World Journal of Forestry 林业世界, 2025, 14(3), 423-432
Published Online July 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/wjf
https://doi.org/10.12677/wjf.2025.143052

Hans汉斯

我国松材线虫病监测及防治技术研究进展

陈河秀，柳文浩，任　军*，彭议萱

贵州师范学院地理与资源学院，贵州　贵阳

收稿日期：2025年6月10日；录用日期：2025年7月10日；发布日期：2025年7月22日

摘　要

松材线虫病是一种重大的检疫性森林病害，截止目前已造成我国19个省(区、市)将近180万公顷松林受灾。研究松材线虫病的监测及防治技术，可有效地保护森林资源，实现森林资源的可持续发展。本文概述了我国松材线虫病危害概况、监测技术研究进展、防治方法，并指出松材线虫病的研究在未来发展要注重协同使用监测手段、完善入境木材法规、培育抗病松树品种，以期为松材线虫病的防治提供参考。

关键词

松材线虫，监测方法，防治技术

Research Progress on Monitoring and Control Technology of Pine Wood Nematode Disease in China

Hexiu Chen, Wenhao Liu, Jun Ren*, Yixuan Peng

School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang Guizhou

Received: Jun. 10th, 2025; accepted: Jul. 10th, 2025; published: Jul. 22nd, 2025

Abstract

Pine wilt disease is a major quarantine forest disease, which has affected nearly 1.8 million hectares of pine forests in 19 provinces (autonomous regions and municipalities) in China. Studying the monitoring and control technology of pine wood nematode disease can effectively protect forest resources and realize the sustainable development of forest resources. In this paper, the harm status, monitoring technology research progress and control methods of pine wood nematode disease were summarized, and it was pointed out that in the future development of pine wood nematode disease research, we should pay attention to the cooperative use of monitoring means, improve the

*通讯作者。

文章引用: 陈河秀, 柳文浩, 任军, 彭议萱. 我国松材线虫病监测及防治技术研究进展[J]. 林业世界, 2025, 14(3): 423-432.
DOI: 10.12677/wjf.2025.143052

laws and regulations on imported timber and cultivate resistant pine varieties, so as to provide reference for the prevention and control of pine wood nematode disease.

Keywords

Pine Wood Nematode, Monitoring Method, Control Technology

Copyright © 2025 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

松材线虫病(Pine Wilt Disease, PWD)被称为“森林界致死魔王”，是由松材线虫(Pine Wood Nematode，PWN)、寄主植物、昆虫媒介、人类活动及地域环境等多种因素交织作用形成的复杂林业病害系统[1] [2]，该病害会导致松树大面积死亡，严重破坏林业生态环境，具有极强的传染性和毁灭性，是一种主要的检疫病害[3] [4]。松树感染此病后的症状变化过程为：松针逐渐变色→松脂停止分泌→松树枯萎→死亡，整个过程持续数月[5]。目前，全球有 52 个国家已宣布松材线虫为有害生物，PWD 为检疫性病害[6]。

我国于 1982 年在南京市中山陵首次发现该病害[7]。自被发现以来，疫情在我国呈快速扩散蔓延态势，短短几十年间，该病害已在我国热带和亚热带地区迅速蔓延，造成了巨大的经济损失，成为我国松林的头号“杀手”[8] [9]。2020 年我国松材线虫病发生达到高峰，约 180 万公顷松林受松材线虫病影响，共涉及 18 个省(区、市)，死亡树木达 1950 万株[10]。截至 2023 年底，全国已有 19 个省(区、市)发生松材线虫病疫情，涉及面积约 122.27 万 hm^2，病死松树 759.86 万株[11]。同 2020 年相比，2023 年松材线虫病疫情防控取得明显成效，松材线虫病发生面积呈下降趋势。由于我国疫情基数大、危害重，该病害依然会影响中国林业的健康发展，对我国林业可持续发展和生态文明建设构成严重威胁。

2021 年 7 月，国家林业和草原局明确提出了防控松材线虫病的总体目标和具体要求，以遏制松材线虫病快速扩散蔓延的势头，维护我国森林资源的健康发展。针对该病害，我国采取了多种监测手段及防治措施，取得了一定的效果，但松材线虫的侵染传播还在不断扩散。本文对中国松材线虫病的危害概况、监测手段以及防治措施进行了总结、梳理，以期为松材线虫病的防治提供参考。

2. 松材线虫病危害概况

2.1. 松材线虫病发生趋势

我国是目前松材线虫病流行最严重的国家，松材线虫病疫情仍在持续扩散，造成的危害不断加重。疫情由南向北、由东向西呈跳跃式蔓延。2019 年有学者对我国松材线虫病发生区域进行了预测分析，结果显示我国东南沿海及中部大部分省份均属于松材线虫病的高适生区或中适生区，仅黑龙江省、西部地区、云南省属于低适生区或非适生区[12]。

近 5 年来中国松材线虫的发病情况显示(表 1)，中国松材线虫发生面积在 2020 年达到高峰期，危害面积达 180.92 万 hm^2，病害发生县(区、市)数量在 2021 年达最高值 742 个，每年依然有新增疫区，但增幅有降低趋势。松材线虫寄主植物种类多达 70 种，其中松属种类有 60 种，我国绝大多数松林都易感松材线虫，常见的有马尾松、油松、华山松、海岸松和落叶松[13]。自然条件下感病的松属寄主 9 种，人工接种松属寄主 7 种[14]。

