

研究报告

铜绿假单胞菌 HZ15 的生物活性

杨德伟^{#1}, 施春兰^{#1}, 解紫薇¹, 秦小萍¹, 秦得强¹, 高熹¹, 顾小飞², 谢永辉², 吴国星^{*1}

1 云南农业大学 植物保护学院, 云南 昆明 650201

2 云南省烟草公司昆明市公司, 云南 昆明 650051

杨德伟, 施春兰, 解紫薇, 秦小萍, 秦得强, 高熹, 顾小飞, 谢永辉, 吴国星. 铜绿假单胞菌 HZ15 的生物活性[J]. 微生物学通报, 2025, 52(4): 1537-1550.

YANG Dewei, SHI Chunlan, XIE Ziwei, QIN Xiaoping, QIN Deqiang, GAO Xi, GU Xiaofei, XIE Yonghui, WU Guoxing. Bioactivities of *Pseudomonas aeruginosa* HZ15[J]. Microbiology China, 2025, 52(4): 1537-1550.

摘要:【背景】实验室前期自巨网苔蛾幼虫分离所得的铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*) HZ15 对烟草黑胥病具有较强拮抗作用, 但其余生物活性尚未挖掘。【目的】通过对菌株 HZ15 在农业上的生物活性进行探究, 旨在为该菌株在农业领域的应用提供理论基础, 并为其生物农药开发提供科学依据。【方法】采用琼脂扩散法、平板对峙、饲喂法、生物测定法、盆栽和大田试验等探究菌株 HZ15 的抑菌、促生、杀虫及对黑麦草的除草活性。【结果】菌株 HZ15 对 4 种植物病原细菌具有较强的抑菌活性, 对 11 种植物病原真菌的抑制率均达到 60%以上, 表现出广谱抑菌活性; 对烟草青枯病的盆栽试验防效达 52.48%, 与 52%氯尿硫酸铜可溶性粉剂 800 倍液处理间无显著差异。大田促生试验中, 菌株 HZ15 能够显著增加烟草的叶片数和最大叶面积。此外, 该菌及其次生代谢产物对红火蚁和秀丽隐杆线虫均有较强的毒杀作用, 其中, 上清滤液对红火蚁的毒杀作用最强, 而菌液对秀丽隐杆线虫的毒杀能力最好。对黑麦草的除草活性实验表明, 菌株 HZ15 对黑麦草的萌发抑制率达 63.80%, 并且显著降低了黑麦草的根长、茎长及鲜重。【结论】铜绿假单胞菌 HZ15 具有抑菌、促生、杀虫、抑制黑麦草生长的生物活性, 在农业和环境管理中具有重要的应用潜力。

关键词: 铜绿假单胞菌; 生物活性; 抑菌活性; 杀虫活性; 除草活性

资助项目: 云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(202105AC160037, 202205AC160077); 昆明市烟草公司一般科技项目(KMYC202201)

This work was supported by the Yunnan Provincial Middle-young Academic and Technical Leaders Reserve Talent Project (202105AC160037, 202205AC160077) and the Kunming Tobacco Company General Science and Technology Project (KMYC202201).

[#]These authors contributed equally to this work.

^{*}Corresponding author. E-mail: wugx1@163.com

Received: 2024-07-22; Accepted: 2024-08-09; Published online: 2024-08-30

Bioactivities of *Pseudomonas aeruginosa* HZ15

YANG Dewei^{#1}, SHI Chunlan^{#1}, XIE Ziwei¹, QIN Xiaoping¹, QIN Deqiang¹, GAO Xi¹, GU Xiaofei², XIE Yonghui², WU Guoxing^{*1}

1 College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China

2 Kunming Branch of Yunnan Tobacco Company, Kunming 650051, Yunnan, China

Abstract: [Background] We have discovered that *Pseudomonas aeruginosa* HZ15 isolated from *Macrobrochis gigas* has a strong antagonistic effect against tobacco black shank. However, other biological activities of this strain remain to be explored. **[Objective]** To investigate the bioactivities of strain HZ15 in agriculture and provide a theoretical basis for the application of this strain in agricultural production and the development of biocontrol agents with this strain. **[Methods]** The agar diffusion method, plate confrontation, feeding method, bioassay, and pot and field experiments were employed to examine the antimicrobial, plant growth-promoting, insecticidal, and herbicidal (against ryegrass) activities of strain HZ15. **[Results]** Strain HZ15 showcased strong inhibitory activities against four species of plant pathogenic bacteria and the inhibition rates over 60% against 11 species of plant pathogenic fungi, exhibiting a broad antimicrobial spectrum. The pot experiment showed that the strain had a control effect of 52.48% against tobacco bacterial wilt, which was comparable to that of 52% chloroisobromine cyanuric acid-copper sulfate soluble powder diluted by 800 times. The field experiment showed that strain HZ15 significantly increased the number of tobacco leaves and the maximum leaf area. In addition, both strain HZ15 and its secondary metabolites exhibited strong toxicity against *Solenopsis invicta* and *Caenorhabditis elegans*, with the supernatant and bacterial culture showing the strongest toxic effects on *S. invicta* and *C. elegans*, respectively. In addition, strain HZ15 inhibited the germination of ryegrass by 63.80% and significantly reduced the root length, stem length, and fresh weight of ryegrass. **[Conclusion]** *P. aeruginosa* HZ15 possesses antimicrobial, plant growth-promoting, insecticidal, and ryegrass growth-inhibiting activities, demonstrating significant potential for application in agriculture and environmental management.

Keywords: *Pseudomonas aeruginosa*; bioactivity; antimicrobial activity; insecticidal activity; herbicidal activity

铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)为革兰氏阴性 γ 变形杆菌,自1882年首次在人体中发现以来,已被证实在环境中广泛存在,包括土壤、水体、植物、动物等^[1-2]。尽管该细菌在医学上具有争议,但其在农业领域展现出巨大的潜在应用价值^[3-4]。

铜绿假单胞菌的抑菌作用是研究较为深入

的生防功能。吩嗪-1-羧酸(phenazine-1-carboxylic acid, PCA)、藤黄绿脓菌素(pyoluteorin, PLT)、绿脓菌素(pyocyanine, PYO)、氰化氢(hydrogen cyanide, HCN)、L-2-氨基-4-甲氧基-反式-3-丁烯酸(L-2-amino-4-methoxy-trans-3-butenic acid, AMB)、蛋白酶及几丁质酶等活性物质的产生使得其具有广谱的抑菌特性^[4-5]。Hariprasad等^[6]

从土壤中分离得到铜绿假单胞菌 2apa, 其菌株和次生代谢产物对链格孢菌(*Alternaria alternata*)、尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)在内的 10 种真菌具有抑制作用; 此外, 在田间试验中, 该菌株能够有效减轻根系和叶片上的细菌、真菌病原物的侵害。Wang 等^[7]从番茄植株根际土壤中分离到的铜绿假单胞菌 CQ-4 对番茄、黄瓜、西瓜枯萎病在内的 16 种植物病原真菌病害均有较强的抑制作用。梁卫驱等^[8]从葡萄根际土壤分离出的铜绿假单胞菌 F13 对 8 种真菌病害具有 60% 以上的抑制率, 对豆角白粉病的田间防效(用药后 9 d)达 71.92%。

铜绿假单胞菌可产吲哚乙酸(indoleacetic acid, IAA)、赤霉素和嗜铁素等, 并具溶磷、解钾、固氮等特性, 使其能够促进植物生长并提高抗性^[4,6,8-9]。铜绿假单胞菌 F13 可明显提高豆角的产量, 主要表现在显著提升豆角的株高和叶片数量, 使产量增加 39.68%; 此外, 该菌还可显著提高豆角果实中维生素 C 和可溶性蛋白的含量, 从而提高豆角质量^[8]。Uzma 等^[10]发现接种铜绿假单胞菌后绿豆的枝条长度、豆荚数、籽粒数、百粒重、秸秆重和总产量等生长参数均有显著提高, 并且该菌可通过提高植物的光合活性、膜稳定性、水分含量和抗氧化效率帮助植物应对干旱胁迫。汪敦飞等^[11]研究表明, 铜绿假单胞菌通过提高水稻抗氧化酶活性增加水稻类黄酮、总酚等抗氧化物的含量, 从而有效缓解水稻镉胁迫, 并提高了水稻根系活力和光合作用, 促进水稻生长。

