

烟草青枯病生物防治研究进展与 综合治理策略

藏传江¹, 王德权¹, 王玉华¹, 欧开元², 杨杰², 苏雪琦³, 侯欣^{3*}

¹山东潍坊烟草有限公司, 山东 潍坊

²山东临沂烟草有限公司, 山东 临沂

³山东农业大学植物保护学院, 山东 泰安

收稿日期: 2026年3月25日; 录用日期: 2026年4月23日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

烟草青枯病是由青枯雷尔氏菌(*Ralstonia solanacearum*)引起的毁灭性土传病害, 严重制约烟草产业的可持续发展。传统防治方法如轮作、抗病品种和化学药剂存在明显局限性, 促使生物防治成为研究热点。本文系统综述了烟草青枯病的病原学、发生规律及生物防治策略的研究进展, 包括植物源杀菌剂、农用抗生素、生防菌(如芽孢杆菌、假单胞菌、真菌及无致病力青枯菌)和噬菌体疗法的应用潜力与机制。尽管生物防治具有环境友好、靶向性强、不易产生抗药性等优势, 但仍面临防效不稳定、根际定殖困难、规模化应用成本高等挑战。未来需构建以根际微生态调控为核心, 整合多种生物防治手段、抗病品种和智能监测技术的综合治理体系, 以实现烟草青枯病的绿色、高效和可持续防控。

关键词

烟草青枯病, 青枯雷尔氏菌, 生物防治, 生防菌, 噬菌体, 植物源杀菌剂

Research Progress and Comprehensive Management Strategy of Biological Control of Tobacco Bacterial Wilt

Chuanjiang Zang¹, Dequan Wang¹, Yuhua Wang¹, Kaiyuan Ou², Jie Yang², Xueqi Su³,
Xin Hou^{3*}

¹Shandong Weifang Tobacco Limited Company, Weifang Shandong

²Shandong Linyi Tobacco Limited Company, Linyi Shandong

³College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an Shandong

*通讯作者。

文章引用: 藏传江, 王德权, 王玉华, 欧开元, 杨杰, 苏雪琦, 侯欣. 烟草青枯病生物防治研究进展与综合治理策略[J]. 农业科学, 2026, 16(4): 637-646. DOI: 10.12677/hjas.2026.164080

Abstract

Tobacco bacterial wilt is a devastating soil-borne disease caused by *Ralstonia solanacearum*, which seriously restricts the sustainable development of tobacco industry. Traditional control methods such as crop rotation, disease-resistant varieties and chemical agents have obvious limitations, which makes biological control a research hotspot. In this paper, the etiology, occurrence regularity and biological control strategies of tobacco bacterial wilt were systematically reviewed, including the application potential and mechanism of botanical fungicides, agricultural antibiotics, biocontrol bacteria (such as *Bacillus*, *Pseudomonas*, fungi and avirulent *Ralstonia solanacearum*) and phage therapy. Although biological control has the advantages of environmental friendliness, strong targeting, and low resistance to drugs, it still faces challenges such as unstable control effect, difficulty in rhizosphere colonization, and high cost of large-scale application. In the future, it is necessary to construct a comprehensive management system with rhizosphere microecological regulation as the core, integrating various biological control methods, disease-resistant varieties and intelligent monitoring technology, so as to achieve green, efficient and sustainable prevention and control of tobacco bacterial wilt.

Keywords

Ralstonia solanacearum, Biological Control, Biocontrol Bacteria, Bacteriophage, Botanical Fungicides

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

烟草是我国重要经济作物，在农业经济、税收及农民收入中占据重要地位[1]。然而，烟草长期受多种病害威胁，其中青枯雷尔氏菌引起的烟草青枯病是最具破坏性的土传病害之一[2] [3]。该病害在全球烟草主产区普遍发生，我国南方烟区尤为严重，流行年份可造成严重产量损失并降低烟叶品质[4] [5]，且随着耕作制度改变和气候变暖，发病区域扩大、危害加重，已成为制约烟草产业可持续发展的主要瓶颈。目前烟草青枯病的传统防治方法，如轮作、抗病品种、化学药剂等，均存在明显局限[6]，轮作受耕地资源限制，抗病品种缺乏高抗材料且抗性易丧失，化学药剂防效有限且易引发抗药性和环境污染[7]-[9]。这些局限性促使研究者将目光转向更加环保、可持续的生物防治技术。生物防治具有环境友好、靶标特异性强、不易产生抗药性等优势[10]，对保障烟叶质量安全、促进烟草产业绿色发展具有重要意义。当前烟草青枯病生物防治已形成多元技术体系，但存在防效不稳定等应用瓶颈，未来需以根际微生态精准调控为核心，整合多生防因子与相关技术，构建可持续综合治理体系。

2. 烟草青枯病病原学与发生规律

2.1. 病原菌分类地位

青枯雷尔氏菌已从复合种调整为 3 个独立物种，我国烟草青枯菌以 phyloptype I、II 为主，遗传多样性丰富，致病力与地域适应性差异显著，为精准防控带来挑战[11]。

2.2. 病原菌核心生物学与致病机制

青枯雷尔氏菌为革兰氏阴性杆菌，好氧，最适生长温度 28℃~32℃、pH 6.0~7.0 [12]。致病依赖胞外多糖堵塞导管、细胞壁降解酶破坏组织、III型分泌系统抑制植物免疫等多因子协同作用[13]。