Table 1. The occurrence of pine wood nematode in China from 2019 to 2023
表 1. 我国 2019~2023 年松材线虫发生情况[10] [11] [15]-[17]

发生情况	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
涉及省份(个)	18	18	19	19	19
县(区、市) (个)	666	726	742	737	708
发生面积(万 hm^2)	111.46	180.92	171.65	151.15	122.27
病死植株(万株)	1946.74	1947.03	1407.92	1040.48	759.86
新增疫区(个)	*	60	24	7	7
撤销疫区(个)	*	*	6	36	37

注：*表示未获取数据。

2.2. 松材线虫病传播途径

松材线虫隶属伞滑刃属(*Bursaphelenchus*)，是引发松材线虫病的罪魁祸首[18]。病原线虫雌性成虫长960~1310 μm，雄性成虫长度略短[19]。松材线虫的主要传播方式为人类活动传播和自然传播两种，人类活动传播是人为运输疫木和产品传播，75%的松材线虫病传播主要是通过该方式进行的，具有速度快、距离远的特征[20]。自然传播是指松材线虫寄生在媒介昆虫体内，由媒介昆虫携带至健康松木上，并在健康的松木上产卵传播。多项研究表明松材线虫病的传播与墨天牛属(*Monochamus*)有直接关系，现已查明有 13 种天牛携带松材线虫幼虫进行近距离传播[21]。中国松材线虫病的主要传播媒介是松褐天牛(*Monochamus alternatus*)和云杉花墨天牛(*Monochamus saltuarius*) [22]-[24]。松材线虫幼虫通过天牛气孔侵入天牛成虫的呼吸系统，被侵染的天牛成虫在健康松树取食或产卵时会产生伤口，线虫会通过伤口完成对松树的侵染，以松树为新的寄主，对松树造成危害[14]。

2.3. 松材线虫的病害循环

松材线虫主要通过自然传播进行侵染，松墨天牛作为自然传播的主要媒介，对病害的发生具有重要的影响，对于松墨天牛一年发生一代的地区，病害循环比较典型。松材线虫病害循环具体如下：在枯死松树上越冬的松材线虫是第二年松材线虫病害发生的主要侵染来源。在春末夏初，5~6 月份，松墨天牛幼虫在枯死的松树中进行羽化，羽化时大量松材线虫附着在天牛成虫体上，羽化后的天牛成虫携带线虫飞出，飞到健康的松树上进行取食补充营养，成虫天牛在取食过程中将所携带的松材线虫通过取食伤口传播至健康松树体内，松材线虫便会在树体内大量繁殖。松墨天牛补充营养后选取感染松材线虫病的濒死松树进行产卵。一般在 7~9 月份，松墨天牛卵便孵化出幼虫，幼虫在树皮下生长，秋末，老熟松墨天牛幼虫钻入木质部越冬(图 1)。有研究表明，秋季松材线虫在马尾松主干内的分布为 8~11 m 数量较多，尤其是距离顶梢 1 m 的位置，虫口密度达到最高的 1349.50 条·g^{-1}，秋季更适合开展松材线虫病普查[25]。

2.4. 松材线虫致病机制

寄主松树被松材线虫侵染后，一般在当年秋季就会整株死亡，从发病到死亡的时间为 30~45 d。有部分偏冷地区松树被侵染后在第二年死亡[26]。被侵染的松树在发病早期松脂分泌能力下降，树冠部位针叶逐步变黄，后期表现为整株松树枯死状。

关于松材线虫致病机理有三种观点：1) 酶学说，松材线虫能分泌大量降解细胞壁相关的酶，纤维素酶能降解松树细胞壁中的纤维素，从而导致松树水分运输功能受损。2) 毒素学说，松材线虫侵入寄主后，

线虫本身或其伴生细菌可以产生植物毒素，或者寄主松树受到感染后自身产生的有毒物质。3) 空洞化学说，松树被松材线虫入侵后，松树体内单萜和倍半萜等物质含量急剧增加，这类物质渗入管胞内容易形成空洞，导致水分无法运输，最终寄主因缺水死亡[27]。

