果实的 H_2O_2 含量始终显著低于 CK 组（$P<0.05$）。贮藏末期第 6 d 时，CK 组的 H_2O_2 含量达到 18.53 μmol·g^{-1}；而 LVEF 组的 H_2O_2 含量为 14.87 μmol·g^{-1}，较对照组降低 19.75%。同样，Xu 等[5] 研究发现 LVEF 处理

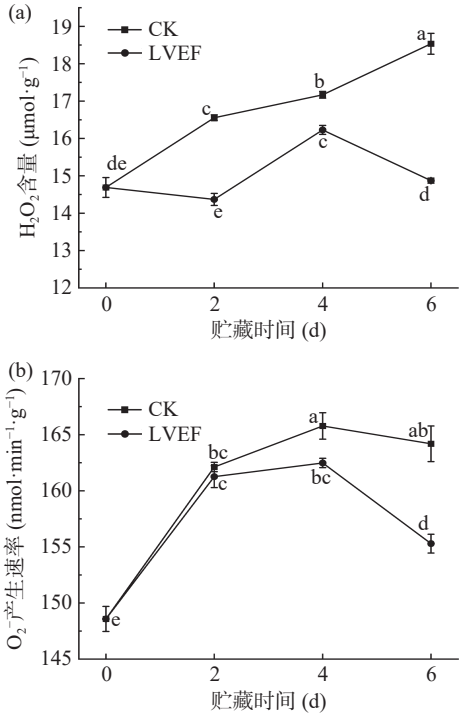


图 5　低压静电场处理对杏果实贮藏期间 H_2O_2 含量(a)和 O_2^-产生速率(b)的影响

Fig.5　Effect of low voltage electrostatic field treatment on H_2O_2 content (a) and O_2^- production rate (b) of apricot fruits during storage

可以显著抑制草莓在贮藏期间（4±1 ℃）的 H_2O_2 积累。这些结果共同表明，LVEF 处理可通过抑制 H_2O_2 含量的增加，减轻采后果实的氧化损伤。

内源性超氧阴离子（O_2^-）含量的增加会促进收获后果实的品质下降和衰老[17]。由图 5(b)可知，在整个贮藏期间，CK 组和 LVEF 组杏果实的 O_2^-产生速率均呈现先上升后下降的趋势，且 CK 组的 O_2^-产生速率始终高于 LVEF 组。进一步分析，两组处理均在第 4 d 达到 O_2^-产生速率的峰值，此时 CK 组杏果实的 O_2^-产生速率为 165.78 nmol·min^{-1}·g^{-1}；而 LVEF 组杏果实的 O_2^-产生速率为 162.48 nmol·min^{-1}·g^{-1}，较 CK 组下降 1.99%（$P<0.05$）。贮藏末期第 6 d 时，差异最明显，此时 CK 组的 O_2^-产生速率为 164.19 nmol·min^{-1}·g^{-1}，而 LVEF 组杏果实的 O_2^-产生速率为 155.29 nmol·min^{-1}·g^{-1}，较 CK 组下降 5.42%（$P<0.05$）。这一结果与徐耀宗[18] 研究发现 LVEF 可以降低双孢蘑菇在 4 ℃ 贮藏下的 O_2^-产生速率结果一致。结合以上研究结果来看，LVEF 处理有效减少了杏果实在贮藏时期 O_2^-的生成速率，从而有助于延缓果实品质的下降和衰老进程。

2.2.3　低压静电场对杏果实还原型谷胱甘肽含量的影响　谷胱甘肽是植物中的一种内源性抗氧化剂，对延缓衰老发挥着重要的作用[19]。由图 6 可知，除贮藏时间第 6 d 时的 LVEF 组杏果实的 GSH 含量低于 CK 组外，其余的 2 d 和 4 d 时 LVEF 组杏果实的 GSH 含量均高于 CK 组。在贮藏第 4 d 时，LVEF

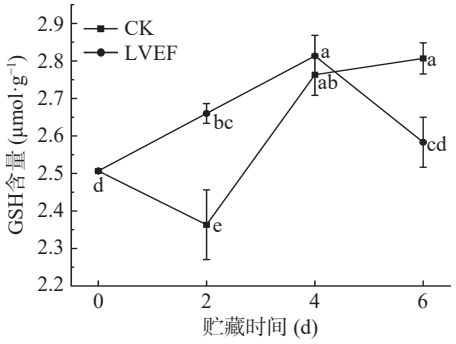


图 6 低压静电场处理对杏果实贮藏期间 GSH 含量的影响

Fig.6 Effect of low voltage electrostatic field treatment on GSH content of apricot fruits during storage

