北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

同林分松科4属树种对松材线虫病的抗性评价及长时序动态监测

俞琳锋 王峰 余润 吴昊 宗世祥 骆有庆 任利利

Resistance evaluation and long-term dynamic monitoring of tree species from four genera of Pinaceae against pine wilt disease in a co-occurring stand

Yu Linfeng, Wang Feng, Yu Run, Wu Hao, Zong Shixiang, Luo Youqing, Ren Lili

引用本文:
俞琳锋, 王峰, 余润, 吴昊, 宗世祥, 骆有庆, 任利利. 同林分松科4属树种对松材线虫病的抗性评价及长时序动态监测[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(1):41–49. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250138
Yu Linfeng, Wang Feng, Yu Run, Wu Hao, Zong Shixiang, Luo Youqing, Ren Lili. Resistance evaluation and long–term dynamic monitoring of tree species from four genera of Pinaceae against pine wilt disease in a co–occurring stand[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1):41–49. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250138

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250138

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

松材线虫病的潜伏侵染

Latent infection of pine wilt disease

北京林业大学学报, 2021, 43(9): 14–18. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210218

联合微波与光学时间序列影像的马尾松林松材线虫病遥感识别

Remote sensing recognition of pine wilt disease in *Pinus massoniana* forest combined with microwave and optical time–series images

北京林业大学学报, 2024, 46(3): 40–52. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220453

辽宁松材线虫病与中国其他疫区的差异性分析

Difference analysis on pine wilt disease between Liaoning Province of northeastern China and other epidemic areas in China

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 155–160. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200108

2017年中国大陆松材线虫病灾害经济损失评估

Economic loss assessment of pine wilt disease in mainland China in 2017

北京林业大学学报, 2020, 42(10): 96–106. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190210

基于GIS空间技术和MaxEnt模型预测川西松材线虫病入侵风险

Prediction of invasion risk of pine wilt disease based on GIS spatial technology and MaxEnt model in western Sichuan Province of southwestern China

北京林业大学学报, 2023, 45(9): 104–115. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220527

松材线虫交配特性研究

Mating characteristics of *Bursaphelenchus xylophilus*

北京林业大学学报, 2023, 45(6): 82–89. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210416

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250138

同林分松科 4 属树种对松材线虫病的抗性评价及长时序动态监测

俞琳锋[1,2,3]　王　峰[4]　余　润[3]　吴　昊[5]　宗世祥[3]　骆有庆[3]　任利利[3]

（1. 中国林业科学研究院资源信息研究所，北京 100091；2. 国家林业和草原局林业遥感与信息技术重点实验室，北京 100091；3. 北京林业大学林学院，北京 100083；4. 东北林业大学林学院，黑龙江 哈尔滨 150040；5. 辽宁省林业有害生物防治检疫工作站，辽宁 沈阳 110000）

摘要:【目的】探究松科 4 属（松属、落叶松属、云杉属和冷杉属）多个树种对松材线虫病的抗性，评估松材线虫病在我国“北扩西进”的入侵风险，为松材线虫病的宏观预警和科学防控提供依据。**【方法】**结合自然侵染和人工接种的方法，利用无人机图像和 2015—2023 年时序亚米级卫星影像，对辽宁抚顺市抚顺县、清远县、新宾县和东洲区 5 个混交林分中多树种受松材线虫侵染的显症情况进行长时序观测。研究对象涵盖松科 4 属的多个树种，重点关注油松、红松、长白落叶松、红皮云杉和杉松。**【结果】**在自然侵染条件下，自 2017 年松材线虫入侵抚顺后，研究区油松林和红松林中显症树木数量持续增加，受侵染林分相继被皆伐清理；而紧邻的长白落叶松显症树木较少，红皮云杉和杉松未发现受害发病。在人工接种条件下，通过 2021—2023 年的连续时序观测，发现接种 3 年的红松显症率达 83%，油松为 52%，而同时期接种的长白落叶松大树未见明显症状。**【结论】**本文明确了抚顺地区油松和红松为松材线虫病的易感病树种，而自然生长的长白落叶松大树具有较高抗性，自然生长的红皮云杉和杉松大树表现出极强抗性。

关键词：松材线虫病；松科 4 属；亚米级卫星影像；时序监测；抗病性

中图分类号：S758.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)01−0041−09

引文格式：俞琳锋，王峰，余润，等. 同林分松科 4 属树种对松材线虫病的抗性评价及长时序动态监测［J］. 北京林业大学学报，2026，48(1)：41−49. Yu Linfeng, Wang Feng, Yu Run, et al. Resistance evaluation and long-term dynamic monitoring of tree species from four genera of Pinaceae against pine wilt disease in a co-occurring stand[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1): 41−49.

Resistance evaluation and long-term dynamic monitoring of tree species from four genera of Pinaceae against pine wilt disease in a co-occurring stand

Yu Linfeng[1,2,3]　Wang Feng[4]　Yu Run[3]　Wu Hao[5]　Zong Shixiang[3]　Luo Youqing[3]　Ren Lili[3]

(1. Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Key Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information System, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China;
3. School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
4. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;
5. Liaoning Provincial Station of Forest Pest Control and Quarantine, Shenyang 110000, Liaoning, China)

Abstract: ［**Objective**］This study aims to systematically evaluate the resistance of multiple tree species in four Pinaceae genera (*Pinus*, *Larix*, *Picea*, and *Abies*) to *Bursaphelenchus xylophilus*, clarify the invasion risk associated with the “northward and westward expansion” trend of pine wilt disease in China, and provide a scientific basis for macro-level early warning and disease management. ［**Method**］A combined

收稿日期: 2025−04−22　**修回日期:** 2025−07−04

基金项目: 山东省重点研发计划（2024CXGC010911），国家重点研发计划（2021YFD1400900）。

第一作者: 俞琳锋，助理研究员。主要研究方向：林业有害生物遥感监测预警研究。Email：yulinfeng@ifrit.ac.cn　地址：100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号中国林业科学研究院资源信息研究所。

