

四川辣椒炭疽病菌分离鉴定及辣椒素类物质的抑菌作用

朱丽,刘玉珊,尚迪,张军,张玮珊,孙婷,蔡臣,钟珉菡,任亚利

(四川省农业特色植物研究院 四川内江 641200)

摘要:明确四川省辣椒炭疽病的致病菌种类构成及其优势种群,并探究辣椒素类物质(辣椒碱和二氢辣椒碱)对炭疽病病原菌生长的抑制作用,为开发绿色防控技术提供依据。从成都、泸州等四川的11个县区采集了具有典型炭疽病病症的辣椒果实16份,通过组织分离、单孢法纯化、致病性鉴定,并结合形态学特征和多基因系统发育分析进行种类鉴定;采用菌丝生长抑制法测定辣椒碱和二氢辣椒碱对分离鉴定的炭疽病病原菌的室内毒力。结果表明,辣椒炭疽病病原菌鉴定为3种,分别是斯高维尔炭疽菌(*Colletotrichum scovillei*)、平头炭疽菌(*Colletotrichum truncatum*)、果生炭疽菌(*Colletotrichum fructicola*),其中 *C. scovillei* 为优势菌种,分离频率达50.00%;*C. scovillei* 在5种主栽辣椒果实上致病力均最强。一定浓度的辣椒碱和二氢辣椒碱对3种病原菌菌丝生长均具有显著抑制作用,且二者对相同病原菌的抑制效果相似,对不同病原菌抑制效果存在差异;其中,对 *C. truncatum* 的抑制效果最佳,辣椒碱和二氢辣椒碱的 EC_{50} 分别为43.48 mg·L⁻¹ 和46.89 mg·L⁻¹,对 *C. fructicola* 的抑制效果最弱。综上, *C. scovillei*、*C. truncatum*、*C. fructicola* 是2024年四川地区辣椒炭疽病的致病菌,且 *C. scovillei* 在此批采样产区中占据主导地位和强致病力。辣椒碱和二氢辣椒碱对主要病原菌,特别是 *C. truncatum* 具有显著的抑制活性,鉴于其天然来源和环境友好特性,辣椒素类物质可作为开发辣椒炭疽病绿色环保农药或化学农药增效剂的潜在天然添加剂成分。

关键词:辣椒;炭疽病;辣椒碱;二氢辣椒碱;抑菌活性

中图分类号:S641.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)02-125-10

Isolation and identification of *Colletotrichum* species causing anthracnose on pepper in Sichuan and the antibacterial activity of capsaicinoids

ZHU Li, LIU Yushan, SHANG Di, ZHANG Jun, ZHANG Weishan, SUN Ting, CAI Chen, ZHONG Minhan, REN Yali

(Sichuan Academy of Agricultural Specialty Plants, Neijiang 641200, Sichuan, China)

Abstract: To clarify the species composition and dominant pathogens of pepper anthracnose in Sichuan province, and to investigate the inhibitory effects of capsaicinoids (capsaicin and dihydrocapsaicin) on the growth of the pathogens, providing a basis for the development of green control strategies, this study collected 16 diseased pepper fruit samples from 11 counties/districts in Sichuan, including Chengdu and Luzhou. The pathogens were isolated via tissue separation, purified through single-spore isolation, and species identification based on pathogenicity tests, morphological characteristics, and polygenic phylogenetic analysis. *In vitro* toxicity of capsaicinoids was assessed using mycelial growth inhibition assays. The results showed the pathogens causing pepper anthracnose belonged to three species: *Colletotrichum scovillei*, *Colletotrichum truncatum*, and *Colletotrichum fructicola*. Among them, *C. scovillei* was the dominant species, with an isolation frequency of 50.00%, and exhibited the strongest pathogenicity across five major cultivated pepper varieties. Certain concentrations of capsaicin and dihydrocapsaicin significantly inhibited the mycelial growth across all three pathogens. The inhibitory effects of the two compounds were similar against the same pathogen but varied among different pathogens. Specifically, the strongest inhibition was observed against *C. truncatum*, with EC_{50} values of 43.48 and 46.89 mg·L⁻¹ for capsaicin and dihydrocapsaicin, respectively, while the weakest inhibition was against *C. fructicola*. In summary, *C. scovillei*, *C. truncatum*, and *C. fructicola* were identified as the main pathogens causing pepper anthracnose in Sichuan in 2024, with *C. scovillei* being dominant species in the sampled areas and demonstrating strong pathogenicity. Capsaicin and dihy-

收稿日期:2025-09-30;修回日期:2025-10-27

基金项目:四川省省级科研院所基本科研业务费项目(25JBKY02,25JBKY01);四川省农业科学院自主创新项目(2023ZZCX010)

作者简介:朱丽,女,研究实习员,研究方向为蔬菜逆境生理与遗传育种。E-mail:18784009622@163.com

通信作者:蔡臣,男,副研究员,研究方向为蔬菜学与农业基础。E-mail:48845389@qq.com

drocapsaicin exhibited significant inhibitory activity against these major pathogens, particularly *C. truncatum*. Given their natural origin and environmental compatibility, capsaicinoids hold potential as natural additives for developing green pesticides or synergists for chemical pesticides in the control of pepper anthracnose.

Key words: Pepper; Anthracnose; Capsaicin; Dihydrocapsaicin; Antimicrobial activity

辣椒是我国种植范围最广的蔬菜作物之一,四川省作为辣椒主产区,其产业经济价值显著。然而,炭疽病是辣椒生产中的毁灭性病害,可引发果实腐坏,发病严重的情况下,会使产量下降超过50%,极端情况下甚至会导致作物绝收^[1-2]。该病害由炭疽菌属(*Colletotrichum* ssp.)多种病原菌引起,采收前后均可侵染,且病原菌种群结构复杂,病原菌种类和致病力地域差异显著^[3-5]。传统化学防治易引发抗药性及农药残留问题,亟需开发绿色防控策略。辣椒炭疽病病原菌种类多样,包括斯高维尔炭疽菌 *C. scovillei*、平头炭疽菌 *C. truncatum*、果生炭疽菌 *C. fructicola*、胶孢炭疽菌 *C. gloeosporioides*、暹罗炭疽菌 *C. siamense* 等 24 种^[6-7]。近年来, *C. scovillei* 在甘肃、贵州、广东多地上升为优势种,占比超 50%^[8-11];四川省前期报道以 *C. truncatum* 和 *C. gloeosporioides* 为主^[12-13],但近期在成都、资阳、盐源、西充等多个主要辣椒种植区, *C. scovillei* 已上升为绝对优势的辣椒炭疽病菌种^[1,14]。 *C. scovillei* 在 25 °C 时菌丝生长最佳,35 °C 的高温条件有利于产孢,潮湿条件下病斑会产生大量分生孢子^[10],四川省多数辣椒产区雨季高温高湿,为病原菌传播和侵染提供了有利条件。