铜绿假单胞菌还具备杀虫、除草以及降解石油污染等功能。贺丽娜等^[12]报道了一种从马尾松中分离得到的铜绿假单胞菌 NZM13-11, 该菌株对松材线虫展现出极高的致死率和虫体消解率(均达到 100%)。Nguyen 等^[9]用铜绿假单胞菌 TUN03 对咖啡线虫进行室内和田间试验,

结果表明菌株 TUN03 对咖啡线虫的致死率较高, 室内线虫死亡率接近 100%, 田间线虫死亡率可达 82.23%, 并且菌株对线虫卵的孵化也具有抑制作用, 抑制率为 84%。有研究指出, 铜绿假单胞菌所产生的几丁质酶能降解昆虫外骨骼中的几丁质(如 *chiC* 编码的几丁质酶 C)导致昆虫死亡^[13]。牛洪涛等^[14]从染病死亡的蔷薇蚜虫中分离到铜绿假单胞菌 JSA1, 其菌液对褐飞虱的致死率随时间推移而有所提升, 但致死率较低(小于 40%), 然而, 其细胞破碎液对褐飞虱的致死率达到 82.53%, 表明胞内物质杀虫活性较好, 远高于菌液。相关研究发现, 铜绿假单胞菌次生代谢产物中分离的 2-(羟甲基)苯酚^[15]、喹啉类化合物及其衍生物^[16]能够有效抑制杂草生长。此外, Lakshmi 等^[17]在除草活性试验中发现分离所得的铜绿假单胞菌 KC1 菌液同样可显著抑制($P < 0.05$)杂草幼苗(刺苋、马齿苋)的根、茎生长。Wu 等^[18]分离的铜绿假单胞菌 L10 是一种植物内生菌, 其含有编码单加氧酶、双加氧酶、醇脱氢酶等与石油降解相关的基因, 能够有效地降解受石油污染土壤中的烃类化合物。

综上所述, 铜绿假单胞菌生防功能多样, 具有较大发展潜力。实验室前期从巨网苔蛾(*Macrobroschia gigas*)幼虫分离得到铜绿假单胞菌 HZ15, 其对烟草黑胥病具有良好的拮抗作用^[19]。为了充分挖掘菌株 HZ15 的生物防治能力, 本研究对其生防因子、抑菌能力和杀虫活性等进行研究, 以期开发基于菌株 HZ15 的生物防治策略奠定科学基础。

1 材料与方法

1.1 样品

生防菌: 铜绿假单胞菌 HZ15, 分离自巨网苔蛾健康幼虫肠道, 于 2020 年 7 月在云南省普洱市思茅区南屏镇南岛河村采集, 经过 16S rRNA

基因测序鉴定^[19], 现保存于云南农业大学农药学实验室。

病原真菌: 大斑刚毛球腔菌(*Setosphaeria turcica*)、人参链格孢(*Alternaria panax* Whetz)、槭菌刺孢 [*Mycocentrospora acerina* (Hartig) Deighton]、玉蜀黍平脐蠕孢(*Bipolaris maydis*)、链格孢菌 [*Alternaria alternata* (Fries) Keisslar]、烟草疫霉(*Phytophthora nicotiana*)、尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)、胶孢炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)、多主棒孢菌(*Corynespora cassicola*)、尖孢炭疽菌(*Colletotrichum acutatum*)、枇杷拟盘多毛孢 [*Pestalotiopsis eriobotrifolia* (Guba) Chen et Cao], 保存于云南农业大学农药学实验室。

病原细菌: 茄科罗尔斯通氏菌(*Ralstonia solanacearum*)、柑橘黄单胞菌芒果致病变种(*Xanthomonas citri* pv. *mangiferaeindicae*, Xcm)、水稻黄单胞菌水稻致病变种(*Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*, Xoo)、胡萝卜软腐坚固杆菌(*Pectobacterium carotovorum*), 保存于云南农业大学农药学实验室。

烟草种子(K326), 玉溪中烟种子有限责任公司; 黑麦草, 成都绿牧天下农业科技有限公司; 红火蚁、秀丽隐杆线虫, 实验室饲养。

1.2 培养基、主要试剂和仪器

LB 培养基(g/L): 胰蛋白胨 10.0, 酵母提取物 5.0, 氯化钠 10.0, 琼脂 15.0。

马铃薯葡萄糖琼脂(potato dextrose agar, PDA)培养基(g/L): 马铃薯 200.0, 葡萄糖 20.0, 琼脂 15.0。

燕麦培养基(g/L): 燕麦 30.0, 蔗糖 15.0。

铁载体、溶磷、纤维素酶、蛋白酶、有机酸、酯酶、IAA、固氮、解钾检测培养基, 参考文献[6,8,10,20]配制。

胰蛋白胨、酵母提取物, 北京奥博星生物

技术有限责任公司; 氯化钠、蔗糖、葡萄糖等, 天津市恒兴化学试剂制造有限公司; 琼脂, 北京兰杰柯科技有限公司; 解磷培养基、CAS 检测培养基、解钾培养基等, 海博生物技术有限公司; PBS, 武汉赛维尔生物科技有限公司。

超净工作台, 苏州安泰空气技术有限公司; 立式蒸汽灭菌锅, 江苏登冠医疗器械有限公司; 电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学有限公司; 光学显微镜, 麦克奥迪实业集团有限公司。

1.3 生防因子的测定

将菌株 HZ15 分别接种于铁载体、溶磷、纤维素酶、蛋白酶、有机酸、酯酶、IAA、固氮、解钾检测培养基上, 28 °C 培养。其中, 蛋白酶培养基培养 3 d, 其余培养时间为 5 d。纤维素酶检测需用 1 mg/mL 刚果红对处理的培养基染色 20 min, 随后用 1 mol/L NaCl 浸泡 15 min, 用无菌水洗去刚果红后, 观察是否产生透明圈^[20]。每个处理 3 次重复。

1.4 药敏试验

菌液的制备: 将菌株 HZ15 接种于 LB 培养基, 28 °C 培养 4 d 进行活化, 选取单菌落接种于 LB 液体培养基, 培育 24 h 得到种子液。按 3% 接种量接种至 100 mL LB 培养基中, 28 °C、180 r/min 培养 24 h 获得 HZ15 菌液, 稀释成 1×10^8 CFU/mL 的菌液备用。

药敏试验参考宁豫昌等^[21]的方法并稍作修改。将菌株 HZ15 菌液与培养基以 1:15 混匀, 制成带菌平板, 随后铺上 6 mm 滤纸片, 取不同浓度抗生素(1、0.5、0.25、0.1、0.05、0.025、0.005 mg/mL) 15 μ L 滴加到滤纸片上, 28 °C 恒温培养 24 h 后记录抑菌圈情况。

1.5 真菌抑菌谱的测定

参考施春兰等^[22]的方法测定真菌抑菌谱, 将培养 4 d 的病原真菌打成 6 mm 菌饼, 接种于 PDA 平板中间, 用无菌牙签将菌株 HZ15 十字

对称接种于距离菌饼 2 cm 左右处, 于 28 °C 培养 5 d, 观察并记录抑菌圈大小。

1.6 细菌抑菌谱的测定

采用琼脂扩散法^[23]测定细菌抑菌活性。即将茄科罗尔斯通氏菌、柑橘黄单胞菌芒果致病变种、水稻黄单胞菌水稻致病变种、胡萝卜软腐坚固杆菌制成菌液并与 LB 培养基按一定比例混合均匀(病原菌菌液与 LB 培养基混合比例为 1:20), 倒成平板, 凝固后用无菌打孔器(6 mm)在含菌平板上打孔, 每孔中加入 100 μ L 菌株 HZ15 的发酵液, 于 28 °C 恒温箱中培养 2–3 d, 观察并测定抑菌圈大小。