责任作者: 任利利，高级实验师。主要研究方向：林木钻蛀性害虫生态调控研究。Email：lily_ren@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

approach of natural infection and artificial inoculation with *B. xylophilus* was employed. Unmanned aerial vehicle images and time-series sub-meter resolution satellite images (2015–2023) were used to track long-term infection dynamics and symptomatic expression in five mixed-species plantations across Fushun County, Qingyuan County, Xinbin County, and Dongzhou District of Fushun City, Liaoning Province of northeastern China. The study focused on multiple species across four genera of Pinaceae, specifically *Pinus tabuliformis*, *Pinus koraiensis*, *Larix olgensis*, *Picea koraiensis*, and *Abies holophylla*. [**Result**] Under natural infection conditions, since the invasion of *B. xylophilus* into Fushun City in 2017, symptomatic trees in *P. tabuliformis* and *P. koraiensis* forests exhibited a significant increasing trend, and infected forests were subsequently clear-cut. In contrast, neighboring *L. olgensis* forests exhibited very few symptomatic trees, and no symptoms were observed in *P. koraiensis* and *A. holophylla*. Under artificial inoculation conditions, continuous time-series observations from 2021 to 2023 revealed that 83% of the inoculated *P. koraiensis* and 52% of the inoculated *P. tabuliformis* exhibited symptoms after three years. Meanwhile, large inoculated *L. olgensis* trees showed no significant symptoms during the same period. [**Conclusion**] The study identifies *P. tabuliformis* and *P. koraiensis* as highly susceptible species to *B. xylophilus* in Fushun City, while naturally grown *L. olgensis* trees exhibit relatively high resistance, *P. koraiensis* and *A. holophylla* trees demonstrate strong resistance to the disease.

Key words: pine wilt disease; four genera of Pinaceae; sub meter level satellite images; time-series monitoring; disease resistance

松材线虫病(pine wilt disease)是由松材线虫(*Bursaphelenchus xylophilus*)引起的一种毁灭性植物病害。松材线虫原产于北美[1]，自 1982 年在南京中山陵首次发现该虫以来，我国疫情迅速扩散，对松林(*Pinus* spp.)生态系统造成严重破坏[2−4]。2021 年，吉林通化市和甘肃陇南市康县相继被确认为松材线虫病疫区，表明该病在我国呈现持续“北扩西进”的传播趋势。根据国家林业和草原局 2024 年第 4 号公告，当年疫情已波及 18 个省(区、市)671 个县级行政区。鉴于松材线虫病传播速度快、适生范围广等特点，亟须采取有效措施加强防控。

在自然条件下，已有研究报道松属(*Pinus*)树种中有 51 种、非松属树种 16 种可感染松材线虫。其中，日本自首次报道该病以来，黑松(*Pinus thunbergii*)、赤松(*Pinus densiflora*)、琉球松(*Pinus luchensis*)和日本五针松(*Pinus pentaphylla*)均表现出高度易感性[5−7]。在我国，迄今确认的自然感病树种至少有 17 种[2]，主要包括黑松、赤松、马尾松(*Pinus massoniana*)、琉球松、白皮松(*Pinus bungeana*)、黄山松(*Pinus taiwanensis*)、湿地松(*Pinus elliottii*)、思茅松(*Pinus kesiya*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)、火炬松(*Pinus taeda*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、华山松(*Pinus armandii*)和红松(*Pinus koraiensis*)。值得注意的是，2018 年，在辽宁省首次确认松材线虫在我国自然条件下侵染长白落叶松(*Larix olgensis*)、日本落叶松(*Larix kaempferi*)和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)[8]；2019 年，又明确了樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)在自然条件下可受侵染[9]。随着新寄主树种和新媒介昆虫云杉花墨天牛(*Monochamus saltuarius*)的不断确认[10]，我国面临的松材线虫威胁进一步加剧。有研究表明，松材线虫对长白落叶松幼苗具有一定致病性，部分接种幼苗中能分离到少量线虫，但未表现明显病症[11]。为便于与幼苗比较，本研究将胸径≥15 cm，或树高在 4～6 m 以上，或树龄在 ≥ 20 年的个体定义为大树。然而，在自然侵染和人工接种松材线虫的条件下，长白落叶松大树对松材线虫的抗病性如何，目前尚不明确。

在原产地北美的研究中，科研人员曾从美国的白云杉(*Picea glauca*)、蓝云杉(*Picea pungens*)、香脂冷杉(*Abies balsamea*)[12−13]，还有加拿大的白云杉、黑云杉(*Picea mariana*)、红云杉(*Picea rubens*)、香脂冷杉中分离出松材线虫[14]。在松材线虫的入侵地区，仅在日本的欧洲云杉(*Picea abies*)和日本冷杉(*Abies firma*)中分离出松材线虫[15]。此外，加拿大和日本均有人工接种云杉属(*Picea*)和冷杉属(*Abies*)幼苗致病的试验记录，但是死亡率显著低于松属树种[16−18]，在日本松材线虫病对非松属树种的危害微乎其微。也有研究表明，欧洲云杉对松材线虫表现出一定抗性，松材线虫局限于接种部位，且随着接种时间的延长，线虫数量逐渐减少[19]。在中国，有研究显示松材线虫对红皮云杉(*Picea koraiensis*)和杉松(*Abies holophylla*)2～3 年生幼苗具有一定致病性，但是接种 60 d 后的死亡率为 10%～20%，远低于黑松[20]。在中国东北地区，云杉属和冷杉属树种广泛

分布，是当地重要的森林资源。然而，关于野外本土云杉属和冷杉属大树对松材线虫的抗病性如何，目前尚缺乏明确结论[21]。

辽宁省抚顺市因地理和气候条件优越，森林资源丰富，松科植物分布广泛，总面积达 31.95 万 hm^2，其中落叶松面积 23.52 万 hm^2，油松 4.6 万 hm^2，红松面积 2.98 万 hm^2[22]。该地区松科树种多属并存的分布格局，为研究松材线虫侵染在不同松科树种间的侵染规律提供了理想条件。关于松材线虫病的发病症状，已有大量研究表明[23]，当松材线虫侵染松树后，从感病早期至后期，树木针叶由绿色逐渐褪为黄褐色，最后呈现红棕色而不脱落的变色过程，同时树脂分泌逐渐减少直至完全停止。随着遥感技术的快速发展，逐步成为评价森林健康状况的路径和方法[24]，亚米级卫星遥感影像[25−27]已被证实可有效识别松材线虫显症木，是大范围监管疫情及掌握发展动态的重要技术手段。