目前,在生产上辣椒炭疽病的防治主要依赖化学药剂,咪鲜胺、戊唑醇、苯醚甲环唑、嘧菌酯、肟菌酯、啶氧菌酯等三唑类及甲氧基丙烯酸酯类药剂对炭疽病菌抑菌效果较好^[8-15],EC₅₀ 多低于 1 μg·L⁻¹,但长期单一使用易导致抗药性风险。复配药剂(如苯甲·丙环唑)可协同增效^[8-9]。生物防治因具有环境友好性也成为辣椒炭疽病防控的重要方向,芽孢杆菌复合菌剂、单一微生物菌剂、放线菌及其代谢产物对辣椒炭疽病的防效可达 60% 以上^[16-17],但在实际应用中存在环境敏感性高、效果不稳定、见效相对较慢、应急能力差、使用要求苛刻等局限^[18]。随着植物源农药的不断出现,辣椒素类物质作为天然植物源活性成分,兼具抑菌性和环境友好性,美国 EPA 将其列入免残留限量的生化农药清单,允许其在蔬菜、水果和谷物等农作物上无限制使用,以天然辣椒素为重要有效成分的复配型杀菌剂/杀虫剂,对芒果、梨、苹果的炭疽病、褐斑病、黑斑病及辣椒、烟草的根腐病、晚疫病、炭疽病均表现出防治潜力^[19-20]。

四川辣椒炭疽病病原菌种群近年来发生显著变化,但系统性研究不足。虽然辣椒素类物质具有环境友好性、不易产生抗性等优势,但其对四川当前流行菌株的抑制效果和种间差异尚不明确。鉴于此,笔者在厘清病原菌种群的基础上,重点探索辣椒素类物质抑菌效力的种间差异,明确天然成分的应用价值,将辣椒素类物质定位为化学农药的绿色增效剂,以期为开发复配型农药提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

病样果实于 2024 年采自成都、泸州、德阳、宜宾、雅安、自贡、绵阳、内江等 11 个发病严重的地区。采样遵循随机性原则,在每个区县随机选取 2~3 个乡镇,每个乡镇随机采集典型发病果实 1~2 份并调查发病率,最终获得病果 16 份,供试的辣椒类型包括菜椒、线椒、灯笼椒、朝天椒等。

以 PDA(马铃薯葡萄糖琼脂)培养基作为培养基质,配制方法参阅方中达^[21]的《植病研究方法》。

辣椒碱(capsaicin, CAS 号:404-86-4)和二氢辣椒碱(dihydrocapsaicin, CAS 号:19408-84-5)均购自上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 方法

1.2.1 病原菌分离纯化 参照陈功等^[22]的方法并在消毒条件上略作修改,通过组织分离法从发病果实中分离病原物。用自来水对采集的发病果实冲洗干净,晾干后,切取病健交界处组织块若干,大小约 0.5 cm×0.5 cm,装入滤茶器,加入 75% 乙醇中消毒 10 s,随后加入 0.1% 氯化汞浸泡 2 min,取出后用无菌蒸馏水冲洗 3 次,置于灭菌滤纸片上吸干表面水分,将组织块接种于 PDA 平板上,每皿 4 块,25 °C 黑暗培养,待病组织块周围长出少量菌丝时,在最边缘位置挑取新菌丝移入新的 PDA 平板上继续培养,通过单孢法获得纯化菌株,编号后保存备用。

1.2.2 病原菌致病性检验 根据科赫氏法则对分离菌株的致病性进行回接鉴定,采用针刺接种法离体果实接种验证^[21],用于验证的二荆条、牧马山二荆条、威远七星椒、郫县本地线椒为四川省农业特色植物研究院前期收集保存,川椒 221 来自四川省川椒种业科技有限责任公司,于 2025 年种植于四川

省农业科学院郫都基地。将纯化的菌株接种于 PDA 平板上,于 28 °C、12 h 光照条件下培养 10 d 至产孢,将分生孢子冲洗制成孢子悬浮液,通过血球计数板计算孢子数量并调节数量至 1.0×10^6 个·mL⁻¹。新鲜健康的辣椒果实,表面经 75% 乙醇消毒 30 s,无菌水清洗 3 次,灭菌滤纸吸干表面水分备用。用无菌接种针刺伤供试果实表面,在伤口处滴加 10 μL 孢子悬浮液,阴性对照滴加 10 μL 无菌水,每份材料接种 3 个果实,每个果实接种 2 个点位,5 次重复。接种后果实置于植物培养箱中,培养条件为温度 28 °C、12 h 光照/12 h 黑暗、相对湿度 ≥ 80%。培养 2 d 后开始观察记录发病症状,待菌株发病后重新分离纯化病原菌。

1.2.3 病原菌形态观察 使用 DN-117M 光学显微镜(南京江南永新光学有限公司)系统观察病原菌的显微形态特征,包括菌落结构、孢子形态、附着胞发育及分生孢子盘排列方式,并进行图像采集。

1.2.4 病原菌分子生物学鉴定 根据生工(上海)生物工程有限责任公司 Ezup 柱式真菌基因组 DNA 抽提试剂盒操作流程提取病原菌 DNA。选取保守基因片段(转录间隔区 *ITS*、3'-磷酸甘油醛脱氢酶 *GAPDH* 基因和几丁质合成酶基因 *CHS-I*)进行 PCR 扩增(表 1),程序设置为:95 °C 预变性 4 min;95 °C 变性 30 s,58 °C 退火 30 s,72 °C 延伸 45 s,进行 35 个循环;72 °C 延伸 7 min。PCR 产物经 1% 琼脂糖凝胶电泳验证后,委托生工(上海)生物工程有限责任公司测序。最终序列通过 NCBI 数据库进行 BLAST 比对分析,选取相关炭疽菌株的 *ITS*、*GAPDH*、*CHS-I* 基因序列,头尾拼接后采用 MEGA 7 软件构建系统发育树。

1.2.5 辣椒素类物质对炭疽病菌的抑菌效果 辣椒素类物质对辣椒炭疽病菌的室内毒力采用菌丝体生长抑制法测定。将待测药剂用无菌水分别稀释 5、10、20、40、60 倍后,分别加入冷却至 50 °C 左

