

贝莱斯芽孢杆菌 BQ 对党参根腐病病原菌抑制效应初探

王馨芳, 张婉霞, 史美玲, 张梓坤, 寇志安, 田永强
(兰州交通大学生物与制药工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 将贝莱斯芽孢杆菌 (*Bacillus velezensis*) BQ 作为最新发现的潜力生防菌。通过平板对峙、孢子萌发、生防机制和离体防治试验检测该菌株对党参根腐病的防治效果。平板对峙试验表明, 贝莱斯芽孢杆菌 BQ 可明显抑制党参根腐病病原菌尖孢镰孢菌 DS 的生长, 菌丝生长抑制率达 50.55%, 对峙区菌丝发生明显形变; 孢子萌发结果表明, 贝莱斯芽孢杆菌 BQ 的代谢产物能有效抑制病原菌 DS 的孢子萌发; 对贝莱斯芽孢杆菌的生防机制进行初探, 贝莱斯芽孢杆菌 BQ 的代谢产物能引起病原菌 DS 的细胞膜通透性增加, 从而导致核酸内容物释放量增加, 细胞破裂至死亡。离体防治结果显示, 贝莱斯芽孢杆菌 BQ 对党参根腐病的治疗效果达到 46.13%, 预防效果达到了 63.62%。可见, 贝莱斯芽孢杆菌 BQ 有防治党参根腐病的潜力, 可作为生物防治剂进行开发。

关键词: 党参; 贝莱斯芽孢杆菌; 根腐病病原菌; 尖孢镰孢菌; 生物防治; 抑制效应

中图分类号: Q939.9; S567 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2024)02-0167-07

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2024.02.013

Evaluation on the Control Effects of *Bacillus velezensis* BQ against *Codonopsis pilosula* Root Rot

WANG Xinfang, ZHANG Wanxia, SHI Meiling, ZHANG Zikun, KOU Zhian, TIAN Yongqiang
(College of Biological and Pharmaceutical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: *Bacillus velezensis* BQ was regarded as the newly discovered potential biocontrol bacteria, and its control effects on root disease of *Codonopsis pilosula* was studied by the dual confrontation test, spore germination, biological control mechanism and in vitro control test. The results of the dual confrontation test showed that *Bacillus velezensis* BQ could obviously inhibit the growth of *Fusarium oxysporum* DS, the mycelium growth inhibition rate reached 50.55%, and the mycelium in the confrontation area was obviously deformed. The results of spores germination showed that the metabolites of *Bacillus velezensis* BQ could effectively inhibit the spores germination of pathogen DS. The metabolites of *Bacillus velezensis* BQ could increase the permeability of cell membrane of pathogenic bacteria DS, which led to the increase of nucleic acid release and cell rupture to death. In vitro control results showed that *Bacillus velezensis* BQ had a therapeutic effect of 46.13% and a preventive effect of 63.62% on *Codonopsis pilosula* root rot. *Bacillus velezensis* BQ has the potential to control *Codonopsis pilosula* root rot and can be developed as a biological control agent.

Key words: *Codonopsis pilosula*; *Bacillus velezensis*; Root rot pathogen; *Fusarium oxysporum*; Biological control; Inhibiting effect

党参 [*Codonopsis pilosula* (Franch) Nannf.] 是桔梗科多年生草本植物, 是中国传统的中药材之一, 党参的根具有滋养脾肺、增强造血功能及免疫力的功效。甘肃是我国党参种植大省, 党参种植面积约占全国的 90%, 已成为部分地区农户的主要收入来源^[1]。然而近年来, 由于连作等原因引起了党参的多种土传病害, 导致党参幼苗存活率不

高^[2]。党参根腐病是由尖孢镰孢菌 (*Fusarium oxysporum*) 引起的最严重的党参土传病害之一, 其孢子可在土壤中存活约 8~10 a^[3]。有研究证实, 尖孢镰孢菌的孢子在根尖分泌物的驱化作用下发育成菌丝^[4-6], 随后尖孢镰孢菌通过分泌产生的细胞壁降解酶 (Cell wall degrading enzymes, CWDEs) 进入根部皮层^[7-8], 接着尖孢镰孢菌定殖在宿主植

收稿日期: 2023-12-14

基金项目: 甘肃省教育厅产业项目(2022CYZC-39); 青海省中央引导地方专项(2023ZY019); 甘肃省重点研发项目(23YFNA0035); 嘉峪关市重点研发项目(22-25)。

