

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2024.01.003

基于根际生物屏障构建的烟草青枯病绿色 防控技术的应用研究

毕开涛¹, 韩伟¹, 陈佛源¹, 覃锋¹, 易蔓¹,
李吉秀², 任甜甜², 杜霞³, 李石力²

1. 四川省烟草公司宜宾市公司, 四川 宜宾 644600; 2. 西南大学 植物保护学院, 重庆 400715;
3. 重庆西农植物保护科技开发有限公司, 重庆 400700

摘要: 青枯病防控一直是烟草农业发展中亟需破解的难题, 探究并构建绿色、持续、高效的烟草青枯病防治技术体系具有重要的生产实践价值. 本研究选择四川省宜宾市筠连县蒿坝镇烟草青枯病连年重发区, 集成以基于根际生物屏障构建的烟草青枯病绿色防控技术体系, 采用土壤保育、拮抗菌剂基质拌菌、有机肥拌菌、营养抗性诱导技术, 系统评价技术体系应用后对烟草生长发育、土壤元素、微生物菌群变化以及经济效益的影响. 结果表明, 技术体系应用后显著促进了烤烟生长发育, 与对照区相比, 打顶后处理区烟株株高、叶片数、茎围、最大叶长、最大叶宽提升了9.8%, 19.53%, 16.56%, 14.86%和29.65%; 显著提高了烤烟对土壤元素的利用, 处理区碱解氮、有效磷、有效钾相比对照区减少了76.58 mg/kg, 80.89 mg/kg, 506.25 mg/kg, 交换性钙、镁、pH值分别增加了1 600 mg/kg, 176.50mg/kg与0.4个单位; 优化了土壤微生物菌群, 与对照区相比, 示范区内烟草根际细菌中有益菌属 *Bacillus*, *Sphingomonas*, *Bryobacter*, *Bradyrhizobium*, *Flavobacterium*, *Arthrobacter*, *Sphingobium* 丰度增加了462.75%, 69.77%, 664.10%, 131.34%, 101.97%, 123.74%, 490.00%, 青枯雷尔氏菌属下降63.14%; 烟叶采收期示范区相对防效仍可达到86%左右, 较非示范区的667 m²均综合经济效益高出1 337.62元. 通过示范应用, 证实了该项技术体系能够优化土壤, 降低青枯病发生, 提升烟叶产量, 在今后的烟草青枯病防治中具有重要的应用前景.

关键词: 生物屏障, 烟草青枯病, 绿色防控,
基质拌菌, 土壤保育

中图分类号: S435.72

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2024)01-0022-11

收稿日期: 2023-12-06

基金项目: 中国烟草总公司四川省公司科技项目(SCYC202315); 中国烟草总公司重大科技项目[110202101047(LS-07)].

作者简介: 毕开涛, 农艺师, 主要从事烟叶生产工作.

通信作者: 李石力, 博士, 讲师.

Green Prevention and Control Technology for Tobacco Bacterial Wilt Based on Rhizosphere Biological Barrier

BI Kaitao¹, HAN Wei¹, CHEN Foyuan¹, QIN Feng¹,
YI Man¹, LI Jixiu², REN Tiantian², DU Xia³, LI Shili²

1. Sichuan Tobacco Company Yibin Company, Yibin Sichuan 644600, China;

2. College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. Chongqing Xinong Plant Protection Technology Development, Chongqing 400700, China

Abstract: Control of bacterial wilt has always been a pressing issue in the development of tobacco agriculture. Exploring and establishing a green, sustainable, and efficient technical system for control of tobacco bacterial wilt holds immense production value. In this study, Yaoba Town, Junlian County, Yibin City, Sichuan Province, a region which tobacco bacterial wilt occurred frequently for many years, was selected for experiment. The green control technology system of tobacco bacterial wilt was constructed based on the rhizosphere biological barrier, soil conservation, mixing antagonistic agents with organic fertilizers, and induction of resistance with nutrient. The effects of this technology on tobacco growth, soil elements, microbial flora, and economic benefits were systematically evaluated. The results showed that the application of this technology significantly promoted the growth and development of tobacco plants. Compared to the control area, plant height, leaf number, stem circumference, maximum leaf length, and maximum leaf width increased by 9.80%, 19.53%, 16.56%, 14.86%, 29.65%, respectively, during the topping period. The utilization of soil elements by tobacco plants was also significantly improved. Compared to the soil of control area, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, available potassium decreased by 76.58 mg/kg, 80.89 mg/kg and 506.25 mg/kg, respectively. Exchangeable calcium and magnesium content, as well as pH values, increased respectively by 1 600 mg/kg, 176.50 mg/kg, and 0.4 units after applying this technology. After the implementation of technology, the soil microbial flora was optimized by compared to the control area. The abundance of beneficial bacteria *Bacillus*, *Sphingomonas*, *Bryobacter*, *Bradyrhizobium*, *Flavobacterium*, *Arthrobacter* and *Sphingobium* increased by 462.75%, 69.77%, 664.10%, 131.34%, 101.97%, 123.74% and 490.00%, respectively, whereas *Rella soliculosa* decreased by 63.14%. During the period of tobacco harvesting in the demonstration area, the relative control efficiency for bacterial wilt still reached to approximately 86%, and the comprehensive economic benefit was ¥ 1 337.62/667 m² higher than that in non-demonstration areas. Demonstrative application proved that this technology can optimize soil properties, reduce occurrences of bacterial wilt and increase tobacco yield, demonstrating significant potential for future applications in management of tobacco bacterial wilt.