2.3. 病害循环与流行规律

病原菌在土壤、病残体越冬，经根系伤口侵入，在木质部繁殖扩展导致植株萎蔫死亡，重回土壤完成循环[14]。高温高湿(25℃~35℃、相对湿度 > 80%)、酸性土壤(pH 5.0~6.5)、连作、偏施氮肥、地下害虫伤口均显著加重病害流行[15]-[18]。

2.4. 病原菌遗传多样性

烟草青枯菌属于 1 号生理小种，我国菌株以 phylotype I 分布最广，phylotype II 多见于冷凉地区。菌株在致病力、寄主适应性、药剂敏感性上差异明显，需差异化防控策略[19]。

3. 生物防治策略研究进展

3.1. 植物源杀菌剂

植物源杀菌剂是利用植物的根、茎、叶、花、果实、种子等或其提取物中的天然抗菌活性物质来防治病害。据研究发现，植物中含有抑菌活性次生代谢物质约 40 万种，常见有植物性挥发性油、酚类化合物、生物碱、多糖类化合物等[20]。例如，余峰等发现橙皮素对烟草青枯病有较强的抑菌活性，达 51.7% [21]；赵世元研究发现黄腐酸能提升烟草对青枯病的防抗效果[22]；苦参的苦参碱在防治烟草青枯病上已有应用报道[23]。

将植物提取物作为杀菌剂防治青枯病的研究还有很多。生姜提取物通过改变青枯菌的形态，破坏了细胞膜的通透性和完整性，降低了关键酶的活性，抑制了青枯菌毒力因子的合成，能有效减缓生姜青枯病的发生[24]；银杏和大蒜提取物对番茄青枯病有良好的防治效果[25]，已经盆栽抑菌试验证明，浓度 2.0 mg/ml 的银杏外种皮提取液能降低能明显减少盆栽番茄因青枯病而导致的死亡率[26]。利用提取法获得的大蒜提取液在滤纸片法抑青枯菌实验中表现出一定的防效[27]。鱼腥草[28]、金银花叶[29]、丁香[30]、肉桂[31]和玉兰叶[32]的提取物也被证实对青枯菌具有抑制效果。

植物源杀菌剂的优势在于来源天然、环境兼容性好、易降解、不易产生抗药性，部分兼具杀虫、驱虫、促生作用[33]。但也存在局限性，田间持效期短，需要频繁施用，规模化生产与标准化困难，成本相对较高，特别是高纯度活性成分的获取。

3.2. 农用抗生素

农用抗生素是直接利用微生物产生的、在低浓度下即可抑制或杀死其他微生物的次级代谢产物，其主要通过干扰细菌细胞壁合成、损伤细胞膜、抑制蛋白质合成、抑制核酸合成等途径抑制病原菌能量代谢来杀菌抑菌[34]。

研究发现，植物次生代谢产物瑞香素能提升烟草体内酶活性和根部木质素含量，促进抗性基因表达，对田间烟草青枯病有稳定的防治效果，具有开发为防治烟草青枯病的植物激活剂的潜力[35]；春雷霉素由春日链霉菌产生，主要抑制蛋白质合成，对青枯菌有一定防治效果，是登记用于防治烟草青枯病的抗生素之一[36]；水合霉素具有较强杀菌活性，有研究报道其对番茄青枯病有良好的防治效果[37]；中生菌素是一种广谱性的农用抗生素[38]，在防治烟草青枯病上也有应用研究[39]；农用链霉素是重要的农用抗生素，已有研究证明，在土壤中链霉菌/病原菌终浓度比值为 10:1 和 100:1 时，对青枯病的防

效较好[40]。

农用抗生素活性高、见效相对较快、作用靶点相对明确。但抗药性风险高，细菌极易获得抗性，导致防效迅速下降甚至失效；对根际土壤深层病菌效果不佳，施于土壤表面或灌根难以渗透到深层；部分抗生素生产成本较高；且全球范围内对农用抗生素的监管趋严，可用种类减少。

3.3. 生防菌

生防菌是能够控制病害发生发展的，对病原菌有拮抗作用或能促进植物生长诱导其抗性的有益微生物[41]。

3.3.1. 细菌类

芽孢杆菌属是应用最广泛的生防菌类群，大量研究发现枯草芽孢杆菌、短短芽孢杆菌和侧孢芽孢杆菌是有很大大生防潜力的3种芽孢杆菌，有预防和控制植物病害的功效，能形成抗逆性强的芽孢，耐盐、耐酸、耐高温，易于生产和保存，代谢活性强，产生多种抗菌物质和酶类，能促进植物生长[42][43]。刘伟等[44]从多地健康烟草土壤中采集土样30份，分离得到780株芽孢杆菌。通过对所分离的芽孢杆菌进行拮抗初筛，得到抗烟草青枯病菌活性较好的菌株LW-6，抑菌圈直径为21.05 mm，抑菌带宽为8.37 mm。刘邮洲等[45]筛选出22株对番茄枯萎病菌和番茄青枯病菌皆具有很强拮抗作用的菌株，其中防效较好的4株拮抗菌均为枯草芽孢杆菌。易有金等[46]在烟草青枯病区采取健康烟草植株，从其茎秆内分离到2株对烟草青枯菌有强拮抗作用的内生菌株009和011，结果表明属于短芽孢杆菌属中的短短芽孢杆菌。多粘类芽孢杆菌菌株HY96-2研制成的 0.1×10^8 cfu/g多粘类芽孢杆菌细粒剂(KDLD)，已正式进行产品登记，并在防治烟草青枯病的生产上投入应用[47]。解淀粉芽孢杆菌WS-10成功定殖于烟草根部和根际土壤中，依靠生物膜的形成以及水解酶和胞外多糖的分泌，其对烟草青枯病防效达72.02% [48]。在盆栽试验中，使用贝莱斯芽孢杆菌EM-1处理烟草，接种青枯病菌5 d后，青枯病病情指数为5.8，较对照组降低了45.23% [49]。