基于松材线虫侵染导致寄主冠层变色的典型症状，本研究结合 2015—2023 年时序亚米级卫星影像和无人机图像，结合地面人工接种试验，系统分析自 2017 年松材线虫传入辽宁省抚顺市以来，红松、油松、长白落叶松、红皮云杉和杉松林分中显症树木的时序动态变化。研究重点包括：(1)明确松材线虫对同一林分中松科 4 属不同树种的自然侵染情况；(2)系统比较在野外条件下，红松、油松和长白落叶松大树在接种松材线虫 3 年过程中的侵染差异。研究旨在厘清抚顺地区松科 4 属主要树种对松材线虫的抗病性，为东北地区松材线虫病的科学防控提供数据支撑，并为松材线虫“北扩西进”扩散风险评估提供理论依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

抚顺市位于辽宁省东部，平均海拔 400 ~ 500 m，地处中温带区域，属典型的大陆性季风气候，年平均气温为 13.9 ℃，年均降水量为 826.8 mm。2017 年松材线虫侵入抚顺市后迅速扩散，并呈暴发态势。2020 年度受灾面积达到 6 713 hm^2，对当地松林资源造成了严重破坏[22]。截至 2024 年底，抚顺市已连续 8 年被我国列为松材线虫病疫区。在此背景下，本研究在抚顺市抚顺县、新宾满族自治县、清原满族自治县和东洲区交界处松材线虫病疫区内开展大范围地面踏查，最终选取 5 片具有代表性的区域用于时序观测(图 1)。

1.2　样地设置

研究区域中 4 个样地位于大伙房林场，1 个样

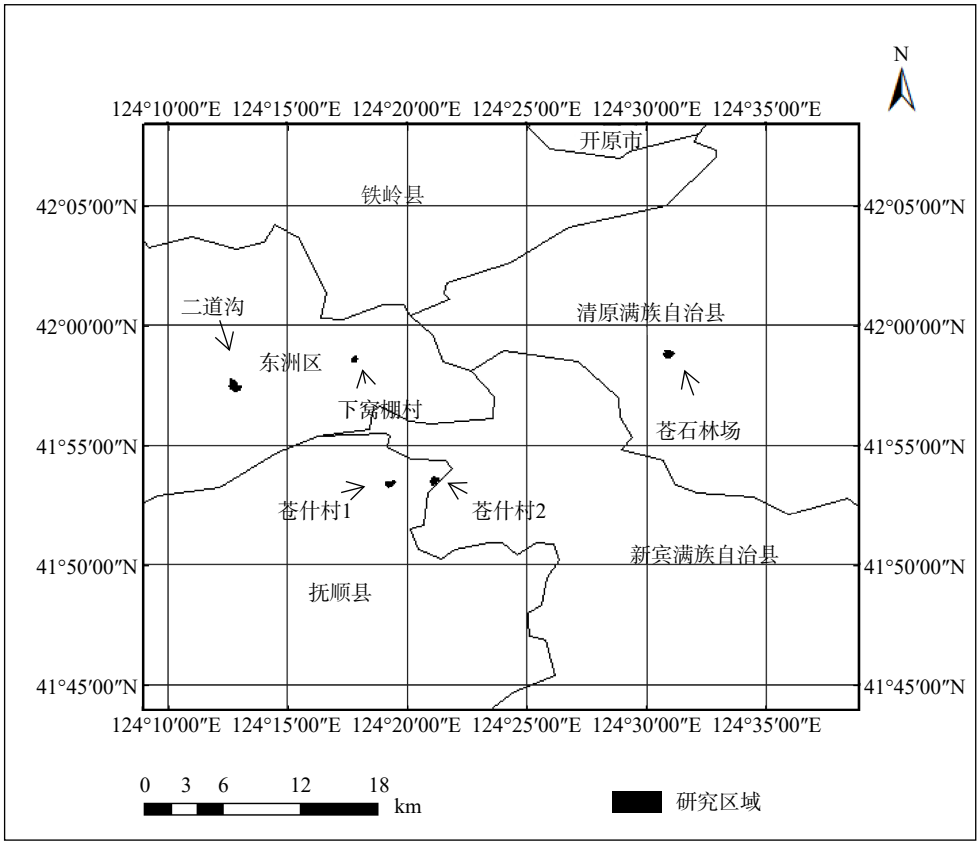


图 1　研究区域

Fig. 1　Study area

地位于苍石林场，总面积约 75 hm^2，地理坐标见表 1。主要树种包括红松、油松、长白落叶松、红皮云杉和杉松，且样地中多个树种主要呈块状或带状混交。对研究区域内变色立木进行抽样检测，结合形态学与分子生物学鉴定方法，证实树木显症特征确由松材线虫侵染所致[28−29]。为进一步探究不同树种的抗病性，于 2020 年 9 月在二道沟选择 20 ~ 30 年生长白落叶松林和 50 ~ 60 年生油松林，在下窝棚村选择 30 ~ 40 年生红松林，开展人工接种试验。试验采用抚顺株系松材线虫，在树干垂直方向设置梯度接种位点，起始高度距地面 2.0 m，随后以 0.25 m 为间距逐级向上递增，共形成 10 个纵向排列的接种点。操作时以电钻 45°倾角斜向钻入树干，穿透表皮层直至木质部，控制孔深约 5 cm；随后注入含繁殖型 4 龄幼虫（25 条/μL）的悬浮液 2 mL，并及时封口。以 ddH_2O 替代线虫悬液，按相同参数进行钻孔、注液及封口操作，作为对照[30]。最终，长白落叶松、红松和油松的接种数量分别为 70 棵、72 棵和 64 棵。

1.3 无人机图像和卫星影像获取及预处理

在 2019 年 9 月和 2023 年 6 月，使用大疆无人机对研究区域进行图像采集，旁向重叠率和航向重叠率设置为 85%，飞行速度为 3 m/s，飞行高度为 90 ~ 200 m，地面分辨率为 2 ~ 4 cm。2019 年 9 月获取的苍什村 1 和苍什村 2 区域无人机图像，主要用于分析自然条件下松材线虫病侵染过程；2023 年 6 月获取的下窝棚村和二道沟区域无人机图像，则主要用于比较接种松材线虫 3 年后不同树种的侵染情况。

