

松材线虫病区域性绿色可持续防控模式

理永霞^{1,2,5} 方国飞³ 李东振^{1,2} 张伟^{1,2} 温晓健^{1,2} 王璇^{1,2}
刘振凯^{1,2,5} 冯宇倩^{1,2} 殷万东^{1,2} 孙伟伦⁴ 张星耀^{1,2*}

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林保护学重点实验室, 北京 100091; 2. 南京林业大学, 南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037; 3. 国家林业和草原局生物灾害防控中心, 林草有害生物监测预警国家林业和草原局重点实验室, 辽宁沈阳 110034; 4. 哈尔滨三立雅风科技开发有限公司, 黑龙江哈尔滨 150000; 5. 山东昆崙山森林生态系统定位观测研究站, 山东烟台 264100)

摘要: 松材线虫病作为林业重大检疫性病害, 入侵中国 40 多年来一直严重威胁着松林的安全。如何将防治策略由被动的灾后疫木处置转变为主动的灾前防御已成为中国行业发展亟待解决的瓶颈问题。本文基于国家林草局和科技部的“揭榜挂帅”项目研究成果, 提出了松材线虫病防控现阶段的“中国技术解决方案”。方案坚持分区分类施策的原则, 集松材线虫病监测、检测、预防、治疗及疫木高值化利用等技术于一体, 构建松材线虫病区域性绿色可持续防控模式, 即根据不同地区、不同林地类型和不同发生程度采取不同措施。针对健康松林和高风险松林, 通过“松材线虫病天空地一体化监测预警技术”对松林进行全覆盖监测和预警, 以实现疫情的早期及时发现; 一旦发现疑似松材线虫病感染木, 及时开展检测和诊断, 确诊后迅速就地处置疫木, 同时对其周围 50 m 范围内的树干注射高效防控药剂, 在 5 km 范围内实施航空喷洒化学制剂或预防性生物菌剂, 旨在实现对松树潜伏感染的早期治疗, 对高风险松林进行预防和保护。在老疫区, 根据疫情发生程度、立地条件及当地经济等实际情况, 利用疫木就地除治和高效安全利用等技术坚守疫木管控底线; 结合森林经营、块状改培等灵活多样的防控措施, 逐步控制疫情, 拔除疫点, 构建抵御松材线虫病的区域松林安全景观格局。该模式为松材线虫病防控从“被动扑杀”到“主动防御”的转变提供了思路和参考。

关键词: 松材线虫病; 可持续防控模式; 监测预警; 快速检测; 高效防控; 疫木高值化利用
中图分类号: S736.18 **文献标识码:** A **文章编号:** 2097-5279(2026)01-0081-06

A new regional green and sustainable prevention and control technology model for pine wilt disease

Li Yongxia^{1,2,5} Fang Guofei³ Li Dongzhen^{1,2} Zhang Wei^{1,2} Wen Xiaojian^{1,2} Wang Xuan^{1,2}
Liu Zhenkai^{1,2,5} Feng Yuqian^{1,2} Yin Wandong^{1,2} Sun Weilun⁴ Zhang Xingyao^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forest and Grassland Pest Monitoring and Warning, Center for Biological Disaster Prevention and Control, National Forestry and Grassland Administration, Shenyang 110034, China; 4. Harbin Sun-light Yafeng Science and Technology Development, CO., LTD, Harbin 150000, China; 5. Kunyushan Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Yantai 264100, China)

Abstract: Pine wilt disease (PWD), as a major quarantine forest disease, has been seriously threatening the health and safety of pine forests in China since its invasion over 40 years ago. How to transform the prevention and control strategy from passive post-disaster disposal of infected pine wood to active pre-disaster defense has become an urgent bottleneck problem in the development of China's forestry industry. Based on the research results of the "Open bidding for selecting the best candidates" projects initiated by the National Forestry and Grassland Administration and the Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, this paper proposes the "China Technical Solution" for PWD prevention and control at the current stage. Adhering to the principle of implementing targeted measures by region and type, the solution integrates technologies such as monitoring, detection, prevention, treatment of PWD and high-value utilization of infected pine wood, forming a new regional green and sustainable

收稿日期: 2025-08-24; 修回日期: 2025-10-14。

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD1400900)。

* 通信作者: 张星耀(E-mail: zhangxingyao@126.com), 研究员。

引文格式: 理永霞, 方国飞, 李东振, 等. 2026. 松材线虫病区域性绿色可持续防控模式[J]. 树木医学, 3(1): 81-86.

