

韩悦, 李晓冰, 周宏胜, 等. 微酸性电解水对桃果实采收后软腐病的防治效果[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(11): 2146-2156.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.11.008

## 微酸性电解水对桃果实采收后软腐病的防治效果

韩悦<sup>1,2,3</sup>, 李晓冰<sup>1,2,3</sup>, 周宏胜<sup>2,3</sup>, 张映瞳<sup>2,3</sup>, 胡花丽<sup>2,3</sup>, 罗淑芬<sup>2,3</sup>, 刘雪松<sup>2,3</sup>,  
刘欣页<sup>2,3</sup>, 赵淳<sup>4</sup>, 李鹏霞<sup>2,3</sup>, 凌军<sup>2,3</sup>

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 江苏 南京 210014; 3. 江苏省农业科学院/农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 江苏 南京 210014; 4. 东海县晶质农产品电商交易有限公司, 江苏 连云港 222300)

**摘要:** 桃果实皮薄、肉质软, 采后极易受到病原真菌侵染, 引发病害尤其是引发的软腐病严重影响其贮藏寿命和市场价值。为了明确微酸性电解水(SAEW)对桃果实采收后软腐病防治的最佳浓度及处理时间, 本研究通过分离、纯化并鉴定确定引起桃软腐病发生的病原菌为匍枝根霉(*Rhizopus stolonifer*) TF-1 菌株, 采用不同质量浓度的SAEW处理该病原菌菌株的孢子和菌丝并评估其抑制效果, 结果显示, 质量浓度 100 mg/L SAEW 处理 5 min 可有效降低菌株 TF-1 的孢子萌发率, 抑制菌丝生长, 并诱导菌丝细胞蛋白质和核酸外泄。碘化丙啶(PI)染色结果表明, 100 mg/L SAEW 处理 5 min 后 93.29% 的孢子细胞膜受损, 表明 SAEW 具有显著的杀菌作用。说明, SAEW 可有效抑制匍枝根霉的生长, 为桃果实采收后软腐病的防治提供了一种安全、经济且高效的杀菌剂。

**关键词:** 桃; 软腐病; 匍枝根霉; 微酸性电解水; 防治效果

**中图分类号:** S436.621.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)11-2146-11

## Efficacy of slightly acidic electrolyzed water in controlling postharvest soft rot pathogen of peach

HAN Yue<sup>1,2,3</sup>, LI Xiaobing<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Hongsheng<sup>2,3</sup>, ZHANG Yingtong<sup>2,3</sup>, HU Huali<sup>2,3</sup>,  
LUO Shufen<sup>2,3</sup>, LIU Xuesong<sup>2,3</sup>, LIU Xinye<sup>2,3</sup>, ZHAO Chun<sup>4</sup>, LI Pengxia<sup>2,3</sup>, LING Jun<sup>2,3</sup>

(1. Food Science College, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China; 2. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 4. Donghai County Jingzhi Agricultural Products E-commerce Trading Co., Ltd., Lianyungang 222300, China)

**Abstract:** Peach fruit, characterized by its thin skin and soft flesh, is highly susceptible to fungal infections after harvest. The resulting diseases, particularly soft rot, significantly reduce its storage life and market value. To identify the optimal concentration and treatment time of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) for controlling postharvest soft rot in peach fruit, the causal pathogen was isolated, purified, and identified as the strain *Rhizopus stolonifer* TF-1. Spores and mycelia of the pathogen were treated with SAEW at different mass concentrations, and

收稿日期: 2024-12-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2100601); 江苏省自然科学基金项目(BK20221434); 中央引导地方科技发展资金项目(BE2024014)

作者简介: 韩悦(1999-), 女, 辽宁抚顺人, 硕士研究生, 主要研究方向为果蔬采后保鲜。(E-mail) 1545293919@qq.com

通讯作者: 李鹏霞, (E-mail) guoshubaoxian@163.com; 凌军, (E-mail) robinlingjun@126.com

the inhibitory effects were assessed. The results showed that treatment with 100 mg/L SAEW for five minutes effectively reduced the spore germination rate of strain TF-1, inhibited mycelial growth, and induced the leakage of cellular proteins and nucleic acids. Propidium iodide (PI) staining revealed that 93.29% of spores exhibited compromised membrane integrity, demonstrating the significant bactericidal efficacy of SAEW. This study demonstrates that SAEW can effectively suppress the growth of *Rhizopus stolonifer*, highlighting its potential as a safe, cost-effective, and efficient fungicidal agent for managing postharvest soft rot in peach.

**Key words:** peach; soft rot; *Rhizopus stolonifer*; slightly acidic electrolyzed water; control efficacy

桃[*Prunus persica* (L.) Batsch.] 原产于中国,果实成熟后香气浓郁、果肉甘甜、营养丰富<sup>[1]</sup>。然而,桃果实采收后极易受到病原真菌侵染,尤其是软腐病病原菌侵染不仅会导致桃果实腐烂变质,还严重影响其货架期和经济价值<sup>[2]</sup>。有研究表明,水蜜桃采收后腐烂率最高达总产量的40%~60%<sup>[3]</sup>。因此,桃果实采收后控制软腐病至关重要。软腐病的主要病原菌为匍枝根霉(*Rhizopus stolonifer*)。作为一种强寄生型真菌,匍枝根霉具有生长迅速、繁殖力强等特点,能够通过空气传播的孢子迅速侵入桃果实,并在低温条件下依然保持较高的生长活性,极易导致桃果实腐烂变质<sup>[4-6]</sup>。

化学杀菌剂曾经广泛应用于控制果蔬采后病害,虽然效果显著,但因残留风险,存在食品安全隐患,逐渐被市场淘汰。前人研究发现,生物防治、精油处理、超声与热水处理等具有一定抑菌效果。胡春红<sup>[7]</sup>发现,光催化剂 CNTs/BiOI 复合体可显著抑制匍枝根霉,且效果随处理方式而异。刘晨霞等<sup>[8]</sup>的研究结果表明,酸性硫酸钙溶液可有效抑制水蜜桃采后因匍枝根霉侵染引起的软腐病。超声和热水联合处理均可抑制甘薯块根中匍枝根霉的菌丝生长和孢子萌发,能有效控制甘薯采收后贮藏期间软腐病的发生和发展<sup>[9]</sup>。百里香酚和肉桂醛组合处理可引起木瓜匍枝根霉细胞膜通透性增加,破坏细胞结构<sup>[10]</sup>。以上杀菌方式虽然具有一定的抑菌效果,但成本高、操作复杂,实际应用受限。因此,当前亟需开发一种安全高效、低成本的桃果实防腐方法<sup>[11]</sup>。

微酸性电解水(Slightly acidic electrolyzed water, SAEW)是一种通过电解稀盐酸或氯化钠溶液生成的安全高效杀菌剂,具有低腐蚀性、无残留风险等特点,已在鲜切果蔬、畜禽及水产等农产品保鲜中显示出优异的抑菌效果<sup>[12]</sup>。微酸性电解水能够通过破坏微生物细胞膜,影响胞内蛋白质与核酸功能,达到

