

松材线虫病害

遥感监测与传播模拟研究

◎ 黄明祥 龚建华 张健钦 著

Study on Pine Wilt Disease Remote Sensing Monitoring and Diffusion Simulation



中国环境科学出版社

3.7

50134

S763.7

2

D00950134

目 (批准号: 40901233)

联合资助

划 (批准号: 2006AA12Z109)

松材线虫病害遥感监测与 传播模拟研究

Study on Pine Wilt Disease Remote Sensing
Monitoring and Diffusion Simulation

黄明祥 龚建华 张健钦 著



中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

松材线虫病害遥感监测与传播模拟研究/黄明祥, 龚建华, 张健钦著. —北京: 中国环境科学出版社, 2012.05
ISBN 978-7-5111-0759-6

I. ①松… II. ①黄…②龚…③张… III. ①遥感技术—应用—松材线虫病—病虫害防治②模拟理论—应用—松材线虫病—病虫害防治 IV. ①S763.712.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 223073 号

地图审核号: 浙S (2012) 25号

策划编辑 徐于红
责任编辑 俞光旭
责任校对 扣志红
封面设计 彭 杉

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67121726 (生态图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)
印装质量热线: 010-67113404

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2012 年 5 月第 1 版
印 次 2012 年 5 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 9.5
字 数 100 千字
定 价 38.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

前 言

在经济全球化的今天,外来有害生物入侵引发的生物灾害和生物安全问题是全球性的问题。我国是遭受外来生物入侵最严重的国家之一,据统计,入侵我国的外来物种目前有 400 多种,在国际自然保护联盟公布的全球 100 种最具威胁的外来生物中,我国有 50 余种。外来入侵的生物具有巨大的危害,一是造成严重的生态破坏和生物污染;二是导致生态灾害频繁爆发,对农林业造成严重损害,危害经济发展;三是危害人类的健康。

松材线虫是危害松树较大的外来入侵生物之一,它是松材线虫病的病原体,松材线虫病又称松枯萎病,是一种毁灭性病害,它通过松墨天牛等媒介昆虫将松材线虫传播于松树体内,从而引发松树病害。松材线虫原发于北美,20 世纪初入侵日本,造成日本松材线虫病大量爆发,随后入侵韩国、中国等国家。在我国,自 1982 年南京中山陵首次发现松材线虫以来,已经扩散蔓延至 11 个省、直辖市,造成严重的松林资源破坏,危害风景名胜等区域的生态安全,也严重影响我国的出口贸易,经济损失巨大。

当前,对松材线虫病害的彻底除治尚无有效的手段。目前在病害防治方面主要是通过检验检疫手段控制疫区病害的传入,通过喷洒杀螟松乳剂清除传媒松墨天牛,采用丰索磷、乙拌磷、治线磷等内吸性杀虫和杀线剂施于松树根部土壤中预防线虫侵入和繁殖等手段防治病害的发生和扩散。一旦树木感染松材线虫,清理发病树木是唯一可行的除治手段,也是防止病害进一步传播扩散的有效手段。但是如何快速定位和发现发病树木是当前疫情监测的主要工作和难点,对于病害木的寻找和监测,目前还是主要通过各地林业部门进行人工地面调查寻找和定位病害木,偶有条件好的地方采用航空遥感方式识别病害木。松材线虫病疫情的监测仅仅靠人工地面普查难度很大,尤其在山区,山高地险、很难及时发现。对于零星病害木的自动监测和定位,可为控制、缩小发病区域起到决定性的作用。

本书结合地理科学、复杂性科学、计算机科学等学科的研究进展,探讨灾害地理学研究新方法——地理环境灾害系统工程,构建地理环境灾害系统工程三个研究层次,即灾害现象监测、灾害过程模拟、灾害防治协同决策三个层次。针对松材线虫病害特点,建立松材线虫病害研究的方法框架,研究病害影响因子提取和监测方法、病害高光谱特征、病害木识别技术,对病害过程进行模拟从而发现病害传播规律,构建病害除治协同决策机制,实现病害的科学防治与减灾。在理论层面,探讨地理科学、复杂性科学、计算机科学和灾害学有关理论和技术,提出地理环境灾害系统工程概念、研究内容和研究框架。在技术层面,重点研究方面是病害影响因子提取、监测和分析技术,病害木高光谱分析技术,高分辨率影像处理技术,元胞自动机模型和模拟技术,病害防治协同决策技术等。在应用层面,分别在不同空间尺度进行示范,其中以浙江省为大尺度研究区,进行病害影响因子提取及