Li Y X, Fang G F, Li D Z, et al. 2026. A new regional green and sustainable prevention and control technology model for pine wilt disease[J]. Tree Health, 3(1): 81-86.

prevention and control technology model for PWD. Specifically, different specific measures are adopted according to different regions, different forest types and different levels of occurrence. For healthy pine forests and high-risk pine forests, the "sky-ground integrated monitoring and early warning technology for PWD" is used to conduct full-coverage monitoring and early warning of pine forests to achieve early and timely detection of the epidemic. Once suspected PWD-infected trees are found, detection and diagnosis shall be carried out in a timely manner. After confirmation, the infected pine wood shall be disposed of on-site quickly. Meanwhile, the infected trunk within 50 m around it is injected with efficient prevention and control chemicals, and spraying shall be conducted in the area within 5 km by chemical agents or preventive biological agents so as to achieve early treatment of latently infected pine trees and prevention and protection of high-risk pine forests. In old epidemic areas, according to the actual situations such as the severity of the epidemic, site conditions and local economy, technical measures such as *in-situ* control and efficient and safe utilization of infected pine wood are adopted to adhere to the bottom line of infected wood management and control. Combined with flexible prevention and control measures such as forest management and block-based transformation and cultivation, the epidemic is gradually reduced until to be eliminated, and finally a regional pine forest safety landscape pattern resistant to PWD is constructed. Overall, this solution provides ideas and references for the transformation of PWD prevention and control from "passive culling" to "active defense".

Keywords: pine wilt disease; sustainable prevention and control model; monitoring and early warning; rapid detection; high-efficiency prevention and control; high-value utilization of infected trees

松材线虫病(pine wilt disease, PWD)是由松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhrer) Nickle 引起的毁灭性病害,具有传播速度快、致死率高和防治难度大等特点(Nickle, 1970)。自1982年我国首次发现以来,松材线虫病已肆虐40余年,目前形势依然十分严峻(理永霞等, 2025; 闫佳钰等, 2025)。如何将防治策略由被动的灾后疫木处置转变为主动的灾前防御已成为我国行业发展亟待解决的瓶颈问题。本文系统综述了“十四五”期间研发的松材线虫病防控新技术、新产品,基于“分区分类治理”原则,整合监测预警、快速检测、靶向防控、疫木高值化利用等关键环节,构建了松材线虫病区域性绿色可持续防控模式,提出了松材线虫病防控现阶段的“中国技术方案”。该方案形成了从单一到系统、由点

及面的一体化区域防控新模式,为松材线虫病防控从“被动扑杀”到“主动防御”的转变提供了思路和参考。

1 松材线虫病区域性绿色可持续防控模式构建

该模式坚持分区分类治理的原则,以监测预警为基础、精准防控为关键、长效保护为目标、疫木利用为补充,通过构建“天空地一体化监测-检测诊断及靶向防控-疫木高值化利用”的技术路径,构建一套松材线虫病防控技术方案(图1)。针对健康松林和高风险松林,通过“松材线虫病天空地一体化监测预警技术”对松林进行全覆盖监测和预警,实现疫情的早期及时发现。一旦发现疑似松材线虫病感

