

李华平, 李云锋, 聂燕芳. 香蕉枯萎病的发生及防控研究现状 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 128-136.
LI Huaping, LI Yunfeng, NIE Yanfang. Research status of occurrence and control of Fusarium wilt of banana[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 128-136.

香蕉枯萎病的发生及防控研究现状

李华平^{1†}, 李云锋^{1†}, 聂燕芳²

(1 广东省微生物信号与作物病害重点实验室/华南农业大学农学院, 广东 广州 510642;

2 华南农业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510642)

摘要: 香蕉是世界第 2 大水果作物, 也是世界贸易量最大的水果。由尖孢镰刀菌古巴专化型 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, Foc) 引起的香蕉枯萎病是香蕉生产上最重要的病害之一, 极大地限制了世界香蕉产业的健康和可持续发展。近年来国内外学者在其病害发生、病原生物学、侵染过程、病害流行、基因组测序、香蕉与 Foc 互作以及病害防控等方面开展了大量研究, 但鲜见较为系统和全面的评述。本文就香蕉枯萎病的发生历史和危害现状、病原小种和遗传多样性以及防控方法等进行较为全面的梳理和总结, 以期为该病害的研究和防控提供一定的参考。

关键词: 香蕉枯萎病; 尖孢镰刀菌古巴专化型; 病害发生; 病原遗传多样性; 防控方法

中图分类号: S435.111.41 文献标志码: A 文章编号: 1001-411X(2019)05-0128-09

Research status of occurrence and control of Fusarium wilt of banana

LI Huaping^{1†}, LI Yunfeng^{1†}, NIE Yanfang²

(1 Guangdong Province Key Laboratory of Microbial Signals and Disease Control/ College of Agriculture,

South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 College of Materials and Energy,

South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Banana is the second largest fruit crop in the world and is the fruit with the largest world trade. Fusarium wilt, caused by the necrotrophic fungal pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc), is one of the most destructive banana diseases, which greatly threatens the healthy and sustainable development of banana industry worldwide. In recent years, many efforts have been made on studying disease occurrence, pathogen biology, infection process, epidemiology, whole genome sequencing, banana-Foc interaction and disease management. However, there are few systematic reviews on Foc and Fusarium wilt. Here, we summarize with an emphasis on the disease history and the current status, the races and genetic diversity of Foc, and management strategies of Fusarium wilt, so as to provide references for research and control of this disease.

Key words: Fusarium wilt of banana; *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*; disease occurrence; genetic diversity of pathogen; management strategy

香蕉 *Musa* spp. 是世界重要的热带和亚热带水果。据世界粮农组织 (<http://www.fao.org/>) 2017 年的数据统计, 全球有 130 多个国家生产香蕉, 年种植面积超过 500 万 hm², 年产量超过 1 亿 t,

收稿日期: 2019-05-15 网络首发时间: 2019-07-19 10:04:53

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20190718.1024.002.html>

作者简介: 李华平 (1961—), 男, 教授, 博士, E-mail: huaping@scau.edu.cn; 李云锋 (1974—), 男, 教授, 博士, E-mail: yunfengli@scau.edu.cn; †对本文贡献相同

基金项目: 国家香蕉产业技术体系建设专项 (CARS-31-09); 国家自然科学基金 (31600663); 广东省科技计划 (2016A020210098)

是世界第 2 大水果作物, 也是世界贸易量最大的水果。在非洲和中南美洲等地, 有超过 4 亿人将香蕉作为主食, 香蕉已成为继水稻、小麦和玉米后的第 4 大粮食作物^[1]。我国是世界香蕉生产第 2 大国, 也是世界香蕉消费第 1 大国。2017 年, 我国香蕉生产面积约为 38 万 hm², 居世界第 6 位; 产量约为 1 100 万吨, 居世界第 2 位。我国香蕉主产区包括广东、广西、海南、福建、云南和台湾等省区, 此外在四川金沙江河谷地带、湖南南部、三峡地区、江西南部等地也有香蕉栽培。

香蕉病虫害是香蕉生产上的重要制约因素, 可造成香蕉产量和品质的损失, 甚至造成区域性和全局性的香蕉产业波动。据不完全统计, 目前我国共鉴定出香蕉病虫害 57 种; 其中病害 28 种, 包括 18 种真菌性病害、3 种细菌性病害、3 种病毒病和 4 种线虫病; 害虫 29 种^[2-5]。其中, 香蕉枯萎病是我国香蕉产区发生最为严重、最难防治的一种毁灭性病害, 被老百姓称为“香蕉癌症”。

由于香蕉种植区域主要分布在亚洲、非洲和南美洲等不发达或发展中国家, 长期以来香蕉枯萎病的研究没有受到西方发达国家学者们的重视; 与其他重要作物病害相比, 香蕉枯萎病的研究相对滞后。自 2008 年从国家层面设立现代农业(香蕉)产业技术专项以来, 我国香蕉枯萎病的研究才从各个方面得到了较为深入和系统的开展。本文主要从该病害的发生历史和危害现状、病原小种和遗传多样性、以及各种防控技术等方面, 较为系统地总结近年来国内外香蕉枯萎病的发生和防控的研究进展, 以期为从事该病害的研究者们提供参考。

1 香蕉枯萎病的发生历史和危害现状

香蕉枯萎病 (*Fusarium* wilt), 又称巴拿马病或黄叶病, 是由尖孢镰刀菌古巴专化型 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, Foc) 引起的一种土壤维管束病害^[6]。该病于 1874 年在澳大利亚被发现^[7]; 1890 年, 在中南美洲的巴拿马发生^[8]。由于中南美洲主要种植的香蕉品种‘大蜜哈’ (*Gros Michel*, AAA) 高度感病, 该病于 1910 年在巴拿马大流行, 造成大量蕉园的植株死亡、毁园和绝收, 直接导致了香蕉出口产业的衰退, 破坏了巴拿马乃至整个中南美洲的农业格局。为纪念该事件, 香蕉枯萎病也被称为“巴拿马病” (*Panama disease*)^[9]。经病原鉴定, 引起‘大蜜哈’品种枯萎病的病原菌为香蕉枯萎病菌 1 号生理小种 (*Foc race 1*, *Foc1*)。20 世纪 50 年代, 受 *Foc1* 侵染所导致的香蕉枯萎病影响,