作者简介: 王馨芳(1995—), 女, 甘肃临洮人, 硕士, 主要从事生物防治研究工作。Email: wangxf170219@foxmail.com。

通信作者: 田永强(1972—), 男, 甘肃庄浪人, 教授, 主要从事资源微生物研究工作。Email: tianyq@mail.lzjtu.cn。

物体内, 并产生植物毒素来帮助尖孢镰孢菌继续入侵。尖孢镰孢菌的大量生长和繁殖会产生大量化合物, 从而堵塞植物的维管束, 引起植物根系腐烂坏死^[9]。

党参在幼苗阶段易被尖孢镰孢菌侵染, 感染后根部维管束组织发生褐变, 但茎叶部分无明显变化^[10-11]; 随着病害加剧, 植株茎叶部分迅速萎蔫枯萎, 直至植株死亡, 根部往往腐烂直至死亡^[10, 12-13]。党参根腐病发病迅速, 难以控制, 能造成党参减产 50% 以上, 经济损失严重^[1-2]。党参根腐病感染初期较难发现, 一旦发生后, 除灌根外的其他传统方法达不到杀灭尖孢镰孢菌的目的。而化学农药的大量使用易导致土壤污染和作物的农药残留积累, 对中药材的生产、质量和安全产生负面影响^[14-15]。因此, 党参生产上迫切需要一种环境上可接受、可靠有效的方法来防治党参根腐病。

在可持续农业中, 微生物生物防治剂具有代替化学农药来防治植物病害的潜力, 能有效抑制植物病原菌, 并促进植物生长^[16-17]。大多数用作生物防治剂的细菌菌株均属于芽孢杆菌^[18]。芽孢杆菌的抗真菌活性与其抗真菌次级代谢产物有关, 这些成分能抑制病原菌的繁殖、菌丝形变或破裂, 或引起其核酸内容物的释放量增加, 从而导致细胞内环境失衡甚至死亡^[19-21]。贝莱斯芽孢杆菌 (*Bacillus velezensis*) 属芽孢杆菌属, 其在繁殖与生长阶段能够分泌产生许多抗菌成分, 且表现出广谱、高效的抗菌活性。贝莱斯芽孢杆菌的次级代谢产物含有多种蛋白酶、脂肽类抗生素等, 而脂肽类抗生素是其最重要的抗菌物质^[22-25]。有研究证明, 贝莱斯芽孢杆菌对尖孢镰孢菌古巴专化型有较好的防治效果^[26]。将贝莱斯芽孢杆菌的产物进行粗提后发现, 其粗提物中含有抗菌脂肽类物质为 Bacillomycin D 及 Surfactin 等多个组分, 能有效抑制尖孢镰孢菌的生长^[27]。此外, 贝莱斯芽孢杆菌对番茄灰斑病、小麦纹枯病等多种植物病害均有较好的防治效果^[28-29]。

本研究利用实验室前期分离纯化得到的 1 株贝莱斯芽孢杆菌菌株 BQ 进行研究, 初步探究了其对党参根腐病抗菌机理和防治效果, 以期贝莱斯芽孢杆菌菌株 BQ 应用于防治党参根腐病提供初步的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试菌种 供试菌株为贝莱斯芽孢杆菌 BQ, 来自兰州交通大学生物农药工程中心, 保藏号为 ACCC61708。通过对菌株 BQ 基因分析, 证实菌株 BQ 为芽孢杆菌属贝莱斯芽孢杆菌 (*Bacillus velezensis*), 对党参根腐病病原菌具有较强抑制作用。供试尖孢镰孢菌菌株 DS 自党参根腐病发病植株的根部分离筛选所得, 对病原菌分离并通过过真菌形态学和 16srDNA 分子鉴定, 最终确定菌株 DS 为尖孢镰孢菌, 保存于兰州交通大学生物农药工程中心。

1.1.2 供试植株 一年生白条党参品种渭党 2 号, 来自甘肃省渭源县党参种植基地。

1.1.3 供试培养基 LB 培养基 (固): 蛋白胨 10 g/L、酵母浸粉 5 g/L、NaCl 10 g/L、琼脂 20 g/L, pH 自然。LB 培养基 (液): 蛋白胨 10 g/L、酵母浸粉 5 g/L、NaCl 10 g/L, pH 自然。