假单胞菌属中荧光假单胞菌、铜绿假单胞菌是重要代表，优势在于根际定殖能力强，产生多种抗生素、铁载体和挥发性有机物，诱导系统抗性能力强，应用潜力巨大[50]。胡军华等[51]研究发现施用铜绿假单胞菌swu31-2菌液后再接种病原菌，烟草青枯病防治效果达60.87%，这与假单胞菌属具有较强的拮抗作用和对烟草有较好的定殖能力密切相关。柳辉林等[52]通过田间药效试验荧光假单胞菌3,000亿/克粉剂是防治烟草青枯病的较好药剂，防治效果达到54.1%以上，增产率达到25%以上。铜绿假单胞菌NXHG29在体外对烟草赤星病菌和青枯病菌具有强烈的拮抗活性，且在盆栽试验中显著降低了黑胫病和青枯病的发病率[53]。荧光假单胞菌LSW-4联合苗强壮能够减少烟草的全生育期，对烟草青枯病的防控效果最好，发病初期防效高达100.00%。发病高峰期的防效高达76.01%，发病后期的防效仍有66.89% [54]。

3.3.2. 真菌类

贵州省烟草主产区发生青枯病烟田中采取健康植株根际的土壤，通过平板对峙试验筛选得到3株对烟草青枯菌具有拮抗作用的真菌，分别为淡色生赤壳菌、棘孢木霉和嗜松青霉[55]。赵江源等[56]从云南省哀牢山土壤分离到2株产铁载体菌株，分别是云南木霉及拟球孢白僵菌，研究发现菌株内的铁载体活性物质对番茄青枯病有良好的防治效果，且抑菌效果与铁载体所处的环境铁离子浓度相关。周晓见等[57]首次系统研究了烟曲霉对烟草青枯病菌的拮抗作用，且该菌株具有良好的遗传稳定性和生防潜力。刘先良等[58]通过盆栽试验研究了接种丛枝菌根真菌对烟草青枯病的防控效果以及丛枝菌根对抗病相关酶活性及丙二醛含量的影响。

3.3.3. 无致病力青枯病菌

许多研究表明[59]-[61],青枯雷尔氏菌存在明显的致病力分化,强致病力菌株侵染寄主植物导致寄主发病,无致病力菌株可侵染寄主植物但不引起寄主发病。无致病力青枯病菌属于针对青枯病的专一性生防菌,是当前青枯病生物防治研究中极具应用潜力的生防资源之一,能够定殖于植物体内,通过位点竞争排斥或抑制致病性菌株的侵染与增长,从而达到防病效果,在土传病害“以菌治菌”的专一性防控中具有不可替代的优势[62]。

多研究表明,青枯雷尔氏菌无致病力菌株能在一定程度上控制青枯病的发展。Yang 等[63]利用基因工程法获得的无致病力 hrp-突变体防治茄科蔬菜青枯病,取得良好的防病效果;Chen 等[64]利用紫外诱变法获得青枯雷尔氏菌无致病力突变菌株处理番茄,发现了番茄对青枯病原抗性,且无致病力突变菌株可在番茄体内定殖和繁殖;此外,Liu 等[65]、Xiao 等[66]、Trigalet 等[67]及 Frey 等[68]分别通过生防菌致弱、自然筛选、转座子 Tn5 插入诱变、基因工程等途径获得青枯雷尔氏菌无致病力突变菌株防治青枯病,均取得较好的防治效果。郑雪芳等[69]通过分离筛选自然弱毒株、⁶⁰Co 辐射诱变和 EZ-Tn5 插入诱变,分别获得 3、12 和 40 株青枯菌无致病力突变菌株,进一步对番茄青枯病防治试验表明,其中的菌株 FJAT1498 防治效果达 100%。

陈国康等[70]研究发现无致病力菌株 Tbw1-7-3 在温室盆栽条件下对青枯病的相对防效达 89.4%,其田间防效在发病初期 10 d~20 d 与药剂农用链霉素处理间无明显差异,且其抗药性突变株在烟株根表和体内可短暂定殖;田间试验也显示 Tbw1-7-3 菌株在发病初期具有良好的控病效果。

周帮菊[71]用伤根接种待测菌后 7 d 接种青枯菌,4 周后,青枯无致病力菌株 Aujd5-2y 和 Tbw1-7-3 在一定程度上可以推迟烟草青枯病的发病时间,且在 4 周后的相对防效为 89.4%,将菌株 Aujd5-2y 和 Tbw1-7-3 用于烟草青枯病田间小区控病试验,以农用链霉素为药剂对照,对照发病 1 个月后,菌株 Aujd5-2y 对烟草青枯病的相对防效为 35.64%,高于农用链霉素处理的相对防效,且差异显著。

Chen 等[72]研究表明用无致病力产细菌素的青枯菌(ABPS)121 菌株防治烟草青枯病,发现用产细菌素菌悬浮液处理烟草比用不产细菌素的菌悬浮液处理能更有效地防治青枯病。罗宽等[73]通过 ⁶⁰Co 辐射和紫外光诱变处理致病力菌株 Ps2 和 Ps3 得到无致病力菌株,接种于植株上,盆栽试验表明,通过诱变得到的无致病力菌株 45b 对烟草青枯病有一定的控制作用。郑继法等[74]用浸根法测试 3 个无毒菌株 A3-5、A4-3、A1-4 对烟草青枯病菌 4-11 的防治效果,发现菌株 A3-5 能降低病情,推迟发病 25 d,并且 A3-5 菌株对敏感型菌株和不敏感型菌株均有较好的防治效果。