‘大蜜哈’品种退出了国际市场。抗 *Foc1* 的品种‘香芽蕉’ (*Cavendish*, AAA) 的出现拯救了濒临灭亡的世界香蕉产业^[10]。1967 年在我国台湾发现了对‘香芽蕉’致病的 4 号生理小种 (*Foc race 4*, *Foc4*), 香蕉产业再次面临严重威胁^[11]。20 世纪 70 年代, 在菲律宾发现‘香芽蕉’品系被 *Foc4* 侵染^[8]。20 世纪 90 年代, *Foc4* 严重危害印度尼西亚和马来西亚的‘香芽蕉’蕉园^[11-12]。随后, *Foc4* 从亚洲的‘香芽蕉’种植国家扩展至澳大利亚、中东、印度和非洲, 仍在向未发病的香蕉种植国家和地区不断蔓延^[13-16]。2013 年在约旦和非洲莫桑比克^[17]、2015 年在巴基斯坦和黎巴嫩^[18]、2018 年在波多黎各和日本冲绳宫古岛^[19-20]发现了由 *Foc4* 引起的香蕉枯萎病。据不完全统计, *Foc4* 在世界各香蕉主产区均已发现, 包括澳大利亚、中国、印度尼西亚、约旦、阿曼、莫桑比克、黎巴嫩、巴基斯坦、马来西亚、印度、日本、巴基斯坦、菲律宾、越南、老挝、缅甸、以色列、马来西亚、南非、加那利群岛、南太平洋地区及美洲等国家和地区; 并在世界范围内逐渐由发病区向非病区扩展, 已成为世界香蕉产业发展的一个重要障碍。

我国是世界香蕉的主产国, 也是世界上最大的‘香芽蕉’生产国^[21]。香蕉种植是广东、广西、海南、福建等地农业的支柱性产业^[22]。香蕉枯萎病的发生给我国香蕉产业带来了毁灭性的打击。自 1967 年在我国台湾‘香芽蕉’发现 *Foc4* 以来^[23], 10 年间, 台湾香蕉种植面积就锐减至 4 908 公顷, 几乎摧毁了整个台湾省的香蕉产业^[24]。1996 年在广东省广州市万顷沙区发现 *Foc4*, 在此后的 5 年间, *Foc4* 使南沙区近 0.7 万公顷的香蕉植株发病率达到 30% 以上, 部分地块达到 80% 以上, 导致整个产区只能改种其他作物。随后, 该病迅速蔓延至广东全省。2000 年, 与广东省毗邻的福建省漳州地区发现 *Foc4*^[25]; 2001 年, 在海南省三亚市发现 *Foc4*^[26]; 2009 年, 在云南西双版纳勐腊县香蕉产区发现 *Foc4*^[27]; 2012 年, 广西也报道了 *Foc4* 的出现^[28]。截至 2019 年 5 月, 香蕉枯萎病在我国所有的香蕉主产区均有报道, 给香蕉产业造成了严重影响, 甚至造成蕉园毁灭丢荒, 损失惨重, 成为制约我国香蕉生产的最重要因素。

2 香蕉枯萎病的病原生理小种和遗传变异

2.1 病原生理小种

尖孢镰刀菌古巴专化型是一种死体营养型病原菌, 属于半知菌亚门丝孢纲瘤座孢目镰刀菌属

Fusarium。根据 Foc 对不同香蕉品种类型的致病力的差异, 可将其分为 3 个生理小种, 即 1 号 (Foc1)、2 号 (Foc2) 和 4 号 (Foc4) 生理小种; 根据病害的发生区域和特性, 又可进一步将 Foc4 区分为热带 4 号生理小种 (Foc TR4) 和亚热带 4 号生理小种 (Foc STR4)^[8, 29]。其中, Foc1 分布广泛, 主要能侵染香蕉的栽培种 ‘大蜜哈’ (Gros Michel, AAA)、‘粉蕉’ (Fenjiao, ABB)、‘龙牙蕉’ (Musa, AAB) 和 ‘矮香蕉’ (Dwarf cavendish, AAA), 并曾经导致 ‘大蜜哈’ 的绝产; Foc2 只侵染三倍体杂种 ‘棱香蕉’ (Bluggoe, ABB), 不侵染 ‘大蜜哈’, 主要分布在中美洲; Foc4 则几乎能侵染所有的香蕉品种, 危害性最大^[6]。

2.2 病原的遗传多样性

Foc 生理小种的分类依据是其对香蕉不同品种类型的致病力, 但这种方法仅限于寄主与病原菌间的相互关系, 不能反映病原菌的遗传关系和变异性, 因而难以准确区分同一生理小种不同菌株间的亲缘关系。营养亲合群 (Vegetative compatibility groups, VCGs) 可以有效区分菌株间的亲缘关系。菌株的营养亲和性通常受到多个不亲和位点的调控, 如果 2 个真菌是营养亲合的, 菌株在每一个不亲和位点上都具有相同的等位基因^[30]。因此, 2 个菌株在配对培养时若能够形成异核体, 菌株就是亲和的, 具有这种特性的菌株就定义为 1 个营养亲和群^[31]。由于 Foc 缺乏有性生殖, 因此不同的 VCGs 可以代表遗传分离的群体。

国外通常采用分子生物学方法研究 Foc 的遗传多样性, 包括随机扩增多态性 (Random amplified polymorphic DNA marker, RAPD)、限制性内切酶片段长度多态性 (Restriction fragment length polymorphism, RFLP)、扩增片段长度多态性 (Amplified fragment length polymorphism, AFLP)、简单重复序列 (Inter-simple sequence repeat, ISSR) 等分子标记技术。Boehm 等^[32] 采用脉冲电泳技术对 Foc 的电泳核型进行分析, 发现 15 个 VCGs 菌株的染色体数目为 9~14 条, 基因组 DNA 为 32.1~58.9 Mbp, 并根据染色体数目和基因组大小将不同 VCGs 分为了 2 大类群。Bentley 等^[33] 采用 RAPD 技术分析了来自世界各地包含 3 个生理小种 11 个 VCGs 的 54 个 Foc 菌株, 将 VCGs 分为 2 大类群, 与电泳核型分析结果一致。Koenig 等^[34] 采用 RFLP 方法分析了 17 个 VCGs 的 165 个 Foc 菌株, 将所有菌株分为了 10 个类群, 发现多数群内菌株与地理分布对应较好, 推测 Foc 存在独立进化现