马铃薯葡萄糖琼脂培养基 (Potato dextrose agar, PDA): 马铃薯 200 g/L、葡萄糖 20 g/L、琼脂 20 g/L, pH 自然。

1.2 实验方法

1.2.1 菌种培养 菌株 BQ 采用在 LB 固体平板上划线的方式接种传代。将菌株 BQ 接种至 LB 液体培养基, 30 °C 下以 180 rpm/min 培养 36 ~ 48 h 来制备种子液。将种子液以 V : V=1 : 10 接种至 LB 液体培养基, 在 30 °C 下以 180 rpm/min 培养 36 ~ 48 h, 获得菌株 BQ 的发酵液。试验之前, 需测定发酵液的细菌数并用 LB 液体培养基调节至 1×10^9 CFU/mL。将病原菌 DS 的菌饼 (直径为 5 mm) 接种至 PDA 培养平板的中心, 在 25 °C 条件下暗培养 7 d 进行繁殖。在菌落边缘取 5 个菌饼 (直径为 5 mm) 接种至 PDA 培养基, 在 25 °C 条件下以 180 rpm/min 暗培养 48 h, 获得病原菌 DS 的发酵液。试验之前, 也需测定发酵液的孢子数并用 PDB 培养基调节至 1×10^5 CFU/mL。

1.2.2 平板对峙 在病原菌 DS 的平板边缘取菌饼 (直径为 5 mm) 接种至 PDA 平板中心, 挑取菌株 BQ 的菌落, 在病原菌 DS 菌饼两侧距离平板边缘约 1 cm 的位置划线^[30]。以仅接种病原菌 DS 菌饼的平板为对照, 每处理重复 3 次。所有平板置于

28 ℃下进行暗培养, 直至对照组的 DS 菌丝生长到平板边缘。在光学显微镜下观察对峙区的病原菌菌丝。

1.2.3 孢子抑制 将菌株 BQ 的发酵液以 5 000 rpm/min 离心 20 min 后取上清液, 将上清液用无菌滤膜(0.45 μm)过滤, 获得菌株 BQ 的无菌上清滤液。将其无菌上清滤液用 LB 液体培养基稀释至浓度 0.5%、1.0%、5.0%、50.0%、100.0% (V/V)。将病原菌 DS 的发酵液和 BQ 菌株的无菌上清液滤液以 V : V=1 : 1 混合 [无菌上清滤液的终浓度分别为 0.25%、0.50%、1.00%、5.00%、50.00% (V/V)], 并取 2 mL 加入 24 孔板的菌株中, 在 25 ℃条件下培养 8 h。以空白 LB 液体培养基代替无菌上清滤液为对照(CK)。每处理组重复 3 次。在光学显微镜下观察 DS 的孢子萌发情况, 并计算孢子萌发率和抑制率^[31-32]。

$$\text{孢子萌发率}(\%) = \frac{G1-G2}{G1} \times 100\%$$

式中, G1 是每处理组中观察得到的孢子总数, G2 是每处理组中观察到的萌发的孢子数。

$$\text{抑制率}(\%) = \frac{C1-C2}{C1} \times 100\%$$

式中, C1 是空白对照组的孢子萌发率, C2 是各个处理组的孢子萌发率。

1.2.4 根腐病 病原菌细胞膜相对电导率和核酸内容物释放将病原菌 DS 的发酵液用 2 层无菌纱布过滤, 得到 DS 的菌丝体。用 10 mL 无菌的磷酸盐缓冲液(PBS, 100 mmol/L, pH 7.2)将菌丝体洗涤 3 次, 之后将菌丝体置于 100 mL 的无菌 PBS 中, 将无菌上清滤液以 V : V=1 : 10 接种至含菌丝体的 PBS 中, 以含有等量 LB 液体培养基的 PBS 用作空白对照。每个处理组在 28 ℃下以 180 rpm/min 在黑暗中培养, 并分别在 0、3、6、9、12、24 h 后测定每个组的细胞外电导率(用梅特勒托利多电导率测定仪测定)和 260 nm 处的吸光度(德国斯派克光谱仪测定)^[33-34]。每个处理重复 3 次。将培养 24 h 后获得的各处理组的病原菌 DS 菌丝在扫描电镜下观察。