抑菌杀菌目的<sup>[13]</sup>。黄丽萍等<sup>[14]</sup>的研究结果表明,20℃贮藏温度、有效氯质量浓度120 mg/L的微酸性电解水浸泡处理20 min对蓝莓果实杀菌效果好。何瑞法<sup>[15]</sup>的研究结果表明,有效氯质量浓度100 mg/L微酸性电解水处理对黄瓜白粉病和霜霉病的防效分别达到58.4%和59.4%。然而,目前关于微酸性电解水在桃果实软腐病防治中的应用尚无系统性研究。为此,本研究以采收后发生软腐病的桃果实作为研究对象,分离并鉴定出其主要的病原菌为匍枝根霉(*Rhizopus stolonifer*),探究微酸性电解水对桃软腐病的防治效果,为桃果实采后病害防治提供一种安全、经济的方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验所用桃果实选用金秋蜜品种,成熟度适中,果实大小均匀,横径长度和纵径长度介于70~85 mm,无机械损伤,无病虫害,购自江苏省南京市国银水果超市。马铃薯葡萄糖培养液(PDB):马铃薯200 g、葡萄糖20 g、水1 000 mL;马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)培养基购自青岛高科技工业园海博生物技术有限公司,用于真菌培养。2×Taq Master Mix(Dye Plus)试剂购自南京诺唯赞生物科技股份有限公司;碘化丙啶(PI)试剂购自北京酷来搏科技有限公司。试验所用仪器包括赐绿得 CLD-35L-Ⅲ次氯酸生成器(南京氯盾科技有限公司产品),梅特勒-托利多 Seven Multi 型 pH 计[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司产品],TC-96/G/H(b)B 基因扩增仪(杭州博日科技股份有限公司产品),Eppendorf 小型冷冻高速离心机(德国艾本德公司产品);HH-4 数显恒温水浴锅(常州万达升实验仪器有限公司产品),ZWY-2102C 智城恒温培养振荡器(上海智城分析仪器制造有限公司产品),SPX-25013-Z 生化培养箱(上海博迅实业有限公司医疗设备厂产品),JS-

680D 凝胶成像分析仪(上海培清科技有限公司产品),LCZ-880A 型超净工作台(北京亚泰科隆仪器技术有限公司产品),IMJ-54A 高压灭菌锅[施都凯仪器设备(上海)有限公司产品]。

## 1.2 试验方法

**病原菌分离纯化:**参照李佩琪等<sup>[16]</sup>的平板分离方法对病原菌进行分离纯化并略作修改。从发病桃果实病健交界处切取约 0.5 cm<sup>3</sup> 组织块,依次进行表面消毒,先用 75%乙醇浸泡 30 s,然后用 1%的 NaClO 处理 5 min,再用无菌水漂洗 3 次。消毒后的组织块置于无菌滤纸上吸干水分后接种于 PDA 培养基,28 °C 恒温培养至单一菌落出现,纯化后的病原菌菌株保存于 -80 °C 冰箱备用。

**致病性测定:**参考刘君盈等<sup>[17]</sup>采用的科赫氏法则对桃果实上分离得到的病原菌菌株进行致病性测定。选取成熟度和大小一致的健康桃果实,使用 75%乙醇对果实表面进行消毒。沿桃果实赤道处对称打孔(孔径 5 mm,深度约 3 mm),将直径 5 mm 的分离菌株菌饼(取自 PDA 培养基)接种于打孔处。接种后的桃果实置于温度为 25 °C、相对湿度为 95%的环境中,定时观察并记录发病情况。

**病原菌形态学鉴定:**参考魏景超《真菌鉴定手册》<sup>[18]</sup>将纯化后的单一菌落用 5 mm 无菌打孔器在菌落边缘取菌饼,然后将其置于新的 PDA 平板上,28 °C 条件下黑暗培养,定期观察并记录。对孢子形态、大小等进行显微镜下观察,并根据形态学特征进行鉴定。

**病原菌分子生物学鉴定:**采用 CTAB 法提取真菌基因组 DNA,并对其靶基因进行扩增。rDNA-ITS 区域引物为 ITS1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3') 和 ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3'); RPB2 基因引物为 RPB2-5F (5'-AGGATGTCG-CAAAATATTTG-3') 和 RPB2-7R (5'-TACTAGCA-CAAATACCAAGAATC-3'); GAPDH 基因引物为 GDF (5'-TTGAAGGGTGGTCCCAAGAAG-3') 和 GDR (5'-TCAGAGGCCTTCTTGATGG-3')。PCR 反应总体积为 30.0 μL,2×Taq Master Mix 15.0 μL,DMSO 1.5 μL,上游引物 1.0 μL,下游引物 1.0 μL,DNA 模板 1.0 μL,ddH<sub>2</sub>O 补至 30.0 μL。PCR 扩增程序:95 °C 预变性 3 min;95 °C 变性 15 s,55 °C 退火 15 s,72 °C 延伸 60 s,35 次循环,最后 72 °C 彻底延伸 5 min。用 1%琼脂糖凝胶电泳仪检测 PCR 产物,并

将 PCR 产物送至南京擎科生物科技有限公司进行测序。测序结果在 NCBI 网站上进行 BLAST 分析比对,利用 MEGA 11 软件以邻接法(NJ)构建系统发育树,bootstrap 值设为 1 000。

**SAEW 的制备与检测:**使用 0.1% NaCl 溶液作为电解液,以蒸馏水为原水,通过微酸性次氯酸水生成器制备 SAEW。制备后的 SAEW 使用 pH 计测定 pH 值,并采用碘量法测定有效氯浓度<sup>[19]</sup>。符合条件的 SAEW 用于后续试验。

**SAEW 对菌株 TF-1 孢子萌发及萌发管伸长的影响:**匍枝根霉 TF-1 菌株孢子悬液的制备参照蒋梦曦<sup>[20]</sup>的方法并略作改动,调整孢子悬液含量为 1 mL 1×10<sup>6</sup> 个<sup>[21]</sup>。经 SAEW 不同质量浓度(25 mg/L、50 mg/L、100 mg/L)分别处理 10 s、1 min、3 min、5 min 后,将处理后的孢子悬液重悬于 PDB 培养基中,置于 28 °C、180 r/min 的恒温振荡培养箱中培养,用光学显微镜观察孢子萌发情况,待孢子萌发后计算孢子萌发率并统计萌发管长度,以处理时间为 0 s 作为对照(CK)。SAEW 对菌株 TF-1 萌发管伸长的影响试验中,待 TF-1 孢子萌发管伸长至一定长度后,经 SAEW 不同质量浓度(50 mg/L、100 mg/L)分别处理不同时间(10 s、1 min、3 min、5 min、10 min)后于不同观测时间(10 h、24 h、48 h、120 h)测量其萌发管长度,以处理时间为 0 s 作为对照(CK)。萌发管伸长量使用 Image J 软件进行测量,孢子萌发率按照公式(1)计算:

$$\text{孢子萌发率} = \frac{\text{萌发孢子数}}{\text{孢子总数}} \times 100\% \quad (1)$$

**SAEW 对菌株 TF-1 菌丝生长的影响:**从 PDA 平板边缘用无菌打孔器取直径为 5 mm 的菌饼,将菌饼正面紧贴于 PDA 培养基中心,分别经不同质量浓度 SAEW(0 mg/L、25 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、200 mg/L)处理 5 min。用 100 mg/L SAEW 处理不同时间(1 min、3 min、5 min)。用十字交叉法测量菌落直径,每组 3 个平行取其平均值,设置 3 个生物学重复,计算抑菌率。培养条件:(28±1) °C 黑暗培养箱。