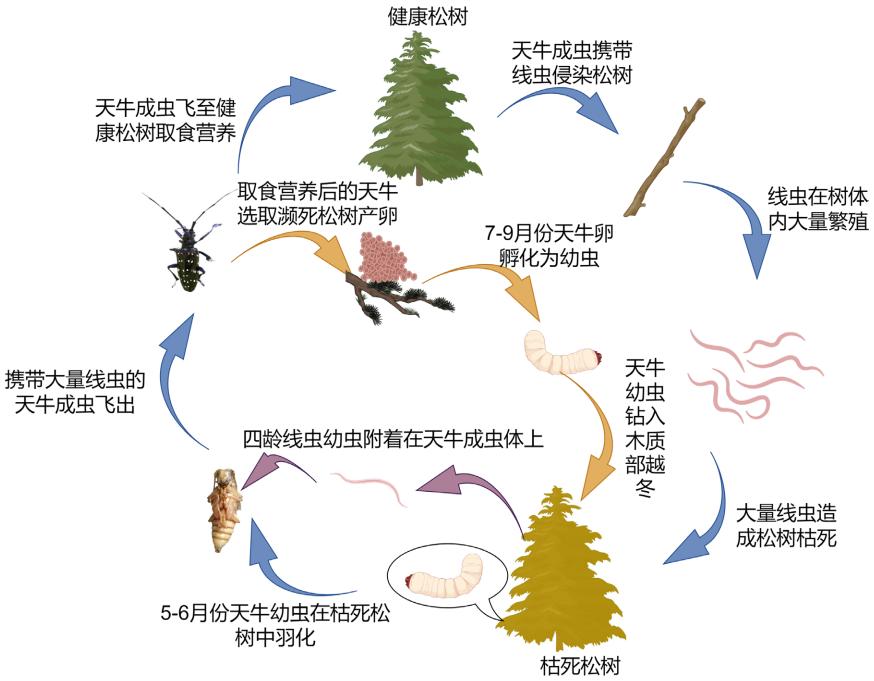

Figure 1. Pine wood nematode infection cycle process
图 1. 松材线虫侵染循环过程

我国松材线虫病的致病机理研究在分子生物学方面获得了较多成果。原位信使核糖核酸杂交分析显示，基因 vap-1、-2 和-3 的转录物仅在松材线虫的食道腺细胞内积累，具有编码松材线虫毒液过敏原样蛋白的功能，在线虫致病性中起着重要作用[28]。靶向 BxAK1 的 RNA 干扰在显著增加松材线虫死亡率的同时还大幅度降低了线虫的繁殖和生育能力，是控制松材线虫的有效途径[29]。细胞色素 P450 基因可能与松材线虫的活力、扩散能力、繁殖、致病性和农药代谢有关[30]。cyp-33C9 基因的沉默显著降低了松材线虫的取食、繁殖、产卵和孵化，当 cyp-33C9 基因沉默时，松材线虫的迁移速度在早期阶段降低[31]。松材线虫伴生细菌增强了线虫的毒力，在线虫致病力方面发挥着重要的作用[32]。中国不同地区松材线虫的伴生细菌存在多样性，一些伴生细菌可以通过提高线虫的繁殖力和抗氧化能力来促进松材线虫的侵扰能力[33]。组织蛋白酶 L-半胱氨酸蛋白酶(CPL)基因是与植物寄生线虫寄生能力有关的多功能基，Bx-cpl 的沉默可以降低松材线虫的取食、繁殖和致病[34]。Bx-cpi-1 是 II 型半胱氨酸蛋白酶抑制剂基因的变体，参与了线虫的发育和致病性[35]。在分子水平揭示松材线虫的致病机理，为松树的有效防治提供了理论基础。

3. 松材线虫病监测方法及防治措施

3.1. 松材线虫病监测方法

松材线虫病的发生隐蔽性较强、传播速度快，寄主一旦出现症状就很难治愈，对松材线虫病采取有效的监测是防止该病害大面积蔓延扩展的关键。目前对枯死松树的监测手段主要有地面监测、卫星遥感监测和无人机遥感监测[36] (图 2)。

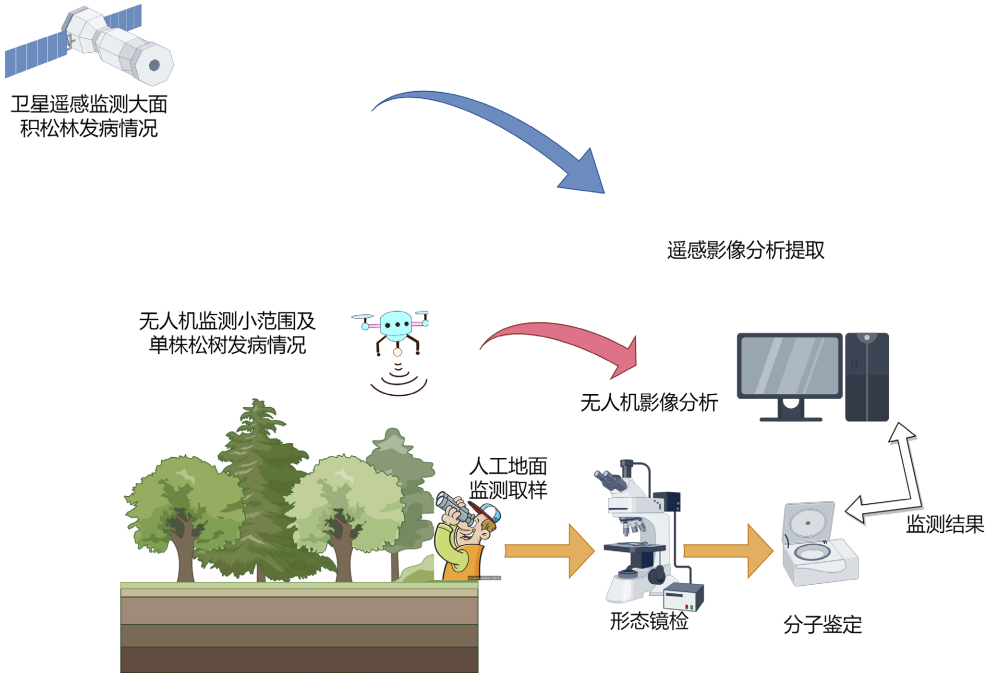

Figure 2. Monitoring methods for the occurrence of pine wood nematode disease in China
图 2. 中国松材线虫病发生监测手段