本研究采用的亚米级卫星数据源主要包括 GF-2 和 GF-7BWD 亚米级卫星影像（中国资源卫星中心，https://data.cresda.cn）和 Worldview-2/3 影像（DigitalGlobe 商用高分辨率遥感卫星，https://imagehunter.apollomapping.com/）。综合影像质量、物候期匹配及林分覆盖度等因素，对 2015—2023 年期间获取的遥感数据进行筛选，每片林分最终选取 4 景卫星影像（表 2），覆盖了松材线虫病入侵前和入侵后的不同年份，作为显症树木遥感监测的数据支撑。利用 ENVI5.6 软件对影像进行预处理，包括辐射校正、大气校正、几何校正，并采用 Gram-Schmidt Spectral Sharpening 模型将全色波段和多光谱波段进行融合，生成空间分辨率在 0.5 ~ 1.0 m 的多光谱影像。结合无人机图像和地面调查，在高分辨率卫星影像中勾绘出 5 片林分中不同树种的分布区域。以此为基础，开展显症树木的时序观测，深入分析不同树种对松材线虫的抗病性差异。

1.4 统计分析

本研究同时设置自然侵染与人工接种两类样地，

表 1 研究区域的具体树种和松材线虫侵染方式

Tab. 1 Specific tree species and infection ways for pine wood nematode in the research area

研究区域	树种	侵染方式
苍石林场（41°58′37″ ~ 41°58′55″N，124°30′43″ ~ 124°31′08″E）	长白落叶松	自然
	红松	自然
	杉松	自然
	红皮云杉	自然
下窝棚村（41°58′27″ ~ 41°58′41″N，124°17′41″ ~ 124°17′52″E）	红松	人工接种
	长白落叶松	自然
	杉松 + 红松	自然
二道沟（41°57′13″ ~ 41°57′42″N，124°12′34″ ~ 124°13′06″E）	长白落叶松	自然
	长白落叶松	人工接种
	油松	自然
	油松	人工接种
苍什村1（41°53′14″ ~ 41°53′29″N，124°19′10″ ~ 124°19′32″E）	红松	自然
	长白落叶松	自然
	油松	自然
苍什村2（41°53′19″ ~ 41°53′40″N，124°21′01″ ~ 124°21′22″E）	油松	自然
	长白落叶松 + 油松	自然

表 2 研究区域的亚米级卫星影像

Tab. 2 Sub meter level satellite images within the research area

区域	时间	数据源
苍石林场	2016−05−19	GF-2
	2019−09−18	GF-2
	2020−05−30	GF-7
	2023−09−11	GF-2
下窝棚村	2015−05−30	GF-2
	2019−08−25	GF-2
	2020−07−21	GF-7
	2023−09−11	WV-3
二道沟	2015−05−30	GF-2
	2020−07−21	GF-7
	2022−09−11	GF-7
	2023−09−11	GF-2
苍什村1	2015−05−30	GF-2
	2018−04−17	WV-2
	2020−05−28	GF-7
	2023−09−11	GF-2
苍什村2	2015−05−30	GF-2
	2018−04−17	WV-2
	2020−05−28	GF-7
	2023−09−11	WV-3

通过时序观测探究松科不同树种受松材线虫侵染的情况。具体而言，针对接种松材线虫的长白落叶松、红松和油松，在接种 3 年过程中，对显症树木进行系统统计。在此，树木显症定义为：单株冠层≥25% 针叶变黄、褪绿或变褐[31]。对无人机图像和亚米级卫星影像进行目视解译，以期观测林分中显症树木数量的时序变化情况。

2　结果与分析

2.1　人工接种松材线虫的侵染分析

2020 年 9 月在野外对长白落叶松、红松和油松大树开展人工接种松材线虫试验，并进行了为期 3 年的连续观测。结果表明，2021—2023 年期间，接种 3 年的红松显症率为 83%（图 2），部分或全部针叶萎蔫呈红褐色（图 3、4），油松显症率为 52%（图 2、5），而长白落叶松在 3 年观测期内均未表现出明显症状（图 2、5）。

2.2　松材线虫侵染不同松科树种的时序观测分析

2.2.1　自然条件下松材线虫侵染不同松科树种的时序观测

基于 2015—2023 年的时序亚米级卫星遥感影像和无人机图像，持续观测了 5 个区域内松科 4 属树种林分的显症动态变化。结果显示，在油松林分中，苍什村 1 的油松林在 2018 年 4 月卫星影像中出

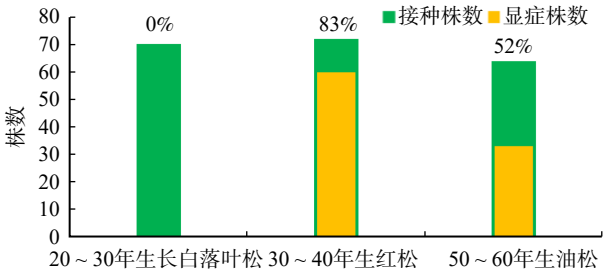


图 2　长白落叶松、红松和油松接种松材线虫 3 年的侵染统计

Fig. 2　Infection result of *Larix olgensis*, *Pinus koraiensis* and *P. tabuliformis* after inoculation with pine wood nematodes for 3 years



a 接种1 d的长白落叶松　b 接种2 a的长白落叶松　c 接种1 d的红松　d 接种2 a的红松

图 3　长白落叶松和红松接种松材线虫后的侵染情况

Fig. 3　Infection development of *L. olgensis* and *P. koraiensis* after inoculation with pine wood nematodes

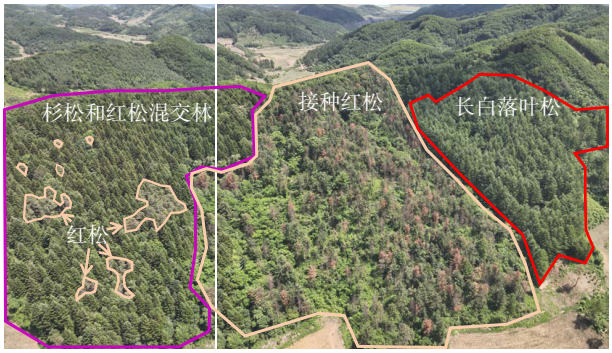


图 4　人工接种 3 年后的红松与自然条件下长白落叶松、杉松的无人机图像（2023 年 6 月下窝棚村）

Fig. 4　Unmanned aerial vehicle images of *Pinus koraiensis* after 3 years of artificial inoculation, under natural conditions of *L. olgensis* and *A. holophylla* forest (Xiawopeng Village, June 2023)