1.7 室内盆栽试验

参考 Shi 等^[24]方法并加以改动。烟草(K326)用育苗盘培养后移栽至盆中, 待烟草长至 5–6 片真叶时, 将烟草接种茄科罗尔斯通氏菌并确保烟株感病。采用灌根法, 即每株烟用 200 mL 浓度为 1×10^8 CFU/mL 的悬浮液进行处理, 以 52% 氯尿酸铜可溶性粉剂 800 倍液和无菌水处理作为对照, 每个处理 9 株烟。记录处理后 15 d 和 30 d 发病情况, 计算病情指数及防效。病情分级标准、病情指数及防效测定参考施春兰等^[22]方法。

1.8 烟草大田促生试验

将烟草种子(K326)用育苗盘培养后移栽, 待烟草长至团棵期前(5–6 片真叶), 每株烟用 200 mL 浓度为 1×10^8 CFU/mL 的悬浮液进行灌根处理, 用 LB 液体培养基作为阴性对照, 无菌水为空白对照, 7 d 后再次灌根处理, 每个处理 9 株烟。50 d 后测量株高、茎围、有效叶片数、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积。

最大叶面积=最大叶长 $\times$ 最大叶宽 $\times 0.634 5$ ^[25]。

1.9 对红火蚁的杀虫活性测定

菌株 HZ15 菌液制备同 1.4 药敏试验中的制备方法。将菌液 8 000 r/min 离心 10 min 得到上

清液, 用 0.22 μ m 无菌有机滤膜过滤, 得到滤液; 上清液经过 121 °C 蒸汽灭菌 30 min 获得灭菌上清液。

将菌液、滤液、灭菌上清液分别与 10% 蜂蜜水混合成各药液, 参考梁钰铃等^[26]的胃毒法并稍作修改。分别取 1 mL 上述药液于 1.5 mL 离心管中, 用棉花球塞紧至湿润, 将装有药液的离心管置于一次性塑料杯(250 mL), 每个杯中放入 30 头饥饿 24 h 的红火蚁(*Solenopsis invicta*), 设置 3 个重复。10% 蜂蜜水作为空白对照, 每 24 h 记录红火蚁死亡率。

1.10 对秀丽隐杆线虫的杀虫活性测定

按照 1.4 中菌液制备的方法获得 HZ15 菌液。参考张娇等^[27]采用固体燕麦培养基培养秀丽隐杆线虫(*Caenorhabditis elegans*), 线虫同期化方法: 挑取产卵高峰期的秀丽隐杆线虫于燕麦培养板中, 使其产卵 2 h 后, 将成虫移走, 置于 20 °C 培养箱中倒置培养, 便可以得到同期化的线虫。

用无菌蒸馏水清洗出线虫, 装于 15 mL 离心管加蒸馏水离心 10 min, 弃置上清液, 重复 3 次, 随后加入 PBS 离心 10 min, 弃置上清液, 加蒸馏水摇匀。将 80 头线虫接种于 96 孔板中并分别加入 10 μ L 菌液、滤液、灭菌上清液, 重复 5 组, 以 PBS 为对照。分别于 24、48 和 72 h 后在光学显微镜下调查线虫死亡情况, 并计算其死亡率和校正死亡率。

1.11 对黑麦草的除草活性测定

参考 Mikulic-Petkovsek 等^[28]的方法并稍作修改。将黑麦草(*Lolium perenne* L.)种子放入含有滤纸的培养皿(直径 9 cm)中, 分别加入 5 mL 按照 1.4 制备的 HZ15 菌液、无菌水、LB 液体培养基培养 1 d, 随后用无菌水冲洗种子并更换培养皿, 最后加入适量无菌水在室内环境下培养, 每个处理 20 颗种子, 重复 3 次。6 d 后测

定其发芽率、根长、茎长、鲜重和干重。至少具有 1 mm 芽或 1 mm 根才被认为发芽。鲜重、干重为 20 棵杂草的重量(包括未发芽种子),其中,鲜重测量完成的杂草在 55 °C 条件下烘干至恒重即为干重。

1.12 统计分析

使用 SPSS 26.0 对数据进行分析,数据结果为平均值±标准差,并采用 Duncan 新复极差法检验进行显著性分析($P<0.05$)。利用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 生防因子测定结果

铜绿假单胞菌 HZ15 的生防因子结果如图 1、表 1 所示,固氮、解钾结果为阴性,铁载体、溶磷、纤维素酶、蛋白酶、有机酸、酯酶、IAA 结果均为阳性,表明菌株 HZ15 能够产生这些

生防因子,使菌株具有抑菌、促生的生防作用。

2.2 药敏试验结果

铜绿假单胞菌 HZ15 对 6 种抗生素的耐受如表 2 所示,其对那他霉素、硫酸卡那霉素、氨苄青霉素钠表现出耐受性,对链霉素、氯霉素、四环素敏感,1 mg/mL 的链霉素产生的抑菌圈最大,为 12.67 mm,0.25 mg/mL 的四环素抑菌圈最小,为 6.00 mm,显著小于其他浓度或抗生素所产生的抑菌圈($P<0.05$)。在浓度为 0.5 mg/mL 时,氯霉素所产生的抑菌圈(7.17 mm)显著小于四环素、链霉素的抑菌效果($P<0.05$)。虽然菌株 HZ15 对氯霉素、四环素、链霉素具有一定的敏感性,但敏感度较低。

2.3 抑菌谱结果

铜绿假单胞菌 HZ15 对 11 种真菌病害和 4 种细菌病害均具有拮抗作用(图 2、表 3、表 4),真菌病害中,对玉米大斑病的抑制率最高,达

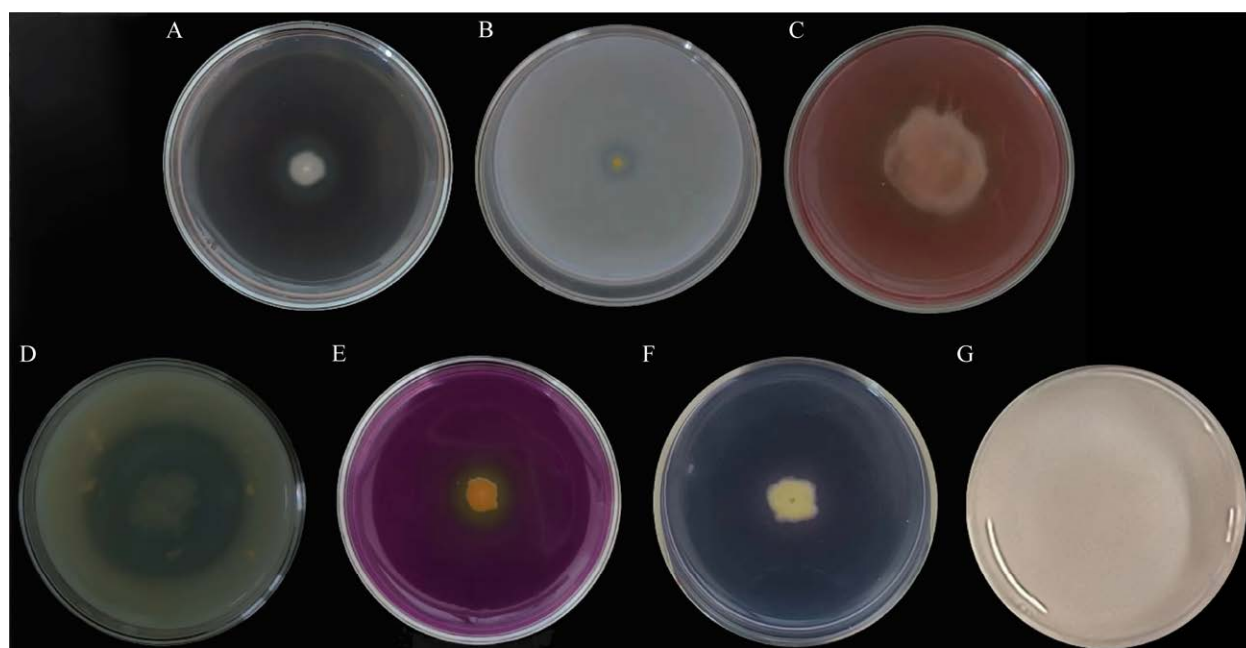


图 1 菌株 HZ15 的生防因子结果 A-G 分别为铁载体、溶磷、纤维素酶、蛋白酶、有机酸、酯酶、IAA。

Figure 1 Results of biocontrol factors of strain HZ15. A-G refers to siderophore, phosphate-solubilizing, cellulase, protease, organic acid, esterase, and IAA, respectively.