1.2.5 防治效果 评价选取粗细大小一致的一年生党参根, 清洗后分别用 75%酒精消毒 15 s, 用 30%次氯酸钠溶液消毒 1 min, 再用无菌水清洗 3 次。为测定菌株 BQ 对党参根腐病的治疗效果, 在

消毒后的党参根上进行针刺, 并在每个伤口接种病原菌 DS 的菌饼(直径 5 mm), 使带有菌丝的一面紧贴伤口^[35]。48 h 后, 取 5 mL 菌株 BQ 的发酵液均匀地喷洒在党参根表面。为测定菌株 BQ 对党参根腐病的预防效果, 将党参根针刺后, 先将 5 mL 菌株 BQ 的发酵液喷洒在党参根系表面, 48 h 后再接种病原菌 DS 的菌饼。以只接种 LB 液体培养基为空白对照, 以只接种病原菌 DS 菌饼的处理为阴性对照。各处理组内的党参均置于铺有无菌湿滤纸的平板(直径 18 cm)内, 在 25 ℃黑暗中培养。培养 7 d 后, 观测党参根系的发病情况, 计算发病率、病情指数和防治效果^[36-37]。每个处理组重复 3 次, 每个处理组内包括 10 条一年生党参根。

党参根腐病分级标准为: 0 级, 根部无病斑; 1 级, 根系患病面积占 1%~10%, 根系剖面无明显变化; 2 级, 根部发病面积占 11%~20%, 根部剖面开始变褐; 3 级, 根部发病面积占 20%~30%, 剖面变成褐色; 4 级, 根部病变面积占 30%~40%, 病变变软, 整个根部变成褐色至黑褐色, 甚至长出白色菌丝; 5 级, 根部发病面积占 40%~50%, 整个根部开始变软, 菌丝覆盖面积扩大, 根部变成黑褐色; 6 级, 50%~60%面积感染, 整个根部开始软化腐烂, 菌丝大面积覆盖; 7 级, 根部发病面积占 60%以上, 根部腐烂, 出现大量水渍^[38]。

$$\text{发病率} = \frac{D1}{D2} \times 100\%$$

式中, D1 是发病党参根系的数量, D2 是调查的党参根系总数。

$$\text{病情指数} = \frac{\sum(E1 \times E2)}{E3 \times E4} \times 100$$

式中, E1 是病害各个级别的发病党参根系总数, E2 是病害相级别数值, E3 是调查的党参根系总数, E4 是最高级数值。

$$\text{防治效果} = \frac{F1-F2}{F1} \times 100\%$$

式中, F1 是阴性对照的病情指数, F2 是处理组的病情指数。

2 结果与分析

2.1 平板对峙

菌株 BQ 对病原菌 DS 的对峙效果如封三图 1 所示, 菌株 BQ 可明显抑制病原菌 DS 的生长。在

培养 7 d 后, 菌株 BQ 对病原菌 DS 菌丝的抑制率达到 50.55%。在光学显微镜下观察菌丝结构可知, 对照组的病原菌 DS 菌丝呈线状平滑生长, 而处理组的病原菌 DS 菌丝发生了明显的形变, 出现了出现了菌丝葫芦状膨大、节间缩小, 以及出现了菌丝横断。表明菌株 BQ 对病原菌 DS 的生长状态具有一定影响, 具有较强的生防潜力。

2.2 孢子萌发

菌株 BQ 对病原菌 DS 的孢子萌发抑制效果如封三图 2 所示。与对照组相比, 含有无菌上清液的培养基能显著抑制病原菌 DS 的孢子萌发。随着上清液添加比例的增加, 菌株 BQ 对 DS 分生孢子的抑制作用越来越强。当上清液添加量为 50.00% (v/v) 时, 其抑制效果最强, 孢子萌发抑制率达到 $(95.85 \pm 0.31)\%$; 当上清液添加量降至 1.00% 时, 抑制率仍高达 $(41.11 \pm 0.18)\%$ (表 1)。表明菌株 BQ 的代谢产物中含有的抗菌成分能显著抑制病原菌 DS 的孢子萌发, 有作为生物防治剂进行开发的潜力。