3.1.1. 地面监测

地面监测松材线虫病是一种传统有效的方法，该方法主要依靠生态护林员进行网格化巡查，观察并记录松树异常情况。根据松材线虫病的发生情况制定监测方案。2023 年 12 月国家林业和草原局关于重新印发《松材线虫病疫区和疫木管理办法》的通知规定，要加强松材线虫病疫情监测调查，日常监测按照网格化管理方式进行全域性巡查，至少每月一次；专项普查按照全覆盖无盲区要求进行全域性调查，春秋季各一次。乡镇林业工作站按照地方林业主管部门制定的监测普查方案组织当地护林员开展监测普查，并及时报告管护区内松树出现死亡、变色等异常情况。未出现过松材线虫的地区，将县区作为监测单位。根据《松材线虫病防治技术方案(2022 年版)》要求，电网和通信线路沿线，通信基站、公路、铁路、水电等建设工程施工区域附近，木材集散地周边，自然保护地，以及疫区毗邻地区，应重点加强日常监测。常态化巡查，一般 2 个月至少巡查一遍。重点区域应加大巡查频次。调查是否出现松树枯死、松针变色等异常情况，并对枯死树木进行抽样，取适量样本进行取样，鉴定是否发生松材线虫病，对确认新发疫情松林小班及周边地区进行详查[37]。

打孔流胶诊断法和诱捕器监测法是地面监测常用到的监测方法。树脂分泌停止是松材线虫病的症状之一，打孔流胶诊断法是监测松材线虫病的有效方法之一，20 世纪 90 年代，刘伟等人提出可用流胶法对松材线虫病作早期诊断，从而达到病害彻底清除的目的[38] [39]。该方法主要用于春秋季节，通过对松树胸高位置树干打孔，观察孔口流脂情况，诊断松树患病情况。诱捕器是对虫情监测的重要工具，由于松材线虫病的发生发展同昆虫天牛的发生规律密不可分，采用诱捕器监测天牛的种群数量、动态，能够间接地监测松材线虫病的发生情况。目前使用的诱捕器主要包含普通诱捕器和智能诱捕器两种，普通诱捕器主要是利用昆虫的趋向性原理，通过黑光灯、诱虫板、信息素等各种型号诱捕器捕捉天牛；智能诱捕器主要是将光电感应自动计数系统、GPRS 发射系统、太阳能充电系统、智能数据汇总系统有机结合，达到天牛诱捕监测的智能化和精准化[40]-[43]。地面监测方法虽然准确有效，但需要投入大量的人力、物力、财力，监测技术落后，导致监测很难做到全覆盖[44]。

3.1.2. 航空航天遥感监测方法

松材线虫病疫情人工监测方法准确性虽高，但监测耗时、耗力、时效性差，尤其在山高地险的山区，疫情很难及时发现[43]。随着遥感技术的不断发展，利用遥感图像监测病虫害的发生发展已成为主要趋势。叶勤文等人在 1994~1996 年利用航空摄像技术对安徽省部分松材线虫病发生区进行了监测，提出应用航空摄像监测森林病虫害是一种比较理想的监测手段，该理论的提出为我国采用航空遥感技术监测松材线虫病开创了先河[45]。近年来，很多学者致力于多光谱图像病虫害识别研究，徐华潮等人利用 ASD 野外光谱仪对不同感病阶段的松树进行了反射光谱测定，结果显示可以利用高光谱遥感技术作为松材线虫病监测的手段[46]。2015 年，刘宁等人提出可利用特征光谱对松材线虫病进行早期预测[47]。2021 年，余润等人证明利用高光谱辐射信息可以判断松材线虫病的发病阶段[48]。目前中国对森林病虫害监测主要采用卫星遥感监测和无人机遥感监测技术。

卫星遥感在森林病虫害调查方面显示了数据时效性强、更新周期短、节约人工成本、探测范围大等诸多优点[49] [50]。2019 年，黄芳芳等人以湖北省宜昌市夷陵区马尾松松材线虫病为背景，提出原始光谱更适用于森林病虫害的快速监测，平均精度在 76%以上[51]。2021 年，马云强等人利用 0.8 m 空间分辨率的 BJ-2 号卫星数据对东钱湖镇的松材线虫病疫木进行监测提取，并结合无人机航空遥感、地面移动调查有效提高了松材线虫病疫木提取的效率和精度[52]。2022 年，周桓宇以松材线虫病北京-2 号卫星遥感数据为基础，通过优化和改进 HRnetV2 模型提出了松材线虫病疫木检测方法，该方法在卫星图像中得以有效实践[53]。近 10 年，我国多名学者利用多种光学遥感数据，对松材线虫病的监测方面取得了有效成果[2] [36] [54]。戴丽提出亚米级高空间分辨率卫星遥感数据具备单木尺度的要素提取和变化信息的监测能力[49]。