表 1 生防因子结果

Table 1 Results of biocontrol factors

Item	Result
铁载体 Siderophore	+
溶磷 Phosphate-solubilizing	+
纤维素酶 Cellulase	+
蛋白酶 Protease	+
有机酸 Organic acid	+
酯酶 Esterase	+
IAA	+
固氮 Nitrogen fixation	-
解钾 Phosphate-solubilizing	-

+: 阳性, -: 阴性。

+: Positive, -: Negative.

表 2 抗生素敏感性

Table 2 Antibiotic sensitivity

抗生素	浓度	抑菌圈
Antibiotic	Concentration (mg/mL)	Antibacterial circle (mm)
那他霉素	0.005–1.000	0
Natamycin		
硫酸卡那霉素	0.005–1.000	0
Kanamycin sulfate		
氨苄青霉素钠	0.005–1.000	0
Ampicillin sodium		
氯霉素	0.500	7.17±0.24d
Chloramphenicol	1.000	11.33±0.47b
四环素	0.250	6.00±0.00e
Tetracycline	0.500	9.17±0.24c
	1.000	12.33±0.47ab
链霉素	0.250	7.33±0.47d
Streptomycin	0.500	9.67±0.47c
	1.000	12.67±0.94a

同列数据后不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 0.05 水平间差异显著。下同。

Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference between 0.05 level by Duncan's new complex range test. The same below.

82.66%，对三七圆斑病、玉米小斑病、烟草黑胫病的抑制率也在 70% 以上。对于细菌性病害，菌株 HZ15 表现出较强的抑制作用，尤其对白菜软腐病的抑制效果最佳，显著高于其他 3 种

细菌性病害($P<0.05$)。此外，菌株 HZ15 对芒果角斑病和水稻白叶枯病也显示出较强的抑菌作用，相较于烟草青枯病，同样具有显著性差异($P<0.05$)。

2.4 室内盆栽试验结果

室内盆栽试验结果如表 5 所示，烟草在经过铜绿假单胞菌 HZ15 菌液灌根处理后，在 15、30 d 时烟草青枯病的病情指数显著低于无菌水处理，与 52% 氯尿硫酸铜可溶性粉剂 800 倍液处理间无显著差异；对烟草青枯病的平均防效也与化学农药处理无差异，表现出较强的防治效果。

2.5 对烟草的促生结果

菌株 HZ15 菌液处理的烟草，在株高、叶片数、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积指标中均为最高，其中，叶片数、最大叶面积的值分别为 15.81、1 248.49 cm² (表 6)，显著高于对照处理，表明菌株 HZ15 能够增加烟草叶片的数量，并提高最大叶面积。

2.6 对红火蚁的杀虫活性

菌株 HZ15 不同组分对红火蚁的致死活性如图 3 所示，1–11 d 中，滤液对红火蚁的杀虫活性均为最强。菌液和灭菌上清液的杀虫效果较为缓慢，在第 4 天后红火蚁死亡率开始显著增加。在 11 d 时滤液、菌液和灭菌上清液的致死率分别为 100%、77.33% 和 61.67%。

2.7 对秀丽隐杆线虫的杀虫活性

铜绿假单胞菌 HZ15 的菌液、滤液、灭菌上清液对秀丽隐杆线虫均具有一定的毒杀作用(图 4)。菌液的杀虫活性最强，在 24、48、72 h 对线虫的死亡率均显著($P<0.05$)高于其他处理。其次是灭菌上清液，其死亡率为 82.82%–90.67%，较为稳定。滤液在 24 h 时对线虫的致死率为 46.32%，但在 72 h 时增加至 89.73%，接近灭菌上清液的毒杀能力。

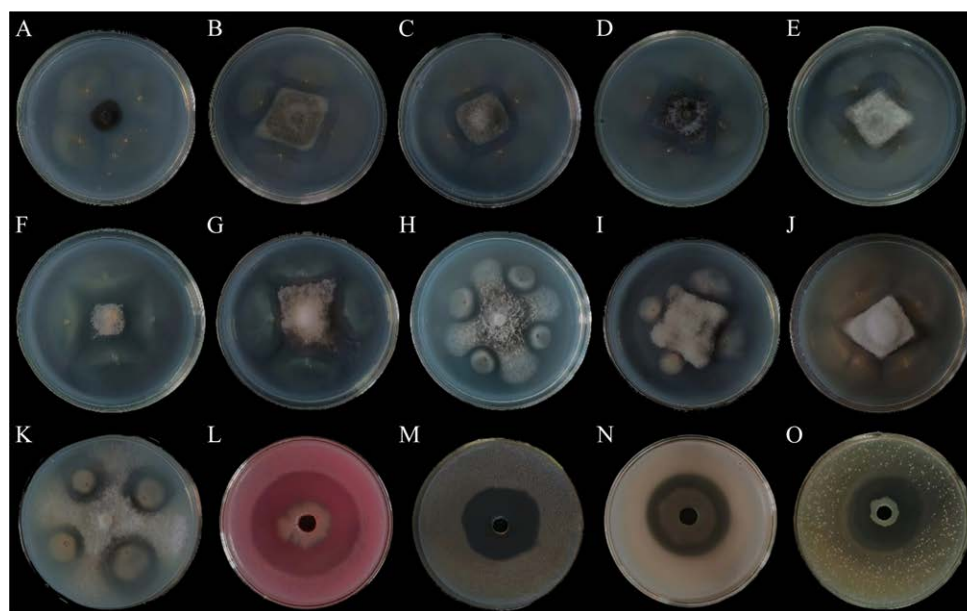


图2 菌株 HZ15 对植物病害的抑制能力 A–K 为真菌病害, 依次为玉米大斑病、三七黑斑病、三七圆斑病、玉米小斑病、烟草赤星病、烟草黑胫病、烟草根腐病、柑橘炭疽病、黄瓜靶斑病、咖啡炭疽病、枇杷灰斑病。L–O 为细菌病害, 依次为烟草青枯病、芒果角斑病、水稻白叶枯病、白菜软腐病。

Figure 2 Inhibition ability of strain HZ15 on plant diseases. A–K refer to fungal diseases (corn spot, *Panax notoginseng* black spot disease, *Panax notoginseng* round rot spot, corn southern leaf blight, tobacco brown spot, tobacco black shank, tobacco root rot, citrus anthracnose, cucumber target spot disease, anthracnose of coffee, loquat grey spot). L–O refer to bacterial diseases (tobacco bacterial wilt, mango corner spot disease, rice bacterial leaf blight, soft rot disease of Chinese cabbage).

