



李晓冰,韩悦,周宏胜,等. 微酸性电解水对梨果生炭疽菌的杀菌机制和防控效果研究[J]. 南京农业大学学报,2026,49(3):513-521.

Li X B, Han Y, Zhou H S, et al. Antifungal mechanism and control effect of slightly acidic electrolyzed water on *Colletotrichum fructicola* causing pear anthracnose[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2026, 49(3): 513-521.

微酸性电解水对梨果生炭疽菌的杀菌机制和防控效果研究

李晓冰^{1,2,3}, 韩悦^{1,2,3}, 周宏胜^{1,2}, 张映瞳^{1,2}, 胡花丽^{1,2},
罗淑芬^{1,2}, 刘雪松^{1,2}, 刘欣页^{1,2}, 李鹏霞^{1,2*}, 凌军^{1,2*}

(1.江苏省农业科学院农业设施与装备研究所,江苏 南京 210014;2.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;3.沈阳农业大学食品学院,辽宁 沈阳 110866)

摘要:[目的]本研究旨在鉴定梨炭疽病的主要致病菌,并探讨微酸性电解水(slightly acidic electrolyzed water, SAEW)对果生炭疽菌抑制机制及其对梨果实采后炭疽病的防控效果。[方法]采用组织分离法、形态学及分子生物学方法鉴定梨炭疽病病原菌,在此基础上,采用不同浓度的 SAEW 处理菌丝和孢子,进一步探讨其杀菌作用机制。[结果]通过形态学和分子生物学鉴定明确了导致梨果病害的致病菌为果生炭疽菌(*Colletotrichum fructicola* TJ-21)。SAEW 对果生炭疽菌具有显著抑制作用,且其抑制效果与有效氯浓度呈正相关。150 mg·L⁻¹ SAEW 处理 5 min 可完全抑制菌丝生长,200 mg·L⁻¹ SAEW 处理 5 min 显著降低孢子萌发率,破坏细胞膜通透性,导致细胞内容物外泄。此外,SAEW 对梨炭疽病的防控效果显著,200 mg·L⁻¹ SAEW 处理 5 min 能显著抑制病斑扩展。[结论]果生炭疽菌是引发梨炭疽病的主要致病菌之一。SAEW 作为一种新型绿色杀菌剂,通过延缓果生炭疽菌的生长、提高细胞膜通透性并破坏细胞膜,发挥其杀菌作用。

关键词:梨;梨炭疽病;果生炭疽菌;微酸性电解水;杀菌机制;防控效果

中图分类号:S477.9

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2026)03-0513-09

Antifungal mechanism and control effect of slightly acidic electrolyzed water on *Colletotrichum fructicola* causing pear anthracnose

LI Xiaobing^{1,2,3}, HAN Yue^{1,2,3}, ZHOU Hongsheng^{1,2}, ZHANG Yingtong^{1,2}, HU Huali^{1,2},
LUO Shufen^{1,2}, LIU Xuesong^{1,2}, LIU Xinye^{1,2}, LI Pengxia^{1,2*}, LING Jun^{1,2*}

(1. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;

2. Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. College of Food Science,

Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: [Objectives] This study aimed to identify the main pathogen of pear anthracnose and explore the inhibitory mechanism of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) on *Colletotrichum fructicola* and its control effect on postharvest pear fruit anthracnose. [Methods] Tissue isolation, morphology and molecular biology methods were used to identify the pathogenic bacteria of pear anthracnose. Based on this, the mycelium and spores were treated with SAEW at different concentrations to further investigate its antifungal mechanism. [Results] Through morphology and molecular biology, the main pathogen of pear anthracnose was identified as *C. fructicola* TJ-21. SAEW exhibited significant inhibitory effects on *C. fructicola* TJ-21, with its efficacy positively correlated with the effective chlorine concentration. The treatment with 150 mg·L⁻¹ SAEW for 5 min completely inhibited mycelial growth, while the treatment with 200 mg·L⁻¹ SAEW for 5 min significantly reduced spore germination rate, disrupted the cell membrane permeability, and caused leakage of cell contents. Furthermore, SAEW showed significant control effects on pear anthracnose, with 200 mg·L⁻¹ SAEW treatment for 5 min significantly inhibiting the expansion of disease lesions. [Conclusions] *C. fructicola* was one of the major pathogens causing pear anthracnose. SAEW, as a novel green fungicide, exerted its antimicrobial effect by inhibiting the growth of *C. fructicola*, increasing cell membrane permeability, and disrupting the cell membrane.

Keywords: pear; pear anthracnose; *Colletotrichum fructicola*; slightly acidic electrolyzed water; antifungal mechanism; control effect

收稿日期:2025-01-26

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)

*通信作者:李鹏霞,研究员,博导,研究方向为食品采后贮藏保鲜,E-mail:guoshubaoxian@163.com;凌军,助理研究员,研究方向为食品采后贮藏保鲜,E-mail:robinlingjun@126.com。

‘库尔勒香梨’属于蔷薇科(Rosaceae)梨属(*Pyrus*),属于新疆梨,具有皮薄肉脆、味甜汁多、营养丰富等特点,深受消费者喜爱,已成为中国重要的出口水果之一^[1-2]。梨炭疽病是影响梨果实品质的常见病害,主要表现为果实表面出现圆形或不规则的病斑,病斑轮纹状或凹陷^[3],严重影响了梨果实的商品价值。近年来,梨炭疽病在我国南方地区发生较为严重,给当地梨产业带来了严重经济损失^[4]。

果生炭疽菌(*Colletotrichum fructicola*)是梨炭疽病的主要致病菌之一,属于半知菌亚门腔孢纲黑盘孢目刺盘孢属(*Colletotrichum*),是胶孢刺盘孢物种复合体(*Colletotrichum gloeosporioides* species complex)成员之一^[5]。2019年,果生炭疽菌被确认为我国梨产区引发炭疽病的优势病原菌,其菌落为白色放射状,气生菌丝与分生孢子密集^[6]。该病菌能够根据环境变化调整生存策略,既能在死亡植物组织上以死体营养的方式生存,也可以在叶片中以内生菌的方式存活^[7]。虽然化学防治因其高效、快速和操作简便而广泛应用于果蔬采后病害控制,但其使用过程中可能产生药物残留对环境产生负面影响以及促使病菌产生抗药性等^[8-9]。虽然生物防治和精油处理等方法有一定的效果,但这些方法在成本和操作上的要求较高,限制了它们的普及^[10-12]。因此,开发一种高效、低成本、对环境友好且易于操作的病害防控方法尤为迫切。