病害风险等级评价和管理分区实验；而以浙江省宁波市象山县泗洲头镇为小尺度研究区，开展病害木识别、高光谱特性分析和病害传播模拟实验等。

全书共分 8 章。其中，第 1 章是本书研究的目的、意义和相关研究综述；第 2 章是本书的基础理论部分，提出了地理环境灾害系统工程的概念及其研究内容和技术，并针对松材线虫病害生物学特征，提出了松材线虫病害研究的技术路线；第 3 章至第 5 章是病害现象监测部分，分别探讨松材线虫病害生境遥感监测及其病害风险等级的评价，健康和发病的马尾松的时序光谱及冠层光谱特征，病害识别的高光谱敏感特征，以及采用无人机影像和 QuickBird 影像进行病害木的识别；第 6 章是病害过程模拟研究，构建了松材线虫病害传播元胞自动机模型，开发了模拟软件 PWD-CASim，并在软件的支持下研究了病害的传播特征；第 7 章是病害协同决策研究及案例，从模型库、知识表达和规则推理等方面进一步完善了协同虚拟地理研讨室（CVGS），并开展病害协同决策实验；第 8 章对本书进行总结，对后续研究进行展望。

本书获国家自然科学基金项目“松材线虫病害传播元胞自动机模型及其三维可视化模拟研究”（批准号：40901233）和国家高技术研究发展计划（“863”计划）“基于多源遥感信息的松材线虫病综合监测预警系统研究”（批准号：2006AA12Z109）的联合资助。特此表示感谢。

最后，对一直指导和支持本书编写的领导、专家、朋友和家人表示感谢。由于著者水平有限，本书难免有疏漏和不足之处，欢迎读者批评指正。

著 者

2011 年 7 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外相关研究现状	2
1.3 小结	12
1.4 本书主要研究内容和思路	12
2 松材线虫病害研究理论框架	14
2.1 地理环境与灾害	14
2.2 地理环境灾害系统工程	17
2.3 地理环境灾害系统工程框架下的松材线虫病害研究思路	23
2.4 本书研究技术路线	33
2.5 小结	34
3 松材线虫病害环境影响因子监测及其病害风险等级评价研究	35
3.1 研究区概况	35
3.2 研究思路	36
3.3 松材线虫病害影响因子	38
3.4 评价模型	46
3.5 病害风险等级评价	49
3.6 小结	54
4 松材线虫病害高光谱特性及其诊断特征研究	55
4.1 实验设计与数据获取	55
4.2 马尾松光谱特性	58
4.3 松材线虫病害高光谱敏感特征	68
4.4 小结	69
5 基于高分辨率遥感影像的松材线虫病害木识别研究	72
5.1 基于无人机影像的病害木识别	72
5.2 基于 QuickBird 影像的病害木识别	84

6 松材线虫病害传播元胞自动机模型及其模拟研究.....	98
6.1 松材线虫病害复杂性及复杂系统建模	98
6.2 基于元胞自动机的松材线虫病害传播模型	101
6.3 基于元胞自动机的松材线虫病害传播模拟	105
6.4 小结	116
7 基于协同虚拟地理研讨室的松材线虫病害协同决策研究.....	118
7.1 松材线虫病害防治协同决策的相关理论和技术	118
7.2 松材线虫病害防治协同决策框架	121
7.3 基于协同虚拟地理研讨室的松材线虫病害防治协同决策案例原型.....	125
7.4 小结	131
8 结论与展望	133
8.1 结语	133
8.2 本书创新点与新进展	136
8.3 讨论与展望	136
参考文献	138

1 绪 论

1.1 研究背景和意义

森林是地球上陆地生态系统的主体,森林资源是人类赖以生存的基础资源,同时森林具有维护地球生命、改善人类生存环境的生态价值。然而,森林正受到过度砍伐、火灾、病虫害、环境污染等方面的威胁。在我国,森林病虫害和森林火灾是困扰我国林业发展的两大难题。2000年,我国森林病虫害发生面积为 874 万 hm^2 ,森林火灾受害面积为 8.84 万 hm^2 。

松材线虫病是松类树种的一种毁灭性病害,被称为松树的“癌症”和“艾滋病”。它已成为我国森林病虫害之首,是我国目前发生最严重、最具威胁性的外来入侵森林病害。这种病害在传播方式上具有“非典”特性,即跳跃式传播,它是通过松墨天牛等媒介昆虫传播松材线虫于松树体内而引发的松树病害。感染了松材线虫病的松树,从发病到死亡只要 2~3 个月时间,从出现症状到死亡只要 40 天左右,从单株发病到整片松林毁灭只要 3~5 年的时间。