卫星遥感监测松材线虫病易受分辨率、天气状况等因素影响，无人机遥感监测的利用弥补了卫星遥感监测的不足。无人机遥感监测松材线虫病是指利用无人机搭载各种类型的传感器设备，凭借机动灵活、实时性强的特点监测松材线虫病变色单疫木的监测方法[55]。该方法能够快速识别变色疫木，且能实现对染病木的定位。目前很多学者对无人机遥感监测松材线虫病的研究主要集中在如何提高无人机遥感监测的识别精度和准确定位上[43]。李浩等人利用小型无人机完成林区遥感影像采集，通过林区图像有效提取，实现了对枯死木进行相对精准的技术判别[56]。曾全等人的研究表明无人机遥感基本实现了松材线虫病致死松树的精准定位[57]。

3.2. 松材线虫病防治方法

我国松材线虫病的防治坚持“预防为主、治理为要、监管为重”的防控理念，主要通过控制传染源和寄主的方法减缓松材线虫的传播扩散，实施过程中实行分区分级管理、科学精准施策，以疫情监测、疫源管控、疫情除治为重点，控制增量，消减存量，有效遏制疫情严重发生和快速扩散势头。松材线虫的传播主要是人为远距离传播和墨天牛近距离传播，针对病害的传播特点及病原线虫的生物学特性，我国松材线虫的防治方法主要体现在检疫检验、物理防治、化学防治、生物防治四个方面(图 3)。

3.2.1. 检疫检验技术

松材线虫病是检疫性森林病害，相关林业部门及政府需全面构建监管体制，增加监控设备、温度湿度实时监控设备。出入境检验检疫是防止松材线虫入侵我国松林的第一道防线，对入境木质包装进行严格把控，针对“蓝变”病木实施及时焚毁是最有效最彻底的方法[58]。针对木材交易制定检疫检验流程，严禁对病体木材进行砍伐和私自贩卖，切断人为因素对松材线虫病的传播。

口岸检疫是预防松材线虫传播的有效途径，主要采用松材线虫形态学和分子生物学结合的检测鉴定技术。松材线虫形态学研究进展显示，松材线虫组线虫已知 15 种，且松材线虫可进一步分为 M 型和 R

型株系，拟松材线虫分为 2 个亚种。宁波海关技术中心初步构建了线虫显微图像智能识别系统，单独根据雌虫尾部，对松材线虫、拟松材线虫的识别准确率达到 96%，如结合头部和雌虫尾部，识别准确率达到 98%。该识别系统的建立为人工智能识别线虫提供了技术依据。松材线虫分子检测技术发展迅速，主要涉及 DNA 提取、基于 PCR 技术的检测方法、基于等温扩增技术的检测方法、测序或 DNA 条形码方法等，各种技术方法有优势也存在缺点，但快速、便捷的线虫智能识别和等温扩增技术将是未来松材线虫检疫主要的技术[24]。

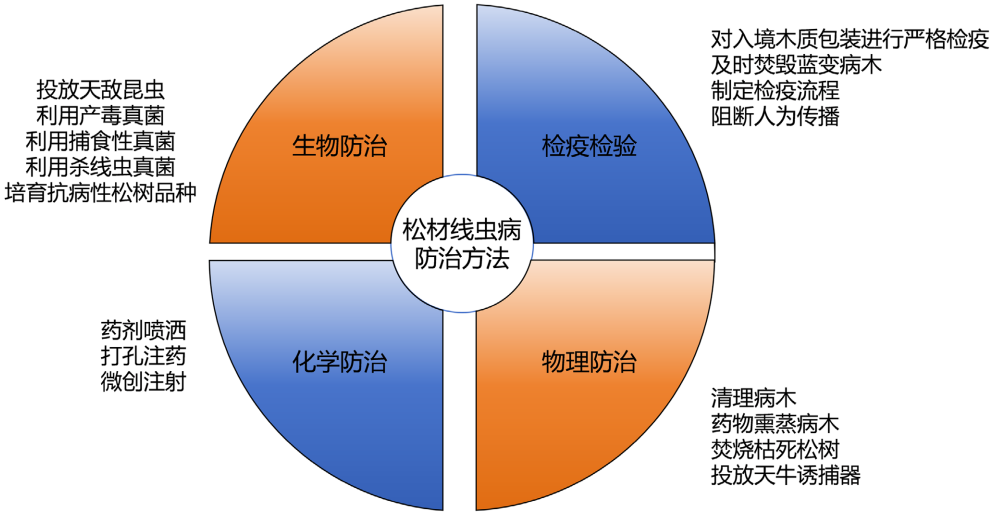

Figure 3. The prevention and control methods for pine wood nematode disease in our country
图 3. 我国松材线虫病防治方法

3.2.2. 物理防治

松材线虫病物理防治方法主要体现在两个方面：1) 及时清理病死松树，原则上“发现一株、清除一株”，年底或 3 月再全面集中清理 1 次。松枯死木不可运出林场，避免疫情进一步扩展，对疫区发病树木彻底砍伐，不留枝杈，将清理的病木运至指定地点，采用药物熏蒸、加热、焚烧等方法处理枯死松树，达到彻底清理线虫及媒介天牛的目的[59]；2) 精确定时定点投放昆虫诱捕器，松墨天牛是松材线虫病的主要传播媒介，在天牛羽化盛行期布局诱捕器，切断松墨天牛传染途径，能有效阻止松墨天牛扩散。