微酸性电解水(slightly acidic electrolyzed water, SAEW)是一种新型的绿色杀菌剂,是通过电解氯化钠、稀盐酸或其混合溶液产生的氧化还原反应而生成的溶液^[13]。SAEW的主要成分为次氯酸(HClO),其pH值、氧化还原电位(ORP)和有效氯浓度(ACC)协同作用,破坏病原菌的细胞膜完整性,抑制病原菌的生长^[14]。已有研究表明,SAEW对多种食源性病原菌(如大肠杆菌、李斯特菌、肠炎沙门氏菌、金黄色葡萄球菌)具有显著的抑制作用^[15]。孙丽娜^[16]研究发现,SAEW联合紫外线(UV)可显著抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌,其作用机制是通过破坏细菌细胞膜和电子呼吸链,导致细胞内活性氧(ROS)升高或三磷酸腺苷(ATP)减少,从而抑制细菌活性。还有研究表明,SAEW对肠炎沙门氏菌具有显著抑制作用,能够破坏细菌细胞膜,导致细胞形态发生变化并最终导致细胞死亡^[17]。

然而,关于SAEW在果实采后病害防控中的应用研究相对较少,特别是针对梨炭疽病的研究尚未见报道。因此,本试验研究不同浓度SAEW对果生炭疽菌的抑制效果及其抑菌机制,并进一步探讨SAEW在梨果实采后炭疽病防控中的应用,为SAEW在梨采后病害防控中的实际应用提供理论依据,并为果实采后贮藏和病害防控提供新的技术方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试梨果实品种为‘库尔勒香梨’,购自江苏省南京市孝陵卫街道国银水果超市。PDA培养基(马铃薯200 g、葡萄糖20 g、琼脂15 g、水1 000 mL,pH值自然)和PDB培养基(不含有琼脂的PDA培养基)购自青岛高科技工业园海博生物技术有限公司,用于真菌的增菌培养。2×Hieff® PCR Master Mix(With Dye)购自翌圣生物科技(上海)股份有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 病原菌分离与纯化 采用李艺阳等^[18]的方法并稍作修改。采用组织分离法分离梨果病原菌,从发病梨果实中选取病斑部位,在病健交界处取几块3 mm×3 mm的植物组织,进行表面消毒。消毒过程:75%乙醇完全浸泡10 s,无菌水清洗1次,随后在NaClO(有效氯浓度为2%)中浸泡2 min,无菌水清洗3次,以清除表面残留的NaClO。处理后的组织置于灭菌的厨房用纸上除去水分,接种于PDA固体培养基,28℃恒温倒置培养。

1.2.2 致病性测定 采用唐景美等^[19]的方法,以‘库尔勒香梨’为宿主测定病原菌的致病性。将分离纯化后的菌株接种在PDA培养基中,28℃恒温倒置培养6~9 d,使其充分地产生分生孢子,随后用无菌水轻柔冲洗,配合涂布棒缓慢刮取,制成浓度为 1×10^4 mL⁻¹的分生孢子液。选择外观一致的健康‘库尔勒香梨’果实,用无菌水清洗2次,晾干;在梨果实赤道处用灭菌5 mm打孔器打孔,将提前制备好的分生孢子液接种于打孔处并置于25℃条件下保湿培养,2 d后定时观察并记录致病力,选择致病力最强的1株作为代表性菌株进行鉴定并用于后续试验。

1.2.3 病原菌鉴定 采用陈佩君等^[20]的方法,将纯化菌株用5 mm灭菌打孔器打取菌饼,接种至新的PDA培养基,于28℃恒温培养箱黑暗倒置培养5 d,定时观察其菌落形态、颜色、生长速度等表面特征并观测其分生孢子和产孢结构。选取培养5 d的菌株,用灭菌牙签轻挑菌丝,采用ES酶法提取菌株的DNA,

对提取的病原菌基因组 DNA 进行扩增,引物采用 ITS-4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3')、ITS-5 (5'-GGAAGTAAAGTCGTAACAAGG-3')、GD-F (5'-GCCGTCAACGACCCCTTCATTGA-3')、GD-R (5'-GGGTGG-AGTCGTACTTGAGCATGT-3')、CYLH13-F (5'-AGGTCCACTGGTGGCAAG-3') 和 CYLH13-R (5'-AGCTGGAT-GTCCTTGGACTG-3')。PCR 反应总体积为 30 μL ,包括 2 $\times$ *Taq* Master Mix 15 μL ,DMSO 1.5 μL ,上、下游引物各 1 μL ,DNA 模板 1 μL ,ddH₂O 补足至 30 μL 。PCR 程序:95 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 3 min;95 $^{\circ}\text{C}$ 变性 15 s,55 $^{\circ}\text{C}$ 退火 15 s,72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 60 s,35 次循环;最后 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 5 min。于 10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 琼脂凝胶电泳仪检测 PCR 产物,并将 PCR 产物送南京擎科生物科技公司进行测序。测序结果在 NCBI 网站上进行 BLAST 分析比对,利用 MEGA 11 软件以邻接法构建系统发育树。

1.2.4 SAEW 的制备与检测 使用 1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液作为电解辅液,以蒸馏水为原水,通过 CLD-35L-III 次氯酸生成器制备 SAEW。制备后的 SAEW 使用 pH 计测定 pH 值 (pH5.0~6.5),并采用碘量法测定有效氯浓度 (ACC, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),制成符合试验条件的 SAEW,备用。

1.2.5 SAEW 对菌株 TJ-21 萌发的影响 果生炭疽菌的孢子悬液根据蒋朝阳等^[21]的方法进行制备,用血球计数板计算孢子悬液浓度并调整浓度为 $1\times 10^4\text{ mL}^{-1}$,在相同条件下用不同浓度 SAEW 进行处理。吸取 10 μL 处理好的孢子悬液重悬于 PDB 培养基中,28 $^{\circ}\text{C}$ 、180 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 恒温振荡培养箱中分别培养 3、6、9 h 并用光学显微镜观察孢子萌发情况,以芽管的产生和长出菌丝为依据,观察各处理的孢子萌发情况,重复观察 3 组每组 50 个分生孢子,计算不同浓度 SAEW 对于果生炭疽菌的抑制率。分生孢子萌发率计算公式:孢子萌发率=萌发孢子数/孢子总数 $\times 100\%$ 。

