

松材线虫病的分布、危害及其防治对策

蒋 敏, 黄 斌, 余 旭, 郑文婷, 金伊丽, 廖梦娜, 倪 健

(浙江师范大学 化学与生命科学学院, 浙江 金华 321004)

摘要: 简述了松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* 病分布与危害现状, 着重论述松材线虫病的形态学与生物化学鉴定、野外调查与取样方法及其危害等级的划分, 以及预防为主、治理为辅的防治对策, 包括检疫手段与物理、化学和生物措施。并对未来的研究与防治进行展望, 包括加强检疫与预防, 阻断传播路径; 分子和遗传致病机理的深入研究, 利用转基因技术研发防疫和杀虫新药物; 近自然林恢复及生态系统的科学管理, 增加生态景观异质性, 增加植物和动物多样性, 加强生物防治; 改善土壤环境, 增强土壤肥力, 提高松林自身健康度和抵抗力; 加强空中监测与地面检测, 引入无人机巡航, 提高诊断手段和技术及加强定期疫情分析。

关键词: 松材线虫病; 调查与诊断; 分布与危害现状; 防治对策

中图分类号: S763 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3776(2018)06-0083-09

Distribution, Damage and Control of Pine Wilt Disease

JIANG Min, HUANG Bin, YU Xu, ZHENG Wen-ting, JIN Yi-li, LIAO Meng-na, NI Jian

(College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: Introduction was made on geographical distribution of pine wilt disease and current situation of damage. Focus was put on the morphological and biochemical identification of the disease, field investigation and sampling and grade of damage, as well as control measures. Further researches should be on strengthening of quarantine to block spread path, development of new drugs by transgenic technology, recovery of close-to-nature forest and management of ecosystems to increase the heterogenicity of ecological landscape, diversity of plant and animal for better biological control. Improving soil environment and soil fertility could also enhance the healthy and resistibility of pine forest. Aerial and field monitoring should be strengthened and application of drone could improve analysis of the disease.

Key words: pine wilt disease; investigation and diagnosis; distribution and damage assessment; prevention and control

作为滑刃科 Aphelenchoididae 伞滑刃属 *Bursaphelenchus* 的一种线虫, 松材线虫 *B. xylophilus* 可通过媒介昆虫(以多种天牛为主)取食健康松属 *Pinus* 树种并侵入松树体内, 在短时间内引起松树枯死, 这种林木病害被称为松材线虫病或松材线虫萎蔫病^[1]。松材线虫主要寄生于 70 种针叶树种, 危害马尾松 *P. massoniana*, 赤松 *P. densiflora*, 黑松 *P. thunbergii* 等 57 种松属植物, 以及 13 种非松属植物^[2]。其雌雄虫体均呈细长的蠕虫形, 长 1 mm 左右, 可快速繁殖, 在气温 30℃ 时 3 d 能完成 1 个世代, 因而具有传染性高、抗逆性强和适应性广的特点。这些生物学特征决定了松材线虫病情发展快, 染病植物死亡率高, 40 d 即可导致松树死亡, 只需 3 ~ 5 a

收稿日期: 2018-03-12; 修回日期: 2018-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471049); 浙江师范大学重点建设项目(2017XM023, 2017PT009)

作者简介: 蒋敏, 本科, 从事生物学研究; E-mail: 1021147592@qq.com。通信作者: 倪健, 教授, 从事全球变化生态学、古生态学和植被生态学研究; E-mail: nijian@zjnu.edu.cn。

能够引起整片松林毁灭,因此是一种危险性极强的森林病害,被称为松树的“癌症”。而且该病害适生区域广泛、传播途径多样、蔓延速度快、危害程度与防治难度都很大,目前世界上尚无简便、经济、有效的办法控制该病害,因此被列为国际重点林木病虫害检疫对象,是森林病虫害之首^[3]。

松材线虫病起源于北美,后逐渐传入欧洲和亚洲。1982 年该病传入我国境内,随后迅速蔓延,严重威胁和破坏我国的松林生态系统^[4]。浙江省是全国松材线虫危害最为严重的地区,以舟山、宁波、杭州和温州等地区尤甚^[5]。为进一步做好检疫、预防和防治,需要对国内外,尤其是浙江省的松材线虫病分布、危害程度及其防治对策进行详细总结,以便为野外调查与病害诊治奠定理论基础。