**SAEW 对桃果实软腐病的防治效果测定:**参考 Karim 等<sup>[22]</sup>的方法并略作改动,用直径 8 mm 的无菌打孔器在桃果实赤道部位对称打 2 个深度约 3 mm 的伤口,然后在每个伤口内加入 30 μL 的 SAEW,待 SAEW 干后,再接种 30 μL 含量为 1 mL 1×10<sup>5</sup> 个孢子的孢子悬液,接种处理 30 min 后放入

密封塑料盒中,置于温度 25 ℃,相对湿度 95% 的条件下培养 2 d,观察并记录结果,计算平均病斑直径和防治效果,防治效果用公式(2)计算。以 SAEW 质量浓度为 0 mg/L 且不接种 TF-1 孢子悬液作为对照(CK)。每个处理 8 个果实,设置 3 次生物学重复。

$$\text{防治效果} = \frac{\text{对照组病斑直径} - \text{处理组病斑直径}}{\text{对照组病斑直径}} \times 100\% \quad (2)$$

菌株 TF-1 菌丝细胞核酸、蛋白质泄漏量的测定:参考孟祥一<sup>[23]</sup>的方法,将经 SAEW 处理后的菌株 TF-1 菌丝离心得到上清液,使用微量分光光度计测量蛋白质含量及在 260 nm 处的吸光度。

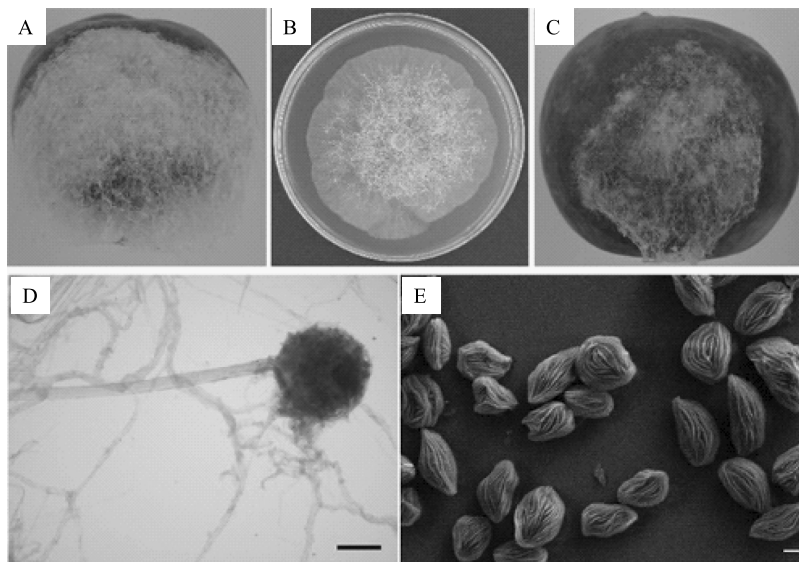
菌株 TF-1 孢子的 PI 染色观察:参考 Wang 等<sup>[24]</sup>的方法,用 100 mg/L 的 SAEW 处理菌株 TF-1 孢子 5 min 后充分洗涤,再经 5 mg/L 的 PI 室温黑暗染色 20 min,充分洗涤后通过激光共聚焦显微镜在

545 nm 波长下观察(激发光 545 nm,发射光 590 nm)。以 0 mg/L SAEW 作为对照(CK)。每个质量浓度随机 3 个视野,试验重复 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 病原菌致病性测定和形态学鉴定

病原菌致病性测定结果(图 1)显示,接种该病原菌的桃果实表现出与自然发病相同的软腐病症状,重新分离得到的菌株形态与原菌株形态一致,证实该病原菌为桃软腐病的主要致病菌。形态学鉴定结果显示,菌株 TF-1 在 PDA 培养基上生长迅速,菌落初期呈白色,中期形成球形的分生孢子囊,成熟时为黑色(图 1D)。对病原菌孢子进行扫描电镜观察,可见孢子呈橄榄形,表面有沟纹(图 1E)。结合《真菌鉴定手册》,初步将菌株鉴定为根霉属(*Rhizopus*),并命名为 TF-1。



A:发病桃果实;B:TF-1 菌株在 PDA 平板培养后形态;C:桃回接发病图;D:光学显微镜下菌株 TF-1 菌落形态,标尺为 100 μm;E:扫描电镜下菌株 TF-1 孢子形态,标尺为 2 μm。

图 1 桃软腐病病原菌鉴定

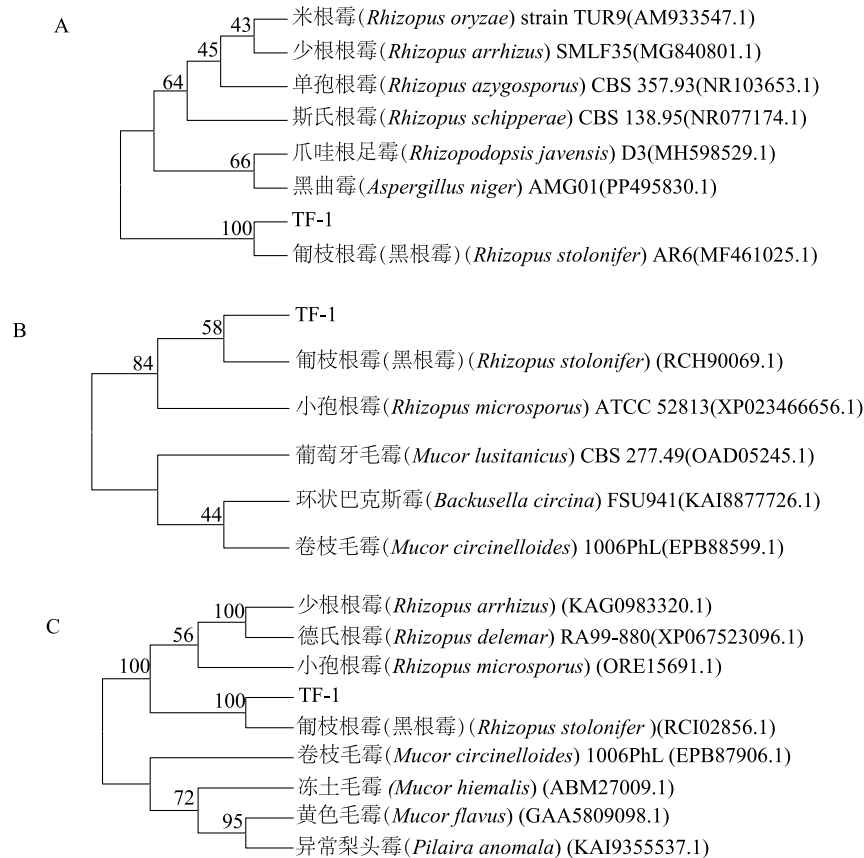
Fig.1 Identification of the pathogen causing peach soft rot