但该类菌株也存在一定局限性,首先是环境适应性有待提升,无致病力青枯病菌的存活和定殖受土壤温度、湿度、pH 值及有机质含量影响较大,在极端环境(如土壤干旱、pH < 5.0 或 > 8.0)下,菌株活性易受抑制,导致控病效果波动;其次是菌株稳定性问题,部分无致病力菌株在长期培养或田间应用过程中,可能因基因突变或质粒丢失恢复致病力,尽管这种概率较低,但仍需建立严格的菌株稳定性监测体系;最后是对高菌量土壤的控病效果有限,当田间土壤中致病型青枯雷尔氏菌含量过高(如连作多年的重病田)时,单一使用无致病力青枯病菌难以完全竞争抑制致病型菌株,需结合土壤消毒、轮作等措施降低初始菌量后再应用。

3.4. 噬菌体疗法

噬菌体是一类专化性极强的细菌病毒,广泛存在于自然界中[75],按生活周期可分为烈性噬菌体和温和性噬菌体。烈性噬菌体感染宿主菌后会裂解宿主菌释放子代,是细菌的天然杀手,能有效地控制宿主菌的种群数量[76]。

1990 年, Tanaka 等以青枯病菌作为宿主筛选到噬菌体,对烟草青枯病进行防治,发现能有效降低烟

草青枯病的发病率, 发病率可从 95.8% 下降为 39.5% 和 17.6% [77]。Fujiwara 等[78]报道了利用青枯菌噬菌体 Φ RSL1 对青枯病进行生物防治的实验结果, 虽然只能杀死部分青枯菌, 但防治青枯病的作用是有有效的。

高苗[79]从烟草青枯病病圃健康烟株的根际土壤中分离出一株噬菌体, 通过形态学、分子生物学等技术进行鉴定并且通过盆栽灌根试验确定了其对烟草青枯病的影响, 相对防效达到 94.87%。Ahmad 等[80]从青枯菌中分离到一株原噬菌体 Rs551, 该噬菌体对其青枯菌的生长无影响, 但能降低青枯菌的致病性从而推迟植株发病。

林志坚等[81]以烟草青枯菌 TBR512 为宿主菌, 采用双层平板法从烟草根际土壤中分离获得一株裂解性噬菌体 RPZH6, 采用室内盆栽法测定噬菌体 RPZH6 的生防效果, 结果表明, 接种后 21 d, 噬菌体 RPZH6 对烟草青枯病的防治效果为 60.98%; 接种后 35d, 防治效果为 53.85%, 显著高于化学药剂处理。蔡刘体等[82]以烟田产区的 7 株烟草青枯菌为宿主, 从烟田土壤中分离到了 14 个对烟草青枯菌具有侵袭性的烈性噬菌体, 为利用噬菌体防控烟草青枯病的生防策略研究提供了噬菌体资源。

由于青枯菌的遗传多样性及噬菌体的高度特异性, 导致噬菌体的防治效果和使用范围受到限制[83]。化学杀菌剂和生防菌联用防控真菌病害, 显示出良好应用前景[84]。噬菌铜和生防芽胞菌 AR03 联合使用明显提高烟草青枯病的防治效果, 大幅降低了化学药剂的使用量[85]。

噬菌体疗法的优势在于高度特异性, 只杀伤目标病原菌, 对植物、有益微生物、人畜和环境安全。但局限性也不容忽视, 宿主范围窄, 一种噬菌体通常只感染特定种/株的细菌, 青枯雷尔氏菌遗传多样性高, 需要筛选广谱噬菌体或使用多种噬菌体混合制剂(鸡尾酒疗法)以覆盖主要流行菌株。

4. 问题与挑战

当前生物防治面临着多方面的现实挑战。防效稳定性问题尤为突出, 防治效果受土壤 pH 值、温湿度等环境因素影响较大, 不同地块间的防效差异显著, 波动范围可达 30%~70%。同时, 持效期普遍较短, 通常仅能维持 15~30 天, 需要多次施用, 增加了使用成本。

在技术层面存在若干瓶颈问题。生防菌在根际的定殖率普遍较低, 通常不足 5%, 严重制约了防治效果的发挥。现有技术难以使生防因子有效到达维管束内部这一关键发病部位。规模化生产成本居高不下, 制约了技术推广。制剂稳定性问题也较为突出, 货架期普遍较短, 影响了产品的商业化进程。

安全性问题同样不容忽视。部分生防菌株可能存在潜在的生态风险, 需要严格评估。抗生素使用带来的抗性基因扩散可能性需要重点关注。对于噬菌体疗法而言, 宿主范围的严格监控至关重要, 以确保其使用的安全性。这些因素都需要在技术开发和推广应用过程中予以充分考虑。

5. 未来展望

单一生物防治手段难以彻底解决烟草青枯病这一复杂土传病害, 未来需整合多种绿色防控技术, 构建以健康土壤和根际微生态调控为核心、生物防治为主干, 结合抗病品种利用与优化农艺措施的环保高效可持续综合防控新体系。