表3 菌株 HZ15 对真菌病害的防治能力

Table 3 Control ability of strain HZ15 against fungal diseases

病害名称 Name of disease	病原菌 Pathogen	菌落直径 Colony diameter (mm)	抑制率 Inhibition rate (%)
玉米大斑病 Corn spot	大斑刚毛球腔菌 <i>Setosphaeria turcica</i>	15.61±0.61d	82.66±0.68a
三七黑斑病	人参链格孢	29.20±0.81ab	67.56±0.90cd
<i>Panax notoginseng</i> black spot disease	<i>Alternaria panax</i> Whetz		
三七圆斑病	械菌刺孢	25.97±1.08bc	71.15±1.20bc
<i>Panax notoginseng</i> round rot spot	<i>Mycocentrospora acerina</i> (Hartig) Deighton		
玉米小斑病 Corn southern leaf blight	玉蜀黍平脐蠕孢 <i>Bipolaris maydis</i>	23.52±1.13c	73.87±1.25b
烟草赤星病 Tobacco brown spot	链格孢菌 <i>Alternaria alternata</i> (Fries) Keisslar	28.34±0.62ab	68.52±0.69cd
烟草黑胫病 Tobacco black shank	烟草疫霉 <i>Phytophthora nicotiana</i>	19.15±1.63d	78.72±0.81a
烟草根腐病 Tobacco root rot	尖孢镰刀菌 <i>Fusarium oxysporum</i>	31.17±0.18a	65.37±0.19d
柑橘炭疽病 Citrus anthracnose	胶孢炭疽菌 <i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	30.65±1.37ab	65.94±1.74cd
黄瓜靶斑病 Cucumber target spot disease	多主棒孢菌 <i>Corynespora cassiicola</i>	29.07±0.31ab	67.70±0.34cd
咖啡炭疽病 Anthracnose of coffee	尖孢炭疽菌 <i>Colletotrichum acutatum</i>	29.48±0.79ab	67.24±0.99cd
枇杷灰斑病	枇杷拟盘多毛孢	30.80±0.98ab	65.78±0.76cd
Loquat grey spot	<i>Pestalotiopsis eriobotrifolia</i> (Guba) Chen et Cao		

表 4 菌株 HZ15 对细菌病害的防治能力

Table 4 Control ability of strain HZ15 against bacterial diseases

细菌病害 Bacterial disease	病原菌 Pathogen	抑菌圈 Inhibition zone (mm)
烟草青枯病 Tobacco bacterial wilt	茄科罗尔斯通氏菌 <i>Ralstonia solanacearum</i>	21.96±0.55c
芒果角斑病 Mango corner spot disease	柑橘黄单胞菌芒果致病变种 <i>Xanthomonas citri</i> pv. <i>mangiferaeindicae</i> , Xcm	24.52±0.37b
水稻白叶枯病 Rice bacterial leaf blight	水稻黄单胞菌水稻致病变种 <i>Xanthomonas oryzae</i> pv. <i>oryzae</i> , Xoo	25.18±0.31b
白菜软腐病 Soft rot disease of Chinese cabbage	胡萝卜软腐坚固杆菌 <i>Pectobacterium carotovorum</i>	29.62±0.69a

表 5 菌株 HZ15 对烟草青枯病室内防效试验结果

Table 5 Results of laboratory control experiments of strains HZ15 against tobacco bacterial wilt

Group	病情指数 Disease index		平均防效 Average control efficacy (%)	
	15 d	30 d	15 d	30 d
1×10 ⁸ CFU/mL 菌液 1×10 ⁸ CFU/mL bacterial fluid	19.63±2.92b	24.81±2.92b	56.91±6.4a	52.48±5.59a
52%氯尿酸铜可溶性粉剂 800 倍液 52% chloruric acid copper sulfate soluble powder 800× solution	14.44±3.95b	17.78±4.54b	68.29±8.68a	65.96±8.69a
无菌水 Sterile water	45.56±2.40a	52.22±3.63a	—	—

—: 未进行平均防效的计算。

—: Does not calculate the average defense effect.

表 6 菌株 HZ15 对烟草的大田促生试验

Table 6 Field growth promotion experiment of strain HZ15 on tobacco

Group	株高 Plant height (cm)	茎围 Stem circumference (cm)	叶片数 Number of blades (slice)	最大叶长 Maximum leaf length (cm)	最大叶宽 Maximum leaf width (cm)	最大叶面积 Maximum leaf area (cm ²)
1×10 ⁸ CFU/mL bacterial fluid	103.80±2.57 a	5.43±0.27a	15.81±0.10a	68.63±0.73a	28.67±0.57a	1 248.49±35.30a
LB medium	96.38±4.96a	5.66±0.41a	13.22±0.42b	63.59±1.13b	25.11±1.90b	1 014.57±94.91b
Sterile water	100.25±3.90a	6.07±0.52a	13.89±0.74b	64.48±0.52b	27.03±0.72ab	1 106.29±38.29ab

2.8 对黑麦草的除草活性

铜绿假单胞菌 HZ15 的菌液和 LB 处理对黑麦草的萌发和生长均具有一定抑制作用(表 7)。其中, LB 处理在根长、茎长、鲜重上显著($P<0.05$)低于无菌水;而 HZ15 菌液处理在以上方面显著($P<0.05$)低于无菌水和 LB, 此外, 菌液对黑麦草的萌发抑制率达 63.80%。

3 讨论

植物病害、虫害等问题对全球粮食安全构成重大威胁, 为了应对这些问题, 大量化学品被投入使用, 虽然短期内有效, 但造成了环境污染、农残、抗药性等一系列问题^[8,14]。目前, 生物防治因具有污染小、低残留等特点已成为

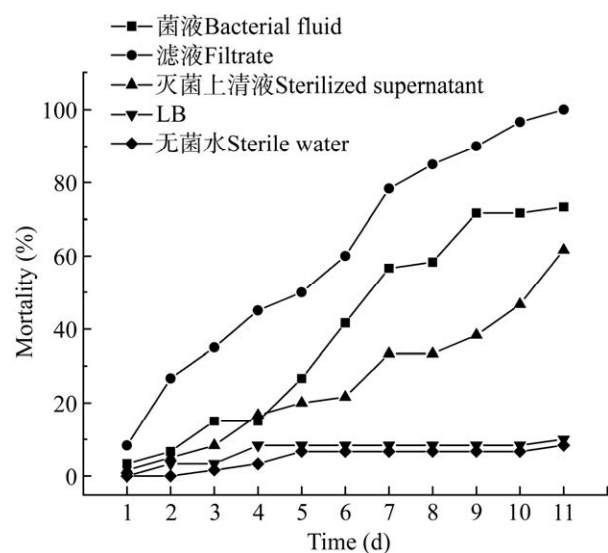


图3 菌株 HZ15 杀红火蚁活性

Figure 3 Activity of strain HZ15 in killing red fire ants.

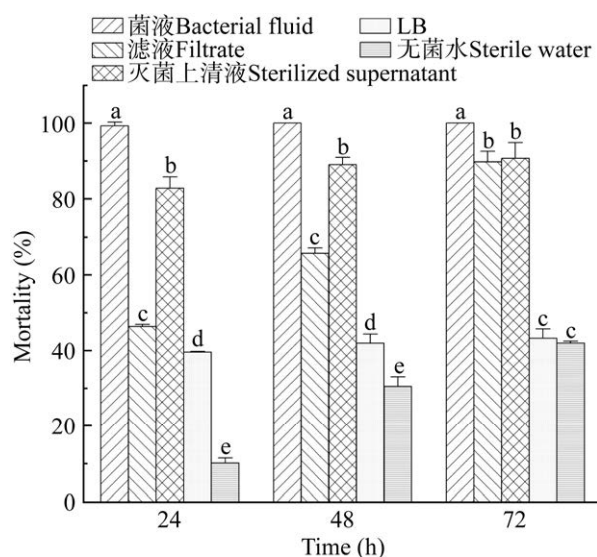


图4 菌株 HZ15 杀线虫活性

Figure 4 Nematocidal activity of strain HZ15

表7 菌株 HZ15 的除草活性

Table 7 Herbicidal activity of strain HZ15

Group	根长 Root length (cm)	茎长 Stem length (cm)	鲜重 Fresh weight (mg)	干重 Dry weight (mg)	萌发率 Germination rate (%)	萌发抑制率 Germination inhibition rate (%)
HZ15 菌液 HZ15 bacterial fluid	1.00±0.16c	3.07±0.57c	245.02±2.88c	77.38±9.14a	35.59±4.15b	63.80±4.22a
LB	4.69±0.22b	7.91±0.32b	481.80±17.35b	75.14±1.50a	88.14±2.40a	11.86±2.40b
无菌水 Sterile water	6.43±0.30a	9.12±0.48a	564.94±74.79a	74.79±4.14a	98.33±2.36a	—

—: 未进行萌发抑制率的计算。

—: Did not calculate the germination inhibition rate.