表 1 贝莱斯芽孢杆菌 BQ 对尖孢镰刀菌 DS 的孢子萌发抑制情况

上清液添加量	孢子萌发率 /%	抑制率 /%
0(CK)	95.34±0.31	0
50.00%	3.95±0.07	95.85±0.31
5.00%	29.33±0.12	69.24±0.16
1.00%	56.14±0.15	41.11±0.18
0.50%	75.34±0.24	20.98±0.35
0.25%	88.62±0.27	7.05±0.13

2.3 细胞膜电导率和核酸内容物释放量

以菌株 BQ 的无菌上清液滤液对病原菌 DS 的

细胞膜相对电导率及核酸内容物释放量来探究其对病原菌 DS 生长状态的影响, 结果如图 3 所示, 与对照组相比, 菌株 BQ 的无菌上清液滤液能使病原菌 DS 的细胞膜相对电导率和核酸内容物含量显示出显著的上升趋势 ($P < 0.05$)。这表明菌株 BQ 的发酵产物能破坏病原菌 DS 的细胞膜, 从而使病原菌 DS 细胞膜通透性增加, 以及核酸内容物释放加剧, 并引起细胞破裂至死亡。

此外, 扫描电镜的结果显示(封三图4), 菌株 BQ 的无菌上清液滤液能显著改变病原菌 DS 菌丝的形态, 能引起菌丝发生严重膨胀、起皱, 并塌陷和断裂。相比之下, 对照组中的菌丝表现为饱满、规则且光滑, 并正常生长的状态。

综上所述, 菌株 BQ 的发酵产物能大大影响病原菌 DS 的细胞膜通透性, 从而影响菌体的生长状态, 导致病原菌渗透压平衡紊乱, 最终导致菌体破裂至死亡。

2.4 对党参根腐病的防治效果

以一年生健康党参离体根为材料, 研究了贝莱斯芽孢杆菌菌株 BQ 对党参根腐病的防治效果, 各处理组除空白对照组外, 发病率均为 100.00% (封三图 5)。与空白对照组相比, 阴性对照组表现出典型的党参根腐病的病理症状, 其中根部腐烂并变成褐色, 生长白色菌丝, 7 d 后维管束变褐色, 病情指数高达 70.73 ± 1.07 。而与阴性对照组相比, 2 个处理组内的菌株 BQ 均可以明显降低病害发生的严重程度。其中, 治疗组 BQ 菌株对党参根腐病的防治效果为 46.13%, 党参根部表面病变较轻, 但维管束内发生明显褐变, 病情指数为

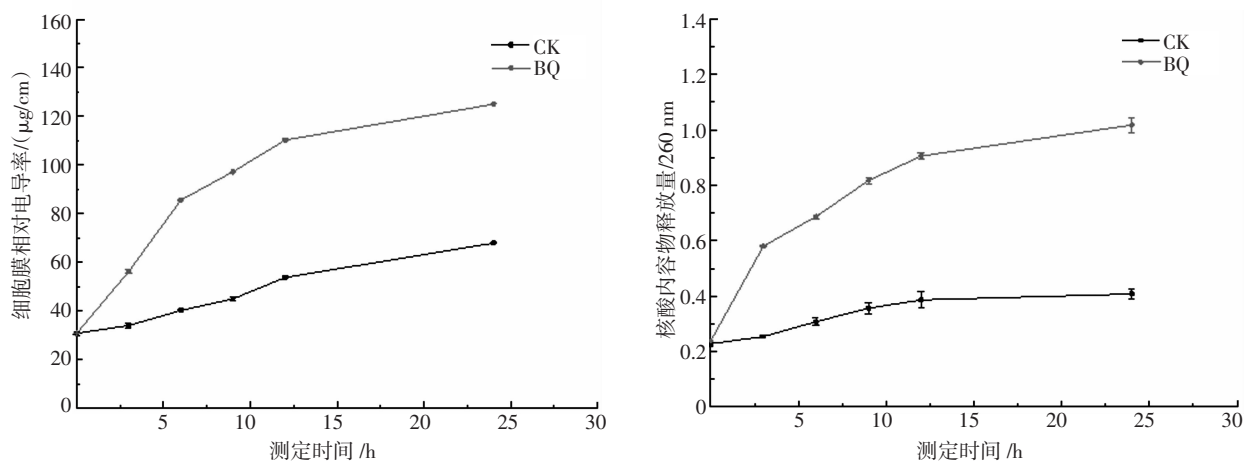


图 3 对病原菌 DS 细胞膜相对电导率(左)及核酸内容物释放量(右)的测定

38.10 ± 0.87; 在预防组中, BQ 菌株对党参根腐病的防治效果为 63.62%, 党参根部表面病斑部位较少, 维管束的褐变程度较轻, 病情指数较低, 仅为 25.73 ± 0.45(表 2)。可知菌株 BQ 对党参根腐病有较好的防治效果, 且预防效果强于治疗效果。