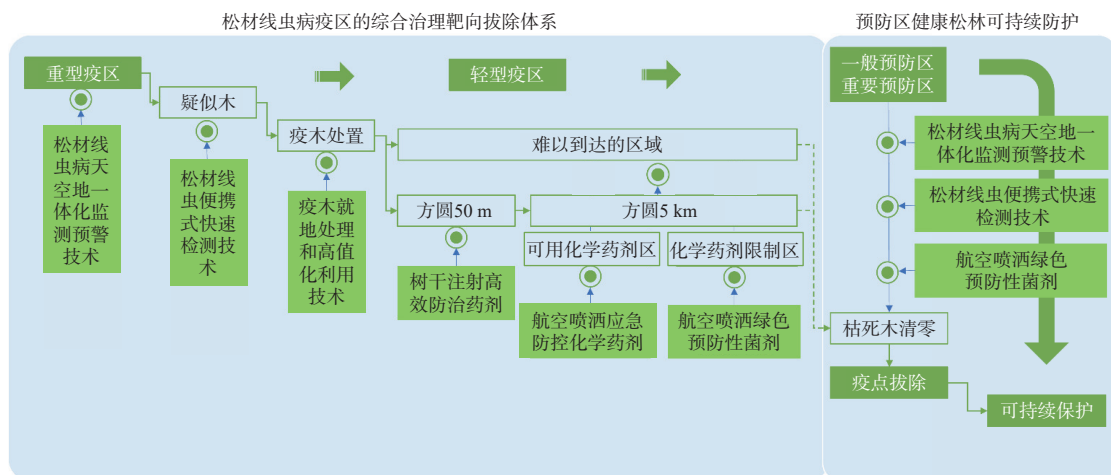


图1 松材线虫病区域性绿色可持续防控技术模式

Fig. 1 A new regional green and sustainable prevention and control technology model for pine wilt disease

染木, 及时开展检测和诊断, 确诊后迅速就地处置。疫木处置后, 及时对其周围 50 m 范围内的树干注射高效防治药剂, 在 5 km 区域内实施航空喷洒化学制剂或预防性生物菌剂, 旨在实现对松树潜伏侵染的早期治疗, 以及对高风险松林进行预防和保护。在老疫区(重型疫区和轻型疫区), 根据疫情发生程度、立地条件及当地经济等实际情况, 利用疫木就地除治和高效安全利用等技术坚守疫木管控的底线, 结合森林经营、块状改培等灵活多样化的防控措施, 逐步控制疫情, 向轻型疫区转变直至拔除疫点, 构建抵御松材线虫病的区域松林安全景观格局。

2 防控新模式技术集成

2.1 松材线虫病天空地一体化监测预警技术

疫情监测作为一项关键举措, 其及时性和准确性关系到松材线虫病防控工作的有效开展。然而, 传统的人工监测方式成本高、效率低、时效性差, 不能满足大面积林分巡查的需要(宗世祥和毕浩杰, 2022)。松材线虫病天空地一体化监测预警技术整合了地面传感器、无人机遥感、卫星影像和气象数据等多维度数据源, 预测精度逐步提高, 广泛应用于松材线虫病疫情监测。其中, 利用 Sentinel-2 和高分卫星等多源遥感数据, 结合深度学习算法(如 U-Net)构建变色木识别模型, 可以实现大尺度的疫情筛查, 对松材线虫病的识别精度超过 80%(Huang et al., 2022; Wang et al., 2022a; Zhou et al., 2022)。搭载多光谱相机的无人机, 通过改进 YOLOv8 目标检测模型, 可以对松材线虫病疫情局部区域进行精准识别, 精度达 90%(Xu et al., 2024)。同时, 在卫星与无人机监测得到变色木点位后, 可利用巡查 APP 将坐标点位发送给地面人员, 以便其及时核实。在此基础上, 国家林业和草原局生物灾害防控中心组织研发并在行业运行“松材线虫病疫情防控监管平台”, 构建了国内首个覆盖小班的松材线虫病本底及相关影响因子时空大数据库, 初步实现了天空地一体化的疫情精细化管理(方国飞等, 2022; Liu et al., 2023)。

2.2 松材线虫便携式快速检测技术

实现病原松材线虫的高效、快速和精准检测, 是防止病害扩散的重要前提。在“十四五”相关项目启动之前, 以核酸为靶标的聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)分子检测技术在松材线虫精准鉴定中已得到成熟应用。然而受设备投入成本、操作专业性要求影响, 在基层推广的便捷性依然不足(李敏等, 2022; 李一农等, 2004; 张奇等, 2008)。