1.2.6 SAEW 对菌株 TJ-21 菌丝生长的影响 采用 Li 等^[22]的方法并稍作修改。采用菌丝生长抑制法测定 SAEW 对果生炭疽菌的杀菌效果,将 TJ-21 孢子悬液接种 PDB 培养基中,并调整最终的孢子浓度为 $1\times 10^6\text{ mL}^{-1}$;取 10 μL 上述孢子悬浮液,分别接种含有 100、150、200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SAEW 的 PAD 平板,于 28 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱中倒置黑暗培养。定期观察菌落生长状态,采用十字交叉法测量菌落直径。试验重复 3 次,取平均值,计算杀菌率。

1.2.7 SAEW 处理菌株 TJ-21 的核酸和蛋白质泄漏量测定 采用毕海瑶^[23]的方法并稍作修改。将浓度为 $1\times 10^4\text{ mL}^{-1}$ 的 TJ-21 孢子悬液接种 PDB 培养基,28 $^{\circ}\text{C}$ 、180 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 恒温振荡培养 48 h,收集菌丝后用无菌水冲洗并离心 3 次,以除去菌丝上残留的 PDB 培养基;称取 1 g 菌丝体于 5 mL 离心管,用不同浓度 SAEW 处理 5 min 后离心得上清液;以无菌水相同步骤处理得上清液为对照组。使用微量分光光度计测定蛋白质含量及在 260 nm 处的吸光值。

1.2.8 菌株 TJ-21 孢子的 PI 染色观察 采用 Goudjal 等^[24]的方法并稍作修改。用 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SAEW 处理 TJ-21 孢子 5 min 后充分洗涤,再经 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 碘化丙啶 (PI) 室温黑暗染色 20 min,充分洗涤后采用激光共聚焦显微镜在 545 nm 波长下 (激发光 545 nm,发射光 590 nm) 进行观察。每个浓度随机 3 个视野,试验重复 3 次。

1.2.9 SAEW 对梨炭疽病的防治效果测定 采用高宇凡^[25]的方法并稍作修改。将果实用无菌水清洗 2 次后晾干,用 5 mm $\times$ 5 mm 无菌打孔器在果实赤道处对称打取 2 个深度约为 3 mm 的伤口。接种 30 μL 分别由 0、100、150、200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SAEW 处理 5 min 后的 $1\times 10^4\text{ mL}^{-1}$ 孢子悬液,放入保鲜盒,密封,25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养,相对湿度调整为 95%,每隔 48 h 采用十字交叉法测量果实病斑直径,并拍照记录数据。以不接种孢子悬液为对照 (CK),每个处理 8 个果实,试验重复 3 次。计算平均病斑直径 (mm) 和防治效果。防治效果=(对照组病斑直径-处理组病斑直径)/对照组病斑直径 $\times 100\%$ 。

2 结果与分析

2.1 病原菌形态学特征

采用组织分离法从感染炭疽病的梨果实中分离并纯化病原菌株。将分离的菌株接种无病害的梨果实,以验证其致病性。接种后培养 5 d,接种部位出现了典型的褐色病斑,病斑表现出与原始炭疽病果实一致的症状 (图 1),证实该菌株为梨炭疽病的致病菌,命名为 TJ-21。形态学观察显示,TJ-21 菌株的菌落呈白色、近圆形并放射状生长,气生菌丝密集,菌落边缘菌丝较为稀薄。培养 7 d 后,菌落上产生了分生孢子,分生孢子为无色、无隔膜、单细胞,形状为长椭圆形且两端钝圆。根据上述形态学特征,初步确定该菌株为炭疽菌属 (*Colletotrichum*)。

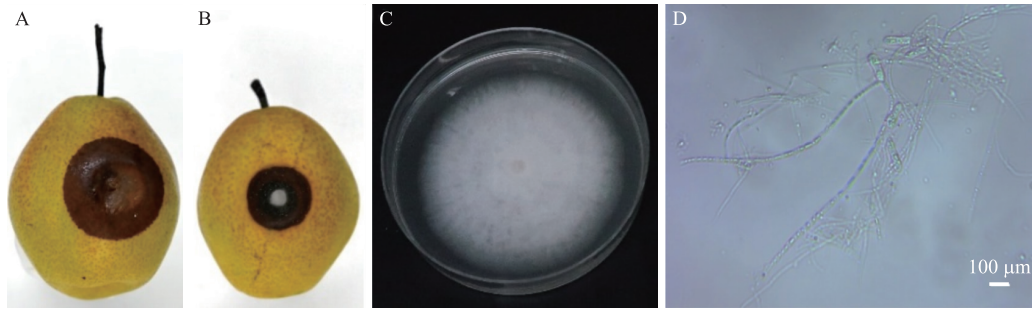


图 1 梨炭疽病原菌鉴定

Fig. 1 Identification of pathogen of pear anthracnose

A. 梨炭疽病图 Pear anthracnose map; B. 梨回接发病图 Pathogenesis map of pear tieback; C. TJ-21 在 PDA 平板的形态 TJ-21 in the form of PDA tablets; D. 光学显微镜下 TJ-21 菌丝形态 Mycelium morphology of TJ-21 under optical microscope.