1 松材线虫病分布与危害现状

松材线虫原产于北美洲。目前松材线虫病主要分布于北美洲的美国、加拿大和墨西哥,欧洲的西班牙和葡萄牙,以及亚洲的日本、韩国、朝鲜和中国,在全球的分布范围并不广,但全球却有 52 个国家将其作为检疫性病虫害^[6]。松材线虫病在北美和欧洲并未造成严重危害,而在亚洲却引起了松树的大面积死亡,对当地森林生态系统和林业造成严重破坏,其中以日本受危害的时间最长、最严重^[7]。日本自 1905 年首次在长崎县发现松材线虫病以来,病害遍布全国绝大部分地区,每年造成大量的松树枯萎死亡,经济损失严重,治理耗费巨大^[1,7]。因此,日本也是研究松材线虫病最多的国家^[1],该线虫的首次分离及其与松树枯萎死亡的关系,也是早在 1968 年由日本科学家发现的^[8-9]。

我国于 1982 年首次在江苏省南京市中山陵的黑松上发现松材线虫病^[10-11],随后迅速向周边地区和省份蔓延,造成大量松树枯死。此后的 30 a (截至 2012 年),松材线虫病先后入侵全国 18 个省、直辖市和自治区(包括台湾),尤其以江苏、安徽、广东和浙江最为严重,给全国森林资源和生态环境造成了巨大破坏^[7,12]。据国家林业局 2017 年第 4 号公告^[13],目前松材线虫病疫区仍有 248 个(县区),其中浙江 37 个、福建 34 个、广东 31 个、江西 25 个、江苏 21 个、安徽 19 个、湖北 16 个、山东 14 个、重庆 12 个、湖南 11 个、四川 11 个、陕西 5 个、广西 4 个、贵州 4 个、河南 1 个和辽宁 1 个,共 16 个省市区(图 1),比 2009 年首次公开发布的疫区数(93 个)增加了 2.6 倍。



图 1 中国松材线虫病疫区分布

Figure 1 Affected area of pine wilt disease in China

我国松材线虫病的发生具有明显的区域聚集特征,全国及江苏、安徽、广东、浙江 4 个重灾区的疫点在空间格局上呈聚集分布,且疫点间存在不同程度的依赖性。其中有 2 个明显的聚集分布区域,一个以南京为中心,包括江苏、安徽大部 and 浙江西北部(30.5 ~ 32.5° N, 117.7 ~ 120.5° E);另一个在广东境内(22.5 ~ 24° N, 113 ~ 114.5° E)^[14]。根据半变异函数模型的评估,松材线虫病在传入中国早期存在一定程度的自然扩散^[14];而基于遗传多样性和系统发育的分子证据表明,中国松材线虫居群间存在明显的遗传差异,山东长岛、浙江岱山、安徽皖南、广东东莞的松材线虫病均由最早发病的南京地区扩散而至,而毗邻南京的安徽明光的松材线虫病却非南京扩散去的;松木制品的调运等人为远距离传播可能是松材线虫在中国蔓延的主要途径^[15]。也有学者推断,中国松材线虫种群最初的定殖和扩散中心是广东(1970 年代从香港入侵),再通过货物运输到达其他地区,只是首次发现于南京^[16]。无论如何,人为传输是松材线虫散布的重要途径;松材线虫的现状分布区主要在长江流