目前, 基于重组酶聚合酶扩增(Recombinase Polymerase Amplification, RPA)等温扩增技术开发的松材线虫便携式快速检测产品, 已成功应用于野外松材线虫病的检测(张伟等, 2024)。该产品通过 RPA 技术对松材线虫特异性基因进行等温扩增, 再结合侧流层析试纸条或荧光设备完成结果判读, 最终实现对病原松材线虫的精准高效识别。整个样品检测流程可在 25 min 内完成, 具有检测精准、快速、可便携、操作简单等特点, 填补了松材线虫野外快速检测产品的空白, 大幅度提升了松材线虫病的检测能力, 使松材线虫病检测从实验室真正走进林间(理永霞等, 2023)。

2.3 松材线虫病高效防控药剂

2.3.1 松材线虫病防控新型化学药剂

化学药剂在松材线虫病的防控工作中发挥了重要作用, 目前市面上已登记的防治松材线虫的化学药剂主要成分有阿维菌素(Abamectin)、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐(简称“甲维盐”, Emamectin Benzoate)、苦参碱(Matrine)、甲维·吡虫啉(Emamectin Benzoate·Imidacloprid)和伊维菌素(Ivermectin)等。这类药剂通过树干注射预防松材线虫病效果良好, 但存在作用单一的问题, 其持效期与季节适应性也需进一步优化。氟吡菌酰胺(Fluopyram)是近年来开发的一种新型杀线类化合物, 具有内吸活性, 可在植株内部高效传导(倪安顺等, 2022; 张婉君等, 2024; Liu et al., 2020; Umetsu et al., 2020)。基于此, 研发出的以阿维菌素和氟吡菌酰胺为主、以疫木源小分子疫苗和助剂为辅的注干药剂, 能够高效灭杀松材线虫、激活松树自身防御, 提高松树抗性, 且突破了季节限制, 在生长季节和非生长季均可适用, 具有渗透性强、传导快和持效期长等特点, 显著提高了松材线虫病防治效果(李东振等, 2024; 理永霞等, 2024a, 2024b, 2025)。另外, 基于高效化学原药和疫木源小分子疫苗, 研发出的新型松材线虫病应急航空喷洒悬浮剂, 其药液可有效附着于茎、叶表面并被吸收, 具有同时杀灭松材线虫和媒介昆虫, 并激活松树自身防御的作用(理永霞等, 2022)。

2.3.2 松材线虫病防控生物药剂

传统防治措施中, 频繁使用化学药剂虽能短期抑制病害, 但造成环境污染的同时导致线虫抗药性增强, 与现代生态保护理念相悖。生物防治凭借绿色环保、作用持久及生态兼容性强等优势, 已成为松材线虫病防控的重要研究方向。线虫埃斯特菌 *Esteya vermicola* J. Y. Liou, J. Y. Shih & Tzean 是首个被

报道的可寄生松材线虫的天敌真菌,该菌可通过吸引、粘附、寄生等过程杀死松材线虫,对松材线虫表现出高感染性和致病力(Wang et al., 2020; Wang et al., 2022b)。联邦121可湿性粉剂是以该菌株为核心,辅以疫木源小分子疫苗和飞防专用助剂制成的松材线虫病新型绿色预防性制剂(温晓健, 2024)。该制剂适用于航空喷洒作业,具有环境友好、无污染、持效期长及不易产生抗药性等特点,是一款可大面积航空喷洒的松材线虫病预防性产品,填补了此类制剂的市场空白,丰富了现有的防控技术体系(理永霞等, 2025)。

2.4 松材线虫病疫木高值化利用技术

当前,焚烧和粉碎仍是疫木处理的主要方式,虽能在一定程度上阻断松材线虫传播,但造成了森林资源的巨大浪费,并潜藏着环境风险。随着生物质能源技术和木材加工工艺的发展,高温灭活、微波处理等热处理方式可同步实现松材线虫的彻底杀灭与木材使用价值的保留,为疫木的高值化利用开辟了新路径。基于松木导热数学模型和热弹耦合效应,研发的疫木热处理技术及相应的可移动疫木热处理装备能够直接加热原木,使原木芯部快速达到65℃以上,确保病害灭杀率达100%(商广帅等, 2023)。该设备可移动、能耗低且无有害排放,能够提升疫木的经济价值(孙伟伦和张剑, 2023)。另外,基于高温干馏工艺,将疫木通过350~450℃高温干馏,收集干馏