右的 PDA 培养基中,以等量的溶剂甲醇加入 PDA 培养基中作为空白对照(CK),使用 0.5 cm 直径无菌打孔器切取菌落边缘菌饼,接种至含药 PDA 平板和空白平板中央,25 °C 黑暗培养 7 d 后,采用十字交叉法测量菌落直径(*D*),计算抑菌率(%),每处理设 3 次重复。抑菌率/% = $(D_{CK} - D_{\text{处理}})/D_{CK} \times 100$ 。以药剂浓度的对数值为横坐标,抑菌率对应的概率值为纵坐标,进行线性回归分析,拟合毒力回归方程,并计算相关系数(*R*²)和半数抑制浓度(*EC*₅₀),验证回归方程的拟合度(*R*² ≥ 0.95 为有效)。

1.3 数据分析

采用 Excel 2019 整理试验数据,并进行毒力回归分析,采用 SPSS 25.0 软件进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 病害流行

四川地区夏季高温多雨,空气湿度大,辣椒炭疽病多发生在每年的 7 月初至 8 月底辣椒大量采收的关键时期,主要危害果实和叶片。初期侵染的果实部位出现水渍状不规则病斑,后期患部果皮组织变薄皱缩凹陷,变黑或灰白,呈现同心轮纹状,产生轮纹排列小黑点(分生孢子盘),湿润时病斑表面有橙色分生孢子团溢出(图 1)。栽培方式是影响该病害流行程度的关键因素之一。由表 2 可知,4 个塑料大棚调查点的平均发病率为 3.74%,7 个露地调查点的发病率变幅较大(0.90%~56.14%),平均发病率高达 21.30%,表明在高温多雨季节,露地栽培极易暴发毁灭性的病害,塑料大棚通过物理隔绝作用,能够有效避免雨水冲刷和溅射传播,极大抑制病害的发生。

2.2 病原菌的分离与鉴定

2.2.1 病原菌的分离与形态鉴定 通过组织分离法从病样中共分离纯化获得 22 株菌株,根据菌落生长速度和形态特征,分为 3 类,分离结果见表 2, a 类型的菌株分离频率最高,为 50.00%。

由图 2 可知,a 类型菌株特征表现为菌落圆形,初生菌丝乳白色,后期正面为灰白色,菌丝致密,羊绒状,可见明显同心轮纹;背面中心为橙红色、边缘乳白色,培养 5~7 d 开始出现黑色分生孢子堆(图 2-A);分生孢子短棒状或一端稍钝圆一端较尖,无色透明,壁光滑,无隔膜,内含油球,分生孢子大小为 $(9.49 \sim 16.56) \mu\text{m} \times (3.36 \sim 5.67) \mu\text{m}$ (图 2-B~C);附着胞壁光滑,卵圆形到椭圆形,深棕色,大小为 $(5.85 \sim 8.52) \mu\text{m} \times (4.21 \sim 5.56) \mu\text{m}$ (图 2-D~F);菌落生

表 1 辣椒炭疽病病原菌鉴定所用的引物

Table 1 Primers used for the identification of the pathogen causing anthracnose in pepper

基因	引物	引物序列
Gene	Primer	Primer sequence
<i>ITS</i>	ITS1	TCCGTAGGTGAAACCTGCGG
	ITS4	TCCTCCGCTTATTGATATGC
<i>GAPDH</i>	GDF	GCCGTCAACGACCCCTTCATTGA
	GDR	GGGTGGAGTCGTACTTGAGCATGT
<i>CHS-I</i>	CHSI-79F	TGGGGCAAGGATGCTTGAAGAAG
	CHSI-354R	TGGAAGAACCATCTGTGAGAGTTG



图 1 辣椒果实感染炭疽病症状

Fig. 1 Symptoms of pepper fruit infected by anthracnose

表 2 病原菌分离结果

Table 2 Isolation results of pathogenic bacteria

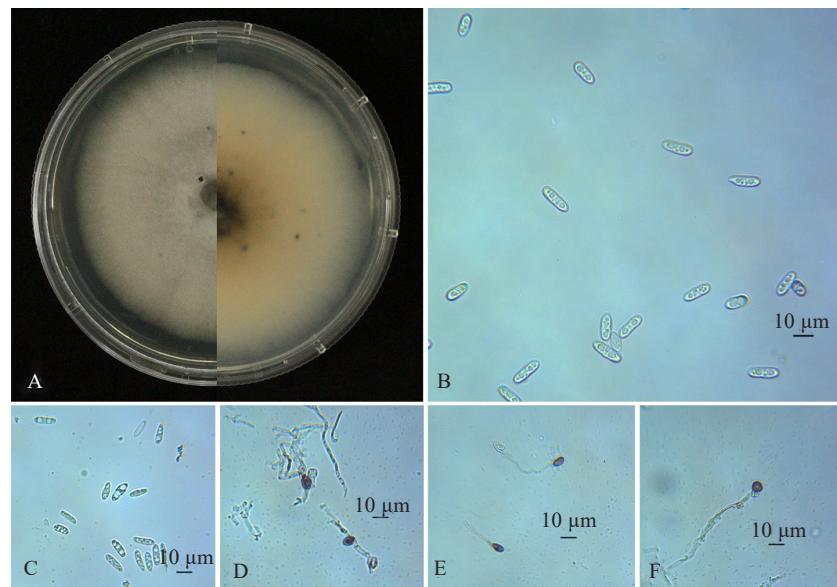
来源地 Source	栽培方式 Cultivation pattern	发病率 Incidence rate/%	编号 No.	菌株类型 Strain type		
				a	b	c
成都市郫都区德源镇 Deyuan, Pidu, Chengdu	塑料大棚 Plastic greenhouse	1.25	CDDY			1
成都郫都区友爱镇 You'ai, Pidu, Chengdu	露地 Open field	56.14	CDYA	3	1	1
德阳市中江县 Zhongjiang, Deyang	露地 Open field	1.08	DY		1	
宜宾市长宁县 Changning, Yibin	露地 Open field	0.90	YB		1	1
成都市崇州市 Chongzhou, Chengdu	塑料大棚 Plastic greenhouse	7.66	CDCZ	2	1	
雅安市雨城区 Yucheng, Ya'an	露地 Open field	11.66	YA			1
泸州市叙永县 Xuyong, Luzhou	露地 Open field	36.02	LZ		1	1
自贡市富顺县 Fushun, Zigong	塑料大棚 Plastic greenhouse	4.97	ZG	2		
成都市新都区 Xindu, Chengdu	塑料大棚 Plastic greenhouse	1.08	CDXD	2		
绵阳市涪城区 Fucheng, Mianyang	露地 Open field	17.71	MY	2		
内江市资中县 Zizhong, Neijiang	露地 Open field	26.57	ZZ		1	
总数 Total				11	6	5
分离频率 Isolate rate/%				50.00	27.27	22.73

长速度为 $7.26 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (表 3)。根据 a 类型菌株培养菌落的形态学特征, 初步判定其分类地位高度疑似斯高维尔炭疽菌 (*C. scovillei*)。