松材线虫的行为,影响松材线虫的侵染和扩散,在松材线虫传播的过程中发挥重要的调控作用^[23-24]。

尽管松材线虫病的发生已有上百年历史,松材线虫的发现也已半个世纪,但其致病机理非常复杂,至今仍然存在争议,当前主要存在4种观点,即酶学说、空洞化学说、毒素学说和细菌学说。酶学说认为,松材线虫产生的酶破坏松树薄壁细胞的细胞壁和细胞膜,致使树脂从树脂道中渗漏并扩散到相邻管胞,阻碍水分输导,导致枝条萎蔫^[21]。空洞化学说则认为松树感染松材线虫后,木质部内挥发性萜烯类物质的含量增加,进入管胞形成空洞,同样阻碍水分输导,降低蒸腾作用,最终导致松树枯萎^[25]。毒素学说同样认为,松树体内会产生有毒物质(包括苯甲酸、苯乙酸、儿茶酚、酮类、二氢松柏醇等)而使松树萎蔫。而细菌学说则认为,松材线虫携带的致病细菌(病原)产生的毒素引起松树萎蔫^[2,21,25]。由于松材线虫病的致病机理有很多研究和综述,此内容不是本文的重点,故而不再展开论述。下面就松材线虫病的诊断、调查与危害等进行深入阐释。

2.1 松材线虫病的诊断

松树枯萎死亡病情发生后的60多年里,一直未能发现松材线虫,直到1968年日本科学家才从松树中分离出松材线虫^[9],这从一个侧面说明松材线虫病较难鉴定。目前病害的诊断主要有2种途径,病树诊断和病原线虫鉴定^[26]。航空遥感技术的应用,为不同时空尺度上的疫区监测奠定了基础^[27]。

2.1.1 病树诊断

主要包括枯死木诊断、活立木早期诊断和原木诊断3种方法。

枯死木诊断。松树发病一般在8月下旬到11月上旬,有大树也有小树,大多数染病植株在1~3个月内枯死,只有少数植株在第2年4~6月枯死,但可在当年诊断。针叶颜色由绿色渐渐变成灰绿色,并逐渐变黄,最后整个树冠变成红褐色,植株死亡,但针叶并不脱落。树皮上常能观察到天牛的产卵刻巢。松树树脂分泌减少,蒸腾作用下降,部分针叶失去光泽。树脂停止分泌,树皮上看不到树脂流出^[21,26]。根据这些特征,在林间普查时可初步判断为松材线虫为害,但还需要深入观察与实验确认。

活立木的早期诊断。包括流胶法与化学法。流胶法简单易操作,是有效的早期诊断。该方法是在树干胸高处用打孔器打1个直径为10~15 mm深至木质部的圆孔,观察树脂分泌能力,若圆孔壁上仅有树脂粒状渗出,树脂仅沉积在孔口下缘,或孔壁上无树脂流出,则可判断为感病^[26]。化学法是采用酸性品红染色追踪树液流动,根据茎干横切面着色情况判断是否有挥发性物质渗漏入导管,鉴定是否为松材线虫病。但该方法不便于操作,也不能用于林间活立木检测,其实用性还需要深入检验。还有利用pH指示剂在松木上的颜色变化来快速检测松材线虫病,因为染病树木的木材酸度有一定程度的增加。但这种酸度的变化与多种因素相关,也存在地域和树种差异,所采用的指示剂及其显色标准也还有待深入研究^[27]。

原木诊断。包括直接观察和显色反应。前者直接检查原木,通常病材干枯,重量明显变轻,能观察到天牛侵入孔,木质部变蓝,无松脂分泌等。后者则分别利用浓度均为0.04%的溴酚兰与二甲基黄酒精溶液作为检测指示剂,溴酚兰酒精溶液可使病木变黄,黄色越明显说明线虫危害越严重,二甲基黄酒精溶液可使病木变红,越红则危害越严重,准确率可达85%^[26]。

2.1.2 病原线虫鉴定

鉴定病原线虫是最直接、最可靠的诊断病害方法,目前利用形态学、生物化学、免疫学检测法(或称血清学分析)和分子生物学等多种手段进行鉴定^[26]。

形态鉴定法。主要依据松材线虫的典型形态学特征,以野外便携式显微镜或室内显微镜作为镜检手段,操作简单,对仪器设备要求低,在生产和研究上被广泛使用,但其最大难点在于区分与松材线虫同属的无致病性或致病力弱的拟松材线虫*B. mucronatus*^[26]。线虫的分离常采用贝尔曼漏斗法^[28]、松枝解剖法^[29]或松褐天牛引诱捕获法^[30-31]。