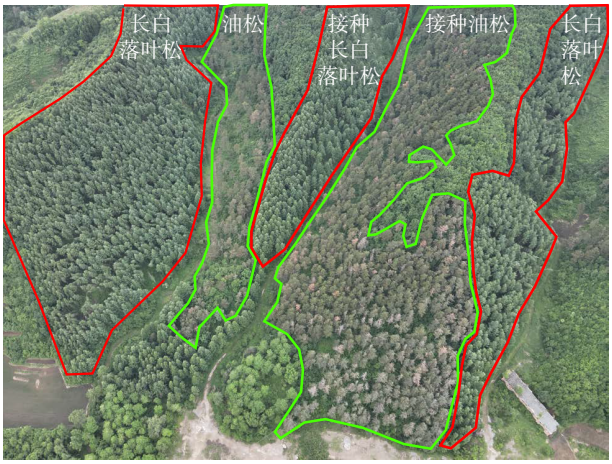


图 5　人工接种 3 年后和自然条件下油松和长白落叶松林分的无人机图像（2023 年 6 月二道沟）

Fig. 5　Unmanned aerial vehicle images of *P. tabuliformis* and *L. olgensis* forests: natural conditions versus 3 years after artificial inoculation (Erdao Valley, June 2023)

现显症树木（图 6），2019 年无人机图像中观测到 67 棵油松表现出明显症状（图 7），随后 2020 年 5 月卫星影像显示显症油松已被择伐清理，至 2023 年 9 月该油松林已皆伐清理。苍什村 2 的油松林的显症过程与此类似，2018 年出现显症树木，2020 年 5 月卫星影像表明受侵染的油松林已被皆伐清理（图 8）。

在红松林中，苍什村 1 于 2018 年出现显症树木，2019 年无人机图像显示 86 棵红松已表现出明显症状（图 7），2020 年 5 月卫星影像中可以观察到显症树木已被择伐清理，导致林分较为稀疏。2023 年 9 月卫星影像显示红松林已全部完成了皆伐清理（图 6），这一变化过程与苍什村 1 油松林的情况基本一致。苍石林场中的红松林在 2019 年 9 月卫星影像中观测到显症树木，到 2020 年 5 月已经皆伐清理（图 9）。

在自然状态下的长白落叶松纯林内，时序观测显示显症树木的数量很少（图 6～12）。值得注意的是，从 2019 年 9 月苍什村 2 的无人机拍摄图像中可

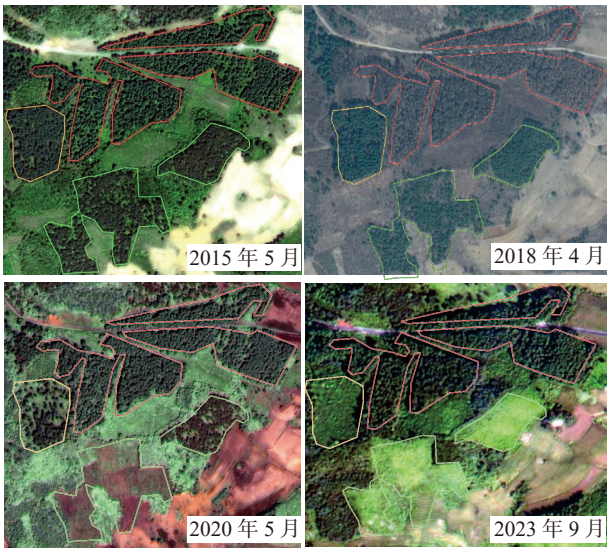


图 6 自然侵染 6 年过程中红松林、油松林和长白落叶松林的时序变化(苍什村 1)

Fig. 6 Temporal changes of *Pinus koraiensis* forest, *P. tabuliformis* forest, and *L. olgensis* forest during the 6-year period of natural infection at Cangshi Village 1

注:受侵染的油松和红松被皆伐清理,长白落叶松未明显显症。

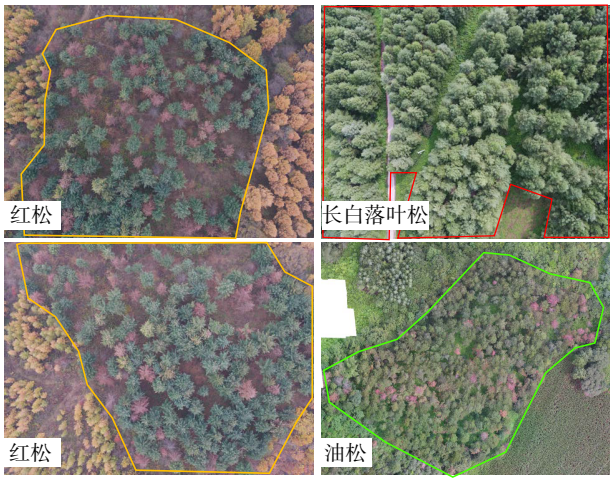


图 7 苍什村 1 林分内红松、油松和长白落叶松的显症情况(2019 年无人机图像)

Fig. 7 Symptom manifestation of *P. koraiensis*, *P. tabuliformis* and *L. olgensis* in the forest of Cangshi Village 1 (2019 UAV images)

注:油松和红松受侵染后显症,长白落叶松未明显显症。

以清晰观察到,在长白落叶松与油松的混交林中,油松已经明显表现出病症,但长白落叶松树冠仍保持翠绿(图 10)。在红皮云杉林和杉松林中,2015—2023 年未发现显症(图 9)。

2.2.2 人工接种条件下松材线虫侵染油松、红松和长白落叶松的时序观测

在下窝棚松林中,2020 年 9 月人工接种所在的红松林显症树木数量自 2020 年 7 月的 48 株增加至 2023 年 9 月的 244 株(图 11)。值得关注的是,在与

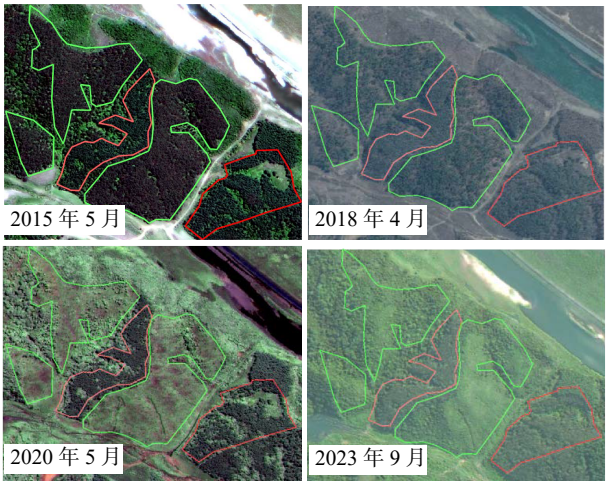


图 8 自然侵染 6 年过程中林分内油松和长白落叶松的时序变化(苍什村 2)