处理的杏果实 GSH 含量达到 2.81 μmol·g^{-1}, 较同一时间 CK 组升高了 1.81%。这一结果表明, LVEF 处理在大部分贮藏时期内提高了杏果实的 GSH 含量, 对维持杏果实抗氧化能力具有积极作用。在孟晓曼等[6] 的研究中, 使用 LVEF-真空协同保鲜处理白玉菇, 发现 GSH 含量呈逐渐下降趋势。这一发现与本研究中 LVEF 处理杏果实 GSH 含量的变化趋势存在差异, 推测可能与 LVEF 的处理强度、处理方式的结合以及果实品种差异有关。

2.3 低压静电场处理对杏果实抗氧化酶及多酚氧化酶活性的影响

2.3.1 低压静电场对杏果实抗氧化酶活性的影响

杏果实在采后贮藏过程中通过多种抗氧化酶如 APX、SOD、CAT、POD、SOD 等[20−21] 协同作用清除自由基, 这些酶共同构成了一个完整的抗氧化防御网络, 以减轻氧化应激对细胞的损伤。本研究发现, LVEF 处理可显著激活杏果实的抗氧化酶防御系统, 有效维持果实采后贮藏期间的氧化还原平衡。

在果实贮藏过程中, POD 不仅参与清除 ROS, 还起到阻止病原菌侵染的作用[22]。由图 7(a)可知, 在贮藏过程中, LVEF 处理的杏果实的 POD 活性在第 6 d 时显著高于 CK 组(P<0.05)。鲁梦情等[23] 研究发现 LVEF 处理可以有效提高油桃果实的 POD 活性。结合本研究中 POD 活性与接种发病率(图 3)的关系, 可以推断出 LVEF 处理通过激活 POD 防御系统, 不仅有效清除了过量的 ROS, 还增强了果实的抗病性, 从而维持其在贮藏期间的品质。

SOD 作为一种含有金属离子(Fe, Cu 及 Zn 等)辅基的抗氧化酶, 其活性的增强能够及时修复果实的受损细胞, 从而逆转由自由基引起的细胞损伤[5]。如图 7(b)所示, 在两个比较组中, SOD 活性总体上呈现出先升高后降低的趋势, 且两组的 SOD 活性均在第 4 d 达到最高值。LVEF 处理第 2 d 和第 4 d 显著高于 CK 组(P<0.05)。徐纯[24] 研究发现, LVEF 处理提高了草莓在贮藏期间 SOD 的活性。这些结果共同表明, LVEF 处理能够有效激活杏果实的抗氧化酶系统, 增强其对氧化应激的防御能力, 从而延缓采后衰老进程。