生物化学检测法。如蛋白质和同工酶电泳分析,是根据不同种间与株系间线虫体内蛋白质与同工酶的差异,通过电泳技术分离获得其图谱而进行诊断;但该方法所获图谱信息复杂、不稳定,样本量需求大,因而存在较多

局限性^[26-27,32]。免疫学检测法则通过制备抗松材线虫血清,以竞争型酶联免疫吸附测定(ELISA)或免疫组化染色的方法检测松材线虫抗原,可直接捕获木屑中的微量线虫抗原,简便、快速且灵敏度高。纤维素酶扩散法则是根据松材线虫与非病原线虫分泌的纤维素酶的差异而诊断病原线虫。这些生化方法的优势在于方法简单、易于观察、耗时较短、结果稳定、灵敏度高、特异性强,但所用仪器设备复杂,技术要求高,只适于高等院校、出入境检验检疫机关等机构在实验室内进行操作,在基层林业部门较难推广。

分子生物学检测技术。通过分析线虫 DNA 特有的基因组来判断松树是否染病,主要包括探针技术以及基于 PCR 的各种检测技术,应用较多的是实时定量检测技术与 SCAR 标记检测技术。分子技术克服了形态鉴定、生理生化检测存在的一些缺陷,检测时间短、准确性高、稳定性好,但只适合于在仪器设备齐全的实验室内操作,难以应用于林间现场^[26-28]。

目前,科学家们致力于快速检测试剂的研发,以便更快捷地鉴别松材线虫病情,比如松材线虫分子检测试剂盒^[27]、带有生物活性物质的早期诊断检测管^[33]及化学信息取样技术^[34]。这些方法既可早期诊断松材线虫病,又避免松树被削皮砍伐,同时操作简便、准确率高、样品量少,减轻了检验检疫人员的工作量,适用于野外大规模病害诊断及普查监测,具有广阔的应用前景^[27]。另外,航空遥感、地理信息系统等 3S 技术在监测松材线虫病方面正发挥着越来越大的作用^[35-36],通过染病林木的反射光谱特征存在“红移”或“蓝移”现象的差异,可准确、快速定位、监测和预警松材线虫病疫区^[37-40]。

2.2 松材线虫病的调查方法

松材线虫病疫情监测主要采用地面人工调查的方法^[41]。野外林木调查时间一般为春季 4-5 月和秋季 9-10 月,调查内容包括疫情发生地点、范围、树种、发生面积、病死树数量,确定疫情分布边界,绘制疫情分布示意图和详图^[41-43]。

制订详细工作方案,准备图件与材料及常用工具和仪器,包括行政区划图、森林资源分布图、松林小班卡片、已发生松材线虫病疫情分布现状图、调查表格等,以及望远镜、钻、锯、斧或砍刀、塑料袋、标签、记号笔等野外用具和材料等。

根据当地松林分布特点,设计具体踏查路线。先以自然界线、道路为主线以及登上制高点进行初步查看,再以林场监测的可疑枯死、濒死松树为重点进行详细踏查,目视查找枯死、濒死松树,选择抽样对象。

抽样、取样和样品检测。抽样松树为尚未完全枯死或刚枯死不久、具有松材线虫病典型外部症状的优势树木,并排除其他死亡原因。抽样数量以小班为单位,症状典型的松树若在 10 株以下则全部取样,10 株以上先抽取 10 株,再选取其余株数的 1%~5%,现场填写《松材线虫病林业小班调查抽样记录表》。取样部位为树干胸高处,或症状明显的树枝;在春季松褐天牛化蛹期,可在蛹室周围取样。取样方式一般为钻取木质部至髓心木屑,或截取圆盘。所取样品粘贴标签记录,及时置于冰箱保存或分离鉴定。然后采用前述的病原线虫鉴定方法进行样品检测,辅助以病树诊断方法。