Fig. 8 Temporal changes of *P. tabuliformis* and *L. olgensis* forest during the 6-year period of natural infection at Cangshi Village 2

注:受侵染的油松被皆伐清理,长白落叶松显症树木很少。

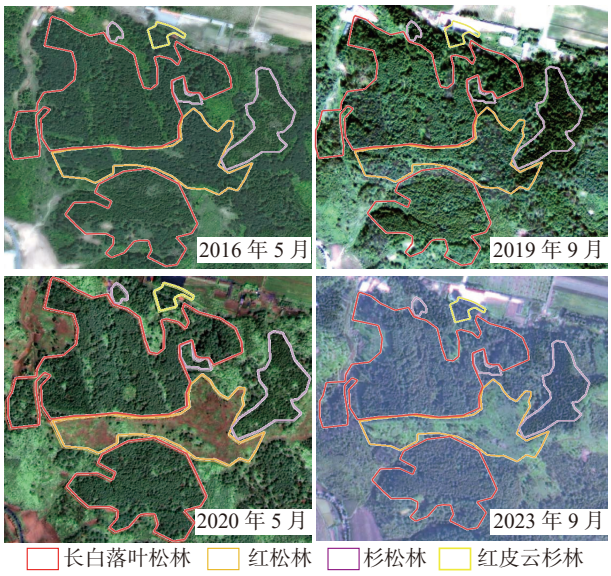


图 9 自然侵染 6 年过程中林分内长白落叶松、红松、杉松和红皮云杉的时序变化(苍石林场)

Fig. 9 Temporal changes of *L.olgensis*, *Pinus koraiensis*, *A. holophylla* and *Picea koraiensis* forest during the 6-year period of natural infection at Cangshi Forest Farm

注:受侵染的红松被皆伐清理,长白落叶松显症树木很少,杉松和红皮云杉未发现受害发病。

接种红松林毗邻的杉松与红松混交林中,杉松未发现受害发病,而混交林内的红松已表现出明显病症(图 4)。此外,与接种红松林毗邻的长白落叶松在观测期内亦未见显症树木(图 4、11)。

在二道沟松林中,2020 年 9 月人工接种所在的油松林,与下窝棚红松林的情况类似,2020 年 7 月显症油松的数量为 39 株,到 2023 年 9 月已显著增加至 236 株(图 12)。然而,同时期接种松材线虫的

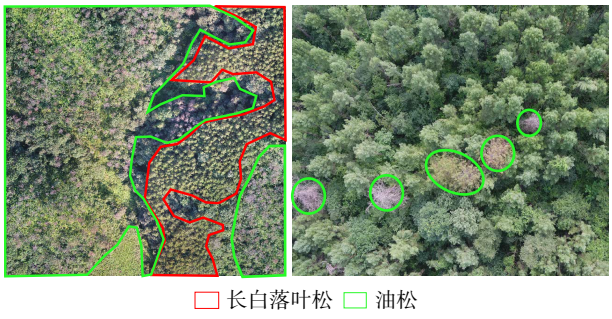


图 10　自然条件下长白落叶松和油松混交林的无人机图像（2019 年 9 月苍什村 2）

Fig. 10　Unmanned aerial vehicle images of natural *P. tabuliformis* and *L. olgensis* forest (Cangshi Village 2, Sep. 2019)

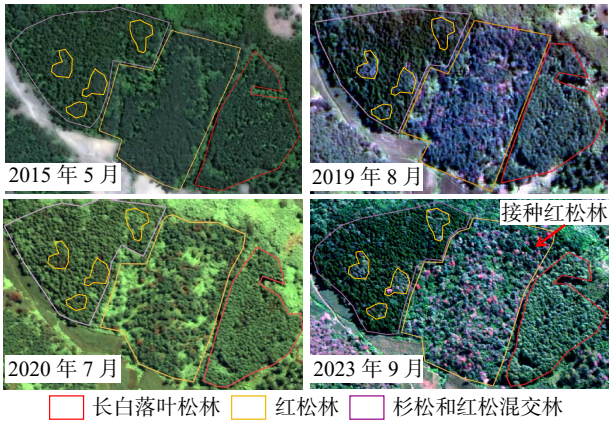


图 11　自然条件下红松林、长白落叶松林、杉松和红松混交林的时序变化以及人工接种 3 年后红松林状况（下窝棚村）

Fig. 11　Temporal changes in natural *P. koraiensis* forest, *L. olgensis* forest, and mixed *A. holophylla*-*P. koraiensis* forests, versus the condition of *P. koraiensis* forest after 3 years of artificial inoculation (Xiawopeng Village)

注：红松接种 3 年后显症树木急剧增加，长白落叶松和杉松未发现显症树木。

长白落叶松在 3 年观测期内始终未表现出明显症状（图 12），2023 年 6 月无人机图像中显示长白落叶松冠层绿色，未出现发病症状（图 5）。

3　讨　　论

本研究利用时序亚米级卫星影像和无人机图像，对辽宁省抚顺市松科 4 属树种受松材线虫侵染的时空动态进行了比较分析，以评估不同树种对松材线虫的抗病性。结果表明，在自然条件下，油松和红松极易受害并在短时间内出现明显症状，与红松林和油松林接壤的长白落叶松林中，显症树木少，杉松和红皮云杉未发现受害发病。在人工接种条件下，接种松材线虫 3 年的油松和红松大树均出现高发病率（油松 52%、红松 83%），而长白落叶松大树始终未表现出侵染症状，证实其抗性显著高于油松和红松。综上所述，可以明确油松和红松是松材线虫病的易感病树种，与前人研究结论一致[2,32]，而长白落叶松