Key words: biological barrier; tobacco bacterial wilt; green prevention and control; substrate mixing; soil conservation

青枯病是一种重要的土传病害,其发生隐蔽,连年发生,给烟叶生产造成了重大的经济损失^[1].此外,烟草青枯病的发生范围与趋势日益严重,逐渐由低纬度向高纬度,低海拔向高海拔地区发生发展,尤其在武陵山、云贵高原、武夷山等烟区的一些区域暴发流行趋势严重,已经成为目前乃至今后我国烟草生产中的重大植保问题^[2-3].

根际生物屏障是由生物体及其生物体所在生境形成的植物健康保障体系,是植物抵御外界胁迫重要的防御系统^[4]。在生物屏障体系中(图1),大量的有益功能微生物参与体系的构建与功能的行使,如假单胞菌属(*Pseudomonas* spp.)、芽孢杆菌属(*Bacillus* spp.)、木霉属(*Trichoderma*)等,这些生防菌通过生态位竞争、拮抗活性、诱导植物产生系统抗性、活化土壤与降解自毒物质等保护植物的安全^[5-7]。然而在根际环境中,元素、环境、微生物等因子都是影响生物屏障形成重要的因子,如土壤酸化后(pH值4.5~5.5),病原菌大量增殖,有益菌被抑制,微生物菌群结构遭到严重破坏,导致了植物抗性下降,生物屏障功能下降^[8]。土壤元素缺失,如交换性钙、镁、硼、钼等中微量元素偏低,土壤抑病效果显著下降,加剧了青枯病的发生^[9]。此外,根系分泌物中部分自毒物质能够显著地刺激病原菌增殖,抑制有益菌的增殖,制约生物屏障的形成^[10-12]。在生物屏障中,微生物扮演着非常重要的角色,如植物受到病原菌侵染后,根际通过释放出氨基酸、糖类等代谢物,诱集有益微生物在根部形成生物屏障,进而增强对病害的抵御能力,并且提升下一代作物对该病害的抗病水平^[13]。另外,当青枯病发生后,土壤中的有益微生物菌群如节杆菌属、芽孢杆菌属等丰度显著下降,生物屏障功能弱化^[14]。基于此,可以看出当屏障内微生物比例严重失调,病原微生物种群丰富增加,导致病原菌对生物屏障产生冲击作用,最终引起病害严重发生^[4]。因此,在防治青枯病中,必须通过调控多种因子,综合多项针对性技术强化生物屏障能力,才能够实现青枯病的持续调控。基于此,本研究采用土壤调理、微生物菌剂基质与有机肥添加、营养抗性诱导等技术,优化生物屏障,提高烟株健康与抗性,并系统评价了该技术体系对土壤与菌群优化、青枯病调控和烟株产量等方面的影响。

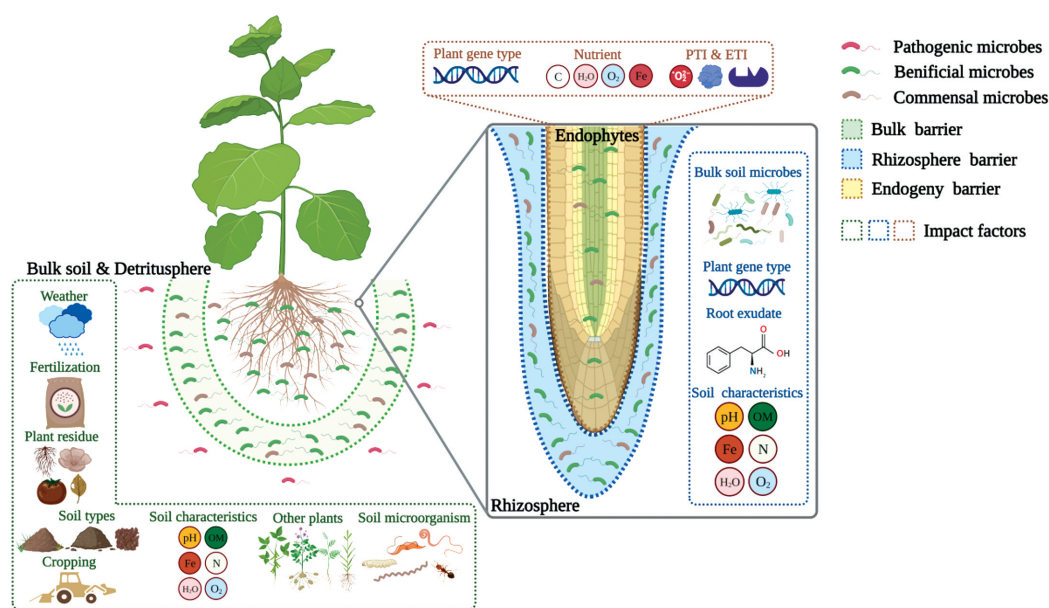


图1 根际生物屏障模式

1 材料与方法

1.1 试验地情况

试验地安排在四川省宜宾市筠连县蒿坝镇基地单元,示范区为常年青枯病发病地块,种植品种“云烟87”,按照当地烟叶生产技术标准进行栽培管理。种植密度:每667 m²为1100株烟左右。