疫情确认与上报。一旦发现疫情,则需经县、市、省级森防检疫部门的鉴定、复核与确认,立即报告当地人民政府和上一级林业行政主管部门,并在一周内报告国家林业局。

2.3 松材线虫病的病害阶段与危害等级划分

通常根据树木生长状况和病株率来划分松材线虫病的危害阶段与等级。在自然感病状态下,根据树木生长状况、松针颜色及松脂流量变化,可将不同受害程度的松树分为 6 个阶段^[44-45]:(1)健康阶段:松树外观健康,松脂分泌正常,未见线虫;(2)开始侵染阶段:松树外观健康,但松脂分泌明显减少或停止,天牛啃食部位有少量松针褪色、萎蔫;(3)病害早期阶段:松脂分泌完全停止,部分针叶失去光泽成灰绿色,与天牛取食部位相近的枝条有少量黄色针叶,主干出现黄色至褐色针叶;(4)病害中期阶段:顶梢与一年生嫩枝基部针叶偶见黄色,其余枝条针叶部分黄色,针叶无光泽;(5)严重病害阶段:顶梢及一年生嫩枝呈灰绿色、萎蔫,部分针叶黄绿色,多年生枝条大多枯黄;(6)病害晚期或死亡阶段:顶梢大部或基本枯黄,其余枝条完全枯死,较早

枯黄的针叶转褐色,但枝干材质尚松软。

一旦确定染病,则松材线虫病的危害等级可根据病株率来划分,但不同地区的划分标准有较大差异。病株率=(病株树/松树总株数)×100%,安徽省的划分标准,病株率低于0.1%为轻度危害,0.1%~1%为中度危害,高于1%则为重度危害^[41]。而山东省,病死树株率低于5%为轻级,5%~10%之间为中级,高于10%则为重级^[43]。

3 松材线虫病的防治对策

鉴于松材线虫病的危害严重,目前尚无简便、经济可行的控制办法,防治工作极其困难,因此,应该以防为主,严防松材线虫病的发生扩散,阻断其传播途径;以治为辅,在发生初期就及时给予积极的治疗,采取各种必要的手段,直至完全消灭病害。

3.1 松材线虫病的预防措施

检疫是预防松材线虫病的首选。掌握松材线虫的检疫技术,采取有效监测手段,加强监测松材线虫病疫情,掌握其动态并及时采取防治措施,是松材线虫病防治工作的重要途径^[42]。松材线虫病害检疫范围包括来自国内外疫情发生区的松属,雪松属 *Cedrus*,冷杉属 *Abies*,云杉属 *Picea* 和落叶松属 *Larix* 等植物的苗木、插条等生长繁殖材料,上述植物的木材、枝桠、根桩、木片及其制品等,以及带有松材线虫及其传播媒介昆虫活体的货物、包装与铺垫材料及运输工具^[45]。一旦发现病虫害就要及时报告,及时处理,控制在萌芽状态,具体措施包括热处理、喷施杀线虫剂、溴甲烷熏蒸、浸泡、集中烧毁等^[45]。

监测并利用物理、化学和生物手段清除其传播寄主松褐天牛。比如,在潜在发生区内设置诱木(5月份)引诱松褐天牛集中产卵后清除,在天牛羽化期(5~8月)设置诱捕器和效果良好的引诱剂(如APF-I型诱剂和诱捕器)诱杀成虫,在晚夏和秋季(10月以前)喷洒杀虫剂(噻虫啉)杀死树皮下的天牛幼虫,或利用管氏肿腿蜂 *Scleroderma guani* 或川硬皮肿腿蜂 *S. sichuanensis* 防治天牛^[45]。

另外,科学有效管理森林生态系统,选用抗病强的松树树种,如黑松×马尾松、赤松×油松等松树杂交种,多具有抗松材线虫侵染的特性;在松树纯林中引种阔叶树种,增加生物多样性;合理种植,疏密有度,增强林木自身更新,从而增强森林健康度及抵御害虫能力,也是有效预防措施之一。