象。Bentley^[33] 采用 DNA 指纹分析技术研究了 20 个 VCGs 的 208 个 Foc 菌株, 结果表明 Foc 存在丰富的遗传多样性, 结合地理分布推测其既存在共同进化, 也存在独立进化现象。Maryani 等^[35] 对印度尼西亚约 180 个 Foc 菌株的遗传多样性进行了分析, 将 65% 的供试菌株鉴定为 Foc TR4, 其他菌株间存在着丰富的遗传多样性, 可划分成 9 个独立的遗传谱系。Karangwa 等^[29] 采用 PCR-RFLP 技术对东非和中非 (ECA) 5 个国家的 281 个 Foc 菌株进行了分析, 发现其中 6 个 VCGs 广泛分布于 ECA 地区; VCG0128 和 VCG01220 则属于首次报道, 可能是新的 VCGs。已有报道的香蕉枯萎病菌 VCGs 超过 25 个^[6, 29, 36]。

由于缺乏 VCGs 的研究基础, 国内对于 Foc 遗传多样性的系统报道不多。Li 等^[37] 采用 AFLP 技术对来自我国台湾和华南地区的 55 个 Foc 菌株进行了分析, 结果表明两地的 Foc4 菌株在亲缘关系上相近, 认为华南地区的 Foc4 由台湾传入。汤浩等^[38] 采用 AFLP 技术对来自广东省不同地区的 20 株 Foc 进行了分析, 发现 Foc 种间菌株的聚类较明显, 但种内分化较大; Foc1 菌株间的遗传分化大于 Foc4, 且聚类结果与菌株的地理来源有一定的相关性。张贺等^[39] 采用 ISSR 技术对 11 个 Foc 菌株进行了分析, 结果表明不同地区 Foc 菌株间的遗传变异很大, ISSR 聚类组与寄主和小种间具有明显相关性, 推测 Foc 致病力和地理来源有关, 且 Foc 与寄主间存在明显的协同进化关系。黄穗萍等^[40] 对不同香蕉产区的 50 个菌株进行了 ISSR 指纹分析, 结果表明 Foc1 的遗传变异大于 Foc4; ISSR 聚类划分与生理小种类型有明显相关性, 与地理来源有一定相关性, 与致病力无关。

Foc1 发生时间长, 扩张定殖后逐渐适应了当地的生态环境, 因此在世界范围内不同菌株间的遗传变异大, 菌株与地域间具有明显相关性; 而 Foc4 于 1967 年在台湾发现, 不同国家和地区的菌株间变异相对较小, 菌株与地域间似乎没有明显相关性, 其菌株的起源很有可能是台湾。当然, 还需长期收集更多国家和地区、更大群体的菌株数量后进行分析, 从而得出更准确的结论。

3 香蕉枯萎病的防控方法

香蕉枯萎病的发生受多种因素综合影响, 其中香蕉品种、植株的生长状况、土壤中病原菌数量、栽培管理及环境条件等都是影响香蕉枯萎病发生是否严重的重要因素。抗病育种、化学防治、生物防

治、农业防控措施及综合防控是目前防治香蕉枯萎病的主要手段。

3.1 香蕉抗病品种的选育与评价

培育抗病品种和生产无病组培苗是目前公认最有效的防控香蕉枯萎病的措施。由‘香芽蕉’品系成功取代被 Foc1 严重危害的‘大蜜哈’品系,是香蕉枯萎病防控中最成功的范例。栽培蕉多为三倍体,高度不育且没有种子,导致香蕉的常规杂交育种非常困难。目前,香蕉抗病品种的选育主要有引种、芽变、组培苗变异、人工诱变和杂交等方法。在我国,通常是从境外引种后再进行芽变等选育工作,利用本地原种开展香蕉育种的不多。芽变和组培苗变异选择育种,基本上都是对原有引种的变异株进行筛选,世界上约有一半的香蕉栽培品种是由芽变产生的^[41]。通过变异株筛选,我国已获得了众多香蕉新品种,如‘宝岛蕉’^[11]、‘农科1号’^[42]、‘大丰2号’^[43]、‘桂蕉9号’^[44]、‘南天黄’^[45]等。值得指出的是,我国引进的‘巴西’和‘威廉斯’品系通过芽变和组培苗变异,选育出的适合华南地区栽种的‘巴西蕉’和‘桂蕉’已成为我国种植面积最大的香蕉品种,占我国香蕉种植面积的80%以上,从根本上杜绝了 Foc1 对我国香蕉的危害。变异株选种简单方便,但其主要问题在于变异小,仅对原有品种的生物学性状进行了部分修饰。而人工诱变和杂交育种能在基因组水平引起较大遗传变异,可导致香蕉中某一生物性状的完全改变,从而获得能够高度抗病的新品种。广东省农业科学院果树研究所通过将引进的‘金手指(AAAB)’与‘SH-3142(AA)’品系杂交,经过系列选育获得了高抗 Foc4 的‘中蕉9号’;中国热带科学院对优良品种‘巴西蕉’进行多代毒素筛选和人工诱变,选育出了不仅对 Foc1 免疫,而且高抗 Foc4 的品系‘中热1号’。这2个抗性品种(系)的成功选育,标志着我国在香蕉抗 Foc4 品种选育方面走在世界前列。

在香蕉抗病品种的选育中,另一个重要的工作是对选育出的品种进行抗病性评价。评价香蕉品种抗枯萎病的方法通常有2种:苗期人工接种的抗性评价和大田自然发病的抗性评价。由于田间土壤病菌分布不均匀,且易受栽培措施、气候变化等影响,大田自然发病的抗性评价结果就不那么可靠。而苗期人工接种是在严格控制的条件下进行的,包括控制接种的病原菌浓度、土壤类型、管理措施和环境条件等,因此该评价方法能真实地反映所选育品种对香蕉枯萎病的抗性。通过国家香蕉产业技术体系

平台,我们采用苗期抗性评价法对我国当前的18个香蕉主栽品种(系)进行了 Foc4 抗性测定,结果表明现有香蕉品种(系)不存在免疫的品种(系),在 Foc4 $1 \times 10^6 \text{ mL}^{-1}$ 的接种条件下,发病率均可高于 50%;但在 Foc4 $1 \times 10^5 \text{ mL}^{-1}$ 或低于该标准,很多香蕉品种(系)表现出良好的抗性,如‘佳丽蕉’、‘海贡蕉’、‘中蕉9号’、‘中热1号’对 Foc4 表现为高抗,‘中热2号’、‘南天黄’、‘宝岛蕉’、‘桂蕉2号’和‘苹果粉’表现出中度偏强的抗性,‘粤科1号’和‘农科1号’表现出中度抗性。

值得指出的是,已选育出的抗枯萎病香蕉品种,要应用于生产实践还需要进行不同产地的适应性试验。从目前选育的抗病品种的应用和推广来看,尽管‘南天黄’在云南、广东和海南,‘宝岛蕉’在海南等地已得到了较大面积的种植,但与原有的优良当家品种‘巴西蕉’相比,这些品种往往表现出生育期长和肥水需求不同等特性。因此,一方面需要探索不同于‘巴西蕉’的栽培管理措施,实行“优良品种必须配合相应优良的栽培方法”,种植出被市场接受的香蕉产品;另一方面还需要继续开展抗病品种的选育工作,以期获得抗性更高、性状更加优良的香蕉品种。