挥发物,经冷凝后制成疫木干馏液,即疫木源小分子疫苗粗制品;通过沉淀、过滤、萃取等精加工,可将粗制品进一步提纯为疫木源小分子疫苗精制液,再与其他植物源免疫诱抗物质科学复配后制成疫木源小分子疫苗,配合松材线虫病高效防控药剂使用,可显著提高药效。与此同时,干馏过程中产生的木炭可进一步提高疫木的经济效益,有效降低防控成本,为构建可持续防控体系提供了新路径(理永霞等, 2025)。尽管当前受检疫政策与成本限制,其规模化应用尚未普及,但在“双碳”目标引领下,该技术因其兼顾防控效能与经济回报,将成为松材线虫病防控技术革新的重要方向。

3 总结与展望

松材线虫病作为全球性森林灾害,其防控一直是国际林业领域的难题。亚洲国家如日本、韩国等虽较早开展研究,但多聚焦于监测、疫木除治、打孔注药等单一技术环节,未能将防控措施整合,缺乏系统性的解决方案(Futai et al., 2025; Kwon et al., 2011; Zhao et al., 2008)。欧洲国家的松材线虫病发生较晚,防控措施多效仿亚洲国家(Álvarez et al., 2015; Back et al., 2024)。基于我国多样的松林生态类型、松材线虫病疫情发展的复杂历程以及前期的防控实践经验,本文创新提出了区域性绿色可持续防控模式,形成了具有全球借鉴意义的“中国技术解决方案”(图2)。