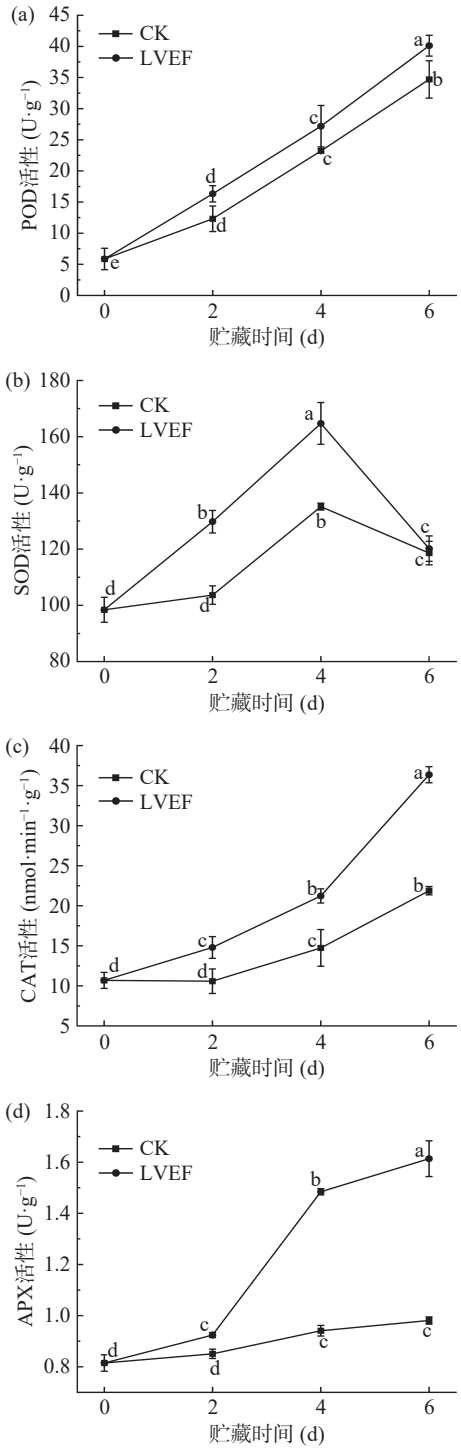


图 7 低压静电场处理对杏果实贮藏期间 POD(a)、SOD(b)、CAT(c)、APX(d)活性的影响

Fig.7 Effect of low voltage electrostatic field treatment on POD (a), SOD (b), CAT (c) and APX (d) activities of apricot fruits during storage

如图 7(c)所示, 在整个贮藏期间, LVEF 组杏果实的 CAT 活性始终显著高于 CK 组(P<0.05)。到贮藏末期第 6 d, CK 组杏果实的 CAT 活性为 21.88 nmol·min^{-1}·g^{-1}; 而 LVEF 组杏果实的 CAT 活性为 36.36 nmol·min^{-1}·g^{-1}, 较 CK 组升高了 66.07%。这一结果与牛培荣等[10] 研究的 LVEF 处理樱桃番茄在贮藏期间表现更高的 CAT 活性结果相一致。因此, LVEF 处理通过提高 CAT 活性, 增强了杏果实对

氧化胁迫的防御能力。

如图 7(d)所示，在整个贮藏期间，LVEF 组杏果实的 APX 活性始终显著高于 CK 组(P<0.05)。至贮藏末期第 6 d，CK 组杏果实的 APX 活性为 0.98 U·g^{-1}；而 LVEF 组杏果实的 APX 活性为 1.61 U·g^{-1}，较 CK 组升高了 64.29%。这一结果表明，LVEF 处理有效增强了杏果实贮藏期间的 APX 活性，进而可能提升了其抗氧化能力，有助于维持果实品质。

2.3.2　低压静电场对杏果实多酚氧化酶活性的影响

PPO 与植物组织褐变过程密切相关，其活性水平是采后果实褐变程度及褐变速率的直接决定因素[25]。如图 8 所示，PPO 活性在贮藏期间呈现先下降后上升的趋势。具体来看，在贮藏的第 4 d 和第 6 d，LVEF 组杏果实的 PPO 活性显著低于 CK 组(P<0.05)。值得注意的是，在贮藏的第 2 d，LVEF 处理组的杏果实 PPO 活性略高于 CK 组，造成这一现象的原因可能与杏品种特有的应激响应机制有关，具体分子机制有待进一步研究。

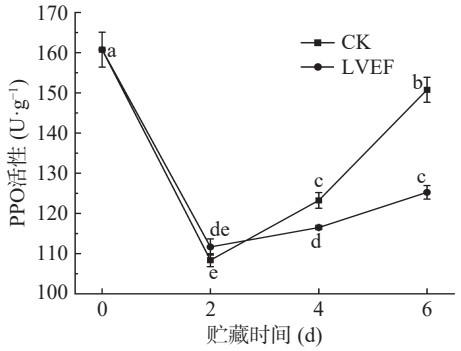


图 8　低压静电场处理对杏果实贮藏期间 PPO 活性的影响

Fig.8　Effect of low voltage electrostatic field treatment on PPO activity of apricot fruits during storage

2.4　低压静电场处理对杏果实抗病相关酶活性及物质含量的影响

2.4.1　低压静电场处理对苯丙氨酸解氨酶和几丁质酶活性的影响　PAL 是具有代表性的抗性相关酶，促进合成抗菌物质如酚类、植保素等，其参与宿主对各种胁迫的抗性[26]。由图 9(a)可知，在贮藏期间，CK 组杏果实的 PAL 活性呈先下降后上升的变化；LVEF 组杏果实的 PAL 活性则表现为先上升后下降的变化，且始终显著高于 CK 组(P<0.05)。贮藏末期第 6 d 时，CK 组杏果实的 PAL 活性达到 43.34 U·g^{-1}；而 LVEF 组杏果实的 PAL 活性为 45.88 U·g^{-1}，较 CK 组升高了 5.86%(P<0.05)。这一结果说明 LVEF 处理能够有效提高杏果实采后贮藏期间的 PAL 活性，进而增强其抗病能力。