由图 3 可知, b 类型菌株特征表现为菌落呈近圆形, 正面初期呈白色或黄色, 菌落表面浅绒毛状, 紧贴培养基表面生长, 菌丝致密, 边缘多小黑点; 背面同心轮纹, 呈灰色, 上面着生小黑点(图 3-A)。分生孢子单胞, 呈透明镰刀状, 无隔膜, 两头尖, 大小为 $(20.95 \sim 27.61) \mu\text{m} \times (2.71 \sim 3.66) \mu\text{m}$ (图 3-B)。分生孢子盘呈簇状且着生黑色刚毛(图 3-C~D)。菌

丝体附着胞灰色, 形状不规则, 分生孢子附着胞灰色, 椭圆形, 大小为 $(6.66 \sim 9.09) \mu\text{m} \times (4.94 \sim 7.17) \mu\text{m}$ (图 3-E~G); 菌落生长速度为 $7.79 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (表 3)。根据形态学特征, 可初步鉴定为平头炭疽菌 (*C. truncatum*)。

由图 4 可知, c 类型菌株特征表现为菌落近圆形, 气生菌丝发达, 放射状生长, 初为白色, 继续培养后菌丝呈现灰色, 表面产生橘红色的孢子堆(图 4-A); 分生孢子杆状, 两端钝圆, 分生孢子大小为 $(13.14 \sim 18.00) \mu\text{m} \times (3.93 \sim 6.07) \mu\text{m}$ (图 4-B~C); 孢子囊



注:A. 菌落形态;B~C. 分生孢子;D~F. 菌丝体附着胞。

Note: A. Colonial morphology; B-C. Conidiospores; D-F. Appressorium.

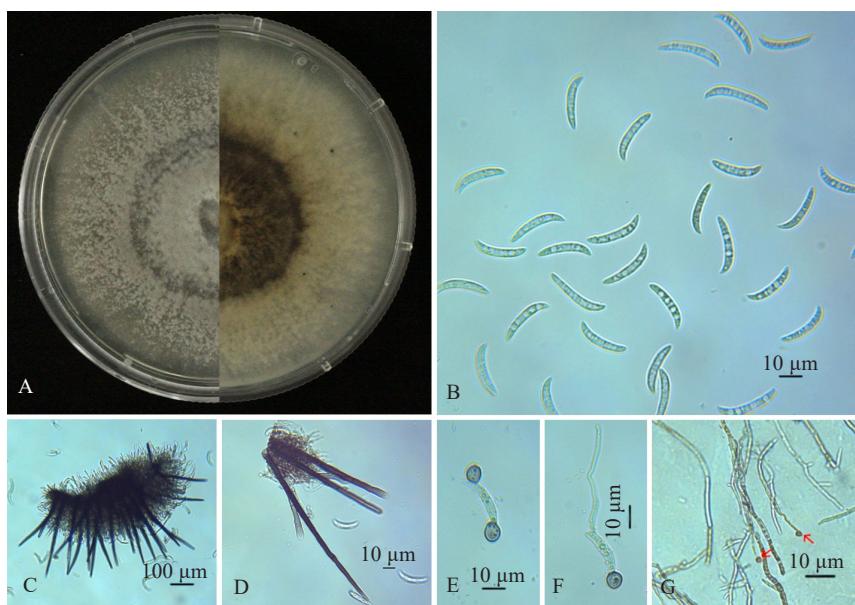
图2 CDYA24-1 菌株形态特征

Fig. 2 Morphological characteristics of CDYA24-1

表3 3种炭疽菌的形态特征统计

Table 3 Morphological characters of three *Colletotrichum* spp

菌种 Species	分生孢子纵径 Conidia longitudinal diameter/ μm	分生孢子横径 Conidia transverse diameter/ μm	附着胞纵径 Appressori longitudinal diameter/ μm	附着胞横径 Appressori transverse diameter/ μm	菌落生长速度 Colony growth rate/($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)
<i>C. scovillei</i>	13.53 \pm 1.82	4.65 \pm 0.61	7.41 \pm 0.98	5.40 \pm 0.73	7.26 \pm 0.22
<i>C. truncatum</i>	23.81 \pm 1.91	3.17 \pm 0.28	7.51 \pm 0.76	6.28 \pm 0.71	7.79 \pm 0.27
<i>C. fructicola</i>	16.22 \pm 1.18	5.00 \pm 0.54	12.80 \pm 1.50	6.53 \pm 0.84	11.74 \pm 0.08



注:A. 菌落形态;B. 分生孢子;C~D. 分生孢子盘;E~G. 附着胞。

Note: A. Colonial morphology; B. Conidiospores; C-D. Acervulus; E-G. Appressorium.

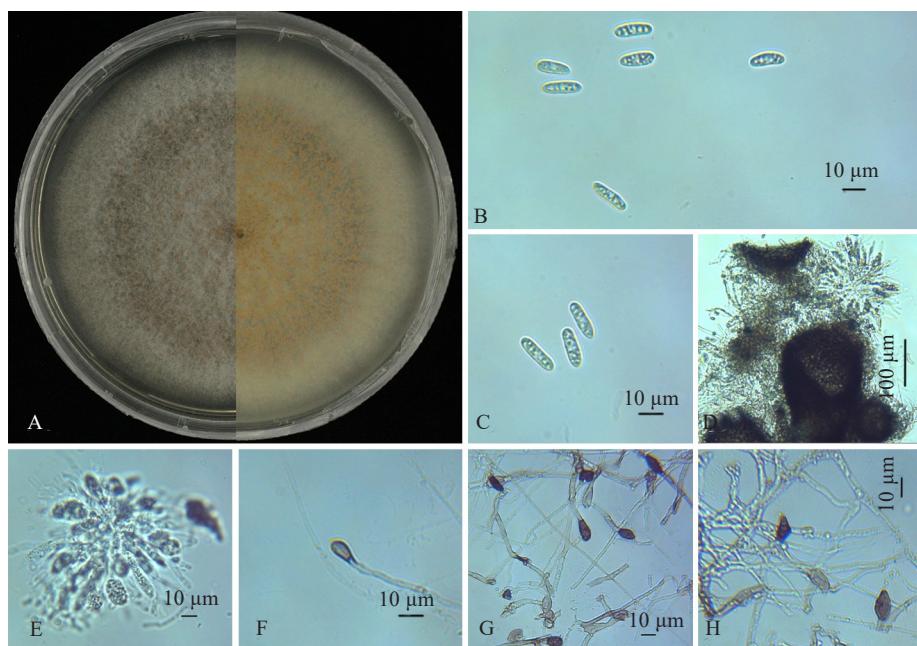
图3 CDCZ2-1 菌株形态特征

Fig. 3 Morphological characteristics of CDCZ2-1

壳为圆球状(图 4-D);子囊呈柱状簇生(图 4-E);菌丝体附着胞卵圆形至长卵圆形,褐色至深褐色,大小为(10.30~14.70)μm×(5.51~7.98)μm(图 4-F~H);菌落生长速度为 11.74 mm·d⁻¹(表 3)。根据菌株的形态学特征,初步鉴定该菌株为果生炭疽菌(*C. fructicola*)。