2.2 病原菌分子生物学鉴定

以病原菌菌株的基因组为模板,使用真菌通用引物 ITS-4、ITS-5、GD-F、GD-R、CYLH13-F 和 CYLH13-R PCR 扩增 *ITS*、*GAPDH* 和 *HIS3* 基因片段,分别获得 700、255 和 375 bp 的扩增片段,并将其与 NCBI 数据库中的序列进行 BLAST 比对。结果表明,与果生炭疽菌(*Colletotrichum fruticola*)的对应序列同源性最高,其中 *ITS* 序列的相似度为 99%,*GAPDH* 序列的相似度为 96%,*HIS3* 序列的相似度为 97%。

进一步的系统发育树(图 2)分析表明,TJ-21 菌株与 *C. fruticola* 聚类于同一分支,两者之间的相似性达到 99%。结合形态学和分子生物学的鉴定方法,明确所分离的病原菌 TJ-21 菌株为果生炭疽菌。

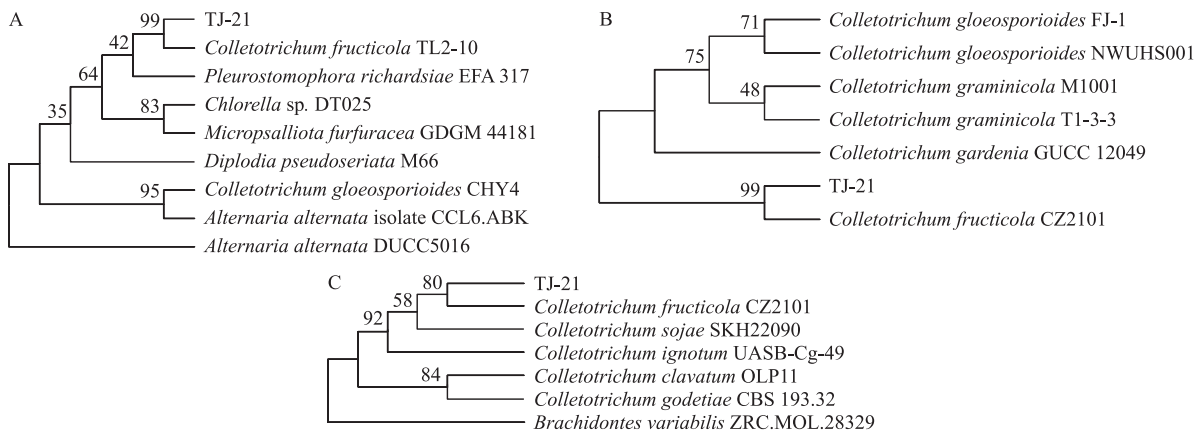


图 2 病原真菌的系统发育进化树

Fig. 2 Phylogenetic tree of pathogenic fungi

A. 基于 *ITS* 序列构建的系统发育树 Phylogenetic tree based on *ITS* sequence; B. 基于 *GAPDH* 序列构建的系统发育树 Phylogenetic tree based on *GAPDH* sequence; C. 基于 *HIS3* 序列构建的系统发育树 Phylogenetic tree based on *HIS3* sequence.

进化树采用邻接法(neighbor-joining, NJ)构建,bootstrap 值设为 1 000,分支上数值为遗传距离,反映氨基酸序列的替换频率。Phylogenetic tree is constructed using the neighbor-joining(NJ) method with 1 000 bootstrap replicates. The values on the branches represent genetic distances, which reflects the substitution frequency of amino acid sequences.

2.3 微酸性电解水(SAEW)对 TJ-21 菌丝生长的影响

如图 3 所示,SAEW 显著抑制了 TJ-21 菌丝的生长($P < 0.05$),且其抑制效果随着 SAEW 有效氯浓度的增加而逐渐增强。培养 7 d 后,对照组的菌丝几乎覆盖了整个 PDA 平板,菌落直径为 (80.08 ± 0.73) mm。50、100 和 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SAEW 处理组的菌落直径分别为对照组的 93.9%、89.5% 和 85.3%。而 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SAEW 处理完全抑制了菌丝的生长。

2.4 SAEW 对菌株 TJ-21 孢子萌发的影响

如图 4 所示,SAEW 对 TJ-21 孢子萌发的抑制效果与有效氯浓度呈正相关。试验结果显示,在相同条件下培养 9 h 后,对照组的孢子萌发率达到 100%,而 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SAEW 处理组的孢子萌发率为 0%。随着 SAEW 浓度的增加,孢子萌发率显著下降。这表明 SAEW 通过抑制孢子的萌发,降低了病原菌的活性。

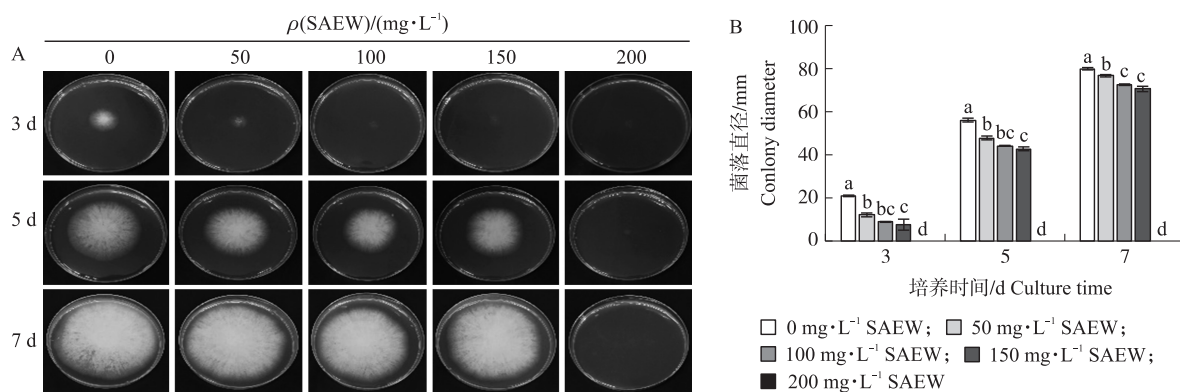


图3 微酸性电解水(SAEW)处理对 TJ-21 的平板抑菌试验

Fig. 3 Slightly acid electrolyzed water(SAEW) treatment of TJ-21 on plate antifungal experiments

A.不同浓度 SAEW 对 TJ-21 平板生长的抑制作用 Inhibitory effect of different concentrations of SAEW on the plate growth of TJ-21; B. TJ-21 在含有不同浓度 SAEW 的 PDA 平板上的菌落直径 Colony diameter of TJ-21 on PDA plates containing different concentrations of SAEW.

平板抑菌试验是将 10 μ L 孢子悬浮液(孢子浓度: 1×10^6 mL⁻¹)接种含有不同浓度 SAEW 的 PDA 平板。For the plate antibacterial experiment, 10 μ L of spore suspension (spore concentration: 1×10^6 mL⁻¹) is inoculated onto PDA plates supplemented with different concentrations of SAEW.

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same as follows.