在根际微生态工程方面, 通过引入功能协同的合成微生物群落(如芽孢杆菌、假单胞菌等不同机制菌株组合)、调控土壤环境(施用有机改良剂、调节 pH 等, 生物炭潜力突出)、管理根系分泌物(育种或栽培调控以招募有益微生物)及基于组学精准设计, 引导根际微生物群落向抑病方向演替; 同时推动多种生物防治策略协同增效, 比如生防菌与植物源诱抗剂、噬菌体、不同作用机制生防菌的组合, 以及生物防治与低毒化学/物理方法的配合, 形成“预防为主, 应急为辅”的模式。

在抗病品种选育与利用上, 需挖掘抗性资源、研究抗性机制, 借助分子标记辅助选择或基因编辑培

育广谱持久抗病品种，并与生物防治结合以延缓抗性丧失；农艺措施则需优化集成，包括与非寄主作物合理轮作、加强土壤健康管理(增施有机肥等)、培育无病壮苗、清洁田园与处理病残体、精准水肥管理等。

此外，还可利用物联网、病原菌快速检测技术等开展智能监测，结合病害流行预测模型，实现“按需防控”的精准防控，提升资源利用效率与防控效果。

6. 结论

烟草青枯病由青枯雷尔氏菌引发，是威胁烟草产业的毁灭性土传病害。受化学防治局限性影响，生物防治成为绿色防控核心方向，其中植物源杀菌剂、农用抗生素、生防菌及噬菌体等手段，在抑病、诱抗、改善根际环境上潜力显著，且兼具环境友好、不易产生高抗性的优势，契合农业可持续发展理念。

但单一生物防治普遍面临防效不稳定、对维管束内部病菌作用有限、规模化应用成本高、生防因子存活定殖难等瓶颈，需通过筛选本地化菌株/噬菌体、开发控释剂型、构建合成微生物群落等策略突破。

未来防控的根本路径，是构建以根际微生态精准调控为基石的综合治理体系，需整合微生态工程、多元生物防治协同、抗病品种利用、健康农艺实践与智慧植保。

唯有依托多学科交叉融合与产学研合作，创新集成绿色技术，才能实现烟草青枯病有效、经济、生态可持续防控，保障产业健康与生态安全，同时为其他顽固性土传病害提供研究范式与实践路径。

基金项目

中国烟草总公司山东省公司重点项目(项目编号：KN291，KN326)。

参考文献

- [1] 晋艳, 杨宇虹, 等. 烤烟连作对烟叶产量和质量的影响研究初报[J]. 烟草科技, 2002(1): 41-45.
- [2] 章慧芬, 张玉芹, 曹长代, 等. 青枯菌侵染下不同类型烟草根系转录组比较分析[J]. 中国烟草科学, 2024, 45(6): 7-16.
- [3] Cai, Q., Zhou, G., Ahmed, W., Cao, Y., Zhao, M., Li, Z., *et al.* (2021) Study on the Relationship between Bacterial Wilt and Rhizospheric Microbial Diversity of Flue-Cured Tobacco Cultivars. *European Journal of Plant Pathology*, **160**, 265-276. <https://doi.org/10.1007/s10658-021-02237-4>
- [4] Mansfield, J., Genin, S., Magori, S., Citovsky, V., Sriariyanum, M., Ronald, P., *et al.* (2012) Top 10 Plant Pathogenic Bacteria in Molecular Plant Pathology. *Molecular Plant Pathology*, **13**, 614-629. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2012.00804.x>
- [5] Nioni, Y.A. and Toyota, K. (2015) Recent Trends in Control Methods for Bacterial Wilt Diseases Caused by *Ralstonia solanacearum*. *Microbes and environments*, **30**, 1-11. <https://doi.org/10.1264/jsme2.me14144>
- [6] Ahmed, W., Yang, J., Tan, Y., Munir, S., Liu, Q., Zhang, J., *et al.* (2022) *Ralstonia solanacearum*, a Deadly Pathogen: Revisiting the Bacterial Wilt Biocontrol Practices in Tobacco and Other Solanaceae. *Rhizosphere*, **21**, Article 100479. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100479>
- [7] 张仕祥, 过伟民, 李辉信, 等. 烟草连作障碍研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(5): 823-829.
- [8] 陆恩瑚. 烟草青枯病防治试验简报[J]. 广西农业科学, 1991(2): 87-88.
- [9] Nicolopoulou-Stamati, P., Maipas, S., Kotampasi, C., Stamatis, P. and Hens, L. (2016) Chemical Pesticides and Human Health: The Urgent Need for a New Concept in Agriculture. *Frontiers in Public Health*, **4**, Article ID: 148. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00148>
- [10] 蒋昕彤, 翟路东, 赵一檬, 等. 烟草病虫害防治技术研究进展[J]. 中南农业科技, 2025, 46(7): 222-225.
- [11] Prior, P., Ailloud, F., Dalsing, B.L., Remenant, B., Sanchez, B. and Allen, C. (2016) Genomic and Proteomic Evidence Supporting the Division of the Plant Pathogen *Ralstonia solanacearum* into Three Species. *BMC Genomics*, **17**, Article No. 90. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2413-z>
- [12] 朱贤朝. 中国烟草病害[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [13] Tans-Kersten, J., Huang, H. and Allen, C. (2001) *Ralstonia solanacearum* Needs Motility for Invasive Virulence on Tomato. *Journal of Bacteriology*, **183**, 3597-3605. <https://doi.org/10.1128/jb.183.12.3597-3605.2001>