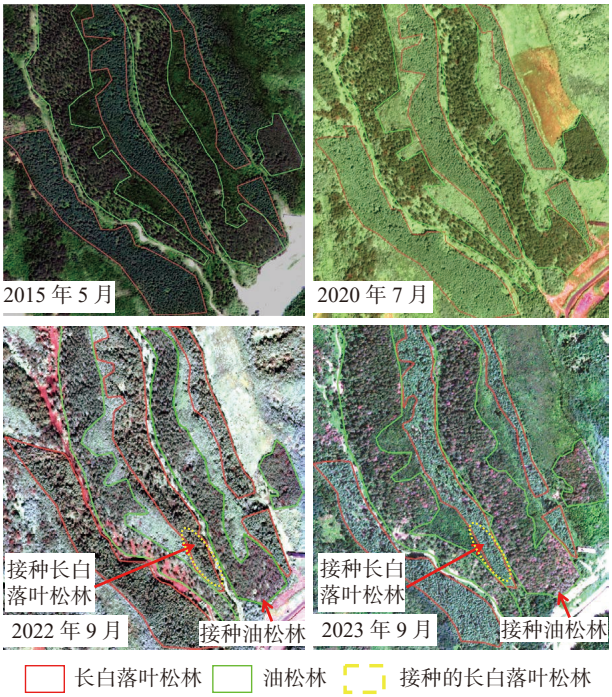


图 12　接种 3 年过程中长白落叶松林和油松林的时序变化（二道沟）

Fig. 12　Temporal changes of *L. olgensis* forest and *P. tabuliformis* forest during the 3-year course of artificial inoculation at Erdao Valley

注：油松接种 3 年后显症树木急剧增加，长白落叶松接种 3 年后未显症。

为松材线虫病的较高抗树种，红皮云杉和杉松对松材线虫的抗性高。

前人对抚顺地区枯死的长白落叶松、日本落叶松和华北落叶松进行取样鉴定，表明松材线虫可以侵染落叶松，但感染松材线虫的枯死落叶松占比 14%，分离到的松材线虫个头略小且数量少[10]。我国曾有幼苗接种试验表明，来自辽宁清原、江苏南京与重庆株系松材线虫对 2 年生长白落叶松幼苗均具有致病性，部分接种幼苗分离到少量线虫，但无明显病症[11]。关于长白落叶松大树接种松材线虫的试验未见报道。本文以易感病树种红松和油松大树为对照，对长白落叶松大树进行人工接种并时序观测，填补了在野外长白落叶松大树对松材线虫抗性的研究空白，研究结果进一步证明了油松和红松是松材线虫病的易感病树种，而长白落叶松大树对松材线虫致病性具有较高抗性。

国外研究中，在原产地美国和加拿大的冷杉属和云杉属枯死树木中发现了松材线虫，在入侵地日本的欧洲云杉和日本冷杉也分离到松材线虫，在加拿大和日本均有人工接种云杉属和冷杉属幼苗致死的记录。在我国，有研究对 2～3 年生幼苗进行接种试验来评估 4 种东北地区常见针叶树（黑松、日本落叶松、红皮云杉和杉松）对松材线虫病的抗性，结果

表明在接种条件下，松材线虫均能侵染 4 个树种，黑松最早出现症状并死亡，红皮云杉和杉松的显症速率远低于黑松，表现出较强的抵抗力。具体来说，黑松的发病率和死亡率最高，红皮云杉和杉松死亡率很低[20]。本研究通过对辽宁抚顺市松材线虫病疫区的红皮云杉和杉松大树进行时序观测，未发现明显发病症状，在室内接种试验的基础上，进一步验证了红皮云杉和杉松在野外的高抗性，不易感病。

本研究基于前人成果，结合野外自然侵染与人工接种大树的方法，为明确辽宁抚顺地区松科 4 属树种对松材线虫的抗性差异提供了数据支撑，但依然存在以下不足。首先，尽管针对接种松材线虫的长白落叶松开展了 3 年连续观测，但受种内个体抗性差异，可能导致显症时间不同[30]，后续将延长观测时间，密切关注长白落叶松大树的症状发展，进一步探究其抗性。其次，现有研究表明红皮云杉和杉松幼苗能感染松材线虫，但缺乏不同龄期红皮云杉和杉松大树接种后的发病规律和不同龄期油松、红松和长白落叶松抗病能力差异的对比研究。后续可开展对应的人工接种试验，并持续观测和检测松材线虫种群动态数据，进一步明确不同种类和不同龄期树种对于松材线虫的抗性。

4 结　　论

本研究结合野外自然侵染与人工接种大树方法，对辽宁抚顺地区松科 4 属树种的松材线虫侵染情况进行了长时序观测，明确了油松和红松为松材线虫病易感病树种，长白落叶松为松材线虫病的较高抗性树种，而红皮云杉和杉松对松材线虫的抗性高。本研究为东北地区松材线虫病的科学防控提供数据支撑，对有效遏制松材线虫继续向北扩散具有重要意义。

参 考 文 献

[1] Wingfield M J, Blanchette R A, Nicholls T H. Is the pine wood nematode an important pathogen in the United States? [J]. Journal of Forestry Washington, 1984, 82(4): 232−235.

[2] 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.
Ye J R. Epidemic status of pine wilt disease in China and its prevention and control techniques and counter measures [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(9): 1−10.

[3] 张旭, 赵京京, 闫峻, 等. 2017 年中国大陆松材线虫病灾害经济损失评估 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(10): 96−106.
Zhang X, Zhao J J, Yan J, et al. Economic loss assessment of pine wilt disease in China’s mainland in 2017 [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(10): 96−106.

[4] 郑雅楠, 刘佩旋, 时勇, 等. 辽宁松材线虫病与中国其他疫区的差异性分析 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 155−160.
Zheng Y N, Liu P X, Shi Y, et al. Difference analysis on pine wilt disease between Liaoning Province of northeastern China and other epidemic areas in China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5): 155−160.

[5] Mamiya Y. History of pine wilt disease in Japan [J]. Journal of Nematology, 1988, 20(2): 219−226.

[6] 朱克恭. 松材线虫病研究综述 [J]. 世界林业研究, 1995, 8(4): 28−33.
Zhu K G. Studies on pine disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*: a review [J]. World Forestry Research, 1995, 8(4): 28−33.

[7] Kikuchi T, Cotton J A, Dalzell J J, et al. Genomic insights into the origin of parasitism in the emerging plant pathogen *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. PLoS Pathogens, 2011, 7(9): e1002219.