植物病害防治的研究热点,在众多生物防治菌中,铜绿假单胞菌因其广泛的拮抗作用和多样的次生代谢物而受到广泛关注,是研究较为广泛的生防菌之一^[29-30]。

铜绿假单胞菌为获得性的多重耐药性病菌^[31-32]。在对菌株 HZ15 的全基因组分析中,抗生素耐药性综合数据库(the comprehensive antibiotic resistance database, CARD)预测到其对四环素、氨基糖苷类、大环内脂类、青霉素类抗生素在内的 21 种抗生素类别具有耐药性^[33],因此菌株 HZ15 对那他霉素、硫酸卡那霉素、

氨基青霉素钠、氯霉素、四环素和链霉素均具有抗性,但可能由于抗生素基因的表达水平不同而导致敏感程度不同(表 2)。相关研究表明,水平基因转移事件对铜绿假单胞菌获取抗生素耐药性基因获取发挥重要作用,这些抗生素耐受基因的存在,为其在不同环境条件下的生存和适应提供了重要保障^[32-33]。

铜绿假单胞菌的抑菌作用已被大量表征^[6-8]。铜绿假单胞菌 F13 对玉米小斑病、香蕉枯萎病、小麦赤霉病在内的 8 种真菌病害的抑制率在 60%以上^[8],在本研究中,菌株 HZ15 对 11 种

真菌病害的抑制率也同样大于 60%。菌株 HZ15 对玉米大斑病和烟草黑胫病的抑制率分别为 82.66% 和 78.72%，在培养条件相同下，高于铜绿假单胞菌 2016NX1 的抑制效果(抑制率分别为 47.06% 和 52.43%)^[29]。菌株 HZ15 对 4 种细菌病害均展现出显著的抑菌效果，其中，对白菜软腐病的抑制作用尤为突出。由此可见，菌株 HZ15 对真菌和细菌病害均展现出显著的抑制效果，该研究有效地扩展了铜绿假单胞菌的抑菌谱。胡军华等^[34]从烟草根际分离到铜绿假单胞菌 swu31-2，其在 24 d 时对烟草青枯病(盆栽，先接病后灌根)的平均防效为 39.50%，低于菌株 HZ15 在 30 d 时对烟草青枯病的防效(52.48%)，虽然实验设计上有所不同，但仍能看出二者在平均防效上存在较大差异。

铜绿假单胞菌已被证实对番茄、豆角、绿豆、烟草、咖啡等多种作物具有促生作用^[6-10,35]。此外，铜绿假单胞菌还能产生抑菌成分、增强植物相关酶的活性、促进植物激素产生等，从而增强植物的抗性^[6,9-10]。已有研究表明铜绿假单胞菌能够产生铁载体、纤维素酶、蛋白酶、酯酶、IAA 等，以及具有溶磷等特性，这些拮抗因子在菌株 HZ15 中也被发现^[3,7-8,10]。但不同菌株之间存在差异，例如铜绿假单胞菌 CQ-4 具有固氮特性^[7]，菌株 F13 能够解钾，但不产 IAA^[8]。铁载体、溶磷、蛋白酶、IAA 被认为是促生拮抗因子，具有促进植物生长的作用^[4,8]。大田试验结果表明，菌株 HZ15 能够增加烟草的叶片数和最大叶面积。相关研究指出，铜绿假单胞菌除产生促生拮抗因子促进生长外，还能显著增加烟草(K326)根部酶活性(超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶)，并降低烟草和土壤中的总铅含量^[35]。

红火蚁被认为是全球最具危害性的百种入侵生物之一，对农业生产和人类健康构成重大

威胁^[36]。铜绿假单胞菌 HZ15 的滤液杀红火蚁活性强于灭菌上清液，这表明该菌株可能通过产生有毒化合物和蛋白质共同作用于红火蚁，导致其死亡^[37]。Chin 等^[37]的研究发现铜绿假单胞菌在防治白蚁方面也具有防治效果。因此，推测菌株 HZ15 可能具有防治白蚁的潜在能力，值得进一步研究和开发。

线虫是一种多样化的生物，广泛存在于自然界，其中根结线虫是世界性的土传病害，其种类繁多、危害程度大，给农业造成严重损失^[1,9]。研究表明，铜绿假单胞菌对番茄、咖啡、香蕉、秋葵等线虫具有杀虫活性，展现出潜在的生物防治应用价值^[9,12]。铜绿假单胞菌主要通过产生脓青素、鼠李糖脂、生物膜和氰化氢等毒力因子，以及蛋白酶、几丁质酶等杀死并消解线虫，菌株 HZ15 的菌液对秀丽隐杆线虫的杀虫活性最强，显著高于滤液和灭菌上清液，猜测菌株能够寄生在线虫体内，从内部杀死线虫，导致其杀虫活性较强^[1,12,33]。

杂草与农作物争夺空间和养分等，严重影响作物的产量和质量，适当的杂草控制措施能够获得较大回报，微生物控制杂草是一种公认的杂草管理策略^[16,38]。铜绿假单胞菌 HZ15 的菌液(1×10^8 CFU/mL)对黑麦草的萌发抑制率达 63.80%，并且显著降低了黑麦草的根长、茎长和鲜重($P < 0.05$)，与 Lawrance 等^[16]和 Lakshmi 等^[17]研究的铜绿假单胞菌对杂草的抑制效果相同。LB 也表现出一定的抑制杂草活性，可能与其高盐环境有关，菌株 HZ15 处理的结果与 LB 同样显著，这表明 HZ15 可能含有特定的代谢产物或活性成分，对杂草具有更强的抑制作用。相关研究表明，铜绿假单胞菌产生的氰化物能够抑制杂草生长^[17]。此外，其次生代谢物，如 2-(羟甲基)苯酚、喹啉类化合物及其衍生物同样具有除草活性^[15-16]。Lakshmi 等^[17]研究表明，铜

绿假单胞菌对作物种子的萌发和生长同样具有抑制作用,但其显著低于杂草种子。当菌液作用于种子时,除草活性成分能够抑制其萌发和生长,而将菌液直接灌入作物根部则能发挥其促生作用^[4,6,16-17]。因此,作物种子应避免与铜绿假单胞菌菌液接触,以免破坏种子。

4 结论

铜绿假单胞菌 HZ15 具有广谱且较强的抗生素抗性,能够产生铁载体、纤维素酶、蛋白酶、IAA 等生防因子。其具有抑制植物病害、促进植物生长、杀红火蚁、杀线虫、抑制黑麦草生长的生物活性,在农业生物防治领域具有广阔的应用前景,尤其是在开发新型、环保、高效的生物农药方面。未来研究可进一步探索菌株 HZ15 的详细作用机制、优化其生产和应用工艺,以及评估其在不同作物和环境条件下的防治效果和生态安全性。