- [14] 肖田, 姚廷山. 烟草青枯病的发生特点与综合防治技术[J]. 云南农业科技, 2008(1): 56-57.
- [15] 何达富. 浅谈元谋番茄青枯病区域性传播路径及防控技术创新[J/OL]. 中文科技期刊数据库(全文版)农业科学, 2025(4): 176-179. https://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=1000004352527&from=Qikan_Search_Index
- [16] 吴建华, 刘许生, 孔繁武, 等. 烤烟青枯病发生与气象因子的关系及预测模式[J]. 江西农业科技, 2004(7): 27-28.
- [17] 叶祖亮. 烟草青枯病的症状、病原、流行规律及防治对策[J]. 农家科技(理论版), 2020(6): 103-103.
- [18] 张俊伟. 玉米青枯病在芮城县的发生与综合防治措施[J]. 种子科技, 2021, 39(8): 64-65.
- [19] Genin, S. (2010) Molecular Traits Controlling Host Range and Adaptation to Plants in *Ralstonia solanacearum*. *New Phytologist*, **187**, 920-928. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03397.x>
- [20] 张祿. 植物源抑制剂在抑菌方面的研究进展[J]. 内蒙古林业, 2021(3): 31-33.
- [21] 余峰, 李洁, 黎妍妍, 等. 橙皮素对烟草青枯病的诱导抗性研究[J]. 中国烟草科学, 2022, 43(4): 55-61.
- [22] 赵世元. 黄腐酸诱导烟草抗青枯病的活性及初步机理研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [23] 单雪华, 周孚美, 王秋芽, 等. 湘南地区烤烟全程绿色防控技术集成与效果评价[J]. 现代农业科技, 2015(16): 113-115.
- [24] Zhang, L., Qin, M., Yin, J., Liu, X., Zhou, J., Zhu, Y., et al. (2022) Antibacterial Activity and Mechanism of Ginger Extract against *Ralstonia solanacearum*. *Journal of Applied Microbiology*, **133**, 2642-2654. <https://doi.org/10.1111/jam.15733>
- [25] 曹鹏飞. 3种植物提取物对樱桃番茄青枯病病原菌的抑菌活性[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(11): 169-170.
- [26] 冀玉良, 银杏外种皮提取液抑制农作物病原菌的初步研究[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(9): 1598-1603.
- [27] 王馨琪, 吴文萍, 张云伟, 等. 大蒜提取物对烟草青枯菌抑制作用的初步研究[J]. 科技创新与生产力, 2023(3): 115-118.
- [28] 许灵杰, 蒋岁寒, 赵二卫, 等. 竹醋液复合洋葱、鱼腥草提取物对烟草青枯病菌的室内抑制效果[J]. 北方园艺, 2015(5): 120-124.
- [29] 翟凤艳, 刘快, 杜丽娟, 等. 金银花叶乙醇提取物对几种病原真菌的抑制作用[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2016, 44(2): 40-44.
- [30] 刘泽鑫, 常晓涵, 许汝冰, 等. 丁香酚对青枯雷尔氏菌的抑菌效果及作用机制[J]. 植物保护学报, 2025, 52(1): 211-221.
- [31] 杨磊, 王聪, 胡心雨, 等. 植物精油对烟草多种病原菌的抑制效果[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(11): 126-129.
- [32] Arredondo-Valdés, R., Chacón-Hernández, J.C., Reyes-Zepeda, F., Hernández-Castillo, F.D., Anguiano-Cabello, J.C., Heinz-Castro, R.T.Q., et al. (2020) *In Vitro* Antibacterial Activity of *Magnolia Tamaulipana* against Tomato Phytopathogenic Bacteria. *Plant Protection Science*, **56**, 268-274. <https://doi.org/10.17221/13/2020-pps>
- [33] 赵永田, 王兴娥, 赵宇, 等. 植物源抑真菌活性成分及抑菌机理研究现状与展望[J]. 农业与技术, 2022, 42(16): 26-29.
- [34] 吴思炫, 高复云, 张锐澎, 等. 番茄青枯病生物防治的研究进展[J]. 应用生态学报, 2023, 34(9): 2585-2592.
- [35] 杨亮, 韩松庭, 李吉秀, 等. 瑞香素对烟草青枯病的防治效果及其作用机理[J]. 植物保护学报, 2024, 52(3): 709-718.
- [36] 牟文君, 马晓静, 胡利伟, 郭建华, 薛超群, 奚家勤, 宋纪真. 烟草青枯病菌对 4 种杀菌剂的敏感性及其复配药剂联合毒力评价[J]. 烟草科技, 2022, 55(3): 16-24.
- [37] Zheng, X., Wang, Z., Chen, M., Chen, Z., Wang, J. and Zhu, Y. (2022) Genetic Stability of Virulent, Intermediate, and Avirulent Strains of *Ralstonia solanacearum* after Extensive, Consecutive Subculturing. *Biological Control*, **167**, Article 104845. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.104845>
- [38] 蒋细良, 谢德龄, 倪楚芳, 朱昌雄, 宋培国. 中生菌素的抗生作用[J]. 植物病理学报, 1997, 27(2): 133-138.
- [39] 罗飞, 穆青, 余知和, 等. 五种药剂对烟草青枯病菌的抑制活性及碳代谢的影响[J]. 农药学报, 2023, 25(4): 870-877.
- [40] 白鸽, 李言雨, 刘彩霞, 等. 链霉菌对土传枯萎病和青枯病的防控效果评估及影响因子探究[J]. 微生物学报, 2025, 65(7): 2874-2888.
- [41] 韩长志. 植物病害生防菌的研究现状及发展趋势[J]. 中国森林病虫, 2015, 34(1): 33-3725.
- [42] Fravel, D.R. (2005) Commercialization and Implementation of Biocontrol. *Annual Review of Phytopathology*, **43**, 337-359. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.43.032904.092924>