### 2.2 病原菌分子生物学鉴定

对菌株 TF-1 的 *ITS*、*GAPDH* 和 *RPB2* 基因序列进行 PCR 扩增,分别获得长约 850 bp、470 bp 和 1 000 bp 的片段,并进行 BLAST 比对。结果显示,*ITS* 序列与匍枝根霉(*Rhizopus stolonifer*)的相似度达到 99.64%,*GAPDH* 和 *RPB2* 序列分别与匍枝根

霉(*Rhizopus stolonifer*)的相似度达到 91.16% 和 100.00%。

系统发育树结果显示,菌株 TF-1 与 *Rhizopus stolonifer* 聚类于同一分支,高度同源,相似性达到 98.00%(图 2)。结合形态学和分子生物学结果,本研究确认菌株 TF-1 属于 *Rhizopus stolonifer*。



A: 基于 ITS 基因序列构建的系统发育树; B: 基于 GAPDH 基因序列构建的系统发育树; C: 基于 RPB2 基因序列构建的系统发育树。

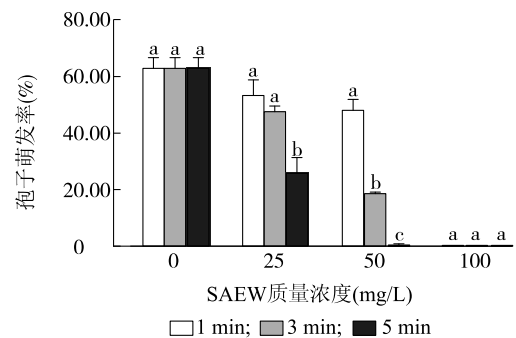
图 2 病原真菌 TF-1 菌株的系统发育进化树

Fig.2 Phylogenetic tree of pathogenic fungal strain TF-1

### 2.3 SAEW 对菌株 TF-1 孢子萌发及萌发管伸长的影响

SAEW 不同质量浓度及不同处理时间对菌株 TF-1 孢子萌发具有明显抑制作用(图 3)。从图 3 可见,应用 25 mg/L SAEW 处理 5 min 后培养 8 h 孢子萌发率降至 25.75%,而 50 mg/L SAEW 处理 5 min 后培养 8 h 孢子萌发率显著降低至 0.4%。100 mg/L SAEW 处理 1 min、3 min 和 5 min 后培养 8 h 孢子萌发率均为 0。随着 SAEW 质量浓度的增加和处理时间的延长,孢子萌发率显著降低,表明 SAEW 对孢子萌发的抑制效果呈现对质量浓度和时间的依赖性。应用 50 mg/L SAEW 分别处理 10 s、1 min、3 min 和 5 min 后培养 24 h 孢子萌发率均达 100.00%;应用 100 mg/L SAEW 处理 1 min 后培养 24 h 孢子萌发率降至 0.5%,处理 3 min 和 5 min 后培养 24 h 孢子萌发率为 0(表 1)。SAEW 对菌株 TF-1 孢子萌发管伸长的影响试验结果如表 2

所示,100 mg/L SAEW 处理 5 min 后培养 10 h、24 h、48 h、120 h 均可有效抑制萌发管伸长。



相同质量浓度 SAEW 图柱上不同小写字母表示不同处理时间间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。

图 3 微酸性电解水 (SAEW) 不同质量浓度和不同处理时间对菌株 TF-1 孢子萌发率的影响

Fig.3 Effects of different mass concentrations and treatment durations of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) on the spore germination rate of strain TF-1

表 1 微酸性电解水 (SAEW) 对 TF-1 孢子萌发的影响

Table 1 Effects of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) on spore germination of TF-1

SAEW 处理		处理后 8 h 的萌发率 (%)	处理后 24 h 的萌发率 (%)
质量浓度 (mg/L)	时间 (s)		
50	0	62.88±3.79	100.00
	10	44.08±0.02	100.00
	60	48.04±3.85	100.00
	180	18.57±0.52	100.00
	300	0.40±0.40	100.00
100	0	62.88±3.79	100.00
	10	1.81±1.81	2.78±0.70
	60	0	0.50±0.50
	180	0	0
	300	0	0

表中数据为平均值±标准差。

表 2 微酸性电解水 (SAEW) 对 TF-1 孢子萌发管伸长的影响

Table 2 Effects of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) on spore germination tube elongation in TF-1

SAEW 处理		芽管长度 (μm)				
质量浓度 (mg/L)	时间 (s)	处理后 8 h	处理后 10 h	处理后 24 h	处理后 48 h	处理后 120 h
50	0	94.60±4.46	192.34±10.60a	>1 000.00a	>1 000.00a	>1 000.00a
	10	94.60±4.46	137.45±6.37b	>1 000.00a	>1 000.00a	>1 000.00a
	60	94.60±4.46	131.82±6.44bc	>1 000.00a	>1 000.00a	>1 000.00a
	180	94.60±4.46	115.64±7.81bc	>1 000.00a	>1 000.00a	>1 000.00a
	300	94.60±4.46	114.81±5.73bc	199.55±26.21b	>1 000.00a	>1 000.00a
100	0	94.60±4.46	110.21±6.27c	150.36±15.03bc	>1 000.00a	>1 000.00a
	10	94.60±4.46	155.27±5.08a	>1 000.00a	>1 000.00a	>1 000.00a
	60	94.60±4.46	116.60±4.14b	>1 000.00a	>1 000.00a	>1 000.00a
	180	94.60±4.46	101.48±2.98bc	>1 000.00a	>1 000.00a	>1 000.00a
	300	94.60±4.46	99.56±4.25bc	127.01±4.17b	>1 000.00a	>1 000.00a
600	0	94.60±4.46	98.49±6.19c	98.54±7.21c	99.48±5.60b	99.50±7.28b
	10	94.60±4.46	94.66±4.66c	99.78±5.44c	94.41±5.78b	97.00±6.07b
	600	94.60±4.46	94.66±4.66c	99.78±5.44c	94.41±5.78b	97.00±6.07b