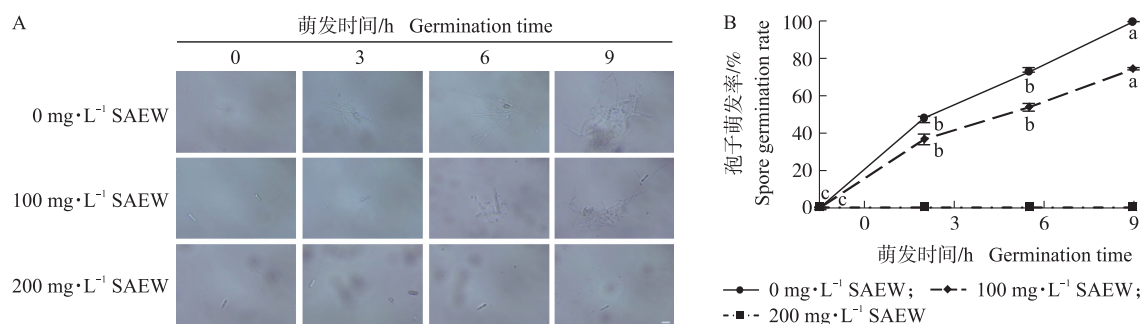


图4 不同浓度 SAEW 处理 5 min TJ-21 的孢子萌发率

Fig. 4 Spore germination rate of TJ-21 treated with different concentrations of SAEW for 5 min

A.TJ-21 孢子萌发图(标尺为 100 μ m) Spore germination diagram of TJ-21 (Bar = 100 μ m); B.TJ-21 孢子萌发率 TJ-21 spore germination rate.

2.5 SAEW 处理对菌株 TJ-21 核酸和蛋白质泄漏量的影响

如图 5 所示,不同浓度的 SAEW 对 TJ-21 核酸和蛋白质泄漏量有不同程度的影响。在相同处理时间下,随着 SAEW 有效氯浓度的增加,核酸和蛋白质的泄漏量呈增加趋势。与对照组相比,200 mg·L⁻¹ SAEW 处理后,菌株的核酸泄漏量是对照组的 5.14 倍,蛋白质泄漏量为对照组的 3.28 倍。这表明 SAEW 对果生炭疽菌具有抑制作用,能够引起细胞内物质的泄漏。

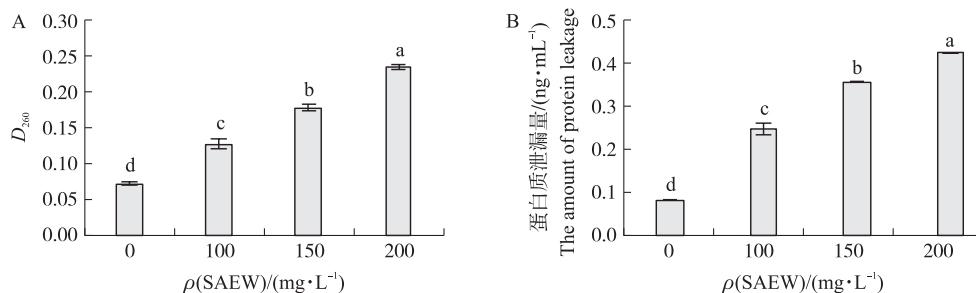


图5 TJ-21 的核酸和蛋白质泄漏量

Fig. 5 Nucleic acid and protein leakage of TJ-21

A.不同浓度的 SAEW 处理 5 min 后的核酸泄漏量 The amount of nucleic acid leakage after treatment with SAEW of different concentrations for 5 min; B. 不同浓度的 SAEW 处理 5 min 后的蛋白质泄漏量 The amount of protein leakage after treatment with SAEW of different concentrations for 5 min.

2.6 菌株 TJ-21 孢子的 PI 染色观察

如图 6 所示,对照组的孢子仅有个别细胞膜出现微弱的红色荧光,而 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SAEW 处理组的孢子大部分表现出明显的红色荧光,染色率相较于对照组增加了 92.3%。这表明 SAEW 严重破坏了其孢子的细胞膜。

2.7 SAEW 对梨炭疽病的控制效果

如图 7 所示,SAEW 对梨炭疽病的扩展具有明显的抑制效果,且随着 SAEW 有效氯浓度的增加,抑制效果逐渐增强。接种 3 d 时, $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SAEW 处理组梨果实开始发病,病斑直径为 $(8.175\pm0.312)\text{ mm}$,且发病率达到 100%,其他处理组未见发病。接种 7 d 时, $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SAEW 处理组开始发病,但病斑直径仅为对照组的 35.9%。接种 13 d 时, $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SAEW 处理组的梨果实出现部分菌丝,而在 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SAEW 处理组中,梨果实始终未见菌丝或病斑形成,防治效果达到 100%(表 1)。

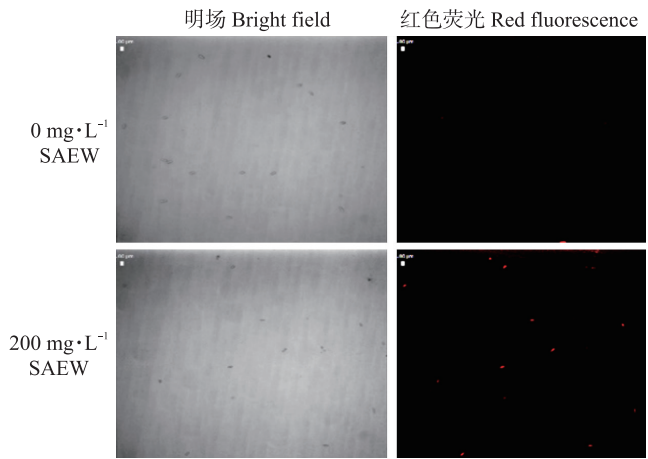


图 6 TJ-21 孢子的 PI 染色图(标尺为 $10\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 6 PI staining image of TJ-21 spores(Bar = $10\text{ }\mu\text{m}$)