1.2 试验材料

复合微生物菌剂(苗强壮)、复合微生物菌剂(根茎康)、土壤调理剂(牡蛎钾)、水杨酸与复合中微量元素,均采购于重庆西农植物保护科技开发有限公司。

1.3 试验设计

试验设置示范区与对照区,示范区主要技术如下:采用微生物菌剂(苗强壮)100 g/667 m²,进行基质拌菌;起垄前撒施土壤调理剂(牡蛎钾)100 kg/667 m²;起垄期将根茎康 1 kg/667 m²与有机肥拌菌进行条施;移栽后 60 d 左右,将中微量元素(100 g/667 m²)与水杨酸(8 g/667 m²)进行叶面均匀喷施。对照区严格按照常规进行农事操作。

1.4 调查内容

1.4.1 烟株农艺性状

采用 5 点调查点,每个处理每个调查点选择有代表性的 20 株烟,示范区与对照区各调查 100 株烟。按照《烟草农艺性状调查方法》(YC/T142—2010),测定打顶后 7 d 的农艺性状,主要包括株高、茎围、最大腰叶长与宽。

1.4.2 土壤样品采集、调查指标与方法

烤烟采收后期,对示范区与对照区进行烟株根际土壤样品采集,采用 5 点取样法,每个点采集 15 株烤烟根际土壤样品混为一个样品,示范区与对照区各采集 5 个样品,其中一部分样品进行风干检测测定土壤 pH 值、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、全钾、速效钾、交换性钙、交换性镁含量。样品寄送上海美吉生物公司进行微生物测序分析。

1.4.3 烟株青枯病调查

按《烟草病虫害分级及调查方法》(GB/T23222—2008),针对青枯病进行系统调查,调查示范区与对照区发病株数以及发病级数,计算发病率与病情指数,每隔 7 d 调查一次,连续调查 8 次。

$$\text{发病率}(\%) = \frac{\text{发病株数}}{\text{调查总株数}} \times 100\%$$

$$\text{病情指数} = \frac{\sum(\text{发病株数} \times \text{该病级代表值})}{\text{调查总株数} \times \text{最高级代表值}} \times 100$$

1.4.4 经济性状调查

自烟叶采收期开始,对处理区和非处理区烟叶进行分区采烤,烤后烟叶进行分级,统计产量和产值,并计算均价。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2003 进行数据处理,计算发病级数与病情指数,采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析,用独立样本 t 检验比较分析,显著性水平设定 $p < 0.01$ 与 $p < 0.05$,采用 Origin 9.0 与 Prism 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 技术体系应用后对烤烟农艺性状的影响

对打顶后烤烟长势进行统计调查,结果表明示范区内烤烟发育显著优于对照区,表现出显著性差异,较对照区相比,示范区内烤烟株高、叶片数、茎围、最大叶长、最大叶宽提升了 9.8%, 19.53%, 16.56%, 14.86% 和 29.65%(表 1)。