- [43] Shoda, M. (2000) Bacterial Control of Plant Diseases. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **89**, 515-521. [https://doi.org/10.1016/s1389-1723\(00\)80049-3](https://doi.org/10.1016/s1389-1723(00)80049-3)
- [44] 刘伟, 沈小英, 段军娜, 等. 抗烟草青枯病菌的芽胞杆菌筛选和鉴定[J]. 植物保护学报, 2013, 40(1): 95-96.
- [45] 刘邮洲, 陈志谊, 梁雪杰, 等. 番茄枯萎病和青枯病拮抗细菌的筛选、评价与鉴定[J]. 中国生物防治学报, 2012, 28(1): 101-108.
- [46] 易有金, 尹华群, 罗宽, 刘学端, 刘二明. 烟草内生短芽孢杆菌的分离鉴定及对烟草青枯病的防效[J]. 植物病理学报, 2007, 37(3): 301-306.
- [47] 徐玲, 王伟, 魏鸿刚, 沈国敏, 李元广. 多粘类芽孢杆菌 HY96-2 对番茄青枯病的防治作用[J]. 中国生物防治, 2006, 22(3): 216-220.
- [48] Ahmed, W., Dai, Z., Zhang, J., Li, S., Ahmed, A., Munir, S., et al. (2022) Plant-Microbe Interaction: Mining the Impact of Native *Bacillus Amyloliquefaciens* WS-10 on Tobacco Bacterial Wilt Disease and Rhizosphere Microbial Communities. *Microbiology Spectrum*, **10**, e0147122. <https://doi.org/10.1128/spectrum.01471-22>
- [49] Sui, X., Han, X., Cao, J., Li, Y., Yuan, Y., Gou, J., et al. (2022) Biocontrol Potential of *Bacillus velezensis* EM-1 Associated with Suppressive Rhizosphere Soil Microbes against Tobacco Bacterial Wilt. *Frontiers in Microbiology*, **13**, Article ID: 940156. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.940156>
- [50] 陈晓斌, 张炳欣, 何勇强. 假单胞菌属生防菌株的遗传工程改良[J]. 微生物学通报, 2000, 27(4): 293-296.
- [51] 胡军华, 张伏军, 蓝希钊, 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.
- [52] 柳辉林, 张剑, 徐隆根, 伍祥兴. 荧光假单胞菌 3000 亿个/克粉剂防治烟草青枯病田间药效试验[J]. 农药科学与管理, 2008, 29(6): 24-26.
- [53] Song, S., Li, S. and Shi, J. (2013) Effects of Successive Application of Bioorganic Fertilizer on Controlling Tobacco Wilt Caused by *Ralstonia solanacearum*. *Soils*, **45**, 451-458.
- [54] 白建淞, 汪安斌, 刘知军, 瞿远军, 张贺翠, 陆宁, 丁伟. 荧光假单胞菌 LSW-4 联合苗强壮对烟草青枯病的防控效果及促生作用[J]. 植物医学, 2025, 4(2): 45-52.
- [55] 陆铮铮, 杨先权, 彭杰, 蒋选利, 丁海霞, 彭丽娟. 烟草青枯菌土壤拮抗真菌的筛选及鉴定[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(1): 86-89.
- [56] 赵江源, 邹雪峰, 何翔, 张庆, 杨济达, 朱红业, 杨佩文, 李铭刚. 2 株分泌型铁载体真菌对番茄青枯病的防效[J]. 植物保护, 2022, 48(4): 123-130.
- [57] 周晓见, 陈毓道, 缪莉, 董昆明, 董夏伟, 靳翠丽. 一株拮抗烟草青枯病菌的真菌的筛选与鉴定[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1418-1423.
- [58] 刘先良, 刁向银, 申鸿, 等. 接种丛枝菌根真菌对烟草青枯病抗性的影响[J]. 烟草科技, 2014(5): 94-98.
- [59] Liu, B., Zhu, Y.J., Lin, K.M., et al. (2007) Study on Num Erical and Pathogenic Variations of *Ralstonia solanacearum* Distributed within the Tissue of Host Plants. *Scientia Agricultura Sinica*, **40**, 1559-1566.
- [60] Brown, D.G. and Allen, C. (2004) *Ralstonia solanacearum* Genes Induced during Growth in Tomato: An Inside View of Bacterial Wilt. *Molecular Microbiology*, **53**, 1641-1660. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2004.04237.x>
- [61] He, Z.F., Yu, H. and Luo, F.F. (2003) Differentiation of Pathogenicity and RAPD Analysis of *Ralstonia solanacearum* in Guangdong. *Acta Phytopathologica Sinica*, **33**, 415-420.
- [62] Balabel, N.M., Eweda, W.E., Mostafa, M.I. and Farag, N.S. (2005) Some Epidemiological Aspects of *Ralstonia Solanacearum*. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, **83**, 1547-1564. <https://doi.org/10.21608/ejar.2005.249963>
- [63] Yang, Y.H., Liu, J.P., Yang, C., et al. (2008) Control of Solanaceae Vegetable Bacterial wilt with Avirulent HRP-Mutants. *Acta Phytophylacica Sinica*, **35**, 433-437.
- [64] Chen, Q.H., Weng, Q.Y. and Hu, F.P. (2003) Biochemical Mechanism of Induced Resistance to Tomato Bacterial Wilt with the Treatment of Avirulent Strains of *Ralstonia solanacearum*. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University*, **32**, 296-300.
- [65] Liu, B., Lin, Y.Z., Zhu, Y.J., et al. (2004) Attenuation Characteristics of Bacterial-Wilt-Disease Biocontrol Strain Anti-8098A to *Ralstonia solanacearum*. *Journal of Agricultural Biotechnology*, **12**, 322-329.
- [66] Xiao, T., Xiao, C.G., Zou, Y., et al. (2008) A Preliminary Study on the Control of Tobacco Bacterial wilt by Avirulent Strains of *Ralstonia solanacearum*. *Plant Protection*, **34**, 79-82.
- [67] Trigalet, A. and Trigalet-Demery, D. (1990) Use of Avirulent Mutants of *Pseudomonas Solanacearum* for the Biological Control of Bacterial Wilt of Tomato Plants. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, **36**, 27-38. [https://doi.org/10.1016/0885-5765\(90\)90089-g](https://doi.org/10.1016/0885-5765(90)90089-g)