3.2 防治方法

3.2.1 化学防治 化学防治是植物病害防治的一种重要方法。国内外很多学者开展了化学药剂对 Foc 的室内毒力测定和大田药效试验。杨双昱等^[46]测定了7种土壤消毒剂(棉隆、1,3-二氯丙烯、异硫氰酸烯丙酯、环氧丙烷、戊二醛、三氯异氰尿酸和氯溴异氰尿酸)对 Foc4 的室内毒力,发现7种土壤消毒剂对 Foc4 菌丝生长都有一定程度的抑制作用;其中 200 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的戊二醛和棉隆抑制效果最佳,抑菌率分别为 80% 和 100%。段雅婕等^[47]测定了3种药剂对土壤中 Foc4 的杀灭效果,发现二氧化氯的质量浓度不小于 400 mg/L 时,处理土壤 24 h 后就能完全杀灭土壤中高达 $10^5 \text{ cfu}/\text{cm}^3$ 的 Foc4;而且药剂处理质量浓度低于 500 mg/L 时,对香蕉幼苗的生长没有不良影响。Huang 等^[48]合成的2种新型聚合季铵盐 PQD-BC 和 PDMS-g-BC 可抑制 Foc4 菌丝生长。郭立佳等^[49]测定了9种药剂在 PDA 平板及土壤中对 Foc4 的抑菌效果,结果表明 50%(w)咪鲜胺、50%(w)多菌灵和 50%(w)福美双的 500 倍稀释液对 Foc4 均具有显著的抑菌效果,盆栽试验结果表明咪鲜胺的防治效果最好。我们也开展了6种土壤消毒剂(闷倒驴 I 型、II 型、二氧化氯、棉隆、消毒

灵和多菌灵)对土壤中 Foc4 的抑菌效果试验,结果表明在土壤含水量(w)为 50% 时,250 mg/L 二氧化氯和 100 倍闷倒驴 I 稀释液可使土壤中 Foc4 数量快速下降;在土壤含水量为 100% 时,杀菌效果明显提升,二氧化氯可使土壤中 Foc4 从施用初期的 10^6 个/g 快速下降至 $10^0\sim10^2$ 个/g;采用 BIOLOG 和 T-RFLP 对土壤中的微生物进行分析,发现土壤消毒剂对微生物的种群和数量影响较大,特别是细菌种群和数量。

已有大量关于各种农药对香蕉枯萎病防治有效的报道,但这种有效仅表现在室内毒力试验或盆栽试验,应用于大田的防治效果不明显。推测原因可能是:香蕉枯萎病是一种维管束类型的病害,且病菌以不同形式存在于土壤中^[50-51],农药施用于土壤后难以接触到病菌。筛选对香蕉植株内吸性更强的农药、农药确切的施用方法和合理的施用时间,是进一步研究的主要方向。

3.2.2 生物防治 筛选拮抗菌及其对香蕉枯萎病病菌的抑制效果和抑菌机理研究,是当前香蕉枯萎病防控研究的一个热点。国内外研究团队已筛选获得大量抑菌效果良好的拮抗菌株^[52-54]。周登博等^[55]从蕉园土壤样品中分离得到具有拮抗作用的 93 株细菌和 133 株放线菌,其中 T3-G-59 菌株被鉴定为多产色链霉菌 *Streptomyces polychromogenes*,其对 Foc4 菌丝生长和孢子萌发抑制率分别为 86% 和 81%。田丹丹等^[56]从‘桂蕉 9 号’植株根部分离到 1 株对 Foc4 具有拮抗作用的解淀粉芽孢杆菌 *Bacillus amyloliquefens* GKT04,盆栽试验表明经 GKT04 处理后,香蕉幼苗的病情指数比对照降低了 49%;其发酵上清液对 Foc4 菌落生长和孢子萌发抑制率分别为 33% 和 71%。黄建凤等^[57]筛选获得 2 株拮抗细菌菌株 H-2 和 H-7,分别被鉴定为枯草芽孢杆菌 *B. subtilis* 和解淀粉芽孢杆菌 *B. amyloliquefens*,盆栽试验结果表明其对香蕉枯萎病的防效分别为 59% 和 53%。Khan 等^[58]研究了枯草芽孢杆菌 30VD-1 的抑菌机理,认为其产生的几丁质酶、挥发物等对 Foc4 起到抑制作用。我们也分离获得了 1 株对 Foc4 具有拮抗作用的解淀粉芽孢杆菌菌株 ZJ6-6,其在香蕉根际土壤中具有良好的定殖能力,可延迟香蕉枯萎病的发病时间,延缓香蕉枯萎病的发病速度;同时,ZJ6-6 诱导处理的香蕉植株平均株高、地下部鲜质量、地上部鲜质量分别比对照增加了 27%、20% 和 45%,具有良好的促生效果^[59]。

以拮抗菌为基础,学者们研发了一系列的生物

菌肥和生物菌剂用于香蕉枯萎病的防治。通过将发酵的拮抗菌添加到有机肥中制成的生物有机菌肥,可在香蕉栽种前直接施用于土壤,或在香蕉生长季节通过追肥的方式施用于田间,是目前应用最广、效果较为显著的一种防控方法。卢亭君等^[60]用 5 亿 cfu/g 枯草芽孢杆菌的生物有机肥在蕉园进行了田间试验,结果发现其对香蕉枯萎病的防效可达 98%。叶乃玮等^[61]将 3 个木霉菌株 (Tr309T、Tr121、Tr14) 分别制成含单菌株或组合菌株的可湿性粉剂,盆栽试验和田间试验结果均表明,组合木霉菌可湿性粉剂可显著降低香蕉枯萎病的发生,防治效果可达 87%。Shen 等^[62-64]一系列研究发现,施用含微生物的有机肥可以改变土壤的微生物区系结构,刺激有益微生物的大量富集,显著提高细菌多样性并降低 Foc 丰度,从而有效抑制香蕉枯萎病的发生。

综合现有的研究和田间实际应用效果来看,生物拮抗菌的应用,不仅可以直接抑制病菌的生长蔓延,而且可以促进香蕉植株的生长,更重要的是能改变土壤中的微生物种类、结构和数量,因此生物拮抗菌是香蕉枯萎病一个十分重要的防控措施。目前需要解决的关键问题是,如何制作含有不同拮抗菌类型的生物菌肥,如何延长生物菌肥的保质期而不降低拮抗菌的数量和活力,以及在香蕉生长的不同时期如何进行合理的施用等。