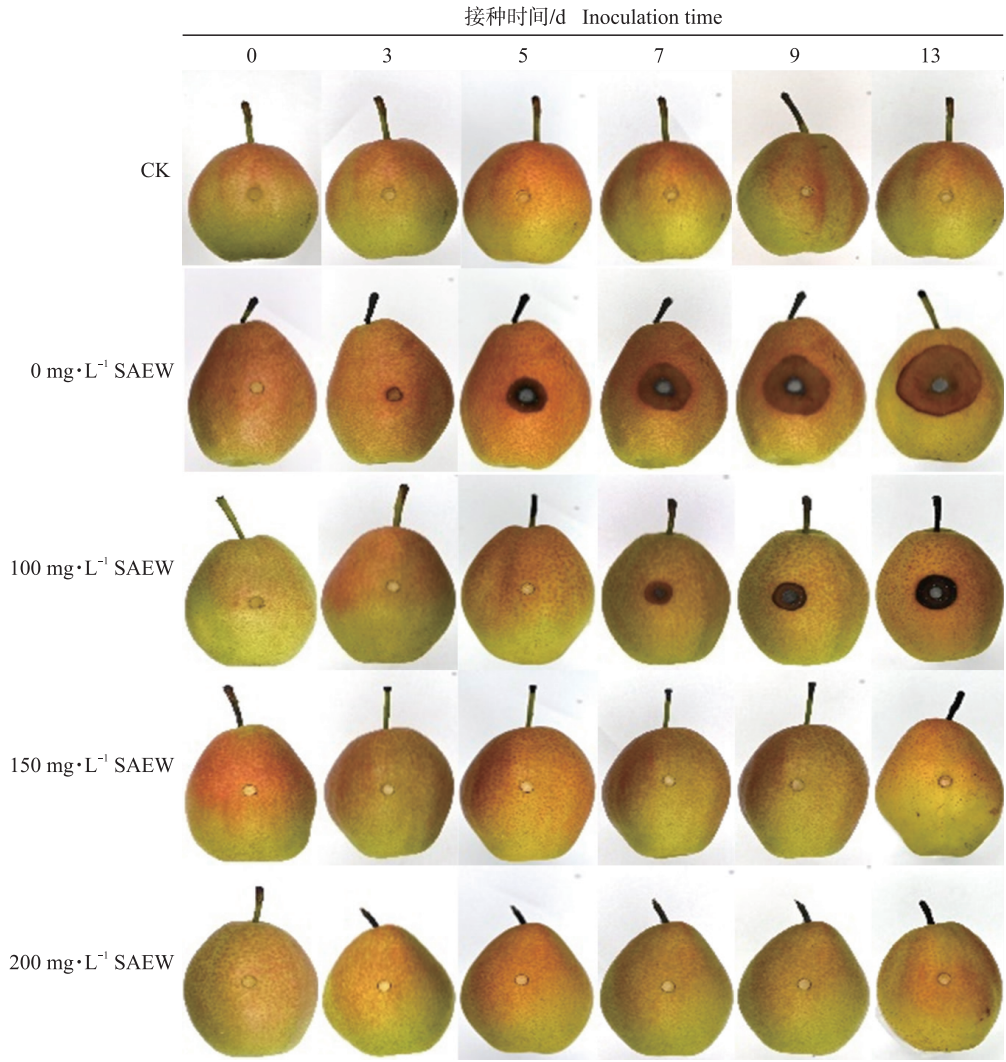


图 7 不同浓度 SAEW 对 TJ-21 在梨果实上的防治效果

Fig. 7 Effect of different concentrations of SAEW on TJ-21 control in pear fruit

表 1 接种 13 d 后不同浓度 SAEW 作用下梨果实的发病情况

Table 1 The incidence of pear fruit under different concentrations of SAEW for 13 days after inoculation

$\rho(\text{SAEW})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	平均病斑直径/mm Average lesion diameter	平均发病率/% Average incidence	防治效果/% Biocontrol effect
0	$32.61\pm4.71^{\text{a}}$	$100.00\pm0.00^{\text{a}}$	$0.00\pm0.00^{\text{c}}$
100	$12.29\pm1.82^{\text{b}}$	$100.00\pm0.00^{\text{a}}$	$62.31\pm1.82^{\text{bc}}$
150	$6.25\pm0.42^{\text{c}}$	$60.13\pm4.72^{\text{b}}$	$80.83\pm4.08^{\text{ab}}$
200	$0.00\pm0.00^{\text{d}}$	$0.00\pm0.00^{\text{c}}$	$100.00\pm0.00^{\text{a}}$

3 讨论与结论

大量研究表明,微酸性电解水(SAEW)具有显著的抗菌能力。林婷婷等^[26]发现,40 mg·L⁻¹ SAEW 可以通过破坏芽孢的内膜和外层结构来杀灭产气荚孢梭菌芽孢。蓝蔚青等^[27]将 SAEW 与超声波联合处理腐败希瓦氏菌,结果发现该联合处理方法能够有效降低腐败希瓦氏菌的菌落总数,破坏细菌细胞膜,导致细胞塌陷并释放内容物,最终细菌死亡。宋欣坤等^[28]研究表明,SAEW 对空肠弯曲菌的杀灭效果与有效氯浓度和处理时间呈正相关,且蛋白质会削弱 SAEW 的杀菌效果。此外,空肠弯曲菌在 10 代以内未表现出对 SAEW 的抗性反应,SAEW 通过破坏空肠弯曲菌的细胞膜结构,导致细胞表面出现褶皱、凹陷和破损,细胞内容物外流,最终细胞死亡。本研究发现,200 mg·L⁻¹ SAEW 在处理 5 min 后可以完全抑制果生炭疽菌的菌丝生长和孢子萌发,并有效抑制果生炭疽菌的扩展。

何雪等^[29]发现 150 mg·L⁻¹ SAEW 处理鲜切苦菊能同时对不动杆菌、假单胞菌、沙雷氏菌、果胶杆菌及泛菌产生抑菌效果。研究表明,50 mg·L⁻¹ SAEW 且 pH 值为 6.5 时在杀灭新鲜黄瓜表面的天然菌落和人为污染添加的大肠杆菌方面,具有良好的效果^[30]。Li 等^[31]发现超声波结合 SAEW 处理可以在一定程度上控制甘薯块根中 *Rhizopus stolonifer* 的生长。不同细菌或真菌对 SAEW 的敏感性有所不同。本研究体内试验结果显示,150 mg·L⁻¹ SAEW 可有效抑制梨炭疽病病斑的扩展。