当病原微生物侵染植物时，植物会产生相关的病程蛋白如 CHT 等[27]，可以使真菌细胞壁受到损坏，从而抑制真菌的生长与繁殖，增强植物的抗病能力[28]。如图 9(b)所示，在整个贮藏期间，CK 组杏果实 CHT 活性呈逐渐上升的趋势，LVEF 组杏果实 CHT

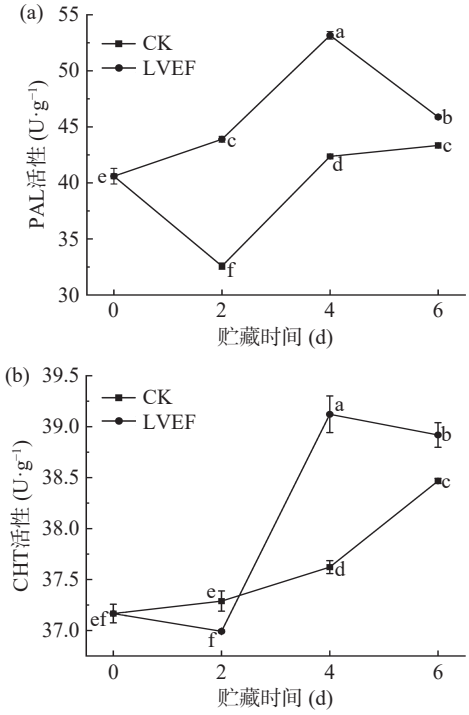


图 9　低压静电场处理对杏果实贮藏期间 PAL(a)和 CHT(b)活性的影响

Fig.9　Effect of low voltage electrostatic field treatment on PAL (a) and CHT (b) activities of apricot fruit during storage

活性呈波动式变化。贮藏第 6 d 时，CK 组杏果实的 CHT 活性为 38.47 U·g^{-1}；而 LVEF 组杏果实的 CHT 活性为 38.92 U·g^{-1}，较 CK 组显著升高了 1.17%(P<0.05)。这表明 LVEF 可以显著提高杏果实的 CHT 活性，增强其对黑斑病的抗病性。

2.4.2　低压静电场处理对总酚和类黄酮含量的影响

酚类物质自身具有抗病害能力，能抑制病原微生物的繁殖，而类黄酮作为重要的植保素，其含量直接体现了植物的抗病性[29]。如图 10(a)所示，在整个贮藏时期，LVEF 组和 CK 组杏果实的总酚含量都是逐渐升高的，且 LVEF 组杏果实的总酚含量始终高于 CK 组。到贮藏末期第 6 d 时，CK 组杏果实的总酚含量为 3.43($OD_{280\ nm}$)；而 LVEF 组杏果实的总酚含量为 3.49($OD_{280\ nm}$)，比 CK 组高了 1.75%。如图 10(b)所示，在贮藏过程中，LVEF 组杏果实的类黄酮含量呈现出先上升后下降的变化趋势，而 CK 组则表现为持续上升的趋势，尽管如此，LVEF 组的杏果实类黄酮含量始终高于 CK 组。在贮藏末期第 6 d 时，CK 组杏果实的类黄酮含量为 0.92($OD_{325}\cdot g^{-1}$)；而 LVEF 组杏果实的类黄酮含量为 0.96($OD_{325}\cdot g^{-1}$)，比 CK 组显著升高了 4.35%(P<0.05)。这一结果与张婷婷等[30]关于 LVEF 处理对采后马铃薯块茎愈伤效果的研究结果一致。即 LVEF 处理能够促使总酚、类黄酮的含量增加，从而加快伤口愈合的速度。同样，本研究中 LVEF 处理也促进了杏果实中总酚和类黄酮含量的增加，这可能有助于提高果实的抗氧化能力，延缓品质劣变。