表 2 贝莱斯芽孢杆菌 BQ 对党参根腐病的防治效果

处理	发病率 /%	病情 指数	防治效果 /%
空白对照	0	0	
阴性对照	100.00	70.73±1.07	
菌株 BQ 治疗	100.00	38.10±0.87	46.13
菌株 BQ 预防	100.00	25.73±0.45	63.62

3 讨论与结论

本研究发现, 贝莱斯芽孢杆菌 BQ 对引起党参根腐病的尖孢镰孢菌 DS 菌丝生长和孢子萌发均具有明显的抑制作用。在平板对峙实验中, 对峙区的尖孢镰孢菌 DS 菌丝发生了较大的形变, 菌丝生长抑制率达 50.55%, 出现了菌丝葫芦状膨大、节间缩小, 以及出现了菌丝横断。扫描电镜下更是观察到了菌丝变粗及内容物泄漏, 以及菌丝横断。以上结果表明贝莱斯芽孢杆菌 BQ 及其代谢产物能对尖孢镰孢菌 DS 的生长状态造成较大影响, 其次级代谢产物中含有能破坏菌丝生长的成分。此外, 随着菌株 BQ 无菌上清液比例的增加, 对病原菌 DS 的孢子萌发表现出较强的抑制作用, 这表明菌株 BQ 分泌出了能有效抑制病原菌 DS 抗真菌物质的代谢产物。

生防菌的抗真菌活性与其能引起病原菌分生孢子结构破坏和细胞膜破裂的抗真菌次级代谢产物有关^[21, 39-40]。结合对引起党参根腐病的病原菌尖孢镰孢菌 DS 菌丝的相对电导率和核酸内容物释放量的测定, 贝莱斯芽孢杆菌菌株 BQ 对病原菌尖孢镰孢菌 DS 细胞膜通透性及核酸内容物释放量均有较大影响, 从而导致细胞渗透压紊乱。综合以上结果可知, 无菌上清液滤液破坏了尖孢镰孢菌的细胞膜完整性, 导致菌丝通透性增加和核酸内容物渗漏, 从而导致细胞内环境失衡甚至死亡。这些结果与先前研究的结论一致, 即细胞质渗漏是由细胞质膜的渗透性增加引起的^[19-20, 41]。

此外, 从对党参根腐病离体防治的防治效果来看, 对党参根腐病的治疗效果达到 46.13%, 预防效果达到了 63.62%, 可见贝莱斯芽孢杆菌菌株

BQ 有着良好的治疗效果和预防效果, 且预防效果优于治疗效果。有研究认为, 拮抗菌对病原菌的保护作用优于治疗作用, 这意味着先进的接种细菌具有强大的定殖能力^[42], 但这些推测有待进一步验证。

综上所述, 贝莱斯芽孢杆菌 BQ 对党参根腐病具有较好的防治效果, 对引起党参根腐病的病原菌尖孢镰孢菌 DS 有抑制作用, 能有效抑制其菌丝生长及孢子萌发。此外, 通过对其抗菌机理初步探索发现, 贝莱斯芽孢杆菌 BQ 的次级代谢产物含有的抗菌成分, 能增加尖孢镰孢菌 DS 的菌体细胞膜通透性和加剧核酸内容物释放, 并引起细胞破裂至死亡。可见, 贝莱斯芽孢杆菌 BQ 有防治党参根腐病的潜力, 可作为生物防治剂进行开发加以利用。

参考文献:

- [1] 李成义, 刘书斌, 李 硕, 等. 甘肃党参栽培现状调查分析[J]. 中国现代中药, 2016, 18(1): 102-105.
- [2] 孙新荣, 仲彩萍, 张西梅, 等. 甘肃定西地区党参根腐病原鉴定与防治研究[J]. 植物保护, 2020, 46(5): 290-297.
- [3] 王飞燕. 香蕉尖孢镰孢菌 *fpd1* 基因敲除与功能研究[D]. 海口: 海南大学, 2015.
- [4] OSPINA-GIRALDO M D, MULLINS E, KANG S. Loss of function of the *Fusarium oxysporum* SNF1 gene reduces virulence on cabbage and *Arabidopsis*[J]. Current Genetics, 2003, 44(1): 49-57.
- [5] DI PIETRO A, GARCÍA-MACEIRA F I, MÉGLECZ E, et al. A MAP kinase of the vascular wilt fungus *Fusarium oxysporum* is essential for root penetration and pathogenesis: *Fusarium* MAPK is essential for pathogenesis [J]. Molecular Microbiology, 2004, 39: 1140-1152.
- [6] MARRE M T, VERGANI P, ALBERGONI F G. Relationship between fusaric acid uptake and its binding to cell structures by leaves of *Egeria densa* and its toxic effects on membrane permeability and respiration[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 1993, 42(2): 141-157.
- [7] GORDON T R. *Fusarium oxysporum* and the *Fusarium* Wilt Syndrome[J]. Annual Review of Phytopathology, 2017, 55(1): 23-39.
- [8] RODRÍGUEZ-GÁLVEZ E, MENDGEN K. The infection process of *Fusarium oxysporum* in cotton root tips[J]. Protoplasma, 1995, 189(1): 61-72.

- [9] THATCHER L F, GARDINER D M, KAZAN K, et al. A highly conserved effector in *Fusarium oxysporum* is required for full virulence on Arabidopsis[J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2012, 25(2): 180-190.
- [10] 孙新荣, 张西梅, 高薇薇, 等. 甘肃党参根腐病发生危害与防治[J]. *陕西农业科学*, 2019, 65(12): 90-91.
- [11] CORRELL J C. The relationship between formae speciales, race, and vegetative compatibility groups in *Fusarium oxysporum*[J]. *Phytopathology*, 1991, 9(81): 1061-1064.
- [12] MARTINS O M, TAKATSU A, DOENÇAS DE HORTALIÇAS NO AMAPÁ[J]. *Fitopatol.bras*, 1990, 15(4): 357-358.
- [13] 李聚奎. 园林树木根腐病发生及防治对策研究[J]. *智慧农业导刊*, 2021, 1(16): 54-56.
- [14] MALIK Z, AHMAD M, ABASSI G H, et al. Agrochemicals and soil microbes: interaction for soil health[J]. *Xenobiotics in the Soil Environment: Monitoring, Toxicity and Management*, 2017, 49: 139-152.
- [15] DHANANJAYAN V, JAYANTHI P, JAYAKUMAR S, et al. Agrochemicals impact on ecosystem and bio-monitoring[J]. *Resources use efficiency in agriculture*, 2020, 7(35): 349-388.
- [16] PANTH M, HASSLER S C, BAYSAL-GUREL F. Methods for management of soilborne diseases in crop production[J]. *Agriculture*, 2020, 10(1): 16.
- [17] BROTMAN Y, LISEC J, MERET M, et al. Transcript and metabolite analysis of the Trichoderma-induced systemic resistance response to *Pseudomonas syringae* in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Microbiology*, 2012, 158(1): 139-146.
- [18] FRAVEL D R. Commercialization and implementation of biocontrol[J]. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 2005, 43: 337-359.
- [19] WANG J, ZHANG J, MA J, et al. The major component of cinnamon oil as a natural substitute against *Fusarium solani* on *Astragalus membranaceus*[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2022, 132(4): 3125-3141.
- [20] JI D, CHEN T, MA D, et al. Inhibitory effects of methyl thujate on mycelial growth of *Botrytis cinerea* and Possible mechanisms[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 142: 46-54.
- [21] JANGIR M, PATHAK R, SHARMA S, et al. Biocontrol mechanisms of *Bacillus sp.*, isolated from tomato rhizosphere, against *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici*[J]. *Biological Control*, 2018, 123: 60-70.
- [22] X. H C, A. K, R. S, et al. Genome analysis of *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 reveals its potential for biocontrol of plant pathogens[J]. *Journal of Biotechnology*, 2009, 140(1): 27-37.
- [23] ZHAO J, LI Y, ZHANG C, et al. Genome shuffling of *Bacillus amyloliquefaciens* for improving antimicrobial lipopeptide production and an analysis of relative gene expression using FQ RT-PCR[J]. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*, 2012, 39(6): 889-896.
- [24] ADENIJI A A, Aremu O S, Babalola O O. Selecting lipopeptide-producing *Fusarium*: uppressing *Bacillus spp.*: Metabolomic and genomic probing of *Bacillus velezensis* NWUMFkBS10.5[J]. *MicrobiologyOpen*, 2019, 8(6): e00742.
- [25] 任建雯, 罗云艳, 冯印印, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 RJW-5-5 的分离鉴定及细菌素、抗菌肽基因簇挖掘[J]. *微生物学通报*, 2021, 48(3): 742-754.
- [26] 曹 禹. 芽孢杆菌 Y6 和 F7 防治番茄青枯病和香蕉枯萎病的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [27] 郭 蔓, 张朝正, 赵 华. 贝莱斯芽孢杆菌抑尖孢镰刀菌脂肽类物质的鉴定[J]. *中国酿造*, 2021, 40(12): 35-39.
- [28] 索雅丽, 李术娜, 李红亚, 等. 番茄灰霉病菌颖颖菌株的筛选及功能基因的分析[J]. *中国植保导刊*, 2010, 30(8): 7-10.
- [29] 夏明聪, 邓晓旭, 齐红志, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 YB-145 对小麦纹枯病的防治效果及促生作用[J]. *河南农业科学*, 2021, 50(10): 76-83.
- [30] CHEN L, HENG J, QIN S, et al. A comprehensive understanding of the biocontrol potential of *Bacillus velezensis* LM2303 against *Fusarium head blight*[J]. *PloS one*, 2018, 13(6): e0198560.
- [31] SIMONETTI E, ROBERTS I N, MONTECCHIA M S, et al. A novel *Burkholderia ambifaria* strain able to degrade the mycotoxin fusaric acid and to inhibit *Fusarium spp.* growth[J]. *Microbiological research*, 2018, 206: 50-59.
- [32] PINTO C A, MOREIRA S A, FIDALGO L G, et al. Effects of high pressure processing on fungi spores: Factors affecting spore germination and inactivation and impact on ultrastructure[J]. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 2020, 19(2): 553-573.
- [33] ZHAO Z, SHANG X, LAWOE R K, et al. Anti-phy-