3.2 松材线虫病的治理措施

对于已确认感染松材线虫的松林,主要采取物理、化学与生物措施来进行治理。及时清除病株残体,设置隔离带,切断松材线虫的传播途径,是较为有效的物理措施。对于已经发生松材线虫病的病疫区,必须清理病死树(包括枝干与根桩)和对病木进行除害处理(磷化铝熏蒸),即便清理操作工作量大、成本高也必须做好。而对于重病区,则需要考虑一次性皆伐整个山头或者地块的松树。在线虫侵染前数周,在松树根部土壤中喷施丰索磷、乙伴磷、治线磷等内吸性杀虫剂,或树干注射,能有效地预防线虫侵入和繁殖,是常用的化学措施,或采用微波技术清除病疫木板材中的松材线虫^[46];但化学方法成本高,常有负面效应,不宜大面积推广使用^[28,45]。在生物治理措施方面,可利用松材线虫病疫木种植茯苓 *Poria cocos*,利用鸟类等天敌进行防治,利用白僵菌 *Beauveria bassiana* 防治昆虫介体,也可用捕线虫真菌防治^[47-48]。生物治理具有明显的生态效益,对环境影响较小,有望在今后的松材线虫病防治中广泛推广。

4 松材线虫病研究与防治展望

虽然国内外投入了大量的人力、物力和财力来防治松材线虫病害,但截止目前该病害仍未得到有效控制。中国幅员辽阔,针叶林占全国森林面积的42.7%,而松林约占整个针叶林面积的58%,很多地区都适宜松材线虫病的流行。无论是简单以年均温10℃线以南作为松材线虫的适生区、14℃线以南为易发生区^[49],还是根据模

糊综合评判方法^[50-51]、Maxent 生态位模型^[52],均发现松材线虫的适生区位于 20 ~ 40° N, 90 ~ 125° E 的亚热带、暖温带之间,主要集中在华东和华南地区,包括河北、辽宁、山西、陕西、河南、山东、江苏、浙江、福建、广东、广西、江西、四川、重庆、贵州、湖南、湖北和台湾南部地区,而新疆、西藏、甘肃的部分地区也适合松材线虫病的发生。尤其在气候变化背景下,松材线虫潜在适宜区呈现向北部、西部地区扩张的趋势,适宜区面积扩大,原来一些不适宜区也变为适宜区^[53]。因此,无论是从松材线虫病的现状疫区分布,还是其潜在适生区和未来适生区来看,该病害的爆发趋势明显,防治工作任重而道远。

从文献分析发现,松材线虫病研究与防治存在几个难点,致病机理不清楚、有效防治手段缺乏、运输途径传播难以阻断。针对这些难点,可采取如下措施进行应对。

加强木材运输等各种检疫,阻断松材线虫的人为传播路径,这是早期预防的最有效措施。经过 30 多年的传染与发展,松材线虫病在我国的分布范围已经非常广泛,加上现代物流业的快速发展,很难从根本上阻断人为传播途径,但严格执法力度,加大检疫范围,仍然是非常必要的。

从分子生物学和遗传病理方面深入研究其致病机理,发现阻隔松材线虫繁殖传播的分子机制,掌握线虫与松树的生态关系,从而寻求最佳的救治方法。如前所述,松材线虫病涉及到寄主、线虫、天牛、真菌、细菌以及环境因素等多个方面,至今其致病机理尚未弄清,但松材线虫及其伴生细菌的共存与进化,是需要深入研究的重要方向^[25,54],有可能是今后病害防治的突破点之一。

通过分子生物学手段提高松材线虫的快速鉴定与病害的迅速诊断技术,提高防治措施与手段,应用转基因技术,研发防疫和杀虫新药物。由于线虫形态鉴定的困难性,采用分子生物学手段准确而快速鉴定,应用基于生物化学技术、生物电学技术和生物信息技术的 RAPD 与 PCR-RFLP 等新型检测工具^[32],将是今后的发展趋势;但仍需考虑野外与室内鉴定的合理配合。利用基因工程选育和改造松树抗病品种,利用转基因技术开发杀虫新药物,也是将来需要重点加强的。

增强景观异质性,以近自然生态恢复的理念,并考虑森林生态系统对生物灾害的自我补偿与恢复能力,摒弃单一的马尾松林或其他松类纯林,而以常绿阔叶树、落叶阔叶树与针叶树的混交林为主要栽植对象,增加现有松树纯林周边的阔叶树防护带和隔离带,增加植物多样性,使用乡土树种,改造生态系统,构建系统优化结构;同时亦应多考虑加强生物防治,增加动物多样性,尤其是鸟类与昆虫多样性,控制松材线虫媒介昆虫的爆发。