本试验结果表明,当 SAEW 的有效氯浓度为 200 mg·L⁻¹ 且处理时间为 5 min 时,能够完全抑制孢子萌发。宋欣坤等^[28]对不同浓度 SAEW 处理空肠弯曲菌 2 min 后,通过扫描电子显微镜观察,发现使用去离子水处理的对照组细胞形态完整且表面光滑,而经过 SAEW 处理后的细胞膜表面出现不规则凹陷和严重破损,说明 SAEW 通过破坏细菌细胞膜,导致内容物外流,从而抑制细菌活性。同时,SAEW 处理后的果生炭疽菌核酸和蛋白质泄漏量明显增加,表明 SAEW 能够提高细胞膜的通透性,诱导细胞内容物泄漏,导致吸光值增大,这也是细胞凋亡的一个重要表现。这与 Zeng 等^[32]的研究结果相似,他们发现 SAEW 通过提高细胞膜的通透性,诱导大肠杆菌和金黄色葡萄球菌细胞内容物外流,从而抑制其生长。本研究中,SAEW 处理后的果生炭疽菌经过 PI 染色,其荧光强度明显高于对照组,表明 SAEW 破坏了细胞膜的完整性。

综上所述,SAEW 处理可以有效抑制果生炭疽菌的菌落生长和孢子萌发,并有效控制梨炭疽病的扩展。抑制效果与 SAEW 的浓度呈正相关。进一步研究表明,SAEW 通过提高细胞膜的通透性,导致细胞内容物外流,从而抑制果生炭疽菌的生长。

参考文献 References:

[1] 脱丽琴,李永丰,梁潇,等. 库尔勒香梨及其杂交后代生理指标研究[J]. 现代园艺,2025,48(1):1-4.
Tuo L Q,Li Y F,Liang X,et al. Study on physiological indexes of Korla fragrant pear and its hybrid offspring[J]. Contemporary Horticulture, 2025,48(1):1-4(in Chinese).

[2] 王春峰,张峰,程嘉宝,等. 库尔勒香梨产业发展现状、存在问题与对策建议[J]. 果树资源学报,2024,5(5):88-91.
Wang C F,Zhang F,Cheng J B,et al. Current status,main problems and the suggestions on development of Korla fragrant pear[J]. Journal of Fruit Resources,2024,5(5):88-91(in Chinese with English abstract).

[3] 吴良庆,朱立武,衡伟,等. 砀山梨炭疽病病原鉴定及其抑菌药剂筛选[J]. 中国农业科学,2010,43(18):3750-3758.
Wu L Q,Zhu L W,Heng W,et al. Identification of Dangshan pear anthracnose pathogen and screening fungicides against it[J]. Scientia Agricultura Sinica,2010,43(18):3750-3758(in Chinese with English abstract).

[4] 高正辉,张金云,伊兴凯,等. 砀山酥梨炭疽病发生特征与防治技术[J]. 安徽农业科学,2010,38(19):10445-10446.
Gao Z H,Zhang J Y,Yi X K,et al. Properties and control methods of anthracnose of Dangshan pear[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010,38(19):10445-10446(in Chinese with English abstract).