3.2.3. 化学防治

化学防治方法是防治松材线虫的有效方法，疫区药剂喷洒、打孔注药、微创注射是化学防治的三种有效手段。疫区药剂喷洒主要是为了消灭媒介昆虫天牛，采用的主要药剂有 3%杀螟松乳剂、2%噻虫啉悬浮剂，在松墨天牛羽化前期通过直升机进行大面积林区药剂喷洒，同时在松墨天牛羽化旺盛期对单株松树进行药剂喷洒，从而达到对天牛的消灭[60]。打孔注药主要是消灭线虫幼虫，该方法主要应用在重要的生态区和风景区，注入的主要药剂有阿维菌素、甲维盐等，并取得了良好的效果[61]。田龙权指出，不同药剂对油松进行注干施药后 1 年时，甲维盐松材线虫注射液防治效果最佳，注干施药后 2 年时，啶虫脒注干剂防治效果最佳[62]。微创注射防治是 2022 年提出的，对古松树树干精准微创注射甲氨基阿维菌素苯甲酸盐制剂，该技术对防治松材线虫起效快，但费用较高，投入较大[63]。

3.2.4. 生物防治

生物防治主要是通过以菌治菌、以敌克敌的方式开展的，在松材线虫病生物防治过程中，利用管氏肿腿蜂(*Scleroderma guani*)、花绒坚甲(*Dastarcus longulus*)天敌昆虫对处在幼虫期的天牛展开有效控制和

防范，同时利用捕食性真菌、内寄生菌、产毒真菌、杀线虫细菌等达到对线虫的防治目的[64]。除此之外，培育抗病性松树品种也是生物防治的一种有效方法，开展松树种杂交试验，改善易感品种的抗病基因，从源头上解决问题，增强松树的抗病性[4]。近年来，我国较多省份积极开展抗病育种选育工作，取得了不错的成效，例如，安徽省营建了我国首个抗松材线虫病马尾松无性系种子园，在国内首次建立起松材线虫病抗性育种多因子综合评价体系[59]。抗病性松树品种的培育在松材线虫病防控中发挥了重要作用。

4. 研究展望

松材线虫病作为一种检疫性病害，严重影响了我国林业的发展。近些年不少学者针对该病害的病原、寄主、传播媒介开展了大量的研究，虽然取得了一些效果，但松材线虫病依然在不断扩展。回顾我国松材线虫病研究及防治现状，该领域研究在未来的发展应该注重以下几个方面：

在松材线虫病的监测方面要坚持“卫星遥感监测－无人机遥感监测－地面人工普查”天空地协同监测，三种手段互相弥补不足，突出各自优势，及时有效地对疫区松材线虫发病情况做出诊断。

建立更为完备的入境木材及木质包装的检疫法规，提高检测鉴定效率，真正做到“预防为主、治理为要、监管为重”，从根源上切断松材线虫入侵途径。

大力开展培育抗病松树品种，将培育抗病新品种作为重点研究对象。

基金项目

贵州师范学院大学生创新创业训练计划项目(S2023142234106) (S2023142234065) (2023142234206)；贵州省教育厅 2023 年度普通本科高校科学研究项目(青年项目) (黔教技〔2022〕252 号)；贵州师范学院科学研究基金项目(2021BS010)；贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK〔2024〕一般 651)；贵州省高校人文社会科学研究项目资助(2025RW079)贵州矿山生态修复与生态经济协同发展研究。

参考文献

[1] 卢涛, 陈星竹. 地理空间视角下贵州省松材线虫病扩散时空格局及定量归因[J]. 林业科技通讯, 2024(10): 30-34.

[2] 陶欢, 李存军, 程成, 等. 松材线虫病变色松树遥感监测研究进展[J]. 林业科学研究, 2020, 33(3): 172-183.

[3] 张晓东, 杨皓博, 蔡佩华, 等. 松材线虫病遥感监测研究进展及方法述评[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 184-194.

[4] 聂恒林, 董正斌, 安富强, 等. 松材线虫病为害情况及防治措施[J]. 现代园艺, 2022, 45(20): 56-58.

[5] Zhang, B., Ye, H., Lu, W., Huang, W., Wu, B., Hao, Z., *et al*. (2021) A Spatiotemporal Change Detection Method for Monitoring Pine Wilt Disease in a Complex Landscape Using High-Resolution Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing*, **13**, Article No. 2083. https://doi.org/10.3390/rs13112083

[6] Wu, W., Zhang, Z., Zheng, L., Han, C., Wang, X., Xu, J., *et al*. (2020) Research Progress on the Early Monitoring of Pine Wilt Disease Using Hyperspectral Techniques. *Sensors*, **20**, Article No. 3729. https://doi.org/10.3390/s20133729

[7] 苗力, 王禹, 李瑞红, 等. 松材线虫病的危害、传播途径和防控措施[J]. 吉林林业科技, 2023, 52(1): 44-45.

[8] 李杨. 松材线虫病疫情防控技术研究[J]. 特种经济动植物, 2022, 25(2): 109-110.

[9] 郭文霞. 国外松材线虫病防治策略和技术措施[J]. 河北林业科技, 2022(4): 47-53.

[10] 孙红, 周艳涛, 李晓冬, 等. 2020 年全国主要林业有害生物发生情况及 2021 年发生趋势预测[J]. 中国森林病虫, 2021, 40(2): 45-48.