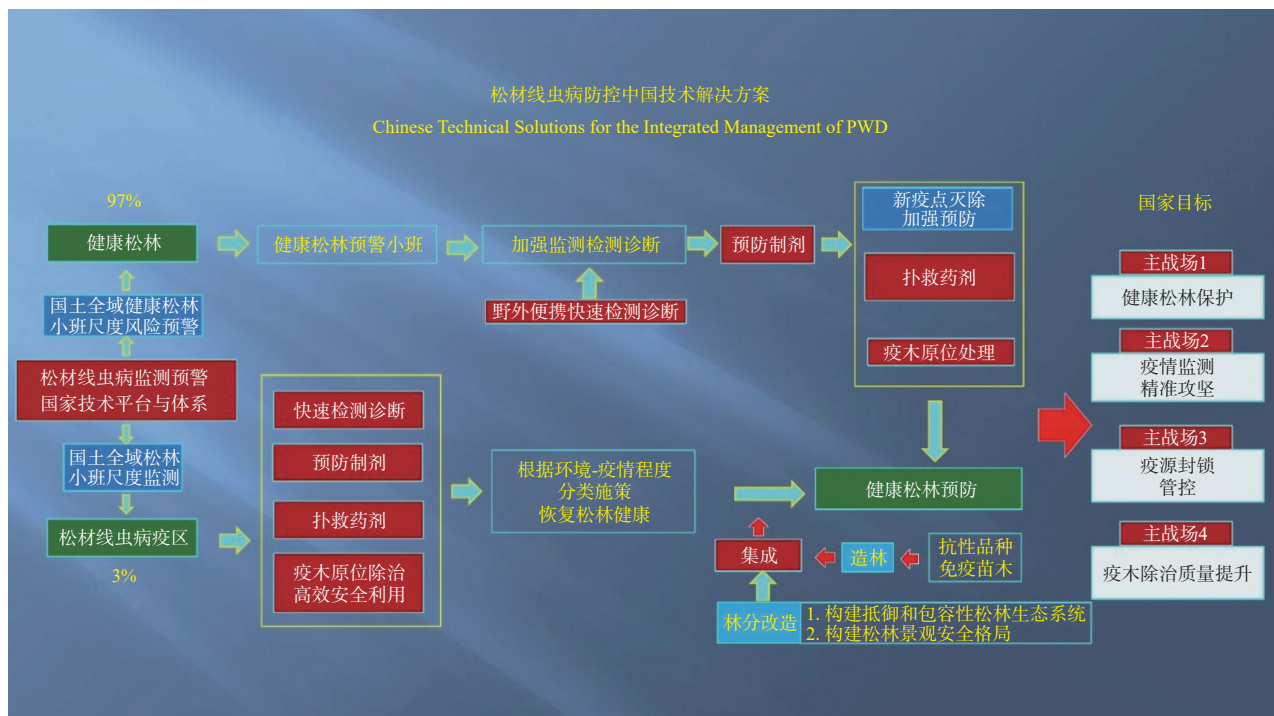


图2 松材线虫病防控中国技术解决方案

Fig. 2 Chinese Technical Solutions for the Integrated Management of Pine Wilt Disease

该方案涵盖“天空地一体化监测→野外快速检测→靶向药剂防控→疫木高值化利用”的全过程,构建了“生态友好型”的近自然防控技术体系。对健康松林加强监测和检测,一旦发现松材线虫病,及时对疫木进行就地处理和救治,防止疫情扩散蔓延,同时对周围高风险树木进行“注干保护+生物预防”的组合措施,巩固防控成果或预防疫情发生;对重型疫区,采用“疫木拔除+应急飞防”的协同措施快速控制疫情,向轻型疫区转变,同时根据疫情发生程度,结合森林经营、块状改培等灵活多样的防控措施,逐步缓解疫情、拔除疫点,最终构建抵御松材线虫病的区域松林安全景观格局。该模式注重生态平衡的维护与资源的可持续利用,为松材线虫病的防控从“被动扑杀”到“主动防御”、从“化学依赖”到“绿色调控”、从“单一处置”到“多元防护”的转变提供了参考范式。

目前,该方案仅依据现阶段研究提出,鉴于我国地域辽阔、松林类型多样、分布环境地形复杂,且松材线虫病及其复杂的病害系统,还亟需进一步深入研究,从而制定出更具成效和针对性的防控方案和措施。如低空施药技术有待进一步提升,无人机施药的覆盖度和精准度仍需提高;生防制剂的活性稳定性容易受到极端天气的影响,尚需进一步提升生防菌株的环境适应能力,同时耦合新型的生物制剂载体和纳米包被技术,提升其环境适应性。此外,还需进一步研发长效的松树免疫诱抗剂产品、松林微生态调控技术和产品、RNAi 农药产品,以实现松材线虫病的高效精准防治(理永霞, 2025)。在智能监测预警方面,为提高分类精度,需扩充数据集,增加各类地物(包括早期病变木)的样本影像用于训练(方国飞等, 2022)。未来,需要进一步利用 DeepSeek 等“通用大模型”技术,融合多行业数据,开展更精准的预测技术研究。关于检测,需要进一步研发基于感病树体的早期化学信号和特异性蛋白抗体的检测技术,以实现感病松树的早期诊断和治疗(李敏等, 2022)。同时,为从根本上解决松材线虫病防控难题,有待进一步研究受灾松林生物多样性动态演变规律,结合抗性育种建立松林主动改培和结构化松林经营技术,最终构建基于介导自然过程、可抵御松材线虫入侵的长效精准防控模式。

参 考 文 献

方国飞, 黄文江, 牟晓伟, 等. 2022. 松材线虫病疫情精准监测实践与展望[J]. 中国森林病虫, 41(4): 16-23.