- topathogenic activity and the possible mechanisms of action of isoquinoline alkaloid sanguinarine[J]. *Pesticide biochemistry and physiology*, 2019, 159: 51–58.
- [34] WANG J, ZHANG J, MA J, et al. The major component of cinnamon oil as a natural substitute against *Fusarium solani* on *Astragalus membranaceus*[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2022, 132(4): 3125–3141.
- [35] SAUDE C, HURTADO-GONZALES O P, LAMOUR K H, et al. Occurrence and characterization of a Phytophthora sp. pathogenic to asparagus (*Asparagus officinalis*) in Michigan[J]. *Phytopathology*, 2008, 98(10): 1075–1083.
- [36] SINGH V, SHARMA N, SINGH S. A review of imaging techniques for plant disease detection[J]. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2020, 4: 229–242.
- [37] XIE G, CUI H, DONG Y, et al. Crop rotation and intercropping with marigold are effective for root-knot nematode (*Meloidogyne* sp.) control in angelica (*Angelica sinensis*) cultivation[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2016, 97(1): 26–31.
- [38] 张建强. 党参根腐病生防菌的促生防病效果及机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [39] XU W, WANG K, WANG H, et al. Evaluation of the biocontrol potential of *Bacillus* sp. WB against *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*[J]. *Biological Control*, 2020, 147: 104288.
- [40] WU Y, ZHOU J, LI C, et al. Antifungal and plant growth promotion activity of volatile organic compounds produced by *Bacillus amyloliquefaciens*[J]. *Microbiology-Open*, 2019, 8(8): e813.
- [41] LEWIS J A, ROBERTS D P, HOLLENBECK M D. Induction of cytoplasmic leakage from *Rhizoctonia solani* hyphae by *Gliocladium virens* and partial characterization of a leakage factor[J]. *Biocontrol Science and Technology*, 1991, 1(1): 21–29.
- [42] PENG Z, MAO X, JIANG H, et al. Evaluation of biological control strain MT-06 for managing cucumber powdery mildew by pot tests and its colonization measurement on cucumber[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2012, 24(4): 624–629.