3.2.3 农业防控措施 在香蕉枯萎病的农业防控中,较常用的措施主要有轮作、土壤改良、重施有机肥和生物肥、加强水肥栽培管理等。轮作和间作等种植模式是我国传统农业的精华,对香蕉枯萎病这类土传病害具有明显的防控作用。大量试验证明轮作不仅可以克服作物的连作障碍,有效促进有机质和养分等土壤资源的循环利用,而且还可以改善土壤微生物群落结构,抑制单一有害微生物的快速生长,从而达到减少病害发生的效果^[65-67]。曾莉莎等^[68]进行甘蔗与香蕉轮作的研究结果表明,连作蕉地香蕉枯萎病的发病率为 49.15%,而轮作甘蔗 1 年的香蕉枯萎病发病率降至 17.86%,轮作 2 年和 3 年甘蔗的香蕉枯萎病发病率则均仅为 1.79%。Huang 等^[69]通过韭菜与香蕉轮作,可将枯萎病发病率降低 88%~97%,病害严重程度指数降低 91%~96%。赖朝圆等^[70]发现,轮作辣椒、甘蔗和冬瓜可以促进香蕉生长,显著降低再植香蕉的枯萎病发病率(防控率达到 66.62%~75.41%);而南瓜、香蕉轮作和香蕉连作的枯萎病发病率较高。此外,香蕉与水稻、木薯、玉米和菠萝轮均能不同程度地降低后茬香蕉枯萎病的发病率^[71-73]。我们也开展了 6 种不同轮作方

式防控香蕉枯萎病的研究,结果发现,在轮作韭菜、生姜和黄瓜4年后分别再种植感病品种‘巴西蕉’,其枯萎病发病率分别为0.1%、5.2%和12.5%;而如果始终连作‘巴西蕉’,香蕉枯萎病的发病率为56.4%;在先前连作的‘巴西蕉’地改种‘广粉1号’和抗病品种‘南天黄’,其枯萎病发病率分别为48.6%和15.2%。这些结果进一步表明,对于香蕉连作地,即使改种抗病品种枯萎病的发病率也仍然较高。

综合不同轮作作物和模式来看,香蕉与韭菜轮作效果最佳,其次是甘蔗、水稻、生姜和菠萝等。需要注意的是,采用轮作方式防控香蕉枯萎病,不仅取决于轮作的作物类型,也取决于作物的轮作时间。即使是轮作效果最好的韭菜,也需要3年以上轮作时间才有较好的防控效果。因此,不同地区采用适合本地的轮作作物,需要深入开展相关作物的轮作年限与香蕉枯萎病防效的研究。

研究表明,香蕉枯萎病的发生与土壤酸化、板结和土壤中有机质贫乏存在密切联系,因此改良土壤是有效防治香蕉枯萎病的另一个重要的农业防控措施。香蕉枯萎病易在pH小于6.0的酸性砂质或砂壤中发生,而中性或偏碱性土壤环境可抑制包括尖孢镰刀菌在内的真菌萌发和致病力^[74]。长期大量施用铵态氮、氯化钾等酸性或生理酸性常规化肥,加剧了我国蕉园的土壤酸化。土壤酸化可抑制细菌和放线菌等土壤微生物的生长,而有利于喜酸性的土壤真菌类微生物(如Foc)的生长^[75]。已有大量研究表明,利用石灰调节蕉园土壤酸度,同时配合施用有机肥可以有效防控香蕉枯萎病^[76]。但生产实践中发现,连年施用石灰会因为产生碳酸钙和硫酸钙沉淀而导致土壤板结。因此,非常有必要研发既可调节土壤酸度,又不易导致土壤板结,且具有治酸改土和营养功能的碱性肥料。华南农业大学樊小林课题组研发了一种以长效氮为氮源、磷酸二铵为磷源、碳酸钾为钾源的新型碱性氮磷钾复混肥料,发现其可显著提高土壤pH,较常规肥料处理提高了0.75个pH单位^[77]。进一步研究发现,施用pH为7和8的2种碱性肥料后,香蕉枯萎病的发病率分别较使用酸性肥料降低了38%和16%,香蕉整株生物量分别增加了15%和23%^[78]。此外,施用碱性肥料可显著优化土壤的微生物种群结构,能明显减少土壤中的Foc和真菌数量,从而有效防控香蕉枯萎病的发生^[75]。

3.2.4 综合防控 香蕉枯萎病是一种土传的维管束病害,单靠上述任何一种防控措施均很难达到理

想效果。很多学者尝试采用多种防治措施相结合的方法来防控香蕉枯萎病。黄建凤等^[57]将酸性土壤改良剂与生防制剂相结合,发现酸性土壤改良剂与放线菌菌剂处理的协同防效为61.1%,和生物有机肥处理的协同防效为58.3%,均高于单独施用酸性土壤改良剂(49.7%)、放线菌菌剂(55.6%)和生物有机肥的处理(52.8%)的防效。赖多等^[79]将解淀粉芽孢杆菌与印楝渣混合发酵而制备的印楝渣生物肥料,在田间使用后,发现香蕉植株在鲜质量、干质量、株高和茎粗均有不同程度的提高,对香蕉枯萎病防效达到72%以上。甘林等^[80]施用微生物菌剂(含枯草芽孢杆菌、哈茨木霉菌和淡紫拟青霉菌)和生物有机肥,对香蕉枯萎病的防控进行了大田试验,结果表明其防效达到了88%以上。在上述香蕉枯萎病的防控方法中,学者们大多是采用2~3种防控措施相结合,虽然在部分蕉园(或盆栽试验)取得了良好的效果,但并没有形成系统的防控技术体系。