2.2.2 分子生物学鉴定 使用 ITS、GAPDH、CHS-I 引物对分离到的菌株进行 PCR 扩增后测序,

测序结果与 NCBI 数据库进行 Blast 序列比对,结果表明,a 类型菌株与 *C. scovillei* 对应序列同源性最高,b 类型菌株与 *C. truncatum* 对应序列同源性最高,c 类型菌株与 *C. fructicola* 对应序列同源性最高,下载与对应炭疽菌属内相近种标准菌株的对应序列,将 ITS、GAPDH 和 CHS-I 基因序列串联比对后,几种类型的菌株随机选取 3 株采用 MEGA 11.0 软件构建多基因系统发育树(图 5)。结果显示,a 类



注: A. 菌落形态; B~C. 分生孢子; D. 子囊壳; E. 子囊; F~H. 附着胞。

Note: A. Colonial morphology; B-C. Conidiospores; D. Perithecioid; E. Ascus; F-H. Appressorium.

图 4 YA21-1 菌株形态特征
Fig. 4 Morphological characteristics of YA21-1

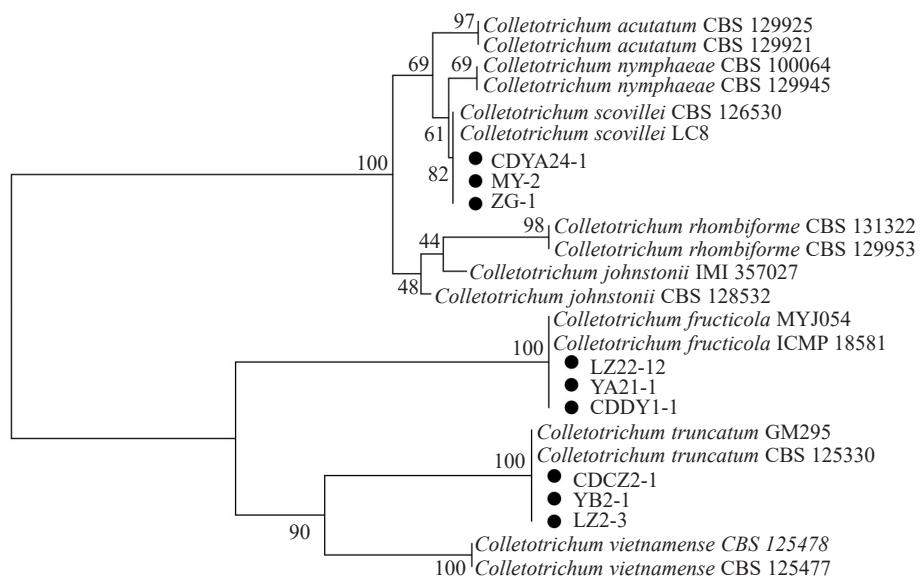


图 5 基于 ITS、CHS-I、GAPDH 基因串联序列构建的炭疽菌菌株系统发育进化树

Fig. 5 Phylogenetic tree of *Colletotrichum* strains based on concatenated ITS, CHS-I and GAPDH gene sequences

型的3个菌株以100%支持率与*C. scovillei* CBS 126530和*C. scovillei* LC8聚类在同一分支,b类型的3个菌株以100%支持率与*C. truncatum* GM295和*C. truncatum* CBS125330聚类在同一分支,c类型的3个菌株以100%支持率与*C. fructicola* MYJ054和*C. fructicola* ICMP 18581聚类在同一分支。采用形态学和分子生物学相结合的方法,将此次取样的四川辣椒果实炭疽病病原菌鉴定为*C. scovillei*、*C. truncatum*和*C. fructicola*。

2.2.3 病原菌的致病性验证 将制备好的*C. sco-*

villei、*C. truncatum*、*C. fructicola*孢子悬浮液,采用针刺法接种到健康辣椒果实上。培养2d后出现水渍状病斑,后期病斑中心凹陷近圆形至长椭圆形或不规则形,组织皱缩呈现同心轮纹,着生黑色小点(分生孢子盘),后期接种*C. scovillei*的病斑有大量橙色分生孢子团溢出(图6)。第6天记录病斑大小,病斑直径大小显示3种炭疽病菌的致病力差异显著(表4),*C. scovillei*对5个辣椒品种果实造成的病斑直径显著大于*C. truncatum*和*C. fructicola*,说明*C. scovillei*的致病力显著强于*C. truncatum*和