[11] 刘冰, 闫佳钰, 王朵, 等. 2023 年全国主要林业有害生物发生情况及 2024 年趋势预测[J]. 中国森林病虫, 2024, 43(1): 41-45.

[12] 叶建仁. 松材线虫病在中国的流行现状、防治技术与对策分析[J]. 林业科学, 2019, 55(9): 1-10.

[13] 范文杰, 曹晓波, 曹冬梅, 等. 松材线虫病的危害及其防治方法探析[J]. 农业灾害研究, 2023, 13(11): 1-3.

[14] 李红霞, 李刚, 王克成. 松材线虫的危害与综合防治[J]. 现代农业研究, 2020, 26(10): 77-78.

[15] 李晓冬, 王越, 周艳涛, 等. 2019 年全国主要林业有害生物发生情况及 2020 年发生趋势预测[J]. 中国森林病虫, 2020, 39(3): 44-48.

[16] 李硕, 孙红, 周艳涛, 等. 2021 年全国主要林业有害生物发生情况及 2022 年发生趋势预测[J]. 中国森林病虫, 2022, 41(2): 44-47.

[17] 陈怡帆, 周艳涛, 孙红, 等. 全国主要林业有害生物2022年发生情况及2023年趋势预测[J]. 中国森林病虫, 2023, 42(2): 51-54.

[18] 禄鑫, 冯陆春, 吴学卷, 等. 我国松材线虫病发生趋势及监测研究进展[J]. 贵州林业科技 2023, 51(2): 105-110.

[19] 王伟妙. 松材线虫病的分布、危害及防治应对措施[J]. 南方农业, 2022, 16(12): 69-71.

[20] 梁涌. 松材线虫病监测普查与防治技术[J]. 农业技术与装备, 2024(4): 119-121.

[21] Pires, D., Vicente, C.S.L., Inácio, M.L. and Mota, M. (2022) The Potential of Esteya Spp. for the Biocontrol of the Pinewood Nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Microorganisms*, **10**, Article No. 168. https://doi.org/10.3390/microorganisms10010168

[22] 国朝胜, 席磊, 胥丽, 等. 无人机高光谱在松材线虫病监测中的应用[J]. 林业科技通讯, 2023(7): 14-17.

[23] 孟令姝, 叶清. 松材线虫: 致命的松树杀手[J]. 中国海关, 2024(11): 51.

[24] 顾建锋, 方亦午, 马欣欣, 等. 松材线虫检测鉴定技术研究进展[J]. 植物检疫, 2023, 37(1): 1-6.

[25] 蔡梦玲. 秋冬季松材线虫在马尾松中的分布特征[J]. 福建林业, 2024, 39(2): 39-42.

[26] 王佳佳. 松材线虫病的危害及其防治措施分析[J]. 农村科学实验, 2024(8): 94-96.

[27] 理永霞, 王璇, 刘振凯, 等. 松材线虫致病机理研究进展[J]. 中国森林病虫, 2022, 41(3): 11-20.

[28] Lin, S., Jian, H., Zhao, H., Yang, D. and Liu, Q. (2011) Cloning and Characterization of a Venom Allergen-Like Protein Gene Cluster from the Pinewood Nematode *Bursaphelenchus xylophilus*. *Experimental Parasitology*, **127**, 440-447. https://doi.org/10.1016/j.exppara.2010.10.013

[29] Wang, X., Cheng, X., Li, Y., Zhang, J., Zhang, Z. and Wu, H. (2012) Cloning Arginine Kinase Gene and Its RNAi in *Bursaphelenchus xylophilus* Causing Pine Wilt Disease. *European Journal of Plant Pathology*, **134**, 521-532. https://doi.org/10.1007/s10658-012-0035-0

[30] Xu, X., Wu, X., Ye, J. and Huang, L. (2015) Molecular Characterization and Functional Analysis of Three Pathogenesis-Related Cytochrome P450 Genes from *Bursaphelenchus xylophilus* (Tylenchida: Aphelenchoidoidea). *International Journal of Molecular Sciences*, **16**, 5216-5234. https://doi.org/10.3390/ijms16035216

[31] Qiu, X., Yang, L., Ye, J., Wang, W., Zhao, T., Hu, H., *et al*. (2019) Silencing of cyp-33C9 Gene Affects the Reproduction and Pathogenicity of the Pine Wood Nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *International Journal of Molecular Sciences*, **20**, Article No. 4520. https://doi.org/10.3390/ijms20184520

[32] He, L., Wu, X., Xue, Q. and Qiu, X. (2016) Effects of Endobacterium (*Stenotrophomonas maltophilia*) on Pathogenesis-Related Gene Expression of Pine Wood Nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) and Pine Wilt Disease. *International Journal of Molecular Sciences*, **17**, Article No. 778. https://doi.org/10.3390/ijms17060778

[33] Fu, Y., Liu, H. and Wu, X. (2020) Diversity and Function of Endo-Bacteria in *Bursaphelenchus xylophilus* from *Pinus massoniana* Lamb. in Different Regions. *Forests*, **11**, Article No. 487. https://doi.org/10.3390/f11050487

[34] Xue, Q., Wu, X., Zhang, W., Deng, L. and Wu, M. (2019) Cathepsin L-Like Cysteine Proteinase Genes Are Associated with the Development and Pathogenicity of Pine Wood Nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *International Journal of Molecular Sciences*, **20**, Article No. 215. https://doi.org/10.3390/ijms20010215

[35] Xue, Q. and Wu, X. (2019) Characteristics and Function of a Novel Cystatin Gene in the Pine Wood Nematode *Bursaphelenchus xylophilus*. *Biology Open*, **8**, bio042655. https://doi.org/10.1242/bio.042655

[36] 邓世晴. 星机地协同的松材线虫病疫区枯死松树监测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 东华理工大学, 2019.