- Fang G F, Huang W J, Mou X W, et al. 2022. Practice and prospect of precise monitoring of pine wilt disease[J]. *Forest Pest and Disease*, 41(4): 16-23. (in Chinese)
- 李东振, 马健, 马帅, 等. 2024. 树干注药技术的基本原理与应用[J]. 中国森林病虫, 43(4): 28-35.
- Li D Z, Ma J, Ma S, et al. 2024. Basic principles and applications of trunk injection technique[J]. *Forest Pest and Disease*, 43(4): 28-35. (in Chinese)
- 李敏, 叶建仁, 陈凤毛. 2022. 松材线虫检测技术研究进展[J]. 中国森林病虫, 41(3): 52-58.
- Li M, Ye J R, Chen F M. 2022. A review of detection technology for pine wood nematode[J]. *Forest Pest and Disease*, 41(3): 52-58. (in Chinese)
- 李一农, 余道坚, 李芳荣, 等. 2004. 松材线虫 rDNA-ITS1 区分子检测与鉴定[J]. 植物保护, 30(3): 61-63.
- Li Y N, Yu D J, Li F R, et al. 2004. Molecular identification of *Bursaphelenchus xylophilus* by PCR amplification of first internal transcribed spacer of ribosomal DNA[J]. *Plant Protection*, 30(3): 61-63. (in Chinese)
- 理永霞. 2025. 我国松材线虫病未来 5~10 年研究发展—香山共识[J]. 树木医学, 2(1): 97-98.
- Li Y X. 2025. Xiangshan Consensus on research and development of *Bursaphelenchus xylophilus* in China in the next 5—10 years[J]. *Tree Health*, 2(1): 97-98. (in Chinese)
- 理永霞, 李东振, 刘振凯, 等. 注药机: CN308426512S[P]. 2024-01-16.
- 理永霞, 李东振, 刘振凯, 等. 一种气动树干注药设备: CN220571150U [P]. 2024-03-12.
- 理永霞, 刘振凯, 温晓健, 等. 一种用于防控松材线虫病的预防性制剂: CN114451415A[P]. 2022-05-10.
- 理永霞, 温晓健, 王璇, 等. 2025. 松材线虫病防控技术研究进展及防控对策建议[J]. 中国森林病虫, 44(6): 1-7.
- Li Y X, Wen X J, Wang X, et al. 2025. Research progress on the control technologies and suggestions for control of pine wilt disease[J]. *Forest Pest and Disease*, 44(6): 1-7. (in Chinese)
- 理永霞, 张星耀, 张伟, 等. 2023. 松材线虫快速检测技术产品研发: 2023051[R]. 北京: 中国林学会.
- 倪安顺, 王长春, 杨丹, 等. 2022. 一种新型复配药剂 2% 阿维菌素·6% 氟吡菌酰胺对松材线虫毒力药效[J]. 林业科学, 58(8): 18-25.
- Ni A S, Wang Y C, Yang D, et al. 2022. Toxicity of a new compound medicament 2% avermectin-6% fluopyram on *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 58(8): 18-25. (in Chinese)
- 商广帅, 于涛, 孙伟伦. 2023. 生物质疫木热处理炉热处理过程仿真模型的构建[J]. 东北林业大学学报, 51(10): 129-137.
- Shang G S, Yu T, Sun W L. 2023. Simulation model construction for heat treatment process of biomass PWD-infected wood heat-treatment furnace[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 51(10): 129-137. (in Chinese)
- 孙伟伦, 张剑. 一种可自行装卸并密封运输松材线虫病疫木的装置: CN219278195U[P]. 2023-06-30.
- 温晓健. 2024. 绿色菌剂“联邦 121”可预防松材线虫病[J]. 林业科技通讯(7): 61.
- Wen X J. 2024. Green microbial agent “Federal 121” can prevent pine wood nematode disease[J]. *Forest Science and Technology*, (7): 61. (in Chinese)