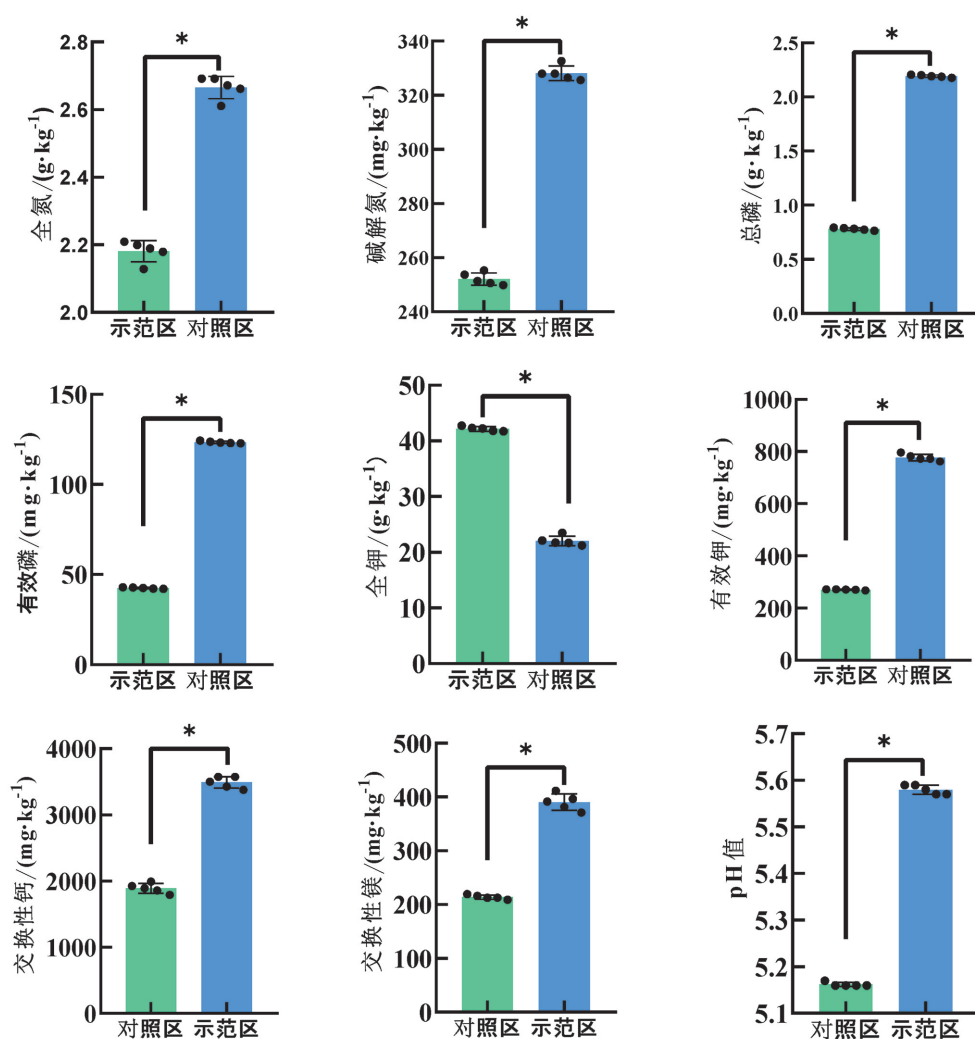
表1 打顶期示范区与非示范区烟株农艺性状对比

处理	株高/cm	茎围/cm	叶数/片	叶长/cm	叶宽/cm
示范区	112.23±3.26aA	10.83±0.12aA	19±0.31aA	69.27±1.22aA	29.25±0.13aA
对照区	102.13±3.52bB	9.06±0.17bB	16.3±0.27bB	60.7±1.35bB	22.56±0.44bB

注：大小写字母不同均表示组间数据比较差异具有统计学意义，其中小写字母不同表示 $p < 0.05$ ，大写字母不同表示 $p < 0.01$ 。

2.2 技术体系应用后对烤烟根际土壤理化性质的影响

本研究对示范区与对照区土壤理化性质进行检测分析，测定了土壤 pH 值、全氮、有效磷、全钾、交换性钙、交换性镁等元素。通过分析发现，技术体系的应用后，烤烟发育显著优于对照区，对土壤元素的利用更加有效，而对照区烤烟长势不足，整体元素利用率不高。示范区与对照区内各项指标均存在显著性差异 ($p < 0.01$)，如图 2 所示，对照区全氮与碱解氮分别达到 2.66 g/kg 与 328 mg/kg，比示范区高 0.5 g/kg 与 76 mg/kg；对照区总磷与有效磷比示范区高 1.3 g/kg 与 505 mg/kg；而全钾示范区达到 41 g/kg 显著高于对照的 21 g/kg，有效钾示范区要低于对照区 507 mg/kg；交换性钙、镁，示范区显著高于对照区 1 600 mg/kg 与 176 mg/kg；土壤酸碱度指标发现示范区内土壤酸化得到显著改善，pH 值提升 0.4 个单位。



“*”表示组间差异具有统计学意义 ($p < 0.05$)。

图2 示范区与对照区土壤理化性质对比分析

2.3 示范区和对照区土壤微生物群落特征对比分析

2.3.1 示范区与对照区根际微生物 α 多样性分析

烟草根际土壤细菌 α 多样性如表 2 所示,示范区烟草根际微生物群落与对照区微生物多样性指数差异显著. Chao1 指数用来反映细菌群落的丰富度, Shannon 指数用来评价细菌群落的多样性, Shannoneven 指数用来反应群落均匀度. ANOVA 检验结果显示,示范区烟草根际细菌群落的丰富度、多样性与均匀度与对照区对照区无显著差异.

表 2 示范区与对照区烟草根际土壤细菌 Alpha 多样性指数

发病情况	对照区	示范区
Chao1 指数	2 193.22±490.58	2 172.93±386.73
Shannon 指数	6.70±0.24	6.65±0.31
Shannoneven 指数	0.88±0.014	0.87±0.022

注:表中数据为 $\bar{X} \pm SD$, $N=5$.

2.3.2 示范区与对照区烟草根际细菌 β 多样性分析

基于 ASV 水平, Bray-Curtis 距离的 PCA 分析表明示范区与对照区烟草根际微生物具有明显的特异性(图 3). PC1 解释了不同品种烟草细菌群落结构差异的 18.32%, 而 PC2 则解释了 13.90%. ADONIS 结果($R=0.756\ 0$, $p=0.004$)同样证明了示范区与对照区烟草根际细菌差异具有统计学意义.