改善土壤环境,增强土壤养分,增加土壤细菌和真菌多样性,降低土壤酸度,从而增强松树的健康程度,提高其自身抵抗力;从林业经营方面来看,加强林分抚育,也可以增强树势,从而提高生态系统自我控制松材线虫病的能力。

进一步加强风险分析与监测预警技术研究,重新评估松材线虫病害的发生及扩散风险,针对不同地区、不同森林植被的病害发生与传播特点,建立更为完备的中国松材线虫病灾害预警模式^[32]。综合利用遥感影像学和地理信息系统,加强空中监测,地面检测与空中监测并重,引入无人机巡航,加强定期疫情分析,提高诊断手段和技术。

参考文献:

- [1] 王明旭. 日本松材线虫病文献资料的研究与分析[J]. 中南林学院学报, 2004, 24 (5): 132 - 137.
- [2] 杨宝君, 潘宏阳, 汤坚, 等. 松材线虫病[M]. 北京: 中国林业出版社, 2003: 1 - 9.
- [3] 王明旭. 松材线虫病发病条件的研究概况[J]. 湖南林业科技, 2007, 34 (5): 4 - 10.
- [4] 张锴, 梁军, 严冬辉, 等. 中国松材线虫病研究[J]. 世界林业研究, 2010, 23 (3): 59 - 63.
- [5] 赵月琴, 卢剑波. 浙江省主要外来入侵种的现状及控制对策分析[J]. 科技通报, 2007, 23 (4): 487 - 491.
- [6] MOTA M M, VIEIRA P. Pine Wilt Disease: A Worldwide Threat to Forest Ecosystems[M]. New York: Springer, 2008: 5.
- [7] 何龙喜, 吉静, 邱秀文, 等. 世界松材线虫病发生概况及防治措施[J]. 林业科技开发, 2014, 28 (3): 8 - 13.