在国家香蕉产业技术体系支持下,我们多年来一直从事香蕉枯萎病的防控。在总结国内外涉及香蕉枯萎病的理论研究和应用推广的基础上,初步建立和集成了针对香蕉枯萎病的无病区、轻病区和重病区的三大综合防控核心技术体系。以该防控体系为指导,通过不同抗性品种的合理选种、无病基质种苗的培育、有机肥和生物菌肥的应用、栽培管理标准化等核心技术的进一步完善和推广,有效遏制了香蕉枯萎病在我国香蕉产区进一步蔓延和扩展的势头。2017年以来,在云南、海南和广东等香蕉枯萎病发病较为严重的产区,大面积推广种植‘南天黄’、‘宝岛蕉’和‘中蕉9号’等抗病品种,使得香蕉枯萎病发病率总体控制在10%以下;在管理到位的蕉园,可以控制在3%以下或者完全不发病;对过去种植‘巴西蕉’发病50%以上的蕉园中的土壤进行病原菌检测,发现综合防控技术的应用可使病原菌孢子 $10^4\sim10^5$ 个/g降低至 $10^2\sim10^3$ 个/g或更少。对新垦蕉区推广种植无土基质种苗、建立单独取水系统或水体消毒、进园交通工具和人员消毒等措施的使用,可有效防止香蕉枯萎病病菌传入,从而杜绝新植蕉园香蕉枯萎病的发生。这表明“香蕉枯萎病三大综合防控核心技术体系”在不同发病区的应用,可极大地解决香蕉枯萎病的危害,为保证我国香蕉产业的健康和可持续发展奠定了坚实的基础。今后的主要工作是:在扩大和推广应用现已建立的各项防控技术体系的基础上,针对不同地区的实际情况,进一步集成和简化现有的防

控关键技术;一方面在广东和海南等地进一步加大示范和推广力度,另一方面在广西和云南等地针对不同香蕉品种种植生态区域建立更为广泛的示范区域和示范点,以建立符合不同生态区域的香蕉枯萎病防控技术或关键技术体系。

4 展望

香蕉枯萎病的基础研究不足,防控方法缺乏系统性,因此需要联合全球从事香蕉枯萎病研究和防控的科学家们进一步加强合作,明确不同国家和地区香蕉枯萎病发生、病菌类型及其遗传变异情况;系统开展不同品种、病原菌和环境的互作研究;加强国与国、地区与地区间的检验检疫,防止病害进一步蔓延;深入开展以抗病品种为中心的各项防控方法的基础和应用研究,特别要着力于抗病品种的培育、综合防控方法集成的研究。只有政府、科学家和香蕉生产企业(农户)的协作努力,才能从根本上控制香蕉枯萎病的危害,从而保障世界香蕉产业的健康和可持续发展。

参考文献:

- [1] NAYAR N M. The bananas: Botany, origin, dispersal[M]// JANICK J. Horticultural Reviews: Volume 36. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2010: 118-164.
- [2] 周传波,吉训聪,肖敏,等.海南省香蕉病虫害种类及防治技术研究初报[J].*安徽农学通报*,2007,13(19): 205-213.
- [3] 曾莉,郭志祥,番华彩,等.云南香蕉病虫害危害现状及防治策[J].*热带农业科技*,2011,34(3): 18-22.
- [4] 付岗,杜婵娟,潘连富,等.广西香蕉病虫害种类调查初报[J].*西南农业学报*,2014,27(4): 1527-1531.
- [5] 王永芬,陈娟,张翠仙,等.云南干热河谷区潞江坝香蕉主要病虫害发生调查[J].*热带农业科学*,2018,38(3): 87-92.
- [6] PLOETZ R C. Fusarium wilt of banana is caused by several pathogens referred to as *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*[J]. *Phytopathology*, 2006, 96(6): 653-656.
- [7] PLOETZ R C, PEGG K G. Fusarium wilt of banana and Wallace's line: Was the disease originally restricted to his Indo-Malayan region?[J]. *Australas Plant Path*, 1997, 26(4): 239-249.
- [8] PLOETZ R C. Panama disease: An old nemesis rears its ugly head: Part 2: The Cavendish era and beyond[J]. *Plant Health Prog*, 2005, 23: 1-17.
- [9] PLOETZ R C. Panama disease: Return of the first banana menace[J]. *Int J Pest Manage*, 1994, 40(4): 326-336.
- [10] STOVER R H. Fusarial Wilt (panama disease) of banana and other *Musa* species[M]. Kew, Surrey, United Kingdom: Commonwealth Mycological Institute, 1962.
- [11] HWANG S C, KO W. Cavendish banana cultivars resistant to Fusarium wilt acquired through somaclonal variation in Taiwan[J]. *Plant Dis*, 2004, 88(6): 580-588.
- [12] HERMANTO C, SUTANTO A, JUMJUNIDANG E H S, et al. Incidence and distribution of Fusarium wilt disease in Indonesia[J]. *Acta Horti*, 2010, 897: 313-321.
- [13] PLOETZ R C, FREEMAN S, KONKOL J, et al. Tropical race 4 of Panama disease in the Middle East[J]. *Phytoparasitica*, 2015, 43(3): 283-293.
- [14] BUTLER D. Fungus threatens top banana[J]. *Nature*, 2013, 504(7479): 195-196.
- [15] THANGAVELU R, MUSTAFFA M M. First report on the occurrence of a virulent strain of Fusarium wilt pathogen (Race-1) infecting Cavendish (AAA) group of bananas in India[J]. *Plant Dis*, 2010, 94(11): 1379.
- [16] MOSTERT D, MOLINA A B, DANIELLS J, et al. The distribution and host range of the banana Fusarium wilt fungus, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, in Asia[J]. *PLoS One*, 2017, 12(7): e0181630.
- [17] GARCÍA-BASTIDAS F, ORDÓÑEZ N, KONKOL J, et al. First report of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 associated with Panama disease of banana outside Southeast Asia[J]. *Plant Dis*, 2014, 98(5): 694.
- [18] ORDONEZ N, GARCIA BASTIDAS F, LAGHARI H B, et al. First report of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 causing Panama disease in Cavendish bananas in Pakistan and Lebanon[J]. *Plant Dis*, 2016, 100(1): 209.
- [19] GARCIA R O, RIVERA-VARGAS L I, PLOETZ R, et al. Characterization of *Fusarium* spp. isolates recovered from bananas (*Musa* spp.) affected by Fusarium wilt in Puerto Rico[J]. *Eur J Plant Pathol*, 2018, 152(3): 599-611.
- [20] NITANI T, AKAI K, HASEGAWA R, et al. Panama disease of banana occurred in Miyakojima Island, Okinawa, Japan[J]. *J Gen Plant Pathol*, 2018, 84(2): 165-168.
- [21] Food and Agriculture Organization of the United Nations[EB/OL]. (2017-01-01) [2019-05-01]. <http://faostat.fao.org/faostat/en/#home>.
- [22] 麦明晓,黄惠琴,鲍时翔.香蕉镰刀菌枯萎病4号生理小种研究进展[J].*中国生物防治学报*,2009,25(s1): 71-75.
- [23] SU H J, CHUANG T Y, KONG W S. Physiological race of fusarium wilt fungus attacking Cavendish banana of Taiwan[J]. Taiwan: Taiwan Banana Research Institute, 1977(2): 22.
- [24] HAWNG S C. Recent development on fusarium R&D of banana in Taiwan[C]//MOHNA A B. Banana fusarium wilt management: Towards sustainable cultivation: Proceeding of the international workshop on the banana fusarium wilt disease. INIBAP, 2001: 9-49.
- [25] 林时迟,张绍升,周乐峰,等.福建省香蕉枯萎病鉴定[J].*福建农业大学学报*,2000,29(4): 465-469.
- [26] 谢艺贤,漆艳香,张欣,等.香蕉枯萎病菌的培养性状和致病性研究[J].*植物保护*,2005,31(4): 72-74.