- [68] Frey, P., Prior, P., Marie, C., Kotoujansky, A., Trigalet-Demery, D. and Trigalet, A. (1994) Hrp⁻ Mutants of *Pseudomonas Solanacearum* as Potential Biocontrol Agents of Tomato Bacterial Wilt. *Applied and Environmental Microbiology*, **60**, 3175-3181. <https://doi.org/10.1128/aem.60.9.3175-3181.1994>
- [69] 郑雪芳, 刘波, 林乃铨, 等. 青枯雷尔氏菌无致病力突变菌株的构建及其防效评价模型分析[J]. 植物病理学报, 2013, 43(5): 518-531.
- [70] 陈国康, 周帮菊, 周丹妮, 等. 无致病力青枯菌株对烟草青枯病的控制作用[J]. 烟草科技, 2015, 48(11): 7-10.
- [71] 周帮菊. 青枯无致病力菌株控制烟草青枯病的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [72] Chen, W.Y. and Echandi, E. (1984) Effects of Avirulent Bacteriocin-Producing Strains of *Pseudomonas solanacearum* on the Control of Bacterial Wilt of Tobacco. *Plant Pathology*, **33**, 245-253. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1984.tb02646.x>
- [73] 罗宽, 王庄. 利用拮抗的 *Pseudomonas* Spp.和无致病力的 *P. solanacearum* 防治青枯病的研究[J]. 植物病理学报, 1983, 13(1): 51-56.
- [74] 郑继法, 张建华, 许永玉, 等. 利用无毒产细菌素菌株防治烟草细菌性青枯病[J]. 中国烟草, 1994(3): 21-24.
- [75] Vos, M., Birkett, P.J., Birch, E., Griffiths, R.I. and Buckling, A. (2009) Local Adaptation of Bacteriophages to Their Bacterial Hosts in Soil. *Science*, **325**, 833-833. <https://doi.org/10.1126/science.1174173>
- [76] 苏靖芳, 于浩, 刘俊杰, 等. 青枯雷尔氏菌噬菌体研究进展[J]. 土壤与作物, 2017, 6(1): 61-66.
- [77] Tanaka, H., Negishi, H. and Maeda, H. (1990) Control of Tobacco Bacterial Wilt by an Avirulent Strain of *Pseudomonas solanacearum* M4S and Its Bacteriophage. *Japanese Journal of Phytopathology*, **56**, 243-246. <https://doi.org/10.3186/jjphytopath.56.243>
- [78] Fujiwara, A., Fujisawa, M., Hamasaki, R., Kawasaki, T., Fujie, M. and Yamada, T. (2011) Biocontrol of *Ralstonia Solanacearum* by Treatment with Lytic Bacteriophages. *Applied and Environmental Microbiology*, **77**, 4155-4162. <https://doi.org/10.1128/aem.02847-10>
- [79] 高苗. 青枯雷尔氏菌噬菌体的分离鉴定及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [80] Ahmad, A.A., Stulberg, M.J., Mershon, J.P., Mollov, D.S. and Huang, Q. (2017) Molecular and Biological Characterization of Φrs551, a Filamentous Bacteriophage Isolated from a Race 3 Biovar 2 Strain of *Ralstonia solanacearum*. *PLOS ONE*, **12**, e0185034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185034>
- [81] 林志坚, 陈长江, 周挺, 顾钢, 胡方平, 李春英, 蔡学清. 青枯菌噬菌体 RPZH6 株系对烟草青枯病的生防效果及全基因组测序分析[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(10): 133-142.
- [82] 蔡刘体, 陆宁, 沈子霞, 等. 烟草青枯雷尔氏菌噬菌体资源的发掘[J]. 生物资源, 2018, 40(4): 339-344.
- [83] Wei, C., Liu, J., Maina, A.N., Mwaura, F.B., Yu, J., Yan, C., *et al.* (2017) Developing a Bacteriophage Cocktail for Biocontrol of Potato Bacterial Wilt. *Virologica Sinica*, **32**, 476-484. <https://doi.org/10.1007/s12250-017-3987-6>
- [84] 黄慧婧, 罗坤. 芽孢杆菌与杀菌剂复配防治植物病害的研究进展[J]. 微生物学通报, 2021, 48(3): 938-947.
- [85] 冯永新, 关辉, 靳彦峰, 等. 短小芽孢杆菌与化学杀细菌剂协同防治烟草青枯病研究, 中国烟草科学, 2021, 42(4): 44-49.