表中数据为平均值±标准差,同一质量浓度 SAEW 处理同列数据后不同小写字母表示处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。

### 2.4 SAEW 对菌株 TF-1 菌丝生长的影响

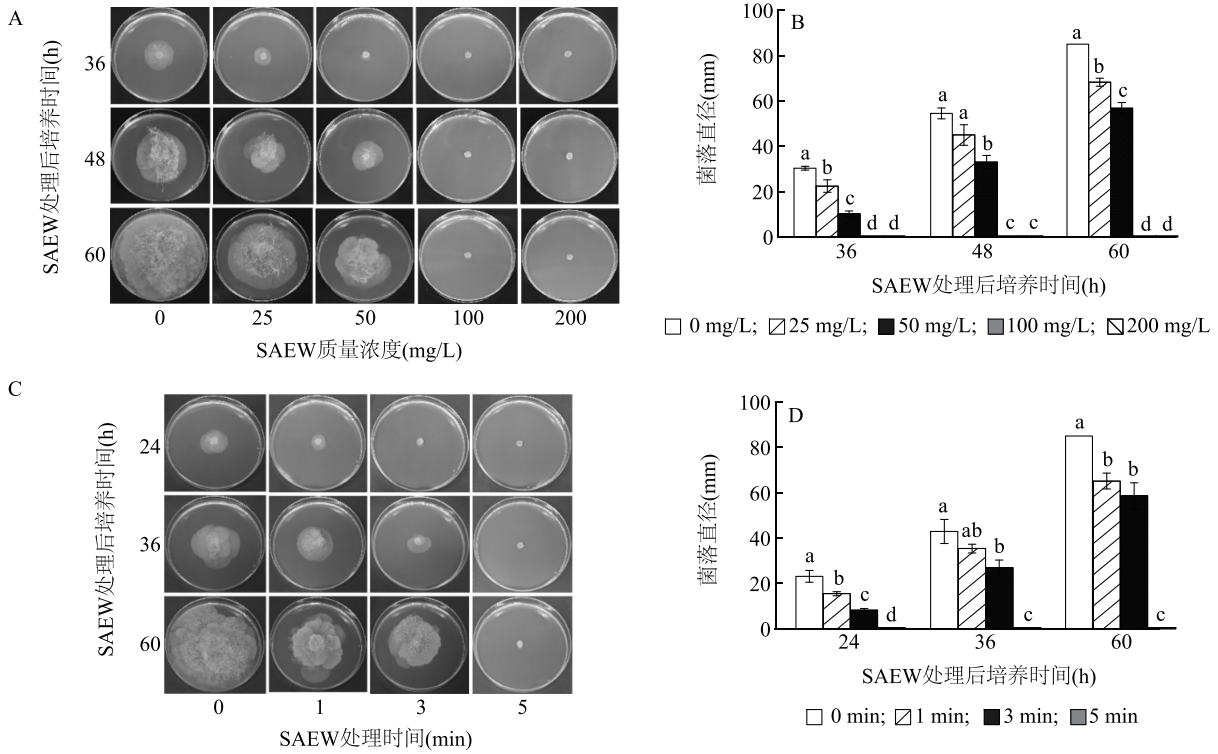
从图 4A 和图 4B 可见,SAEW 不同质量浓度处理对菌株 TF-1 菌丝生长具有显著抑制作用;SAEW 质量浓度为 0 时,处理后培养 60 h 平均菌落直径达到 85 mm;而 SAEW 质量浓度为 100 mg/L 处理 5 min 时,菌丝生长受到显著抑制 ( $P < 0.05$ ), 200 mg/L SAEW 处理 5 min 的抑菌效果与 100 mg/L 处理 5 min 的无显著差异,表明 SAEW 质量浓度为 100 mg/L 时已达到抑菌阈值。同时,SAEW 对菌丝的抑

制作用同样表现出浓度依赖性,且 5 min 处理时间足以发挥显著的抑菌效果。

### 2.5 SAEW 对桃果实软腐病的防治效果

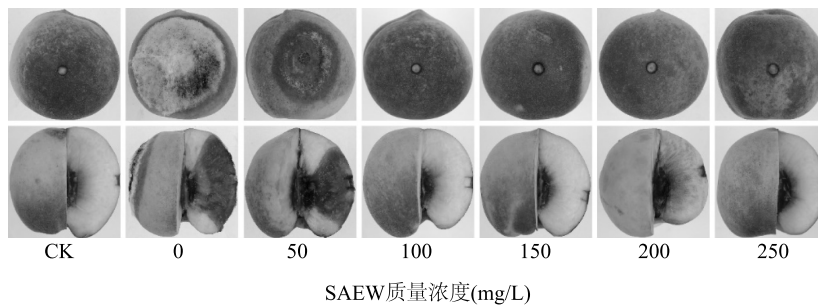
不同质量浓度 SAEW 对桃果实软腐病的防治效果见图 5 和表 3。接种菌株 TF-1 孢子悬液处理 2 d 后,未经 SAEW 处理的桃果实软腐病发病率为 100%,平均病斑直径为 70.00 mm。50 mg/L SAEW 处理后,病斑直径显著减小,防治效果为 18.94%。质量浓度  $\geq 100$  mg/L SAEW 处理后,桃果实未见病

斑形成,防治效果均达 100%。这表明 100 mg/L SAEW 可有效防治桃果实软腐病。



A: 菌株 TF-1 不同质量浓度 SAEW 处理 5 min 后培养 36 h, 48 h, 60 h 菌丝生长状态, B: 不同质量浓度 SAEW 处理 5 min 后不同培养时间菌落平均直径, C: 菌株 TF-1 应用 100 mg/L SAEW 处理 0 min, 1 min, 3 min, 5 min 后不同培养时间菌丝生长状态, D: 100 mg/L SAEW 不同处理时间后不同培养时间菌落平均直径。柱图上不同小写字母表示相同处理时间不同浓度间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 4 微酸性电解水 (SAEW) 对菌株 TF-1 的平板抑菌试验结果  
Fig.4 Plate inhibition test of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) against strain TF-1



CK: 对照 (SAEW 质量浓度为 0 mg/L 且不接种 TF-1 孢子悬液)。

图 5 不同质量浓度微酸性电解水 (SAEW) 对桃果实菌株 TF-1 感染引起的软腐病的防治效果

Fig.5 Control efficacy of different mass concentrations of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) against soft rot caused by strain TF-1 infection in peach fruit

在桃果实伤口处进行不同质量浓度 SAEW 处理并接种菌株 TF-1 孢子悬液 2 d 后的防治效果见图 6 和表 4。接种菌株 TF-1 孢子悬液处理 2 d 后, 应用 100 mg/L SAEW 处理后 0 s 桃果实发病率为 100%, 处理后 10 s 防治效果达到 92.59% (表 4); 处