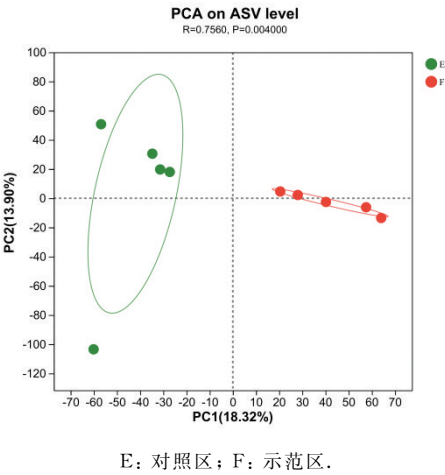
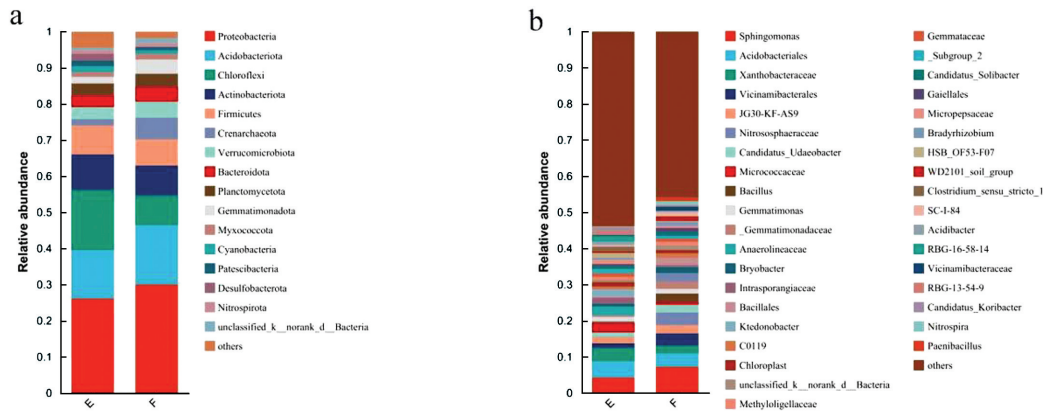


图 3 示范区与对照区烟草根际微生物群落 β 多样性

2.3.3 示范区与对照区烟草根际微生物群落组成

其门与属水平的根际细菌群落组成如图 4 所示. 在门水平, 变形菌门(*Proteobacteria*)、酸杆菌门(*Acidobacteriota*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、放线菌门(*Actinobacteriota*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)、泉古菌门(*Crenarchaeota*)、疣微菌门(*Verrucomicrobiota*)、浮霉菌门(*Planctomycetota*)、芽孢杆菌门(*Gemmatimonadota*)为示范区与对照区烟草根际细菌的优势菌门. 属水平, 鞘单胞菌属(*Sphingomonas*)、酸杆菌属(*Acidobacteriales*)、黄色杆菌属(*Xanthobacterace-*

ae)、*Vicinamibacterales*、*Gaiellales* 为烟草根际土壤中的优势菌属。其中,鞘单胞菌属(*Sphingomonas*)在示范区烟草根际土壤中含量高于示范区烟草根际土壤,在示范区烟草根际土壤中相对丰度为 0.07,在对照区烟草根际土壤相对丰度为 0.04。此外,酸杆菌属细菌在示范区烟草根际土壤含量为 0.045,高于对照区烟草根际土壤含量 0.036。



E: 对照区; F: 示范区 a: 门水平; b: 属水平

图4 示范区与对照区烟草根际细菌群落组成

2.3.4 示范区与对照区烟草根际微生物群落差异分析

对示范区与对照区烟草根际细菌群落组成进行物种差异判别分析,寻找对样本划分产生显著性差异影响的物种,即指示类群(indicator taxa),将具有显著差异的不同分类水平指示类群以图5所示。在10个样本中共筛选出相对丰度排在前15个的差异菌属,即指示类群,结果如图5所示,示范区与对照区烟草根际微生物群落存在较大差异,属于酸杆菌门的纤维杆菌属(*Ktedonobacter*)、*Acidibacter*在示范区烟草根际烟株富集。芽孢杆菌属(*Bacillus*)、布鲁氏菌(*Bryobacter*)、慢生根瘤菌(*Bradyrhizobium*)、硝化螺旋菌(*Nitrospira*)在对照区烟草根际富集。

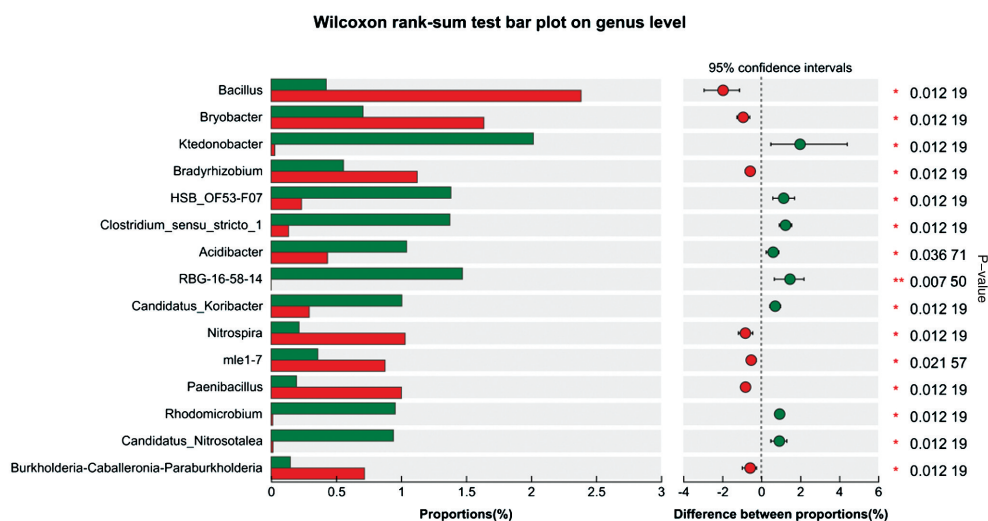


图5 不同发病程度烟草根际差异细菌组成分析

在示范区与对照区烟草根际细菌群落中,青枯雷尔氏属(*Ralstonia*)在对照区烟草根际土

壤中的相对丰度为 0.06%, 在示范区烟草根际土壤中的相对丰度为 0.02. 与对照区相比, 示范区青枯雷尔氏属(*Ralstonia*)相对丰度下降 63.14%. 对照区烟草根际细菌中有益菌属 *Bacillus*, *Sphingomonas*, *Bryobacter*, *Bradyrhizobium*, *Flavobacterium*, *Arthrobacter*, *Sphingobium*, *Gemmatimonas*, *Flavisolibacter* 的相对丰度分别为 0.21%, 2.14%, 0.01%, 0.35%, 0.28%, 0.04%, 0.12%, 0.003%, 0.64%.