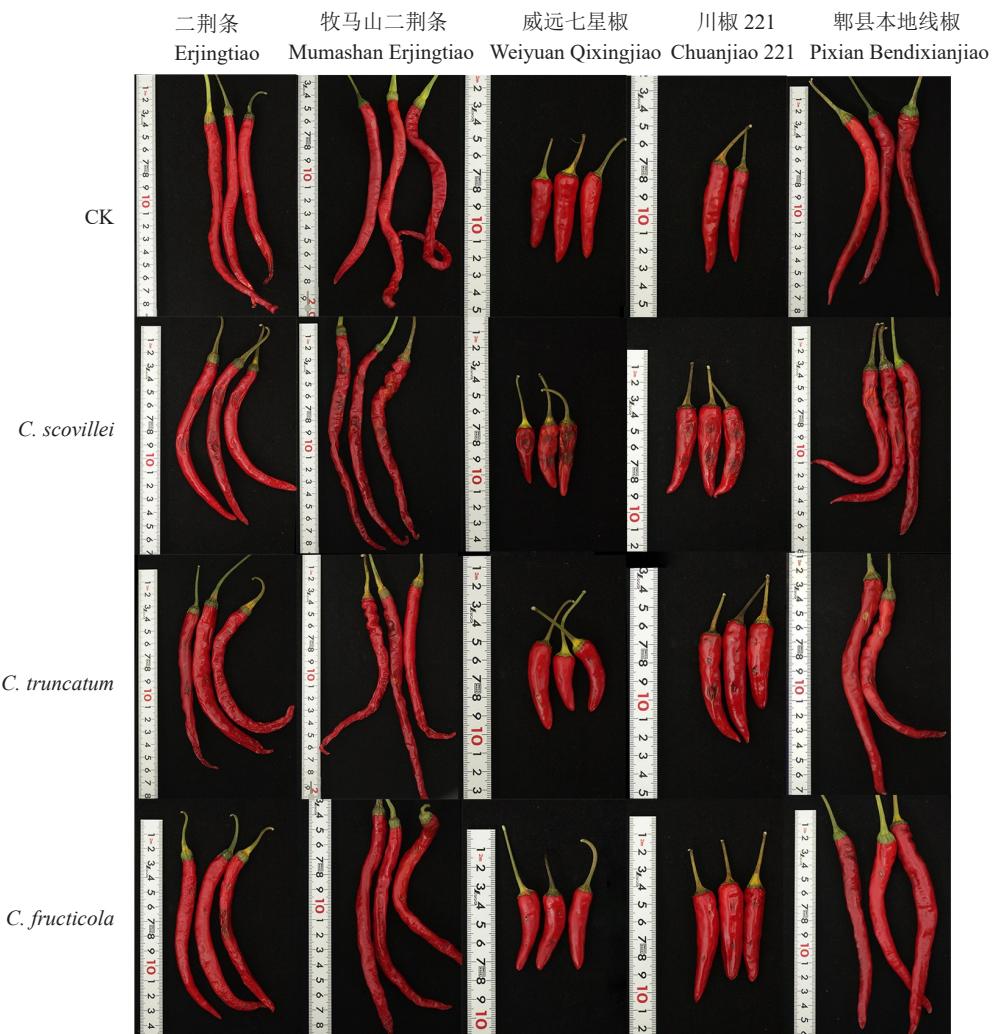


图6 接种炭疽菌后辣椒果实症状
Fig. 6 Symptoms of pepper fruit after inoculation with *Colletotrichum* spp

C. fructicola。

2.3 辣椒素类物质室内抑菌效果

采用菌丝体生长抑制法测定了辣椒碱和二氢辣椒碱对3种病原菌的抑菌活性,基于不同浓度下的抑菌率拟合毒力回归方程并计算EC₅₀,结果表

明:辣椒素类物质对3种辣椒炭疽病菌菌丝生长均表现出一定的抑制作用,但抑制效果不同,毒力水平存在明显差异(图7)。由表5的EC₅₀可知,辣椒碱和二氢辣椒碱对不同病原菌的抑制作用相似,其中对病原菌*C. truncatum*的抑制效果最好,EC₅₀分

表 4 接种后病斑大小

Table 4 Size of the lesion after vaccination

菌种 Strain	二荆条 Erjingtiao	牧马山二荆条 Mumashan Erjingtiao	威远七星椒 Weiyuan Qixingjiao	川椒 221 Chuanjiao 221	郫县本地线椒 Pixian Bendixianjiao	mm
<i>C. scovillei</i>	13.25±0.46 a	18.05±0.40 a	15.24±0.55 a	17.62±0.52 a	19.36±0.66 a	
<i>C. truncatum</i>	3.64±0.73 b	12.20±0.76 b	2.49±0.40 b	4.13±0.70 c	6.71±0.26 b	
<i>C. fructicola</i>	3.84±0.49 b	1.98±0.21 c	1.89±0.22 c	6.01±0.31 b	6.02±0.39 c	

注:同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

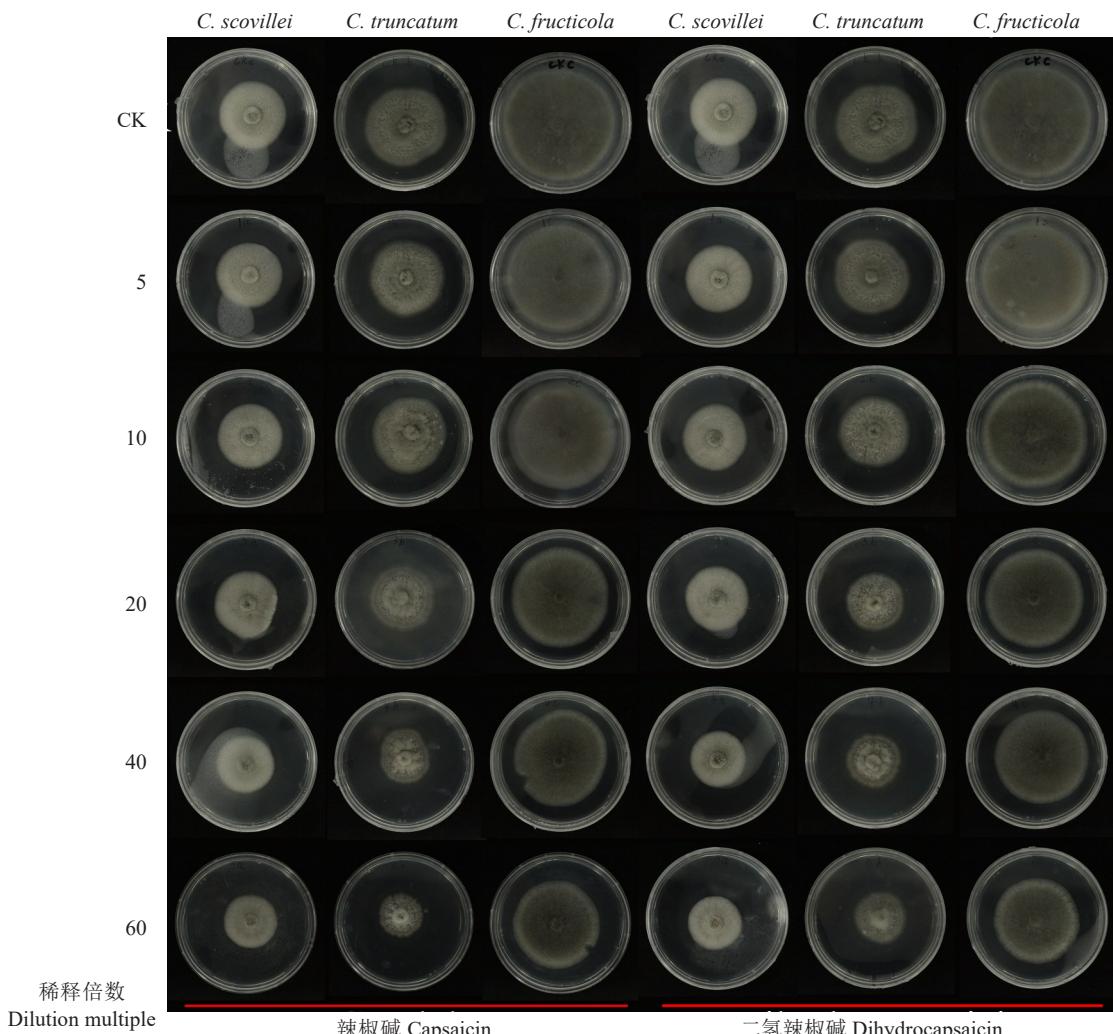


图 7 辣椒碱和二氢辣椒碱对病原菌的抑制效果

Fig. 7 The antibacterial effects of capsaicin and dihydrocapsaicin on pathogenic bacteria