理后 1 min 桃果实尽管表面未见发病, 但剖面图显示果实内部已有轻微发病 (图 6)。

### 2.6 SAEW 处理后菌株 TF-1 菌丝细胞核酸、蛋白质的泄漏量

从图 7A 和图 7C 可见, 随着 SAEW 质量浓度的

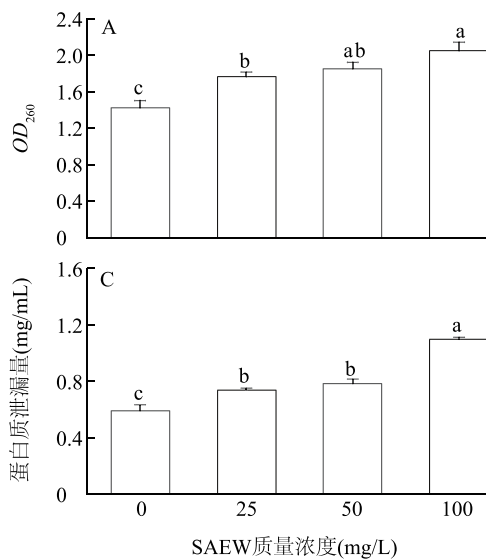
增加菌株 TF-1 菌丝细胞核酸和蛋白质泄漏量呈上升趋势,100 mg/L SAEW 处理菌丝细胞核酸泄漏量显著高于 SAEW 质量浓度为 0 mg/L 和 25 mg/L。100 mg/L SAEW 处理菌丝细胞蛋白质泄漏量显著高于其他处理。从图 7B 和图 7D 可见,100 mg/L SAEW 处理 5 min,菌株 TF-1 菌丝细胞核酸泄漏量与蛋白质泄漏量分别达到最高值,与未用 SAEW 处理的对照(CK)相比差异达极显著水平( $P<0.01$ )。综上,SAEW 通过破坏菌丝细胞膜完整性,导致胞内物质外泄,抑制菌株活性。

表 3 不同质量浓度微酸性电解水(SAEW)处理后桃果实软腐病的平均发病率

Table 3 Average incidence of soft rot in peach fruit after treatment with different concentrations of slightly acidic electrolyzed water (SAEW)

质量浓度 (mg/L)	平均病斑直径 (mm)	平均发病率 (%)	防治效果 (%)
0	70.00±2.16a	100	0
50	56.74±9.56b	100	18.94
100	0±0c	0	100.00
150	0±0c	0	100.00
200	0±0c	0	100.00
250	0±0c	0	100.00

表中数据为平均值±标准差,同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

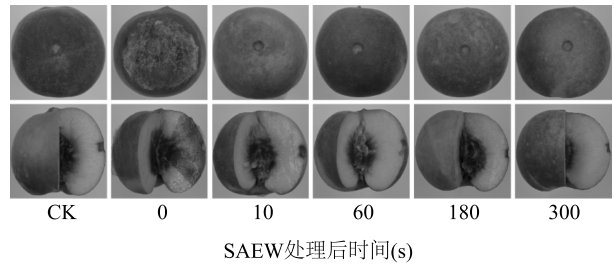


□ 对照; ■ 处理

A, C: 不同质量浓度 SAEW 处理 5 min 后核酸、蛋白质泄漏量,图柱上不同小写字母表示处理间差异达显著水平( $P<0.05$ ); B, D: 100 mg/L SAEW 处理 1 min, 3 min 和 5 min 后核酸、蛋白质泄漏量,图柱上 \* 表示同一处理时间与对照相比差异达显著水平( $P<0.05$ ), \*\* 表示同一处理时间与对照相比差异达极显著水平( $P<0.01$ )。对照:SAEW 质量浓度为 0 mg/L;处理:SAEW 质量浓度为 100 mg/L。

图 7 微酸性电解水(SAEW)处理后菌株 TF-1 菌丝细胞核酸、蛋白质泄漏量

Fig.7 Leakage of nucleic acids and proteins from mycelial cells of strain TF-1 treated with slightly acidic electrolyzed water (SAEW)



CK:对照(SAEW 处理质量浓度为 0 mg/L 且不接种 TF-1 孢子悬液)。图 6 100 mg/L 微酸性电解水(SAEW)处理后不同时间对菌株 TF-1 引起的桃果实软腐病的防治效果

Fig.6 Control efficacy of 100 mg/L slightly acidic electrolyzed water (SAEW) against TF-1-induced peach soft rot at different times

表 4 100 mg/L 微酸性电解水(SAEW)处理不同时间桃果实软腐病的平均发病率

Table 4 The average incidence of peach soft rot after treatment with 100 mg/L slightly acidic electrolyzed water (SAEW) at different times

SAEW 处理后时间(s)	平均病斑直径 (mm)	平均发病率 (%)	防治效果 (%)
0	61.12±1.01a	100.0	0
10	4.53±4.53b	12.5	92.59
60	0c	0	100.00
180	0c	0	100.00
300	0c	0	100.00

表中数据为平均值±标准差,同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

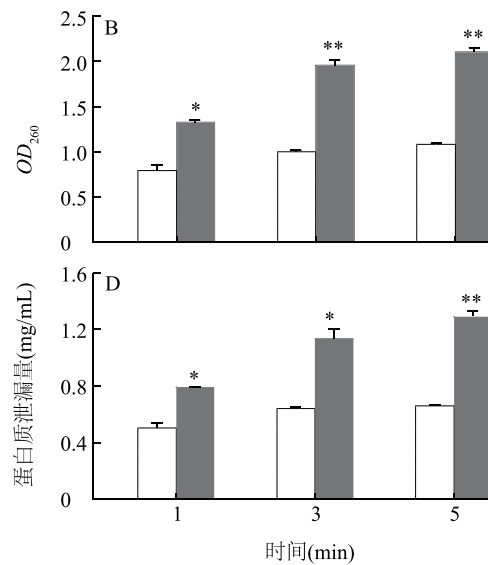
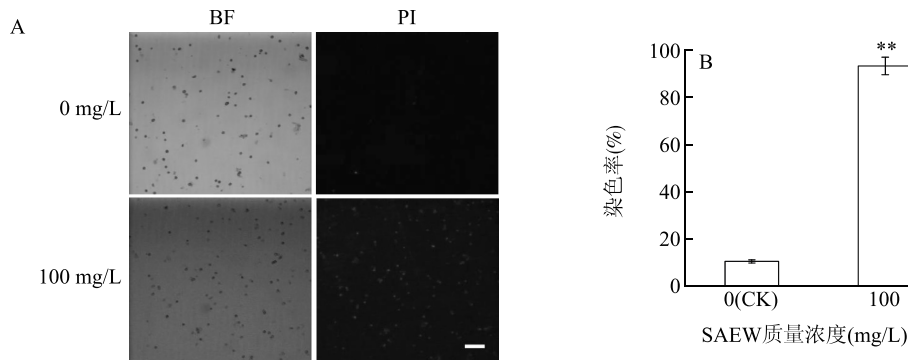