- [27] 曾莉, 郭志祥, 番华彩, 等. 云南香蕉枯萎病及防治研究进展[J]. *热带农业科技*, 2016, 39(4): 19-22, 24.
- [28] 覃柳燕, 李朝生, 韦绍龙, 等. 广西香蕉枯萎病4号生理小种发生特点调查[J]. *中国南方果树*, 2016, 45(3): 93-97.
- [29] KARANGWA P, MOSTERT D, NDAYIHANZAMASO P, et al. Genetic diversity of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in east and central Africa[J]. *Plant Dis*, 2018, 102(3): 552-560.
- [30] CORRELL J C, HARP T L, GUERBER J C, et al. Characterization of *Pyricularia grisea* in the United States using independent genetic and molecular markers[J]. *Phytopathology*, 2000, 90(12): 1396-1404.
- [31] MOORE N, PEGG K, ALLEN R, et al. Vegetative compatibility and distribution of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in Australia[J]. *Aust J Exp Agr*, 1993, 33(6): 797-802.
- [32] BOEHM E W A, PLOETZ R C, KISTLER H C. Statistical analysis of electrophoretic karyotype variation among vegetative compatibility groups of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*[J]. *Mol Plant-Microbe In*, 1994, 7(2): 196-207.
- [33] BENTLEY S, PEGG K G, DALE J L. Genetic variation among a worldwide collection of isolates of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* analyzed by RAPD-PCR fingerprinting[J]. *Mycol Res*, 1995, 99(11): 1378-1384.
- [34] KOENIG R L, PLOETZ R C, KISTLER H C. *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* consists of a small number of divergent and globally distributed clonal lineages[J]. *Phytopathology*, 1997, 87(9): 915-923.
- [35] MARYANI N, LOMBARD L, POERBA Y S, et al. Phylogeny and genetic diversity of the banana *Fusarium* wilt pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in the Indonesian centre of origin[J]. *Stud Mycol*, 2019, 92: 155-194.
- [36] FOURIE G, STEENKAMP E T, PLOETZ R C, et al. Current status of the taxonomic position of *Fusarium oxysporum* formae specialis *cubense* within the *Fusarium oxysporum* complex[J]. *Infect Genet Evol*, 2011, 11(3): 533-542.
- [37] LI M H, YANG B J, LENG Y Q, et al. Molecular characterization of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 1 and 4 isolates from Taiwan and Southern China[J]. *Can J Plant Pathol*, 2011, 33(2): 168-178.
- [38] 汤浩, 喻国辉, 程萍, 等. 珠海香蕉枯萎病菌遗传多样性的 AFLP 分析[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(13): 204-209.
- [39] 张贺, 张欣, 蒲金基, 等. 利用 ISSR-PCR 技术分析香蕉枯萎病菌的遗传多样性[J]. *微生物学报*, 2015, 55(6): 691-699.
- [40] 黄穗萍, 郭堂勋, 李其利, 等. 香蕉枯萎病菌致病力分化与 ISSR 遗传多样性分析[J]. *植物保护*, 2018, 44(6): 107-114.
- [41] 陈石, 郑加协, 周红玲, 等. 香蕉品种选育研究进展[J]. *中国热带农业*, 2010(1): 55-58.
- [42] 刘绍钦, 梁张慧, 黄炽辉, 等. 抗枯萎病香蕉新品系农科1号的选育[J]. *广东农业科学*, 2007(1): 30-32.
- [43] 黄秉智, 杨护, 许林兵, 等. 香蕉优质新品系大丰2号的选育[J]. *中国果树*, 2006(4): 11-12.
- [44] 韦绍龙, 黄素梅, 韦莉萍, 等. 香蕉抗(耐)枯萎病新品种桂蕉9号的选育及其高产栽培技术[J]. *南方农业学报*, 2016, 47(4): 530-536.
- [45] 许林兵, 张锡炎, 李华平, 等. 抗枯萎病香蕉新品种‘南天黄’选育[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(6): 998-1004.
- [46] 杨双昱, 舒灿伟, 杨媚, 等. 土壤消毒剂对香蕉枯萎病菌的室内毒力测定及其防病效果[J]. *江西农业大学学报*, 2019, 41(4): 1-12.
- [47] 段雅婕, 庞振才, 陈晶晶, 等. 二氧化氯对土壤中香蕉枯萎病的防治效果初探[J]. *中国南方果树*, 2015, 44(6): 74-77.
- [48] HUANG Z F, RUNQI L Y, DONG C Y, et al. Polymeric quaternary ammonium salt activity against, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, race 4: Synthesis, structure-activity relationship and mode of action[J]. *React Funct Polym*, 2017, 114: 13-22.
- [49] 郭立佳, 杨腊英, 彭军, 等. 不同药剂防治香蕉枯萎病效果评价[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(1): 188-192.
- [50] 王振中. 香蕉枯萎病及其防治研究进展[J]. *植物检疫*, 2006(3): 198-200.
- [51] DONG H H, FAN H Y, LEI Z X, et al. Histological and gene expression analyses in banana reveals the pathogenic differences between races 1 and 4 of banana *Fusarium* wilt pathogen[J]. *Mycology*, 2019.
- [52] 周登博, 井涛, 起登凤, 等. 抗香蕉枯萎病菌的卢娜林瑞链霉菌的分离及防效鉴定[J]. *园艺学报*, 2017, 44(4): 664-674.
- [53] 起登凤, 邹良平, 周登博, 等. GA1-2 菌株的分离鉴定及其对香蕉尖孢镰刀菌的抑菌效果[J]. *植物保护学报*, 2017, 44(5): 809-816.
- [54] 谭泽文, 鄂晨, 张逸凡, 等. 甲基营养型芽孢杆菌的分离鉴定及在防蝇产蛆环境防治中的应用[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(3): 631-635.
- [55] 周登博, 井涛, 张锡炎, 等. 香蕉枯萎病拮抗菌筛选及其抑菌活性[J]. *植物保护学报*, 2016, 43(6): 913-921.
- [56] 田丹丹, 周维, 覃柳燕, 等. 香蕉枯萎病拮抗内生细菌的分离鉴定及防治效果初探[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(10): 2007-2013.
- [57] 黄建凤, 张发宝, 逢玉万, 等. 两株香蕉枯萎病拮抗细菌的筛选及抑菌机理[J]. *微生物学通报*, 2017, 44(4): 835-844.
- [58] KHAN N, MH P, ICE T A, et al. Antifungal activity of *Bacillus* species against *Fusarium* and analysis of the potential mechanisms used in biocontrol[J]. *Front Microbiol*, 2018, 9: 2363.
- [59] 谢晚彬, 李华平. 香蕉枯萎病生防细菌 ZJ6-6 的盆栽防治效果及其生防基因分析[J]. *中国南方果树*, 2018, 47(6): 55-58.
- [60] 卢亭君, 卢行尚, 黄晓妹. 5 亿 cfu/g 枯草芽孢杆菌生物