表 5 病原菌对辣椒素类物质的敏感性

Table 5 Sensitivity of pathogenic bacteria to capsaicin substances

处理 Treatment	菌株 Strain	回归方程 Regression equation	R ²	EC ₅₀ /(mg·L ⁻¹)
辣椒碱 Capsaicin	<i>C. scovillei</i>	$y=1.1197x+2.6079$	0.992 0	137.14
	<i>C. truncatum</i>	$y=1.6722x+2.2605$	0.991 5	43.48
	<i>C. fructicola</i>	$y=1.0731x+2.6251$	0.990 8	163.35
二氢辣椒碱 Dihydrocapsaicin	<i>C. scovillei</i>	$y=1.0416x+2.7200$	0.990 6	154.50
	<i>C. truncatum</i>	$y=1.5794x+2.3965$	0.991 3	46.89
	<i>C. fructicola</i>	$y=1.0523x+2.5264$	0.962 7	224.21

别为 $43.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $46.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对 *C. scovillei* 的抑制效果次之, EC_{50} 分别为 $137.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $154.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

3 讨论与结论

笔者从四川 11 个辣椒产区分离鉴定出 3 种炭疽病菌: *C. scovillei*、*C. truncatum* 和 *C. fructicola*。通过分子鉴定和致病性分析发现, *C. scovillei* 以 50.00% 的分离频率和显著大于 *C. truncatum* 和 *C. fructicola* 的病斑直径成为绝对优势种, 这一结果与近年来国内多个辣椒产区的报道一致^[23-24]。侯思皓等^[1]、张河庆等^[14]在四川多个辣椒种植区同样发现 *C. scovillei* 已成为优势病原菌, 分离频率超过 80%, 但 *C. fructicola* 的检出率(22.73%)明显高于既往报道^[1, 13], 表明四川地区炭疽病菌种群结构可能发生动态变化, 这种变化可能与栽培模式改变、气候变化及杀菌剂选择压力等因素密切相关。

致病力分析显示, 3 种炭疽病菌在辣椒果实上的致病力存在显著差异。其中 *C. scovillei* 的致病力最强, 在四川 5 种辣椒果实上形成的病斑直径均显著大于其他两种病原菌, 并伴随明显的橙色分生孢子团溢出, 表明其具有较强的侵染和繁殖能力。这与已有的研究结果一致, 不同病原菌的致病力不同, 不同基因型对同一病原菌的抗性存在明显差异^[25-27]。巩雪峰等^[28]研究发现, *C. scovillei* 通过抑制辣椒体内的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)等抗氧化酶活性, 破坏植物的活性氧代谢平衡, 从而加剧病害发展, 印证了其作为优势病原菌的生态适应性。

前人研究表明, 辣椒素质量浓度在 $3.57\text{--}50.00 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 范围内对辣椒枯萎病菌的菌丝生长具有明显抑制作用, 且呈剂量依赖性^[29], 笔者进一步证实了辣椒碱和二氢辣椒碱对 3 种病原菌也表现出剂量依赖性抑制效果, 其中对 *C. truncatum* 的抑制活性最强。前人研究发现, 天然辣椒碱或其单体、辣椒素类似物对番茄灰霉病菌、芒果炭疽菌、番茄早疫菌、白色念珠菌、金黄色葡萄球菌等多种病原菌具有明显抑制作用^[30-32], 与本研究的结果相呼应, 说明辣椒素类物质对不同类型的病原菌均具有广谱抑制潜力。目前辣椒素类物质的抑菌机制尚未明确, 可能涉及直接破坏病原菌细胞结构与间接诱导植物产生抗性两方面, 一方面干扰病原菌细胞膜的通透性和完整性, 导致细胞内容物(如电解质、蛋白质)外漏, 抑制病原菌毒素产生和释放, 菌丝畸

形、缢缩甚至死亡^[33-34]; 另一方面辣椒素处理能显著提高植物体内超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等多种保护酶活性^[34], 清除超氧阴离子和羟自由基^[35], 提升植物的抗氧化能力, 从而增强植物的抗病能力。尽管辣椒素类物质的直接抑菌质量浓度高于常规化学药剂(如咪鲜胺 $\text{EC}_{50} < 1 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)^[36-37], 但其作为天然成分具有低毒、环境兼容性高的独特应用价值。Fan 等^[38]研究表明, 植物源活性成分与宿主防御系统的协同作用可以显著提升病害防控效果, 基于此, 辣椒素类物质可开发作为化学农药的增效剂或独立用于采后保鲜^[39]。

综上所述, 笔者明确了四川部分辣椒产区炭疽病病原菌组成及辣椒素类物质的抑菌效果。四川地区辣椒炭疽病的流行与夏季气候密切相关, 采用设施避雨栽培是防控该病害的有效策略。从 11 个辣椒产区分离鉴定出 3 种致病菌: *C. scovillei*、*C. truncatum* 和 *C. fructicola*, 其中 *C. scovillei* 为优势菌种, 分离频率达 50.00%, 且致病力最强。室内毒力测定结果表明, 辣椒碱和二氢辣椒碱对 3 种病原菌均具有明显抑制作用, 其中对 *C. truncatum* 的抑制效果最佳, 虽然其抑菌浓度高于化学药剂, 但作为天然成分具有环境友好特性, 可作为生物农药添加剂或采后保鲜剂。研究结果为优化辣椒炭疽病绿色防控技术提供了新思路, 未来可进一步开发辣椒素类物质与化学药剂的复配方案, 以兼顾防治效果与环境安全性。

参考文献

- 侯思皓,巩雪峰,许艺,等.辣椒炭疽病菌鉴定及炭疽菌胁迫下的生理变化[J].西南农业学报,2024,37(10):2185-2193.
- 郑洁,周成丽,赵东风,等.辣椒炭疽病的发病症状与防治方法[J].上海蔬菜,2021(3):39-40.
- 杨佳文,赵尊练,张管曲,等.陕西线辣椒炭疽病原菌的鉴定及生物学特性研究[J].西北农业学报,2017,26(11):1695-1705.
- ROMJON M, BUNWAREE A, RANGHOO-SANMUKHIYA V M. First report of *Colletotrichum queenslandicum* associated with chilli anthracnose in Mauritius[J]. Plant Disease, 2024, 108(7):2233.
- JOY E T, AMRUTHA P, JOHNSON J M, et al. Cultural, morphological and pathogenic variability in the *Colletotrichum capsici* isolates, inciting anthracnose and fruit rot of chilli (*Capsicum annuum* L.) in different agro-climatic zones of Kerala, India[J]. International Journal of Plant and Soil Science, 2024, 36(6):304-316.
- LIU F L, TANG G T, ZHENG X J, et al. Molecular and phenotypic characterization of *Colletotrichum* species associated with