- [8] 陈守常. 松材线虫病病原与致病机理研究进展[J]. 四川林业科技, 2010, (1): 18-25.
- [9] FUTAI K. Pine Wood Nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. Ann Rev Phytopathol, 2013, 51: 61-83.
- [10] 孙永春. 南京中山陵发现松材线虫[J]. 江苏林业科技, 1982, (4): 47.
- [11] 程翔瑞, 林茂松, 黎伟强, 等. 南京黑松上发生的萎蔫线虫病[J]. 森林病虫通讯, 1983, (4): 1-5.
- [12] 宋玉双. 松材线虫病防控—三十年回顾与思考[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2013: 4-10.
- [13] 国家林业局. 2017年松材线虫病疫区公告(2017年第4号)[EB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/main/4461/content-941973.html>, 2017-01-20.
- [14] 潘宏阳, 叶建仁, 吴小芹. 中国松材线虫病空间分布格局[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4325-4331.
- [15] 孙捷, 杨寿运, 崔春亮, 等. 基于分子证据探讨松材线虫在中国的传播途径[J]. 南京农业大学学报, 2008, 31(2): 55-60.
- [16] 谢丙炎, 成新跃, 石娟, 等. 松材线虫入侵种群形成与扩张机制[J]. 中国科学C辑: 生命科学, 2009, 39(4): 333-341.
- [17] 王宏毅. 中国松材线虫的生物地理学与经济地理学[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(1): 144-145.
- [18] 章今方, 吾中良, 王奕交, 等. 浙江省松材线虫病的发生与防治[J]. 浙江林业科技, 1996, 16(1): 63-69.
- [19] 李兰英, 高岚, 温亚利, 等. 松材线虫病对浙江省环境影响经济评价[J]. 林业经济, 2009, (8): 68-73.
- [20] 王心同, 赵宇翔, 郭文辉, 等. 我国自然风景区松材线虫病入侵形势与预防对策[J]. 中国森林病虫, 2008, 27(2): 39-41, 35.
- [21] 李兰英, 高岚, 温亚利, 等. 松材线虫病研究进展[J]. 浙江林业科技, 2006, (5): 74-80.
- [22] 谢立群, 巨云为, 赵博光. 松材线虫传播机理的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(19): 5798-5800, 5867.
- [23] 成新跃, 徐汝梅, 谢丙炎. 化学通讯在松材线虫侵染和扩散中的作用[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 339-345.
- [24] 郑雅楠, 杨忠岐, 王小艺. 松墨天牛携带松材线虫传播的化学生态学机制[J]. 植物保护, 2014, 40(1): 12-15.
- [25] 谈家金, 叶建仁. 松材线虫病致病机理的研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2003, 22(6): 613-617.
- [26] 陈凤毛, 汤坚, 叶建仁. 松材线虫病鉴定方法与评价[J]. 安徽农业大学学报, 2005, 32(1): 22-25.
- [27] 马跃, 吕全, 于成明, 等. 松材线虫病早期诊断技术研究评述[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2014, 45(1): 158-160.
- [28] 蔡佳, 郎志飞. 松材线虫病的概况以及防治方法的现状与发展[J]. 科技资讯, 2011, (33): 121-122.
- [29] 来燕学. 用松枝解剖法快速检测松材线虫病原[J]. 浙江林学院学报, 2005, 22(2): 188-192.
- [30] 蒋丽雅, 周健生. 引诱松褐天牛检测松材线虫病的方法[J]. 森林病虫通讯, 1997, (3): 41-43.
- [31] 范军祥, 黄焕华, 钱明惠, 等. 松材线虫病的诊断方法探讨[J]. 广东林业科技, 2008, 24(5): 52-55.
- [32] 张锴, 梁军, 张星耀. 中国松萎蔫病病原线虫鉴定及诊断技术研究[J]. 中国森林病虫, 2010, 29(6): 31-34.
- [33] 潘沧桑. 松材线虫病研究进展[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2011, 50(2): 476-483.
- [34] ZHAO L L, JIANG P, HUMBLE L M, et al. Within-tree distribution and attractant sampling of propagative pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*: An early diagnosis approach[J]. For Ecol Manag, 2009, 258: 1932-1937.
- [35] 刘震宇. 广州市松材线虫病管理信息系统研建[D]. 长沙: 中南林学院, 2004: 1-65.
- [36] 王蕾. 基于“3S”技术的松材线虫入侵前后马尾松林动态变化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005: 1-75.
- [37] 宁眺, 方宇凌, 汤坚, 等. 松材线虫及其传媒松墨天牛的监测和防治现状[J]. 昆虫知识, 2005, 42(3): 264-269.
- [38] 石进, 马盛安, 蒋丽雅, 等. 航空遥感技术监测松材线虫病的应用[J]. 中国森林病虫, 2006, 25(1): 18-20.
- [39] 王震, 张晓丽, 安树杰. 松材线虫病危害的马尾松林木光谱特征分析[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(3): 367-370.
- [40] 杜华强, 葛宏立, 范文义, 等. 分形理论在马尾松松材线虫病发病早期高光谱探测中的应用[J]. 林业科学, 2009, 45(6): 68-76.
- [41] 蒋丽雅, 江顺利, 包锦芳. 松材线虫病疫情人工地面调查方法[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(13): 3053-3054.
- [42] 陈开团. 福建省防范松材线虫病面临的形势及加强木材运输检疫工作的措施[J]. 林业勘察设计, 2002, (2): 105-106.
- [43] 迟海英, 王新, 李强, 等. 松材线虫病检疫检验技术及威海地区的监测防范对策[J]. 山东林业科技, 2006, (1): 81-82.
- [44] 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.
- [45] 吴丽芳. 松材线虫病危害及综合治理措施[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(10): 154-155.
- [46] 蒋丽雅, 盛常顺, 马圣安, 等. 松材线虫病疫木的微波除害处理技术[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2006, 30(6): 87-90.
- [47] 何学友, 黄金水. 日本松材线虫病的最新研究动向[J]. 中国森林病虫, 2005, 24(5): 26-31.
- [48] 胡赛蓉, 赵宇翔, 李北屏, 等. 松材线虫病疫木安全利用新途径[J]. 中国森林病虫, 2006, 25(5): 26-28.
- [49] 宋玉双, 臧秀强. 松材线虫在我国的适生性分析及检疫对策初探[J]. 森林病虫通讯, 1989, (4): 38-41.