- [5] 刘丽萍,高洁,李玉. 植物炭疽菌属 *Colletotrichum* 真菌研究进展[J]. 菌物研究,2020,18(4):266-281.
Liu L P,Gao J,Li Y. Advances in knowledge of the fungi referred to the genus *Colletotrichum*[J]. Journal of Fungal Research,2020,18(4):266-281(in Chinese with English abstract).
- [6] 包艳. 梨炭疽菌生物学特性及其生防菌抑菌活性研究[D]. 南京:南京农业大学,2021.
Bao Y. Study on biology characteristics of *Colletotrichum fruticola* and the antifungal activity of its biocontrol bacteria[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2021(in Chinese with English abstract).
- [7] Jiang J J,Zhai H Y,Li H N,et al. Identification and characterization of *Colletotrichum fruticola* causing black spots on young fruits related to bitter rot of pear(*Pyrus bretschneideri* Rehd.) in China[J]. Crop Protection,2014,58(1):41-48.
- [8] 沈量. 梨炭疽病防治药剂的筛选及苯醚甲环唑抑菌机制的研究[D]. 武汉:华中农业大学,2019.
Shen L. Screening of fungicides for controlling pear anthracnose and study on suppression mechanisms of difenoconazole[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University,2019(in Chinese with English abstract).
- [9] 阮宏椿,黄艳琴,陈巧红,等. 福建省大豆胶孢炭疽病菌对吡唑醚菌酯的抗性风险分析[J]. 福建农业学报,2024,39(9):1094-1101.
Ruan H C,Huang Y Q,Chen Q H,et al. Risk assessment on resistance to pyraclostrobin of *Colletotrichum gloeosporioides*[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences,2024,39(9):1094-1101(in Chinese with English abstract).
- [10] 关秀杰,郝宇,郝长红. 黄柏活性提取物对葡萄炭疽病的防效研究[J]. 现代农业科技,2024(21):60-63.
Guan X J,Hao Y,Hao C H. Study on control effect of active extracts from cortex phellodendri on grape anthracnose[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2024(21):60-63(in Chinese).
- [11] 李群,冯月玲,王梅,等. 云南木霉 *Trichoderma yunnanense* 不同处理发酵液对炭疽菌抑制活性的稳定性[J]. 农技服务,2024,41(9):55-61.
Li Q,Feng Y L,Wang M,et al. Stability of inhibitory activity of *Trichoderma yunnanense* fermentation broth with different treatments on tea anthracnose[J]. Agricultural Technology Service,2024,41(9):55-61(in Chinese).
- [12] 刘倩,马连杰,张慧,等. 辣椒炭疽病生防菌株 TN2 的筛选鉴定与抑菌效果[J]. 生物技术通报,2025,41(1):287-297.
Liu Q,Ma L J,Zhang H,et al. Screening,identification and control effects of biocontrol strain TN2 against pepper anthracnose[J]. Biotechnology Bulletin,2025,41(1):287-297(in Chinese with English abstract).
- [13] 戚铭,罗自生,王蕾,等. 微酸性电解水在食品保鲜消毒领域的应用[J]. 食品安全质量检测学报,2020,11(12):3795-3802.
Qi M,Luo Z S,Wang L,et al. Application of slightly acidic electrolyzed water in food preservation and disinfection[J]. Journal of Food Safety & Quality,2020,11(12):3795-3802(in Chinese with English abstract).
- [14] 陆灿强,刘远华,舒邓群,等. 微酸性电解水冰对牛肉保鲜及抗氧化效果的影响[J]. 食品工业科技,2020,41(13):284-288.
Lu C Q,Liu Y H,Shu D Q,et al. Effect of slightly acidic electrolyzed water ice on beef fresh-keeping and antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry,2020,41(13):284-288(in Chinese with English abstract).
- [15] Kim H J,Tango C N,Chelliah R,et al. Sanitization efficacy of slightly acidic electrolyzed water against pure cultures of *Escherichia coli*, *Salmonella enterica*,*Typhimurium*,*Staphylococcus aureus* and *Bacillus cereus* spores,in comparison with different water hardness[J]. Scientific Reports,2019,9:4348.
- [16] 孙丽娜. 微酸性电解水联合紫外线对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的杀菌效果与机制研究[D]. 南昌:江西农业大学,2024.
Sun L N. The inactivation effect and mechanism of the combination treatment of slightly acidic electrolyzed water and UV against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*[D]. Nanchang:Jiangxi Agricultural University,2024(in Chinese with English abstract).
- [17] 孙丽娜,李裕卫,刘昌林,等. 微酸性电解水对肠炎沙门氏菌的杀菌机制初探[J]. 食品工业科技,2023,44(9):146-152.
Sun L N,Li Y W,Liu C L,et al. A preliminary on the bactericidal mechanism of slightly acidic electrolyzed water on *Salmonella enteritidis*[J]. Science and Technology of Food Industry,2023,44(9):146-152(in Chinese with English abstract).
- [18] 李艺阳,吴晃,顾和平,等. 江苏省大豆荚真菌病害的病原菌分离与鉴定[J]. 江苏农业学报,2024,40(10):1801-1809.
Li Y Y,Wu M,Gu H P,et al. Isolation and identification of the pathogens causing soybean pod fungal diseases in Jiangsu Province[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2024,40(10):1801-1809(in Chinese with English abstract).
- [19] 唐景美,史国英,周子义,等. 广西番荔枝果实炭疽病病原菌鉴定及其生物学特性[J]. 西南农业学报,2024,37(10):2201-2209.
Tang J M,Shi G Y,Zhou Z Y,et al. Identification and biological characteristics of pathogen causing anthracnose on fruit of *Annona atemoya* in Guangxi[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2024,37(10):2201-2209(in Chinese with English abstract).
- [20] 陈佩君,杨春艳,林泽岳,等. 广东百香果炭疽病病原菌的分离及鉴定[J]. 植物医学,2024,3(5):48-55.
Chen P J,Yang C Y,Lin Z Y,et al. Isolation and identification of the pathogen causing anthracnose in passion fruit in Guangdong[J]. Plant Health and Medicine,2024,3(5):48-55(in Chinese with English abstract).
- [21] 蒋朝阳,于泽洋,杨花,等. 宁夏地区葡萄炭疽病病原菌鉴定及生物学特性研究[J]. 西北农业学报,2024,33(6):1112-1121.
Jiang Z Y,Yu Z Y,Yang H,et al. Identification and biological characteristics of *Colletotrichum* species causing anthracnose on grapevine in Ningxia[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2024,33(6):1112-1121(in Chinese with English abstract).
- [22] Li Y K,Aioub A A A,Lv B,et al. Antifungal activity of pregnane glycosides isolated from *Periploca sepium* root barks against various phytopathogenic fungi[J]. Industrial Crops and Products,2019,132:150-155.
- [23] 毕海瑶. 4-丙基苯酚对核桃炭疽病及核桃褐斑病的抑菌作用研究与应用[D]. 泰安:山东农业大学,2024.
Bi H Y. Study and application of 4-propylphenol on inhibition of *Colletotrichum gloeosporioides* and brown spot of walnut[D]. Tai'an:Shandong

- Agricultural University,2024(in Chinese with English abstract).
- [24] Goudjal Y,Zamoum M,Sabaou N,et al. Potential of endophytic *Streptomyces* spp. for biocontrol of *Fusarium* root rot disease and growth promotion of tomato seedlings[J]. Biocontrol Science and Technology,2016,26(12):1691-1705.
- [25] 高宇凡.褪黑素、茉莉酸甲酯、水杨酸及其组合防治西瓜炭疽病效果研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2024.
- Gao Y F. Study on the effects of melatonin, methyl jasmonate, salicylic acid and their combinations on resistance to watermelon anthracnose[D]. Yangling:Northwest A&F University,2024(in Chinese with English abstract).
- [26] 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.
- Lin T T,Sun Z L,Liu F,et al. Bactericidal effect and mechanism of action of slightly acidic electrolyzed water on *Clostridium perfringens* spores [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2023,39(8):1755-1761(in Chinese with English abstract).
- [27] 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.
- Lan W Q,Zhao X Y,Zhou D P,et al. Effect and underlying mechanism of ultrasound combined with slightly acidic electrolyzed water treatment on *Shewanella putrefaciens*[J]. Food Science,2022,43(15):87-92(in Chinese with English abstract).
- [28] 宋欣坤,庞柳欣,牛玲玲,等.微酸性电解水对空肠弯曲菌的杀灭特性及机制[J].食品科学,2024,45(8):29-36.
- Song X K,Pang L X,Niu L L,et al. Inactivation characteristics and mechanism of slightly acidic electrolyzed water on *Campylobacter jejuni*[J]. Food Science,2024,45(8):29-36(in Chinese with English abstract).
- [29] 何雪,任凯,徐畅,等.微酸性电解水对鲜切苦菊中腐败菌的抑制效果[J].食品科学,2025,46(13):304-313.
- He X,Ren K,Xu C,et al. Inhibitory effect of slightly acidic electrolyzed water on spoilage bacteria in fresh-cut chicory[J]. Food Science,2025,46(13):304-313(in Chinese with English abstract).
- [30] 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.
- Xue J L,Liu H,Gan H P,et al. Application analysis of slightly acidic electrolyzed water in food sterilization and preservation[J]. Modern Food,2024,30(2):63-66(in Chinese with English abstract).
- [31] 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.
- [32] Zeng X P,Tang W W,Ye G Q,et al. Studies on disinfection mechanism of electrolyzed oxidizing water on *E. coli* and *Staphylococcus aureus*[J]. Journal of Food Science,2010,75(5):M253-M260.

责任编辑:范雪梅