Fig.7 Leakage of nucleic acids and proteins from mycelial cells of strain TF-1 treated with slightly acidic electrolyzed water (SAEW)

## 2.7 菌株 TF-1 孢子的 PI 染色观察

本研究用 PI 对菌株 TF-1 孢子进行染色(图 8),从图 8A 可见,菌株 TF-1 孢子在 0 mg/L SAEW、明场(BF)下可见孢子分布,PI 通道下几乎无红色荧光,说明此时大部分孢子细胞膜完整,为活细胞。100 mg/L SAEW 处理的菌株 TF-1 孢子,PI 通道下出现大量红色荧光,表明该处理条件下很多孢子细

胞膜受损,细胞死亡。从图 8B 可见,未经 SAEW 处理的菌株 TF-1 孢子染色率为 10.47%,而 100 mg/L SAEW 处理 5 min 后孢子染色率显著提高至 93.29%,表明 SAEW 导致孢子细胞膜通透性显著增加。综上,PI 染色率的增加说明菌株 TF-1 孢子细胞膜受损,细胞内容物泄漏,显示 SAEW 对菌株 TF-1 孢子具有强抑制作用。



A: 菌株 TF-1 孢子的 PI 染色结果(标尺为 80  $\mu\text{m}$ ), B: 100 mg/L SAEW 处理前后菌株 TF-1 孢子的染色率。图柱上 \*\* 表示与对照相比差异达极显著水平( $P < 0.01$ )。

图 8 菌株 TF-1 孢子的碘化丙啶(PI)染色

Fig.8 Propidium iodide (PI) staining of TF-1 spores

## 3 讨论

本研究从病原菌株的分离与鉴定入手,明确了匍枝根霉(*Rhizopus stolonifer*)是导致桃果实发生软腐病的主要病原菌,该结论与 Wang 等<sup>[25]</sup>、邹曼等<sup>[26]</sup>、Li 等<sup>[9]</sup>关于匍枝根霉会导致桃果实发生软腐病的报道结果一致。与传统化学杀菌剂相比,SAEW 具有低毒、无残留和成本低廉等优点,在水果、蔬菜病害防治中具有明显优势<sup>[12]</sup>。刘晨霞等<sup>[8]</sup>的研究结果显示,酸性硫酸钙溶液对水蜜桃采后病害有一定抑制作用,与本研究中 100 mg/L SAEW 的处理相比效果稍差。肉桂精油能通过破坏匍枝根霉细胞膜造成细胞内容物渗出,使用浓度为 0.8 mL/L 的肉桂精油熏蒸可以有效减轻桃果实软腐病发生,但并不能完全抑制该病<sup>[27]</sup>。此外,生防菌如贝莱斯芽孢杆菌 KT 菌悬液能提高果实抗氧化和抗病能力,通过营养和空间竞争以及分泌抑菌活性物质直接抑制匍枝根霉,但不适用于果实的长时间处理和运输<sup>[28]</sup>。据报道,300 W 超声波(US)结合 50 mg/L SAEW 处理在 55  $^{\circ}\text{C}$  下可完全抑制匍枝根霉的孢子萌发,但 SAEW 对匍枝根霉孢子萌发管伸长的影响

尚未有研究<sup>[29]</sup>。隋心意<sup>[30]</sup>通过 PDA 表面萌发法探究 SAEW 对灰霉菌(*Botrytis cinerea*)和茄葡柄霉(*Stemphylium solani*)真菌孢子萌发的影响,结果显示 SAEW 对这两种真菌孢子的萌发都有明显抑制作用,喷洒 100 mg/L SAEW 对两种真菌孢子的萌发抑制率分别为 34.97% 和 46.18%,但是可能 SAEW 处理浓度较低,仅表现为暂时抑制作用与推迟萌发时间;SAEW 对灰霉菌和茄葡柄霉菌丝生长有抑制效果,与本研究结果相符。Gao 等<sup>[31]</sup>研究发现,SAEW 可以在 7 d 内对鲜切苹果表面的微生物起到良好的抑制效果。Xuan 等<sup>[32]</sup>的研究结果表明,细菌细胞膜会因 SAEW 有效氯成分以及高氧化还原电位产生损伤,导致胞内物质泄漏。Liu 等<sup>[33]</sup>的研究结果表明,经 SAEW 处理后腐败希瓦氏菌(*Shewanella putrefaciens*)和腐生葡萄球菌(*Staphylococcus saprophytic*)的胞外蛋白质及 DNA 含量显著增加。蓝蔚青等<sup>[34]</sup>研究发现,超声波和 SAEW 联合处理,腐败希瓦氏菌(*Shewanella putrefaciens*)菌体细胞膜通透性改变,PI 染料更容易进入细胞内部。本研究通过不同质量浓度的 SAEW 处理发现,100 mg/L SAEW 可完全抑制匍枝根霉孢子萌发、菌丝生长及

桃果实病斑形成,并显著破坏病原菌的细胞膜完整性,表现出优异的杀菌效果。

SAEW 作为安全有效的新型抑菌剂能够有效抑制微生物活性,且成本较为低廉,其作用机理成为研究热点。林婷婷等<sup>[35]</sup>通过对产气荚膜梭菌芽孢的杀灭效果及作用机制的研究发现,SEAW 可通过破坏芽孢的内膜结构及外层结构达到杀灭效果。解琳<sup>[36]</sup>研究发现,SAEW 能够通过改变菌株的细胞膜状态、细胞壁结构、氧化酶活性以及基因表达量产生消杀作用。本研究进一步通过 PI 染色试验验证了 SAEW 对匍枝根霉孢子细胞膜的破坏作用,100 mg/L SAEW 处理 5 min 后的染色率显著提高至 93.29%,表明细胞膜通透性显著增加。

## 4 结论

经鉴定从患软腐病的桃果实中分离出的菌株 TF-1 属于匍枝根霉 (*Rhizopus stolonifer*)。SAEW 对该菌株孢子及菌丝的抑制作用呈现浓度依赖性,100 mg/L SAEW 处理 1 min、3 min、5 min 均可完全抑制菌株 TF-1 的孢子萌发,处理 5 min 可有效抑制其萌发管伸长。100 mg/L SAEW 处理 5 min 菌株 TF-1 菌丝生长完全受到抑制,且 100 mg/L SAEW 处理 5 min 后该菌株菌丝细胞核酸泄漏量与蛋白质泄漏量与对照相比差异达极显著水平,孢子 PI 染色率显著提高。这些结果表明,SAEW 可破坏菌体细胞膜完整性,导致胞内物质外泄,从而发挥高效杀菌作用。在病害防治应用层面,100 mg/L SAEW 处理 5 min,可有效防治因匍枝根霉引发的桃果实软腐病。作为一种绿色环保的杀菌剂,有望为食品安全领域提供更安全、经济且无化学残留的解决方案,为果蔬采后病害防控开辟新路径。