- anthracnose disease in peppers from Sichuan province, China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):32761.
- [7] MONGKOLPORN O, TAYLOR P W J. Chili anthracnose: *Colletotrichum* taxonomy and pathogenicity[J]. *Plant Pathology*, 2018, 67(6):1255-1263.
- [8] 周志成,孙海,肖仲久,等.辣椒炭疽病病原分离鉴定及对杀菌剂敏感性测定[J].华南农业大学学报,2023,44(3):430-437.
- [9] 郑婕,庄远航,郭梓琪,等.南雄辣椒炭疽病菌的分离鉴定与药剂筛选[J].中国蔬菜,2022(10):58-65.
- [10] 张翠文,魏立娟,杨成德.甘肃省辣椒炭疽病菌的分离鉴定及生物学特性[J].西北农业学报,2023,32(10):1627-1636.
- [11] ELLOUZE W, LOFANO A, TRACEY A, et al. First report of *Colletotrichum scovillei* causing anthracnose fruit rot on pepper in Ontario, Canada[J]. *Plant Disease*, 2024, 108(7):2230.
- [12] 易兰.辣椒炭疽病病原菌的分离鉴定和辣椒抗炭疽病材料的筛选[D].成都:四川农业大学,2019.
- [13] 刘方玲.四川辣椒炭疽病的病原学研究[D].成都:四川农业大学,2015.
- [14] 张河庆,宋占峰,韩帅,等.四川辣椒炭疽病菌鉴定及防治药剂筛选研究[J].中国蔬菜,2024(4):93-99.
- [15] 陈鹏宇,杨立辉,瞿长兰,等.辣椒炭疽病菌 *Colletotrichum ni-grum* 鉴定、生物学特性及药剂敏感性研究[J].中国瓜菜,2023,36(3):27-35.
- [16] 卿婷婷,陶刚,赵兴丽,等.4种微生物菌剂对辣椒主要病害的生物防治作用[J].中国生物防治学报,2020,36(2):258-264.
- [17] ZHONG J, BAI Y X, LI G X, et al. *Streptomyces olivoreticuli* ZZ-21 act as a potential biocontrol strain against pepper anthracnose caused by *Colletotrichum scovillei*[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2025, 441:111319.
- [18] 彭钿钿,马云龙,许沛冬,等.芽孢杆菌防治植物病害作用机制与应用[J].生物技术通报,2025,41(8):42-52.
- [19] 云南宏绿辣素有限公司.一种复配植物源杀菌剂及其制备方法:CN201711483817.9[P].2019-08-23.
- [20] 北京绿神保科技有限公司.高效无毒农药广普型杀虫杀菌剂及其制备方法和使用方法:CN201010563737.6[P].2013-03-13.
- [21] 方中达.植病研究方法[M].3版.北京:中国农业出版社,1998.
- [22] 陈功,易思情,金晨钟,等.山药炭疽病病原菌的分离鉴定及其室内毒力测定[J].中国瓜菜,2023,36(11):122-126.
- [23] 孙平平,范博文,付崇毅,等.吉林白城与内蒙古开鲁辣椒白疫病病原鉴定及生防菌筛选[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(12):60-71.
- [24] 王赛风.山西省辣椒炭疽病病原鉴定及其对常用杀菌剂的敏感性[D].太原:山西农业大学,2022.
- [25] 郑婉婉,赵建荣,程春园,等.辣椒种质资源炭疽病抗性鉴定与遗传分析[J].中国蔬菜,2024(5):59-68.
- [26] 廖旺姣,韦维,邹东霞,等.广西香花油茶炭疽病病原菌鉴定及生物学特性[J].西南农业学报,2022,35(6):1340-1347.
- [27] 张国芝,赵霞,杨海艳,等.四川辣椒炭疽病菌鉴定及育种材料抗性筛选[J].西南农业学报,2013,26(3):1026-1029.
- [28] 巩雪峰,宋占峰,许艺,等.GABA 和 BABA 诱导辣椒幼苗及果实对炭疽病抗性的生理影响[J].西南农业学报,2024,37(7):1553-1562.
- [29] 王建明,梁建根,陈燕飞,等.辣椒素的抑菌作用及其对某些保护酶活性的影响[J].植物病理学报,2005,35(6)(增刊):35-37.
- [30] 张然,李彪,韦勇,等.天然辣椒素对几种植物病原菌的抑菌活性研究[J].湖北农业科学,2018,57(8):66-69.
- [31] 王梦,赵佩霞,张鹏,等.辣椒碱单体、二氢辣椒碱单体和降二氢辣椒碱单体抑菌效果研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2019,46(3):61-65.
- [32] WANG Y L, LIU Z H, LIU T, et al. Synthesis and antibacterial activity of capsaicin derivatives containing phenolic hydroxyl groups[J]. *Chemistry Select*, 2024, 9(30):e202401299.
- [33] PERIFERAKIS T A, PERIFERAKIS A, PERIFERAKIS K, et al. Antimicrobial properties of capsaicin: Available data and future research perspectives[J]. *Nutrients*, 2023, 15(19):4097.
- [34] SAMUEL F, SORAYA M, STEFAN B, et al. Antibacterial properties of capsaicin and its derivatives and their potential to fight antibiotic resistance: A literature survey[J]. *European Journal of Microbiology & Immunology*, 2021, 11(1):10-17.
- [35] 袁杨斌,刘强,陈瑞,等.辣椒碱体外抑菌及抗氧化能力评价[J].饲料研究,2021,44(3):48-52.
- [36] 朱亚楠,王冰雪,戴祎卓,等.保定辣椒炭疽病菌鉴定及对5种药剂的敏感性[J].植物保护,2025,51(3):339-344.
- [37] 张文静,姚福田,吕红,等.山西省辣椒炭疽病菌对4种杀菌剂的敏感性及对戊唑醇的抗性风险评估[J].植物病理学报,2025,55(2):270-280.
- [38] FAN S, LI Q, FENG S, et al. Melatonin maintains fruit quality and reduces anthracnose in postharvest papaya via enhancement of antioxidants and inhibition of pathogen development[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(5):804.
- [39] ALI M, TUMBEH L A, MUHAMMAD I, et al. Melatonin mitigates the infection of *Colletotrichum gloeosporioides* via modulation of the chitinase gene and antioxidant activity in *Capsicum annuum* L.[J]. *Antioxidants*, 2020, 10(1):7.