2.4 技术体系应用对烟草青枯病发生的影响

对示范区与对照区青枯病发生情况进行对比分析结果表明, 末次调查示范区与对照区烤烟处于采收末期, 示范区内青枯病的发病率为 8.8%, 病情指数为 3.02, 而对照区青枯病的发病率为 80.35%, 病情指数 25.36, 相对防效为 86%左右(图 6).

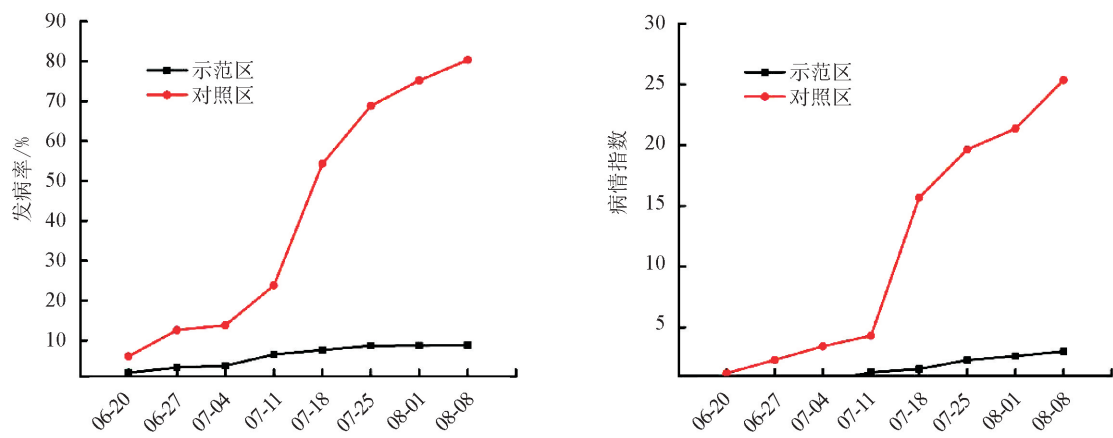


图 6 示范区与对照区田间青枯病发病率与病情指数

2.5 技术体系应用对烤烟经济效益的影响

对示范区与对照区产量以及经济效益进行统计分析, 结果表明, 示范区 667 m² 的产量、均价、产值为 149.56 kg, 29.52 元/kg, 4 564.57 元, 与对照相比分别提高了 31 kg, 3.25 元/kg 与 1 337.62 元(表 3).

表 3 示范区与非示范区经济效益对比

处理	667 m ² 产量/kg	667 m ² 产值/元	均价/(元 · kg ⁻¹)
示范区	149.56	4 415.01	29.52
对照区	118.27	3 077.39	26.02

3 结论与讨论

烟草青枯病发生复杂, 影响因子多样, 单一技术措施难以有效防控. 基于此, 本研究通过构建以生物屏障为核心的绿色防控技术体系, 综合应用改良土壤、优化土壤微生物菌群结构、微生态调控、营养抗性诱导等技术, 构建烟株健康的立体生物屏障体系. 通过土壤理化性质、微生物菌群、烟株发育等方面的调查, 证实了该技术体系能够较好的改良土壤、优化土壤菌群结构、增强烟株抗病能力, 最终有效地调控青枯病的发生, 提高了烟农的经济效益.

强大的生物屏障是维护作物健康的关键,尤其在抵御土传病原菌侵染中,生物屏障内的关键微生物以及环境因子起着重要的作用. 本研究发现,采用土壤调理剂应用后能够显著优化土壤,尤其是改良土壤酸化,处理后 pH 值提升 0.4 个单位. 沈桂花等研究发现在烟草根际施用牡蛎粉能够显著提高土壤 pH 值,降低青枯病发生,发病率较对照降低了 43.33%^[15]. 同时牡蛎粉使用之后降低了交换性铝 0.3 mmol/kg,交换性钙离子增加了 2.3 mmol/kg^[16]. 本研究也发现采用以牡蛎粉为核心的调理剂牡蛎钾能够显著提高交换性钙、镁的含量. 此外土壤酸化显著影响了生物屏障中的微生物菌群,如研究表明,土壤酸化后土壤中整体的微生物菌群由真菌型转化为细菌型,同时部分有益微生物种群的丰度显著降低^[17-19]. 但是,通过添加土壤改良剂后微生物菌群结构得到显著改善. Shen 等研究发现牡蛎粉能够显著提高土壤中 *Saccharibacteria*, *Aeromicrobium*, *Pseudoxanthomonas* 丰度,降低青枯病发生^[20]. 此外,通过增施石灰+油菜还田处理能显著提高有益菌属鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)的相对丰度,降低青枯雷尔氏菌属(*Ralstonia*)的相对丰度,同时青枯病的发病率可以降低 46.01%左右^[21].