REFERENCES

- [1] AMBREETHA S, BALACHANDAR D. Pathogenesis of plant-associated *Pseudomonas aeruginosa* in *Caenorhabditis elegans* model[J]. BMC Microbiology, 2022, 22(1): 269.
- [2] AMBREETHA S, MARIMUTHU P, MATHEE K, BALACHANDAR D. Rhizospheric and endophytic *Pseudomonas aeruginosa* in edible vegetable plants share molecular and metabolic traits with clinical isolates[J]. Journal of Applied Microbiology, 2022, 132(4): 3226-3248.
- [3] GHADAMGAHI F, TARIGHI S, TAHERI P, SARIPELLA GV, ANZALONE A, KALYANDURG PB, CATARA V, ORTIZ R, VETUKURI RR. Plant growth-promoting activity of *Pseudomonas aeruginosa* FG106 and its ability to act as a biocontrol agent against potato, tomato and taro pathogens[J]. Biology, 2022, 11(1): 140.
- [4] CHOPRA A, BOBATE S, RAHI P, BANPURKAR A, MAZUMDER PB, SATPUTE S. *Pseudomonas aeruginosa* RTE4: a tea rhizobacterium with potential for plant growth promotion and biosurfactant production[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2020, 8: 861.
- [5] ZHOU L, JIANG HX, SUN S, YANG DD, JIN KM, ZHANG W, HE YW. Biotechnological potential of a rhizosphere *Pseudomonas aeruginosa* strain producing phenazine-1-carboxylic acid and phenazine-1-carboxamide[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2016, 32(3): 50.
- [6] HARIPRASAD P, CHANDRASHEKAR S, BRIJESH SINGH S, NIRANJANA SR. Mechanisms of plant growth promotion and disease suppression by *Pseudomonas aeruginosa* strain 2apa[J]. Journal of Basic Microbiology, 2014, 54(8): 792-801.
- [7] WANG XY, ZHOU XN, CAI ZB, GUO L, CHEN XL, CHEN X, LIU JY, FENG MF, QIU YW, ZHANG Y, WANG AX. A biocontrol strain of *Pseudomonas aeruginosa* CQ-40 promote growth and control *Botrytis cinerea* in tomato[J]. Pathogens, 2020, 10(1): 22.
- [8] 梁卫驱, 胡珊, 黄皓, 郑伟才, 喻孟君, 陈彦, 陈淑慰, 徐匆, 罗华建, 刘孝龙. 植物根际促生菌 F13 的筛选、鉴定及对豆角促生、抗病的效果[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2024, 63(2): 150-159.
LIANG WQ, HU S, HUANG H, ZHENG WC, YU MJ, CHEN Y, CHEN SW, XU C, LUO HJ, LIU XL. Screening and identification of plant growth-promoting rhizobacteria F13 and its effect on growth promotion and disease resistance of cowpea[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2024, 63(2): 150-159 (in Chinese).
- [9] NGUYEN DN, WANG SL, NGUYEN AD, DOAN MD, TRAN DM, NGUYEN TH, NGO VA, DOAN CT, TRAN TN, DO VC, NGUYEN VB. Potential application of rhizobacteria isolated from the central highland of Vietnam as an effective biocontrol agent of robusta coffee nematodes and as a bio-fertilizer[J]. Agronomy, 2021, 11(9): 1887.
- [10] UZMA M, IQBAL A, HASNAIN S. Drought tolerance induction and growth promotion by indole acetic acid producing *Pseudomonas aeruginosa* in *Vigna Radiata*[J]. PLoS One, 2022, 17(2): e0262932.
- [11] 汪敦飞, 郑新宇, 肖清铁, 王微, 林瑞余. 铜绿假单胞菌对镉胁迫苗期水稻根系活力及叶片生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2767-2774.
WANG DF, ZHENG XY, XIAO QT, WANG W, LIN RY. Effects of *Pseudomonas aeruginosa* on root activity and leaf physiological characteristics in rice (*Oryza sativa* L.) seedling under cadmium stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(8): 2767-2774 (in Chinese).
- [12] 贺丽娜, 冯源, 石慧敏, 叶建仁. 具有杀线活性马尾松内生细菌的筛选与鉴定[J]. 生物技术通报, 2022, 38(8): 159-166.
HE LN, FENG Y, SHI HM, YE JR. Screening and identification of endophytic bacteria with nematicidal activity against *Bursaphelenchus xylophilus* in *Pinus massoniana*[J]. Biotechnology Bulletin, 2022, 38(8): 159-166 (in Chinese).
- [13] BODYKEVICH G, de LEON MA, LI S, TOM K. Cloning *chiC* from insecticidal *Pseudomonas aeruginosa* PAO1[J]. Undergraduate Journal of Experimental Microbiology and Immunology, 2022: 27.
- [14] 牛洪涛, 郭慧芳, 李永腾, 刘宝生. 蚜虫病原细菌的分离鉴定及其对褐飞虱的杀虫活性初探[J]. 农药学报, 2015, 17(5): 538-543.
NIU HT, GUO HF, LI YT, LIU BS. Isolation and