[8] 于海英, 吴昊, 张旭东, 等. 落叶松自然条件下感染松材线虫初报 [J]. 中国森林病虫, 2019, 38(4): 7−10.
Yu H Y, Wu H, Zhang X D, et al. Preliminary study on *Larix* spp. infected by *Bursaphelenchus xylophilus* in natural environment [J]. Forest Pest and Disease, 2019, 38(4): 7−10.

[9] 于海英, 吴昊, 黄瑞芬, 等. 辽宁抚顺樟子松松材线虫分离与鉴定 [J]. 中国森林病虫, 2020, 39(2): 6−10.
Yu H Y, Wu H, Huang R F, et al. Separation and identification of *Bursaphelenchus xylophilus* from *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Fushun City [J]. Forest Pest and Disease, 2020, 39(2): 6−10.

[10] 于海英, 吴昊. 辽宁发现松材线虫新寄主植物和新传播媒介昆虫 [J]. 中国森林病虫, 2018, 37(5): 61.
Yu H Y, Wu H. New host and vectors of pine wood nematodes were found in Liaoning Province [J]. Forest Pest and Disease, 2018, 37(5): 61.

[11] 曹业凡, 汪来发, 王曦茁, 等. 松材线虫对长白落叶松的致病性 [J]. 林业科学, 2020, 56(11): 108−115.
Cao Y F, Wang L F, Wang X Z, et al. Pathogenicity of *Bursaphelenchus xylophilus* to *Larix olgensis* seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(11): 108−115.

[12] Wingfield M J, Blanchette R A, Kondo E. The pine wood nematode on balsam fir in Minnesota [J]. Phytopatholgy, 1982, 72: 965.

[13] Kondo E, Foudin A, Linit M, et al. Pine wilt disease-nematological, entomological, and biochemical investigations [M]. Columbia: University of Missouri-Columbia Agricultural Experiment Station, 1982.

[14] Bowers W, Hudak J, Raske A, et al. Host and vector surveys for the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner and Buhrer) Nickle (Nematoda: Aphelenchoididae) in Canada [R]. St. John’s: Forestry Canada, Newfoundland and Labrador Region, Information Report N-X-285. 55, 1992.

[15] Mamiya, Y. Pathology of the pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. Annual Review Phytopathology, 1983, 21: 201−220.

[16] Sutherland J R, Ring F M, Seed J E. Canadian conifers as hosts of

the pinewood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*): results of seedling inoculations [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 1991, 6: 209−216.

[17] Zhao B G, Futai K, Sutherland J R, et al. Pine wilt disease [M]. Tokyo: Springer, 2008.

[18] Kasuga H, Togashi K. Nine-month persistence of *Bursaphelenchus xylophilus* in living *Abies sachalinensis* and *Picea jezoensis* seedlings and nematode reproduction in stem sections [J]. Nematology, 2012, 14: 547−554.

[19] da Silva M N, Lima M R M, Vasconcelos M W. Susceptibility evaluation of *Picea abies* and *Cupressus lusitanica* to the pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) [J]. Plant Pathology, 2013, 62: 1398−1406.

[20] Zhang X J, Wang S L, Zhou Q, et al. Phenotypic changes in *Pinus thunbergiis*, *Larix kaempferis*, *Picea koraiensis*, and *Abies holophylla* seedlings inoculated with pine wilt nematode: revealing the resistance [J]. Forests, 2025, 16: 137.

[21] Xu Q W, Zhang X J, Li J X, et al. Pine wilt disease in Northeast and Northwest China: a comprehensive risk review [J]. Forests, 2023, 14: 174.

[22] 王孔海, 仲庆林, 聂雪梅. 抚顺地区松材线虫病发生原因分析 [J]. 辽宁林业科技, 2021(3): 56−58.
Wang K H, Zhong Q L, Nie X M. Analysis of occurrence reasons of pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus* in Fushun Automatic [J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2021(3): 56−58.

[23] 王晓堂. 基于高光谱的松萎蔫病动态变化的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
Wang X T. Research on dynamic changes of pine wilt disease based on hyperspectral [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.

[24] 骆有庆, 刘宇杰, 黄华国, 等. 应用遥感技术评价森林健康的路径和方法 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(9): 1−13.
Luo Y Q, Liu Y J, Huang H G, et al. Pathway and method of forest health assessment using remote sensing technology [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(9): 1−13.

[25] 孙红, 曾庆伟. “高分七号”数据在松材线虫病松树样木监测中的应用 [J]. 林业科技通讯, 2022(9): 27−29.
Sun H, Zeng Q W. Application of GF-7 data in the monitoring of pine wood nematode disease [J]. Forest Science and Technology, 2022(9): 27−29.

[26] 周桓宇. 基于卫星遥感的松材线虫病疫木检测研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
Zhou H Y. Research on the detection of the tree infected with pine wilt disease ultilizing satellite remote sensing [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.

[27] Zhou H W, Yuan X P, Zhou H Y, et al. Surveillance of pine wilt disease by high resolution satellite [J]. Journal of Forestry Research, 2022, 33(4): 1−8.

[28] Yu R, Ren L L, Luo Y Q, et al. Early detection of pine wilt disease in *Pinus tabuliformis* in North China using a field portable spectrometer and UAV-based hyperspectral imagery [J]. Forest Ecosystems, 2021, 8(1): 1−19.

[29] Yu R, Luo Y Q, Li H N. et al. Three-dimensional convolutional neural network model for early detection of pine wilt disease using uav-based hyperspectral images [J]. Remote Sensing, 2021, 13(20): 4065.

[30] 王佳楠, 姜生伟, 张瑞芝, 等. 松材线虫潜育期延长导致红松越年枯死 [J]. 林业科学, 2024, 60(10): 67−75.
Wang J N, Jiang S W, Zhang R Z, et al. Prolonged incubation period of *Bursaphelenchus xylophilus* results in the over-year death of *Pinus koraiensis* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(10): 67−75.

[31] Zhang R Z, Wang J N, Xia R, et al. Antioxidant processes involving epicatechin decreased symptoms of pine wilt disease [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1015970.

[32] 陈明海, 胡文宇, 孙恒坤. 抚顺县松材线虫病发生情况及防治对策 [J]. 辽宁林业科技, 2020(4): 52−53.
Chen M H, Hu W Y, Sun H K. The outbreak of pine wilt disease in Fushun County and its control strategies [J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2020(4): 52−53.

（责任编辑　范　娟
责任编委　黄华国）