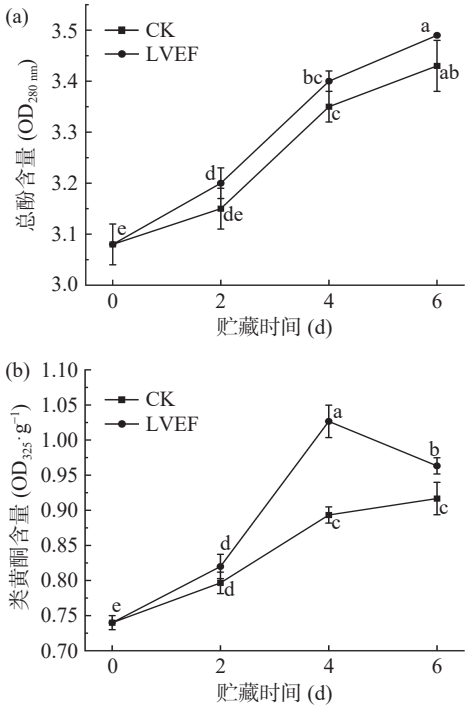


图 10 低压静电场处理对杏果实贮藏期间总酚含量(a)和类黄酮含量(b)的影响

Fig.10 Effect of low voltage electrostatic field treatment on total phenolic content (a) and flavonoid content (b) of apricot fruits during storage

3 讨论

低压电场处理能够降低微生物细胞表面的平整度,导致细胞生物膜丧失活性,进而抑制微生物的生长和繁殖[31]。Liu 等[13] 研究低压静电场与改良气调包装(MAP)结合处理可抑制双孢蘑菇贮藏期间的微生物生长。而在本研究中发现,LVEF 处理有效降低杏果实的接种发病率并抑制病斑直径的扩展。这些结果表明 LVEF 处理不仅能有效抑制病原菌的侵染过程,降低杏果实的接种发病率,同时还显著延缓病害发展进程。这些指标直接反映了果实对病原菌的抗性水平,从而表明 LVEF 处理在维持杏果实贮藏品质方面具有明显优势。

维持细胞内活性氧(ROS)稳态平衡对延缓采后果实衰老和品质劣变至关重要[32]。在外界胁迫下,植物通过代谢调节适应环境变化,其内源抗氧化系统可清除胁迫诱导的过量 ROS[33]。然而,当 ROS 积累超过清除能力时,会导致氧化损伤,破坏细胞膜完整性并削弱果实的抗逆性功能[34]。植物细胞中的抗氧化酶系统,包括 SOD、CAT、APX 及 POD 等,协同清除 ROS,其中,SOD 作为第一道防线,它能够催化杏果实细胞内有害的 O_2^-发生歧化反应,生成低毒性的 H_2O_2 和 O_2,而 CAT、POD 和 APX 可将果实内积累的 H_2O_2 分解为无毒性的 O_2 和 H_2O[35−36] 从而协同维持杏果实细胞内的氧化还原平衡。这一平衡增强了果实对病原菌胁迫的防御能力[37]。已有研究表明,在樱桃[38]、甜瓜[39]、葡萄[40] 中,较高的抗氧化酶活性与果实对链格孢菌的抵抗能力呈正相关。本研究发现在整个贮藏期间 LVEF 处理提高了杏果实 SOD、CAT、APX 及 POD 的活性,维持较低的 MDA 含量。这与前人在其他果实上的研究结果相一致,说明 LVEF 处理可能通过增强杏果实抗氧化酶系统的活性,提高其对 ROS 的清除能力,维持细胞氧化还原稳态,进而提升杏果实对链格孢菌的防御能力,延缓果实的衰老和品质劣变。此外,GSH 作为重要的非酶抗氧化物质,在采后果实的抗氧化防御系统中发挥着关键作用[41]。PPO 活性的升高是导致采后果实褐变和质量下降的重要因素[42]。本研究中 LVEF 处理提高了杏果实中的 GSH 含量,抑制了 PPO 酶的活性,有效维持了组织细胞内的氧化还原平衡,减轻杏果实的褐变程度。

PAL 是苯丙烷途径的初始通道酶,其活性的增加不仅促进了与抗病密切相关的黄酮、多酚等物质的积累,还通过促进细胞壁木质化来构建物理屏障,从而直接抑制病原菌的侵染和扩展[43]。CHT 作为重要的病程相关蛋白,在果实中发挥着直接抗病原菌的作用,它能够特异性降解真菌细胞壁中的几丁质成分,导致病原菌原生质膜破裂而死亡[27]。本研究中 LVEF 处理可以明显提高杏果实中总酚,类黄酮含量,提升 PAL 和 CHT 酶的活性,从而增强果实抗病性。