- identification of an entomopathogenic bacterium from aphids and preliminary study of its efficacy against *Nilaparvata lugens*[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2015, 17(5): 538-543 (in Chinese).
- [15] ADETUNJI CO, OLOKE JK, BELLO OM, PRADEEP M, JOLLY RS. Isolation, structural elucidation and bioherbicidal activity of an eco-friendly bioactive 2-(hydroxymethyl) phenol, from *Pseudomonas aeruginosa* (C1501) and its ecotoxicological evaluation on soil[J]. Environmental Technology & Innovation, 2019, 13: 304-317.
- [16] LAWRENCE S, VARGHESE S, VARGHESE EM, ASOK AK, JISHA M S. Quinoline derivatives producing *Pseudomonas aeruginosa* H6 as an efficient bioherbicide for weed management[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2019, 18: 101096.
- [17] LAKSHMI V, KUMARI S, SINGH A, PRABHA C. Isolation and characterization of deleterious *Pseudomonas aeruginosa* KC1 from rhizospheric soils and its interaction with weed seedlings[J]. Journal of King Saud University - Science, 2015, 27(2): 113-119.
- [18] WU T, XU J, XIE WJ, YAO ZG, YANG HJ, SUN CL, LI XB. *Pseudomonas aeruginosa* L10: a hydrocarbon-degrading, biosurfactant-producing, and plant-growth-promoting endophytic bacterium isolated from a reed (*Phragmites australis*)[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1087.
- [19] 曾舒泉, 钮徐融, 魏聪聪, 何明川, 兰明先, 谢永辉, 王志江, 詹筱国, 吴国星, 金红岗. 烟草黑胥病拮抗菌 HZ15 的发酵条件优化[J]. 江西农业学报, 2021, 33(12): 14-20.
- ZENG SQ, NIU XR, WEI CC, HE MC, LAN MX, XIE YH, WANG ZJ, ZHAN YG, WU GX, JIN HG. Optimization of fermentation conditions for antagonistic bacterium HZ15 against tobacco black shank[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2021, 33(12): 14-20 (in Chinese).
- [20] 汤永玉, 吴国星, 朱国渊, 李冉, 施春兰, 王思洁, 杨燕通, 高熹. 附子白绢病菌拮抗菌的鉴定、发酵条件优化及抑菌效果[J]. 微生物学通报, 2023, 50(7): 2892-2906.
- TANG YY, WU GX, ZHU GY, LI R, SHI CL, WANG SJ, YANG YT, GAO X. Identification, fermentation optimization, and effect of a strain against *Sclerotium rolfsii* in *Aconitum carmichaeli*[J]. Microbiology China, 2023, 50(7): 2892-2906 (in Chinese).
- [21] 宁豫昌, 吴祖芳, 龚婷. 贝莱斯芽孢杆菌的生物特性研究[J]. 中国兽医杂志, 2022, 58(7): 25-32.
- NING YC, WU ZF, GONG T. Study on the biological characteristics of *Bacillus velezensis* strain[J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine, 2022, 58(7): 25-32 (in Chinese).
- [22] 施春兰, 吴国星, 赵长飞, 杨燕通, 万丽娜, 田永明, 刘正玲, 谢永辉, 詹筱国, 顾小飞. 球孢白僵菌和爪哇虫草菌对烟草青枯病的防效效果[J]. 微生物学通报, 2024, 51(8): 2974-2985.
- SHI CL, WU GX, ZHAO CF, YANG YT, WAN LN, TIAN YM, LIU ZL, XIE YH, ZHAN YG, GU XF. Control effect of tobacco bacterial wilt by *Beauveria bassiana* and *Cordyceps javanica*[J]. Microbiology China, 2024, 51(8): 2974-2985 (in Chinese).
- [23] 施春兰, 朱国渊, 秦得强, 叶坤浩, 杨丽, 魏朝霞, 曾华兰, 叶鹏盛, 吴国星. 附子白绢病拮抗菌 CZ1 的分离鉴定、发酵条件优化及防效测定[J]. 微生物学通报, 2023, 50(10): 4485-4498.
- SHI CL, ZHU GY, QIN DQ, YE KH, YANG L, WEI ZX, ZENG HL, YE PS, WU GX. An antagonistic bacterial strain CZ1 against southern blight on *Aconitum carmichaelii*: isolation, identification, optimization of fermentation conditions, and evaluation of control effect[J]. Microbiology China, 2023, 50(10): 4485-4498 (in Chinese).
- [24] SHI CL, ZENG SQ, GAO X, HUSSAIN M, HE MC, NIU XR, WEI CC, YANG R, LAN MX, XIE YH, WANG ZJ, WU GX, TANG P. Complete genome sequence analysis of *Bacillus subtilis* MC4-2 strain that against tobacco black shank disease[J]. International Journal of Genomics, 2024, 2024: 8846747.
- [25] 宋健, 刘国祥, 佟英, 王琰琰, 李媛, 张兴伟, 戴培刚. 不同发育时期烟草叶数和叶面积的 QTL 动态分析[J]. 分子植物育种, 2019, 17(18): 6047-6052.
- SONG J, LIU GX, TONG Y, WANG YY, LI Y, ZHANG XW, DAI PG. Dynamic QTL analysis of leaf number and leaf area in tobacco at different developmental stages[J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(18): 6047-6052 (in Chinese).
- [26] 梁钰铃, 潘凤香, 梁铭荣, 陆永跃. 4 种新烟碱类药剂对红火蚁有翅生殖蚁及幼虫的胃毒毒力传递作用[J]. 植物检疫, 2023, 37(5): 6-10.
- LIANG YL, PAN FX, LIANG MR, LU YY. Stomach toxicity transfer of four neonicotinoid chemicals to the alate reproductive ants and larvae of red imported fire ant[J]. Plant Quarantine, 2023, 37(5): 6-10 (in Chinese).
- [27] 张娇, 侯微, 王英平. 红参水提取物对秀丽隐杆线虫寿命的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2024, 46(1): 86-91.
- ZHANG J, HOU W, WANG YP. Effect of red ginseng water extract on senescence index of *Caenorhabditis elegans*[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2024, 46(1): 86-91 (in Chinese).
- [28] MIKULIC-PETKOVSEK M, VEBERIC R, HUDINA M, MISIC E. HPLC-DAD-MS identification and quantification of phenolic components in Japanese knotweed and American pokeweed extracts and their phytotoxic effect on seed germination[J]. Plants, 2022, 11(22): 3053.
- [29] 肖咪云, 孙孟龙, 阮楚晋, 陈寿昆, 刘裕华, 陆祖军. 生防细菌 2016NX1 对病原真菌的抑制及发酵条件优化[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(2): 168-178.
- XIAO MY, SUN ML, RUAN CJ, CHEN SK, LIU YH, LU ZJ. Inhibitory effect of biocontrol bacterium 2016NX1 on plant pathogenic fungi and optimization of fermentation conditions[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2019, 37(2): 168-178 (in Chinese).
- [30] 楚文琢, 彭双强, 廖晓兰, 马文月. 铜绿假单胞菌 SU8 发酵液与乙蒜素混配对草莓灰霉病的防效[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 79-83.

- CHU WZ, PENG SQ, LIAO XL, MA WY. Control effect of *Pseudomonas aeruginosa* SU8 fermentation broth mixed with allicin on strawberry gray mold disease[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(6): 79-83 (in Chinese).
- [31] 蒋海霞, 周莲, 何亚文. 铜绿假单胞菌生防菌株抑菌代谢产物及其生防应用研究进展[J]. 微生物学通报, 2015, 42(7): 1338-1349.
- JIANG HX, ZHOU L, HE YW. Research progress in biocontrol strain *Pseudomonas aeruginosa*: antifungal metabolites and their applications in biocontrol[J]. Microbiology China, 2015, 42(7): 1338-1349 (in Chinese).
- [32] FRESCHI L, VINCENT AT, JEUKENS J, EMOND-RHEAULT JG, KUKAVICA-IBRULJ I, DUPONT MJ, CHARETTE SJ, BOYLE B, LEVESQUE RC. The *Pseudomonas aeruginosa* pan-genome provides new insights on its population structure, horizontal gene transfer, and pathogenicity[J]. Genome Biology and Evolution, 2019, 11(1): 109-120.
- [33] 杨德伟, 施春兰, 曾舒泉, 解紫薇, 秦小萍, 秦得强, 高熹, 顾小飞, 谢永辉, 吴国星. 铜绿假单胞菌 HZ15 全基因组和比较基因组学分析[J]. 南方农业学报, 2024, 55(9): 2653-2664.
- YANG DW, SHI CL, ZENG SQ, XIE ZW, QIN XP, QIN DQ, GAO X, GU XF, XIE YH, WU GX. Whole-genome and comparative genomic analysis of *Pseudomonas aeruginosa* strain HZ15[J]. Journal of Southern Agriculture, 2024, 55(9): 2653-2664 (in Chinese).
- [34] 胡军华, 张伏军, 蓝希钳, 林立鹏, 唐婧, 马淑华, 谢洁, 肖杰, 潘国庆, 周泽扬. 烟草根际细菌铜绿假单胞菌 swu31-2 的定殖能力及其对烟草青枯病的防治作用[J]. 植物保护, 2009, 35(5): 89-94.
- HU JH, ZHANG FJ, LAN XQ, LIN LP, TANG J, MA SH, XIE J, XIAO J, PAN GQ, ZHOU ZY. Analysis of the colonization of tobacco rhizosphere bacterium swu31-2 and its control effect on tobacco bacterial wilt[J]. Plant Protection, 2009, 35(5): 89-94 (in Chinese).
- [35] LI J, ZHENG BF, HU RW, LIU YJ, JING YF, XIAO YH, SUN M, CHEN W, ZHOU QM. *Pseudomonas* species isolated from tobacco seed promote root growth and reduce lead contents in *Nicotiana tabacum* K326[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2019, 65(3): 214-223.
- [36] 农向群, 王广君, 王以燕, 张蕾, 高琼华, 于永浩. 白僵菌和绿僵菌作为防控红火蚁生物农药的潜力及前景[J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(2): 453-461.
- NONG XQ, WANG GJ, WANG YY, ZHANG L, GAO QH, YU YH. Potential and prospect of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* as biological pesticides for the control of red fire ants[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2023, 39(2): 453-461 (in Chinese).
- [37] CHIN KL, H'NG PS, LEE CL, WONG WZ, GO WZ, KHOO PS, LUQMAN AC, ASHAARI Z. Application strategies by selective medium treated with entomopathogenic bacteria *Serratia marcescens* and *Pseudomonas aeruginosa* as potential biocontrol against *Coptotermes curvignathus*[J]. Royal Society Open Science, 2021, 8(4): 201311.
- [38] YANG J, CAO HZ, WANG W, ZHANG LH, DONG JG. Isolation, identification, and herbicidal activity of metabolites produced by *Pseudomonas aeruginosa* CB-4[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(8): 1719-1726.