微生物是生物屏障体系以及防御功能的核心,微生物菌剂的应用,一定程度上可以抑制病原菌生长繁殖,降低青枯病的发生,目前已有大量的生防菌被鉴定以及应用于防治青枯病^[22]. 然而这些微生物菌剂在应用后常常出现定殖能力差、存活率偏低、适应性与竞争能力弱等缺点,导致了生防效果不稳定和不持久^[23]. 那么,要提高生防菌的根部适应与存活定殖能力,必须要早期应用. Wei 等研究发现早期根际微生物群落结构特征就决定了后期的植物健康程度^[24]. 因此在种子萌发与早期发育中添加菌剂(基质拌菌),可以更早地促使植物与微生物形成互作,构建早期根际与根内生物屏障^[25];其次,通过有机肥中添加菌剂,为菌株繁殖提供了营养载体,菌株也可以更好地分解有机肥供植物生长,更强化了根围生物屏障的形成. 本研究发现,施用生物菌剂后根际微生物菌群结构特征出现了显著变化,示范区青枯雷尔氏属(*Ralstonia*)相对丰度下降 63.14%,且根际细菌中有益菌属 *Bacillus*, *Sphingomonas*, *Bryobacter*, *Bradyrhizobium*, *Flavobacterium*, *Arthrobacter* 等 11 中有益菌属丰度显著增加,烟草青枯病的防治效果在采收末期可以达到 80%以上. 同样地,龚杰等研究发现,在烟苗中进行基质拌菌可以显著提升农艺性状和对青枯病的防效,尤其采用 100 g/667 m² 的用量时效果最佳^[26]. 扈雪琴等^[27]与杨会款等^[28]采用田间试验,发现仅单用基质拌菌技术就可以对烟草青枯病有 40%以上的防治效果. 在番茄作物上,应利平等研究发现基质拌菌育苗处理通过改变番茄土壤微生物群落结构,增加土壤细菌和放线菌数量,优化土壤微生物区系,增强番茄长势,提高叶绿素含量^[29]. 此外,通过有机肥中添加菌剂能够显著的优化土壤微生态环境,提高作物抗病性. 如研究发现菌剂与氨基酸、牛粪有机肥复配后能显著提升土壤放线菌数量,使其由“真菌型”向“细菌型”转变^[30]. 吴晓宗等研究发现施用生物有机肥后提高了根际土壤碱解氮、速效磷的含量,降低了烟草青枯病发病率与病情指数,烟草移栽 95 d 时的防效为 31.43%^[31].

植物健康是植物表型完美和实现产质量目标的关键,对人类健康、生态环境安全和社会稳定发展具有十分重要的意义^[32]. 在植物健康维护中,土壤健康是非常重要的基础,尤其在土传病害防治中,可利用有机物质种类多样性,促进活性微生物多样性,消除或缓解土传障碍^[33]. 然而在青枯病的发生与调控过程中,一定要深刻理解该病害发生的系统性,要将青枯病病害概念上升到植物疾病概念,不能仅仅局限在植物与病原的互作研究上,要全面理解与病害发生息息相关的植物、环境、土壤等因子,找准病害的关键主导因子,才能够系统精准调控病害发生^[34]. 此外,不仅要关注病害对植物个体造成的影响,更要关注病害发生对植物群体以及对农

田生态系统等造成的影响,这样才能更加全面、系统且具有针对性地建立植物健康维护与病害控制的技术体系,才能更好地指导生产实践.本研究系统地从土壤与植物健康角度,以微生态调控为基础,构建作物健康的生物屏障体系,通过生产实践验证,有效地调控了烟草青枯病发生,形成了显著的示范成效,该项研究以及所形成的技术方案将在控制茄科作物青枯病中发挥重要的作用,也为其他作物病害的防治提供重要的借鉴意义.

参考文献:

- [1] JIANG G F, WEI Z, XU J, et al. Bacterial Wilt in China: History, Current Status, and Future Perspectives [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1549.
- [2] 谭茜,李杰,汪代斌,等.我国主要烟草青枯病病原青枯菌系统发育分析[J].*中国烟草科学*, 2022, 43(2): 52-57.
- [3] 丁伟,刘颖,李石力,等.烟草青枯病的病原特性及流行预警[J].*植物医生*, 2020, 33(2): 1-10.
- [4] 丁伟,刘晓姣.植物医学的新概念——生物屏障[J].*植物医生*, 2019, 32(1): 1-6.
- [5] 胡军华,张伏军,蓝希锴,等.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.
- [6] 王麒,许婧霞,张亚妮,等.贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*)JJYY 防控土传病害效果评价及其全基因组测序分析和抗菌成分鉴定[J].*微生物学通报*, 2024, 51(1): 155-171.
- [7] 朱洪江,王勇,刘东阳,等.哈茨木霉对烟草青枯病田间控制效果及生物学性状的影响[J].*植物医生*, 2019, 32(5): 26-31.
- [8] LI S L, LIU Y Q, WANG J, et al. Soil Acidification Aggravates the Occurrence of Bacterial Wilt in South China [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 703.
- [9] 郑世燕,陈弟军,丁伟,等.烟草青枯病发病烟株根际土壤营养状况分析[J].*中国烟草学报*, 2014, 20(4): 57-64.
- [10] 李石力.有机酸类根系分泌物影响烟草青枯病发生的机制研究[D].重庆:西南大学,2017.
- [11] LIU Y X, LI X, CAI K, et al. Identification of Benzoic Acid and 3-Phenylpropanoic Acid in Tobacco Root Exudates and Their Role in the Growth of Rhizosphere Microorganisms [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 93: 78-87.
- [12] LIU X J, JIANG Q P, HU X Q, et al. Soil Microbial Carbon Metabolism Reveals a Disease Suppression Pattern in Continuous Ginger Mono-Cropping Fields [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 144: 165-169.
- [13] YUAN J, ZHAO J, WEN T, et al. Root Exudates Drive the Soil-Borne Legacy of Aboveground Pathogen Infection [J]. *Microbiome*, 2018, 6(1): 156.
- [14] LIU X J, ZHANG S T, JIANG Q P, et al. Using Community Analysis to Explore Bacterial Indicators for Disease Suppression of Tobacco Bacterial Wilt [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 36773.
- [15] 沈桂花,刘晓姣,张淑婷,等.牡蛎壳粉对烟草根际土壤微生物代谢多样性及青枯病发生的影响[J].*烟草科技*, 2017, 50(12): 22-28.
- [16] 闫静,时仁勇,王昌军,等.不同改良剂对酸性烟田的改良效果及其对烤烟生长的影响[J].*土壤*, 2023, 55(3): 612-618.
- [17] ROUSK J, BÅÅTH E, BROOKES P C, et al. Soil Bacterial and Fungal Communities across a pH Gradient in an Arable Soil [J]. *The ISME Journal*, 2010, 4(10): 1340-1351.
- [18] ROUSK J, BROOKES P C, BÅÅTH E. Investigating the Mechanisms for the Opposing pH Relationships of Fungal and Bacterial Growth in Soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(6): 926-934.
- [19] ROUSK J, BROOKES P C, BÅÅTH E. Contrasting Soil pH Effects on Fungal and Bacterial Growth Suggest Functional Redundancy in Carbon Mineralization [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(6): 1589-1596.

- [20] SHEN G H, ZHANG S T, LIU X J, et al. Soil Acidification Amendments Change the Rhizosphere Bacterial Community of Tobacco in a Bacterial Wilt Affected Field [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102(22): 9781-9791.
- [21] 左梅, 向必坤, 沈始权, 等. 不同调酸处理对土壤细菌群落结构及雪茄烟株青枯病发生的影响 [J]. *烟草科技*, 2023, 56(7): 25-31.
- [22] 刘勇, 韦树谷, 叶鹏盛, 等. 烟草青枯病的发生流行及生防菌防控的根际微生物效应研究进展[J/OL]. *烟草科技*, (2023-12-01)[2023-12-12]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids>.
- [23] 孙成成, 丁伟, 潘兴兵, 等. 影响微生物菌剂应用稳定性的因素分析 [J]. *植物医生*, 2019, 32(4): 19-23.
- [24] WEI Z, GU Y A, FRIMAN V P, et al. Initial Soil Microbiome Composition and Functioning Predetermine Future Plant Health [J]. *Science Advances*, 2019, 5(9): eaaw0759.
- [25] DINI-ANDREOTE F, RAAIJMAKERS J M. Embracing Community Ecology in Plant Microbiome Research [J]. *Trends in Plant Science*, 2018, 23(6): 467-469.
- [26] 龚杰, 江其朋, 谭茜. 不同用量复合微生物菌剂基质拌菌对烟草生长及青枯病发生的影响 [J]. *植物医生*, 2020, 33(3): 50-54.
- [27] 扈雪琴, 刘晓姣, 江其朋, 等. 烟草育苗基质拌菌对烟草生长及青枯病的影响 [J]. *植物医生*, 2019, 32(4): 28-32.
- [28] 杨会款, 徐传涛, 刘蔺江, 等. 育苗基质中添加不同微生物菌剂对烟草抗病性及产质量的影响 [J]. *植物医生*, 2019, 32(6): 44-51.
- [29] 应利平, 刘玲, 张明科. 基质拌菌育苗对土壤微生物特性和番茄生长发育的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022 (12): 74-81.
- [30] 熊维亮, 张宗锦, 赵明珠, 等. 生防菌剂与不同有机肥复配对植烟土壤微生物区系的影响 [J]. *农学学报*, 2019, 9(1): 21-25, 81.
- [31] 吴晓宗, 曾强, 李红丽, 等. 拮抗菌生物有机肥对植烟土壤和烟草青枯病的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2017, 45 (15): 88-91.
- [32] 丁伟, 江其朋. 论植物健康[J]. *植物医学*, 2023, 2(1): 1-11.
- [33] 蔡祖聪, 黄新琦, 赵军. 作物土传病害防控的健康微生物群落构建原理与实践[J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1213-1220.
- [34] 丁伟, 王珍珍, 江其朋. 论植物疾病[J]. *植物医学*, 2023, 2(2): 1-13.

责任编辑 王新娟