4 结论

本研究系统地探讨了 LVEF 保鲜技术在抑制杏果实黑斑病方面的效果,为采后杏果实的病害防治贡献了新的技术方法和理论支撑。结果表明,1500 V LVEF 处理可有效降低杏果实采后的接种发病率,延缓病斑扩展。在生理机制方面,LVEF 处理可以有效抑制活性氧(如 H_2O_2, O_2^-)含量的上升,维持较低的 MDA 含量,并且有效抑制 PPO 酶的活性。此外,LVEF 处理提高活性氧代谢相关酶(如 POD、SOD、CAT、APX)的活性和抗氧化物质(如 GSH)的含量,有助于维持果实的氧化还原平衡。在抗病方面,LVEF 处理通过激活杏果实中的苯丙烷代谢途径,显著增加了 PAL 的活性,上调 CHT 的活性,并促进了类黄酮和总酚含量的增加,从而有效提升了果实对链格孢菌的抵抗能力。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] GROPPI A, LIU S, CORNILLE A, et al. Population genomics of apricots unravels domestication history and adaptive events[J]. Nature Communications, 2021, 12: 3956.

[2] DECROOCQ S, CORNILLE A, TRICON D, et al. New insights into the history of domesticated and wild apricots and its contribution to Plum pox virus resistance[J]. Molecular Ecology, 2016, 25(19): 4712−4729.