松材线虫原发于北美,目前已确认在美国、加拿大、墨西哥、日本、韩国、朝鲜和中国局部地区有分布。北美地区由于受气候、生态环境保护、媒介昆虫和树种等的影响,松材线虫病并没有造成大的危害。而东北亚的日本、中国和韩国受灾严重,并呈逐步扩散趋势。

在我国,松材线虫病害的发生形势十分严峻,自 1982 年在南京中山陵首次发现以来,扩散蔓延严重。据国家林业局 2006 年第 1 号公告,目前我国的松材线虫病疫区包括江苏、浙江、安徽、江西、山东、湖北、湖南、广东、重庆、云南、贵州等 11 个省、直辖市的 95 个县、区、市,较 2005 年增加 15 个。目前,松材线虫病已累计给我国造成直接和间接损失上千亿元。松材线虫病已经直接威胁到我国分布极为广泛的松林资源和黄山、张家界等著名风景名胜、世界自然文化遗产和重点生态区域的安全,同时使我国一些地区的外贸出口和经济社会发展受到严重影响。

在松材线虫病害监测方面,我国现行的松材线虫病疫情监测仅靠人工地面普查难度很大,尤其在山区,山高地险、很难及时发现。特别是对零星病害木的自动监测和定位,可为控制、缩小发病区域起到决定性的作用。过去在预防线虫病发生方面,大都是向可疑或已发病的成片林区用飞机或地面人工喷洒 25% 杀螟松乳剂,起到降低媒介昆虫松墨天牛的幼虫成活率和成虫密度,从而达到降低线虫病的寄生,起到预防松林虫害的发生。

目前的松材线虫病害防治手段落后,在科技日新月异发展的今天,已凸显其不足。尤其是地理信息科学相关理论、方法和技术的快速发展,遥感空间分辨率的不断提高,为开

展松材线虫病木识别和监测提供了新的研究手段。同时复杂性系统研究及其应用的不断拓宽,为研究松材线虫病传播规律提供了新的思路。而集群体智慧进行病害防治的协同决策,为病害防灾和减灾的科学决策提供了新的方式。

1.2 国内外相关研究现状

1.2.1 松材线虫病防治现状

松材线虫由美国的 Steiner 和 Buhner 在 20 世纪 30 年代作为新种首次报道(Liebhold *et al.*, 1995; Waage, 2001)。但直到 60 年代末才在日本被确认是引起松树枯死的原因。松材线虫病又称松枯萎病,是一种对松树毁灭性病害。

发病症状:病原线虫侵入树体后,松树的外部症状表现为针叶陆续变色,松脂停止流动,萎蔫,而后整株干枯死亡,枯死的针叶呈红褐色,当年不脱落(如图 1-1 所示)。松树从出现症状至死亡约需一个月至一个半月的时间,发病和死亡过程的时间是该病诊断的重要依据之一。但在寒冷地区,松树当年感染了松材线虫也可能在第二年才枯死。松材线虫侵入树体后不仅使树木蒸腾作用降低、失水、木材变轻,而且还会引起树脂分泌急速减少和停止。当病树已显露出外部症状之前的 9~14 天,松脂流量下降,量少或中断,在这段时间内病树不显其他症状,因此以泌脂状况还可以作为早期诊断的依据。松材线虫病症状发展过程可分为四个阶段:首先外观正常,但树脂分泌量减少或停止,蒸腾作用下降;其次针叶开始变色,树脂分泌停止,通常能够观察到天牛或其他甲虫为害和产卵的痕迹;再次是大部分针叶变为淡褐色、萎蔫,可见到甲虫蛀屑;最后针叶全部变为黄褐色或红褐色,病树整株枯死,此时树体一般有多种次生性的害虫栖居。



图 1-1 松材线虫导致的发病松林

病原：松材线虫病是由蠕形动物门，线虫纲，垫刃目，滑刃总科，伞刃属的松材线虫（*Bursaphelenchus xylophilus*）侵染引起的。线虫成虫虫体细长，体长约 1mm，雌虫尾部近圆锥形，末端圆。雄虫尾部似鸟爪，向腹面弯曲（如图 1-2 所示）。在广东罹病的松树中还分离出拟松材线虫（*B. mucronatus*），它与松材线虫十分相似，主要区别是在雌虫的尾部，拟松材线虫为圆锥形，有明显的指形突，其长度约为 $(3.8\sim 5.0)\times 10^{-9}\text{m}$ ，而松材线虫尾部为近圆锥形，末端钝圆，无指形突。