- 有机肥防治香蕉枯萎病田间试验效果初报[J]. *南方园艺*, 2018, 29(4): 11-13.
- [61] 叶乃玮, 吴紫燕, 干华磊, 等. 组合木霉菌制剂防治香蕉枯萎病的研究[J]. *中国果树*, 2019(2): 64-67.
- [62] SHEN Z Z, WANG D S, RUAN Y Z, et al. Deep 16S rRNA pyrosequencing reveals a bacterial community associated with banana *Fusarium* wilt disease suppression induced by bio-organic fertilizer application[J]. *PLoS One*, 2014, 9(5): e98420.
- [63] SHEN Z Z, RUAN Y Z, XUE C, et al. Soils naturally suppressive to banana *Fusarium* wilt disease harbor unique bacterial communities[J]. *Plant Soil*, 2015, 393(3): 21-33.
- [64] SHEN Z Z, RUAN Y Z, CHAO X, et al. Rhizosphere microbial community manipulated by 2 years of consecutive biofertilizer application associated with banana *Fusarium* wilt disease suppression[J]. *Biol Fert Soils*, 2015, 51(5): 553-562.
- [65] VAN EERD L L, CONGREVES K A, HAYES A, et al. Long-term tillage and crop rotation effects on soil quality, organic carbon, and total nitrogen[J]. *Can J Soil Sci*, 2014, 94(3): 303-315.
- [66] XIONG W, ZHAO Q Y, XUE C, et al. Comparison of fungal community in black pepper-vanilla and vanilla monoculture systems associated with vanilla *Fusarium* wilt disease[J]. *Front Microbiol*, 2016, 7: 117.
- [67] ZHANG H, MALLIK A, ZENG R S. Control of Panama disease of banana by rotating and intercropping with Chinese chive (*Allium tuberosum* Rottler): Role of plant volatiles[J]. *J Chem Ecol*, 2013, 39(2): 243-252.
- [68] 曾莉莎, 林威鹏, 吕顺, 等. 香蕉-甘蔗轮作模式防控香蕉枯萎病的持续效果与土壤微生物机理[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(2): 257-266.
- [69] HUANG Y H, WANG R C, LI C H, et al. Control of *Fusarium* wilt in banana with Chinese leek[J]. *Eur J Plant Pathol*, 2012, 134: 87-95.
- [70] 赖朝圆, 杨越, 陶成圆, 等. 不同作物-香蕉轮作对香蕉生产及土壤肥力质量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(2): 299-306.
- [71] 辛侃, 赵娜, 邓小垦, 等. 香蕉-水稻轮作联合添加有机物料防控香蕉枯萎病研究[J]. *植物保护*, 2014, 40(6): 36-41.
- [72] 柳红娟, 黄洁, 刘子凡, 等. 木薯轮作年限对枯萎病高发蕉园土壤抑病性的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(2): 255-259.
- [73] WANG B B, LI R, RUAN Y Z, et al. Pineapple-banana rotation reduced the amount of *Fusarium oxysporum* more than maize-banana rotation mainly through modulating fungal communities[J]. *Soil Biol Biochem*, 2015, 86: 77-86.
- [74] 郭水木, 杨志明. 香蕉镰刀菌枯萎病的发生规律与综防措施[J]. *现代园艺*, 2009(2): 31-32.
- [75] 桂莎, 刘芳, 樊小林. 碱性肥料和生防菌制剂配合施用对香蕉枯萎病的防效[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(11): 1-9.
- [76] 樊小林, 李进. 碱性肥料调节香蕉园土壤酸度及防控香蕉枯萎病的效果[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 938-946.
- [77] 李进, 张立丹, 刘芳, 等. 碱性肥料对香蕉枯萎病发生及土壤微生物群落的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 429-436.
- [78] 李进, 樊小林, 蔺中. 碱性肥料对土壤微生物多样性及香蕉枯萎病发生的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 212-219.
- [79] 赖多, 康向辉, 邵雪花, 等. 印楝渣生物药肥对香蕉生长和香蕉枯萎病的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2017, 38(4): 30-36.
- [80] 甘林, 杜宜新, 郑加协, 等. 抗病品种在香蕉枯萎病绿色防控上的应用[J]. *热带作物学报*, 2016, 37(10): 1945-1948.

【责任编辑 霍 欢】



李华平, 教授, 博士生导师, 教育部优秀年轻教师和南粤优秀教师。现为华南农业大学农学院院长, 兼任中国植物病理学会常务理事, 广东省植病学会副理事长, 广东省农业转基因生物安全管理专家委员会委员, 《华南农业大学学报》副主编, 国家香蕉产业技术体系植保功能研究室主任和病害综合防控岗位专家。主要承担的本科生课程“普通植物病理学”获省精品课程, 主持省级教改项目 8 项, 发表教改论文 8 篇, 获广东省教学成果二等奖 1 项。主要从事香蕉、番木瓜、水稻、柑橘和烟草等作物病原生物学、植物与病原互作、以及病害防控等研究。先后主持国家自然科学基金、国家公益性行业专项和广东省重点科技攻关等省级以上科研项目 42 项。通过基因工程方法首次在国内培育出了高抗环斑病毒的 6 个番木瓜品种, 并在我国大面积推广应用, 使得转基因番木瓜成为了我国商品化生产的唯一一例转基因食用作物。在《Journal of Experimental Botany》《Phytopathology》《Journal of Proteomics》《科学通报》和《中国农业科学》等国内外学术刊物上发表论文 200 余篇。主编或副主编全国高等农林院校教材和专著 7 本。曾获国家和省部级科技奖励 10 余项。