### 参考文献:

- [1] 程辰,纪艳青,孙杰,等. 桃果实采收后响应果生链核盘菌侵染的分子机制[J]. 食品研究与开发,2024,45(19):30-36,105.
- [2] 李家荟,潘斌,纪兆林. 五种药剂防治桃软腐病效果试验[J]. 南方农业,2024,18(5):101-103,110.
- [3] 蔡傅红. 油菜素内酯对草莓和水蜜桃采后病害防治效果及机理研究[D]. 淮安:淮阴工学院,2021.
- [4] 陈晨. 肉桂醛对甘薯软腐病的抑制机制[D]. 杭州:浙江农林大学,2024.
- [5] 王晓钊,黄明明,王玉宁,等. 1-辛烯-3-醇防治采后桃果实软腐病的作用[J]. 微生物学报,2022,62(12):4878-4893.
- [6] LIU Q Q, CHEN Q M, LIU H, et al. *Rhizopus stolonifer* and related control strategies in postharvest fruit: a review [J]. *Heliyon*, 2024,10(8):29522.
- [7] 胡春红. 光催化剂 CNTs/BiOI 复合材料处理对匍枝根霉生长的影响[J]. 周口师范学院学报,2020,37(2):96-99.
- [8] 刘晨霞,乔勇进,黄宇斐,等. 酸性硫酸钙处理对水蜜桃采后匍枝根霉致病力的影响[J]. 核农学报,2019,33(7):1377-1385.
- [9] LI L L, ZHANG M, SUN H N, et al. Contribution of ultrasound and conventional hot water to the inactivation of *Rhizopus stolonifer* in sweet potato [J]. *LWT*, 2021,148:111797.
- [10] PHYO H M, JU J, AL-MAQTARI Q A, et al. Evaluation of the synergistic antifungal effects of thymol and cinnamaldehyde combination and its mechanism of action against *Rhizopus stolonifer* in vitro and in vivo [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2023,49:102658.
- [11] LI Y F, ZUO X X, JI N N, et al. PpMYB1 and PpNPR1 interact to enhance the resistance of peach fruit to *Rhizopus stolonifer* infection [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2023,198:107682.
- [12] 高晴,刘培红,冉苒,等. 微酸性电解水-超声波并行联合处理对鲜切生菜表面大肠杆菌杀菌效果的影响[J]. 食品科学,2024,45(11):210-216.
- [13] 薛婧琳,刘慧,甘慧萍,等. 微酸性电解水在食品杀菌保鲜中的应用分析[J]. 现代食品,2024,30(2):63-66.
- [14] 黄丽萍,靳学远,李勇,等. 微酸性电解水对蓝莓保鲜效果的影响[J]. 食品与机械,2022,38(10):134-138.
- [15] 何瑞法. 微酸性电解水防治黄瓜靶斑病及应用技术[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [16] 李佩琪,江山,戴群,等. 猕猴桃和青菜病原真菌的分离、鉴定及生物学特性[J]. 食品工业科技,2022,43(19):146-153.
- [17] 刘君盈,孙新康,崔钟池,等. 深州蜜桃果实腐烂病原菌鉴定及拮抗菌株的筛选[J]. 河北农业大学学报,2023,46(6):40-45,65.
- [18] 魏景超. 真菌鉴定手册[M]. 上海:上海科学技术出版社,1979.
- [19] 唐志龙,ALERYANI H,高晴,等. 微酸性电解水凝胶对天麻鲜切片贮藏品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报,2022,13(8):2625-2632.
- [20] 蒋梦曦. Iturin A 对匍枝根霉的抑菌机理及其应用于樱桃番茄的研究[D]. 南京:南京农业大学,2021.
- [21] 刘婷婷,付旭娟,黄梅,等. 榆黄蘑木霉病原菌分离鉴定及植物源抑菌剂筛选[J]. 南方农业学报,2024,55(12):3603-3614.
- [22] KARIM M M, USMAN H M, QIN T, et al. Fungicide resistance in *Colletotrichum fructicola* and *Colletotrichum siamense* causing peach anthracnose in China [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2024,203:106006.
- [23] 孟祥一. 阿魏酸对禾谷镰孢菌的抑制及对呕吐毒素毒性的干预作用[D]. 无锡:江南大学,2023.
- [24] WANG Y, LIU X Y, CHEN T, et al. Antifungal effects of hinokitiol on development of *Botrytis cinerea* in vitro and in vivo [J].

- Postharvest Biology and Technology, 2020, 159: 111038.
- [25] WANG X L, ZHU J F, WEI H, et al. Biological control efficacy of *Bacillus licheniformis* HG03 against soft rot disease of postharvest peach[J]. Food Control, 2023, 145: 109402.
- [26] 邹曼, 陈雨诗, 包汶婷, 等. 贝莱斯芽孢杆菌对桃采后软腐病的防治及对果实诱导抗性的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(10): 141-147.
- [27] ZHAO Z C, YU M X, WEI Y Y, et al. Cinnamon essential oil causes cell membrane rupture and oxidative damage of *Rhizopus stolonifer* to control soft rot of peaches[J]. Food Control, 2025, 170: 111039.
- [28] 张倩, 陈雨诗, 许春艳, 等. 贝莱斯芽孢杆菌防治甜樱桃采后软腐病的效果和机理[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 229-239.
- [29] LI L L, MU T H, ZHANG M. Contribution of ultrasound and slightly acid electrolytic water combination on inactivating *Rhizopus stolonifer* in sweet potato[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 73: 105528.
- [30] 隋心意. 微酸性电解水对番茄灰霉病和灰叶斑病防治作用的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [31] GAO Q, YANG Z, BI B, et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water on the quality of fresh-cut apple[J]. Foods, 2023, 12(1): 39.
- [32] XUAN X T, ZHANG Z Y, SHANG H T, et al. Microbial diversity and antibacterial mechanism of slightly acidic electrolyzed water against *Pseudomonas fluorescens* in razor clam during storage[J]. Food Research International, 2025, 204: 115929.
- [33] LIU L, LAN W Q, WANG Y B, et al. Antibacterial activity and mechanism of slightly acidic electrolyzed water against *Shewanella putrefaciens* and *Staphylococcus saprophyticus*[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2022, 592: 44-50.
- [34] 蓝蔚青, 赵欣宇, 周大鹏, 等. 超声-微酸性电解水联合处理对腐败希瓦氏菌的作用机制[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 87-92.
- [35] 林婷婷, 孙芝兰, 刘芳, 等. 微酸性电解水对产气荚膜梭菌芽孢的杀灭效果及作用机制[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(8): 1755-1761.
- [36] 解琳. 微酸性电解水对常见耐药细菌消杀性能及机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.

(责任编辑: 黄克玲)