[3] SU Congyan, ZHENG Xiaochun, ZHANG Dandan, et al. In-

vestigation of sugars, organic acids, phenolic compounds, antioxidant activity and the aroma fingerprint of small white apricots grown in Xinjiang[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(12): 4300−4311.
[4] 张亚琳, 王慧慧, 芦玉佳, 等. 外源褪黑素对杏果实采后黑斑病的调控作用[J]. 中国食品学报, 2024, 24(3): 201−209. [ZHANG Yalin, WANG Huihui, LU Yujia, et al. Regulation of postharvest black spot disease in apricot fruit by exogenous melatonin[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(3): 201−209.]
[5] XU Chun, ZHANG Xiaoying, LIANG Jin, 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.
[6] 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 Xiaoman, SUN Yanan, CHENG Ruyang, et al. Effect of low-voltage electrostatic field-assisted vacuum storage on postharvest quality and antioxidant metabolism of white *Hypsizygus marmoreus*[J]. Food Science, 2022, 43(23): 72−81.]
[7] 赵良, 岑剑伟, 李来好, 等. 高压静电场结合冰温气调保鲜技术对罗非鱼鱼片品质的影响[J]. 南方水产科学, 2016, 12(3): 91−97. [ZHAO Liang, CEN Jianwei, LI Laihao, et al. Effect of high voltage electrostatic field combined with modified atmosphere packaging technology on quality of tilapia fillets[J]. South China Fisheries Science, 2016, 12(3): 91−97.]
[8] 沐楠智, 谢超, 周卓颖, 等. 低压静电场对云南青梅采后贮藏品质及水分迁移特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(22): 70−78. [MU Nanzhi, XIE Chao, ZHOU Zhuoying, et al. Effect of low voltage electrostatic field on postharvest storage quality and moisture movement characteristics of Yunnan green plums (*Prunus mume*)[J]. Food Research and Development, 2024, 45(22): 70−78.]
[9] 何定芬, 谢超, 史恬恬, 等. 低压静电场处理对爱媛橙常温贮藏品质的影响[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2020, 39(6): 532−537. [HE Dingfen, XIE Chao, SHI Tiantian, et al. Effects of low voltage electrostatic field treatment on eyuan orange storage quality during normal temperature storage[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2020, 39(6): 532−537.]
[10] 牛培荣, 马存福, 魏晓博, 等. 低压静电场处理对樱桃番茄采后品质及线粒体氧化还原代谢的影响[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(6): 91−101. [NIU Peirong, MA Cunfu, WEI Xiaobo, et al. Effect of low-voltage electrostatic field treatment on postharvest quality and mitochondrial redox metabolism of cherry tomatoes[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(6): 91−101.]
[11] 李玲, 李智, 石玲, 等. 臭氧对杏果实黑斑病的抑制及贮藏保鲜作用[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 215−220. [LI Ling, LI Zhi, SHI Ling, et al. Inhibitory effect and mechanism of ozone on the black spot disease of apricot fruit[J]. Food Science, 2021, 42(5): 215−220.]
[12] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007. [CAO Jiankang, JIANG Weibo, ZHAO Yumei. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.]
[13] LIU Fengyi, XU Yaozong, ZENG Min, 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 & Emerging Technologies, 2023, 90: 103514.
[14] 王云香, 李文生, 常虹, 等. 高浓度 CO_2 处理对樱桃果实贮藏品质的影响[J]. 北方园艺, 2021(12): 101−110. [WANG Yunxiang, LI Wensheng, CHANG Hong, et al. Effects of high CO_2 treatment on sweet cherry fruit quality during storage[J]. Northern Horticulture, 2021(12): 101−110.]
[15] 吴玉婷, 谢超, 周卓颖, 等. 基于低压静电场协同低温对贵妃红桃保鲜效果的影响[J]. 食品工业, 2022, 43(11): 167−172. [WU Yuting, XIE Chao, ZHOU Zhuoying, et al. Effect of low voltage electrostatic field combined with low temperature on preservation of Guifei red peach[J]. The Food Industry, 2022, 43(11): 167−172.]
[16] XU Dongying, ZUO Jinhua, LI Peiyun, et al. Effect of methyl jasmonate on the quality of harvested broccoli after simulated transport[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126561.
[17] DING Xiaochun, MA Juan, LIU Shuang, et al. Acid electrolytic water treatment improves the quality of fresh-cut red pitaya fruit by regulating ROS metabolism and phenylpropanoid pathway [J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 207: 112636.
[18] 徐耀宗. 低压静电场辅助保鲜技术对双孢蘑菇保鲜效果的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024. [XU Yaozong. Study on the preservation effect of low voltage electrostatic field assisted technology on *Agaricus bisporus*[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.]
[19] 赵俊跃, 蔡净蓉, 徐成妍, 等. 柑橘精油及壳聚糖复合处理对橄榄果实采后生理和耐贮性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2023, 31(1): 53−61. [ZHAO Junyue, CAI Jingrong, XU Chengyan, et al. Effects of *Citrus* essential oil combined with chitosan treatment on post harvest physiology and storability of Chinese olive fruits[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2023, 31(1): 53−61.]
[20] LI Zilong, LI Bingru, LI Meiqi, et al. Hot air pretreatment alleviates browning of fresh-cut pitaya fruit by regulating phenylpropanoid pathway and ascorbate-glutathione cycle[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 190: 111954.
[21] CHENG Jinxiao, ZHANG Xudong, MIAO Ze, et al. Hot air treatment alleviates chilling injury of sweet potato tuberous roots by regulating osmoregulatory substances and inducing antioxidant defense system[J]. Food Chemistry, 2024, 459: 140393.
[22] 方宇鹏, 徐洪武, 姜法祥. 壳聚糖处理对节瓜室温贮藏品质及酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2024(12): 87−94. [FANG Yupeng, XU Hongwu, JIANG Faxiang. Effects of chitosan treatment on storage quality and enzyme activity of chieh-qua at room temperature[J]. Northern Horticulture, 2024(12): 87−94.]
[23] 鲁梦情, 王云香, 聂小宝, 等. 低压静电场对油桃保鲜效果的研究[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(1): 9−15. [LU Mengqing, WANG Yunxiang, NIE Xiaobao, et al. Study on preservation effects of nectarine by low voltage electrostatic field[J]. Storage and Process, 2025, 25(1): 9−15.]
[24] 徐纯. 低压静电场结合低温对草莓保鲜机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [XU Chun. Study on the fresh-keeping mechanism of strawberry by low voltage electrostatic field combined with low temperature[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
[25] KOU Xiaohong, WU Mengshi, LI Lei, et al. Effects of $CaCl_2$ dipping and pullulan coating on the development of brown spot on 'Huangguan' pears during cold storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 99: 63−72.
[26] SHAO Yuanzhi, ZENG Jiaoke, TANG Hong, et al. The chemical treatments combined with antagonistic yeast control anthracnose and maintain the quality of postharvest mango fruit[J].

Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(5): 1159−1169.
[27] 赵亚婷, 刘豆豆, 朱璇, 等. 采前壳寡糖处理对杏果实黑斑病的抗性诱导[J]. 西北植物学报, 2015, 35(7): 1409−1414. [ZHAO Yating, LIU Doudou, ZHU Xuan, et al. Resistance induction of preharvest chitosan oligosaccharide treatment to black spot in apricots fruits[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015, 35(7): 1409−1414.]
[28] 白羽嘉, 张培岭, 黄伟, 等. 链格孢菌侵染采后甜瓜果实组织几丁质酶和 β-1, 3-葡聚糖酶基因表达分析[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 185−191. [BAI Yujia, ZHANG Peiling, HUANG Wei, et al. Analysis of expression profiles of chitinase and β-1, 3-glucanase genes in muskmelon fruit tissue inoculated with *Alternaria alternata*[J]. Food Science, 2018, 39(2): 185−191.]
[29] AHUJA I, KISSEN R, BONES A M. Phytoalexins in defense against pathogens[J]. Trends in Plant Science, 2012, 17(2): 73−90.
[30] 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 Tingting, WANG Fengling, PENG Mengyun, 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.]
[31] 沐楠智, 谢超, 吴玉婷, 等. 基于低压静电场及高通量测序技术对中华管鞭虾(*Solenocera crassicornis*)保鲜过程中微生物群落影响分析[J]. 海洋与湖沼, 2024, 55(1): 193−201. [MU Nanzhi, XIE Chao, WU Yuting, et al. Analysis of bacterial composition and diversity in low voltage electrostatic field treated *Solenocera crassicornis* based on high throughput sequencing[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2024, 55(1): 193−201.]
[32] 雷婷婷, 殷诚, 孙陟岩, 等. 气态臭氧结合微孔气调包装对杨梅品质和抗氧化性能的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 112−119. [LEI Tingting, YIN Cheng, SUN Zhiyan, et al. Effect of ozone gas combined with perforated modified atmosphere packaging on quality and antioxidant capacity of Chinese bayberry[J]. Food Science, 2023, 44(13): 112−119.]
[33] PELÁEZ-VICO M Á, FICHMAN Y, ZANDALINAS S I, et al. ROS and redox regulation of cell-to-cell and systemic signaling in plants during stress[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2022, 193: 354−362.
[34] XU Hongyuan, LI Jingjing, WANG Lijun, et al. Integrated transcriptomic and metabolomics analysis reveals abscisic acid signal transduction and sugar metabolism pathways as defense responses to cold stress in *Argyranthemum frutescens*[J]. Environmental and Experimental Botany, 2023, 205: 105115.
[35] TRIPATHY B C, OELMÜLLER R. Reactive oxygen species generation and signaling in plants[J]. Plant Signaling & Behavior, 2012, 7(12): 1621−1633.
[36] 李秋雨, 曾凯芳, 姚世响. 活性氧在果实成熟和衰老中的作用及调控机制[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(17): 271−276. [LI Qiuyu, ZENG Kaifang, YAO Shixiang. Effect of reactive oxygen species on fruit ripening and senescence and the relevant mechanism[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(17): 271−276.]
[37] 魏婧, 徐畅, 李可欣, 等. 超氧化物歧化酶的研究进展与植物抗逆性[J]. 植物生理学报, 2020, 56(12): 2571−2584. [WEI Jing, XU Chang, LI Kexin, et al. Progress on superoxide dismutase and plant stress resistance[J]. Plant Physiology Communications, 2020, 56(12): 2571−2584.]
[38] PAN Liuyi, ZHOU Jing, SUN Yan, et al. Comparative transcriptome and metabolome analyses of cherry leaves spot disease caused by *Alternaria alternata*[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1129515.
[39] 刘阳, 张郑啸, 白羽嘉, 等. 链格孢菌侵染对甜瓜不同组织活性氧代谢的影响[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(6): 1397−1406. [LIU Yang, ZHANG Zhengxiao, BAI Yujia, et al. Effects of *Alternaria alternata* infection on active oxygen metabolism in different tissues of melon[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(6): 1397−1406.]
[40] 谢曼姝. 链格孢菌毒素 AME 对葡萄细胞自噬及抗氧化系统的影响[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2022. [XIE Manshu. Effects of *Alternaria* toxin AME on autophagy and antioxidant system of grape cells[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2022.]
[41] 杨乾, 范存斐, 王毅, 等. 水杨酸处理诱导采后甜瓜抗坏血酸-还原型谷胱甘肽循环代谢清除过氧化氢的作用及机制[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 243−249. [YANG Qian, FAN Cunfei, WANG Yi, et al. Role and underlying mechanism of the ascorbic acid-reduced glutathione cycle in scavenging hydrogen peroxide in postharvest melons induced by salicylic acid[J]. Food Science, 2021, 42(1): 243−249.]
[42] LI Li, ZHAO Chanjuan, ZHANG Yadong, et al. Effect of stable antimicrobial nano-silver packaging on inhibiting mildew and in storage of rice[J]. Food Chemistry, 2017, 215: 477−482.
[43] 常璐璐, 张乐乐, 于有伟, 等. 精氨酸处理对采后冬枣黑斑病的抗病作用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 321−326. [CHANG Lulu, ZHANG Lele, YU Youwei, et al. Effect of arginine treatment on disease resistance to *Alternaria* rot of postharvest winter jujube[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 321−326.]