[37] 谢毓芬, 刘少波, 任博文, 等. 松材线虫的监测与防治[J]. 科学技术创新, 2020(23): 185-186.

[38] 刘伟, 杨宝君, 徐福元, 等. 松材线虫病树早期诊断的研究I. 马尾松、黑松松材线虫病树的早期诊断[J]. 林业科学研究, 1998(5): 4-9.

[39] 杨宝君, 刘伟, 徐福元, 等. 松材线虫病树早期诊断的研究II. 松树品种、接种量及线虫来源对流胶法的影响[J]. 林业科学研究, 1999(3): 32-36.

[40] 王海军. 康县松材线虫病发生特点及综合防治技术探析[J]. 南方农业, 2024, 18(16): 214-216.

[41] 吴秀俊. 汉中市汉台区人工林中松褐天牛的监测与防治措施[J]. 农村科学实验, 2024(20): 130-132.

[42] 章如意. 松材线虫病危害监测手段和特点以及防治措施[J]. 智慧农业导刊, 2021, 1(14): 63-65.

[43] 何天英, 李霞. 松材线虫害遥感监测在我国的研究进展[J]. 河南科技, 2021, 40(10): 13-15.

[44] 谢柯香. 攸县松材线虫病防治现状及优化措施[J]. 现代农业科技, 2022(19): 133-137.

[45] 叶勤文, 周卫, 高景斌, 等. 航空摄像技术在松材线虫病监测上的应用[J]. 森林病虫通讯, 1997(3): 45-47.

[46] 徐华潮, 骆有庆, 张廷廷, 等. 松材线虫自然侵染后松树不同感病阶段针叶光谱特征变化[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(5): 1352-1356.

[47] 刘宁, 张晓丽, 王书涵, 等. . 基于蒸腾速率与光谱特征的松材线虫病害预测[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 129-135.

[48] Yu, R., Ren, L. and Luo, Y. (2021) Early Detection of Pine Wilt Disease in *Pinus tabuliformis* in North China Using a Field Portable Spectrometer and UAV-Based Hyperspectral Imagery. *Forest Ecosystems*, **8**, Article No. 44. https://doi.org/10.1186/s40663-021-00328-6

[49] 戴丽, 周席华, 罗治建, 等. 湖北松材线虫病卫星遥感监管技术初探[J]. 湖北林业科技, 2022, 51(4): 60-64.

[50] 黄华国. 林业定量遥感研究进展和展望[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12): 1-14.

[51] 黄芳芳, 雷鸣, 张力, 等. 基于随机森林和决策树的马尾松松材线虫病监测方法[J]. 信息通信, 2019(12): 32-36.

[52] 马云强, 赵宁, 王华, 等. 基于 BJ-2 号卫星的马尾松松材线虫病监测研究[J]. 农业与技术, 2021, 41(10): 76-79.

[53] 周桓宇. 基于卫星遥感的松材线虫病疫木检测研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.

[54] 徐培林, 周兴霞, 余安平. 松材线虫病天空地一体化立体监测技术[J]. 测绘, 2020, 43(3): 104-108.

[55] 宗世祥, 毕浩杰. 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, 2022, 41(3): 45-51.

[56] 李浩, 徐航煌, 郑恒宇, 等. 基于无人机遥感图像的松材线虫病监测技术研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(9): 170-175.

[57] 曾全, 孙华富, 杨远亮, 等. 无人机监测松材线虫病的精度比较[J]. 四川林业科技, 2019, 40(3): 92-95+114.

[58] 李娜, 陈鹏云, 庞钧予. 口岸进出境木质包装中松材线虫的检疫及对策[J]. 价值工程, 2015, 34(27): 178-179.

[59] 董宝旭. 松材线虫为害特点及综合防治技术[J]. 现代园艺, 2023, 46(16): 73-75.

[60] 秦建军. 松材线虫病的发生特点及防治措施探讨[J]. 现代农业, 2022(1): 101-103.

[61] 宋高飞, 张标强, 童浩, 等. 树干注射甲维盐制剂对松材线虫病林间防效的综合评价[J]. 林业与环境科学, 2025, 41(1): 86-93.

[62] 田龙权. 松树松材线虫病药剂防治分析[J]. 农业技术与装备, 2023(10): 160-161.

[63] 尹丽钦. 微创注射防治古松树松材线虫病效果分析[J]. 福建林业科技, 2022, 49(3): 72-75+93.

[64] 陈元生, 黄名广, 罗致迪, 等. 花绒寄甲与松褐天牛及松材线虫病三者间长效关系研究[J]. 西部林业科学, 2023, 52(3): 63-69.