- Chinese)
- 闫佳钰, 孙红, 王越, 等. 2025. 2024年全国主要林业有害生物发生情况及2025年趋势预测[J]. 中国森林病虫, 44(2): 52–56.
- Yan J Y, Sun H, Wang Y, *et al.* 2025. Occurrence of major forestry pests in China in 2024 and trend forecast in 2025[J]. *Forest Pest and Disease*, 44(2): 52–56. (in Chinese)
- 张奇, 孙丹, 张楚菁, 等. 2008. 松材线虫鉴定方法的研究与比较[J]. 南开大学学报(自然科学版), 41(5): 43–49.
- Zhang Q, Sun D, Zhang C J, *et al.* 2008. Comparative studies on identification methods of *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis (Natural Science Edition)*, 41(5): 43–49. (in Chinese)
- 张婉君, 叶建仁, 汤方, 等. 一种氟吡菌酰胺与溴虫脲复配增效的杀线组合物: CN115474606B[P]. 2024–06–21.
- 张伟, 车吉明, 理永霞, 等. 2024. 基于RPA等温扩增的松材线虫快速检测技术体系建立[J]. 中国森林病虫, 43(3): 1–8.
- Zhang W, Che J M, Li Y X, *et al.* 2024. Development of a point-of-care testing technology for pine wood nematode based on recombinase polymerase amplification[J]. *Forest Pest and Disease*, 43(3): 1–8. (in Chinese)
- 宗世祥, 毕浩杰. 2022. 基于无人机遥感的松材线虫病监测研究与展望[J]. 中国森林病虫, 41(3): 45–51.
- Zong S X, Bi H J. 2022. Monitoring progress and prospect of pine wilt disease based on UAV remote sensing[J]. *Forest Pest and Disease*, 41(3): 45–51. (in Chinese)
- Álvarez G, Etxebeste I, Gallego D, *et al.* 2015. Optimization of traps for live trapping of Pine Wood Nematode vector *Monochamus galloprovincialis*[J]. *Journal of Applied Entomology*, 139(8): 618–626.
- Back M A, Bonifácio L, Inácio M L, *et al.* 2024. Pine wilt disease: A global threat to forestry[J]. *Plant Pathology*, 73(5): 1026–1041.
- Futai K, Ishiguro H, Futai K, *et al.* 2025. Hidden threats: The unnoticed epidemic system of pine wilt disease driven by sexually mature *Monochamus* beetles and asymptomatic trees[J]. *Biology*, 14(5): 485.
- Huang J X, Lu X, Chen L Y, *et al.* 2022. Accurate identification of pine wood nematode disease with a deep convolution neural network[J]. *Remote Sensing*, 14(4): 913.
- Kwon T S, Shin J H, Lim J H, *et al.* 2011. Management of pine wilt disease in Korea through preventative silvicultural control[J]. *Forest Ecology and Management*, 261(3): 562–569.
- Liu F, Su H J, Ding T T, *et al.* 2023. Refined assessment of economic loss from pine wilt disease at the subcompartment scale[J]. *Forests*, 14(1): 139.
- Liu G Y, Lin X, Xu S Y, *et al.* 2020. Efficacy of fluopyram as a candidate trunk-injection agent against *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 157(2): 403–411.
- Nickle W R. 1970. A taxonomic review of the Genera of the aphelenchoidea (fuchs, 1937) thorne, 1949 (Nematoda: Tylenchida)[J]. *Journal of Nematology*, 2(4): 375–392.
- Umetsu N, Shirai Y. 2020. Development of novel pesticides in the 21st century[J]. *Journal of Pesticide Science*, 45(2): 54–74.
- Wang H H, Wang Y B, Yin C, *et al.* 2020. *In vivo* infection of *Bursaphelenchus xylophilus* by the fungus *Esteya vermicola*[J]. *Pest Management Science*, 76(8): 2854–2864.
- Wang J H, Zhao J H, Sun H, *et al.* 2022a. Satellite remote sensing identification of discolored standing trees for pine wilt disease based on semi-supervised deep learning[J]. *Remote Sensing*, 14(23): 5936.
- Wang X, Li Y X, Liu Z K, *et al.* 2022b. Isolation and identification of *Esteya vermicola* and its potential for controlling pinewood nematode[J]. *Forest Pathology*, 52(3): e12745.
- Xu S X, Huang W J, Wang D C, *et al.* 2024. Automatic pine wilt disease detection based on improved YOLOv8 UAV multispectral imagery[J]. *Ecological Informatics*, 84: 102846.
- Zhao B G, Futai K, Sutherland J R, *et al.* 2008. Pine wilt disease[M]. Tokyo: Springer Japan.
- Zhou H W, Yuan X P, Zhou H Y, *et al.* 2022. Surveillance of pine wilt disease by high resolution satellite[J]. *Journal of Forestry Research*, 33(4): 1401–1408.