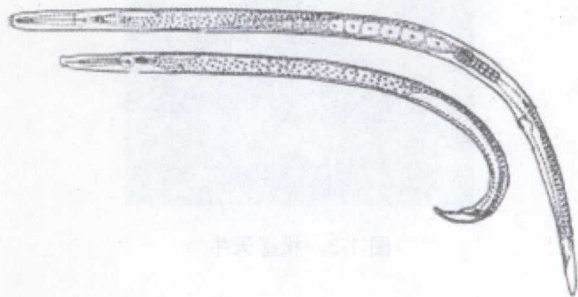


图 1-2 松材线虫

发病规律：松材线虫病多发生在每年的 7—9 月。高温干旱气候适合病害发生和蔓延，低温则能限制病害的发展；土壤含水量低，病害发生严重。在我国，传播松材线虫的主要媒介是松墨天牛（*Monochamus alternatus*）（如图 1-3 所示）。松墨天牛为鞘翅目，天牛科。成虫体长 15~28mm，橙黄色到赤褐色。前胸宽大于长，侧刺突较大，背面有 2 条橙黄色纵纹，与 3 条黑色绒纹相间。每一鞘翅具 5 条纵纹，由方形或长方形的黑色及灰白色绒毛斑点相间组成。卵长约 4mm，乳白色，微弯曲。幼虫乳白色，头部黑色，前胸背板褐色，中央有波状横纹。老熟幼虫体长约 43mm，蛹为离蛹，乳白色，体长 20~26mm，圆筒形。松墨天牛一般在每年 5 月前后羽化，从罹病树中羽化出来的天牛几乎 100% 携带松材线虫，天牛体内的松材线虫均为耐久型幼虫，这阶段幼虫抵抗不良环境能力很强，它们主要分布在天牛的气管中，每只天牛都可携带成千上万条线虫，最高可达 28 万条。当天牛在树上咬食时，线虫幼虫就从天牛取食造成的树伤口进入树脂道，然后蜕皮成为成虫。被松材线虫侵染的松树往往又是松墨天牛的产卵对象。翌年，在罹病松树内寄生的松墨天牛羽化时又会携带大量线虫，并“接种”到健康的树上，导致病害的扩散蔓延。病原线虫近距离由天牛携带传播，远距离则随调运带有松材线虫的苗木、枝丫、木材及松木制品等传播。松树线虫雌雄虫交尾后产卵，每个雌虫产卵约 100 粒，虫卵在温度 25℃ 下经 30h 孵化，幼虫共 4 龄。在温度 30℃ 时，线虫 3 天即可完成一个世代。松材线虫生长繁殖的最适温度为 20℃，低于 10℃ 时不能发育，28℃ 以上繁殖会受到抑制，在 33℃ 以上则不能繁殖。



图 1-3 松墨天牛

发病区域：目前松材线虫病主要分布在包括北美洲的美国、加拿大和墨西哥，亚洲东北部的中国、韩国和日本，以及欧洲的葡萄牙。

在日本，最早于 1905 年在九州的长崎县就有关于松树大量枯死的记载。随后该病持续扩大至福冈县、冲绳县和香川县高松市等地。至 20 世纪 40 年代初，受松材线虫病的危害导致木材的年损失达到 3 万~4 万 m^3 。第二次世界大战期间，受战争影响，日本未对线虫病进行防治，到 1948 年木材损失量就达到 123 万 m^3 。而后对病木进行积极清理，至 1953 年木材损失量降至 50 万 m^3 。60 年代能源转换时期，石油代替木材，劳动力从农村转移至城市，松林管理因此受影响，致使可以减缓的线虫病再度加重，到 1979 年损失木材高达 240 万 m^3 。为了有效防治松材线虫病的发生，1977 年日本政府颁布了《松枯萎病防除特别措施》，有效期 5 年，而后又继续延长该措施，共实行了 4 个五年计划，至 1997 年终止。在此 20 年防治措施期间，用于松材线虫病的防治费用为 870.4 亿日元。日本松材线虫病危害如此严重有 3 个因素起主要作用，一是树种（黑松、赤松和琉球松）易于发病；二是媒介松墨天牛携虫能力极强；三是日本大部分地区气候适宜病害的发生和流行（王明旭，2004；白秀萍，2004；何学友等，2005；杨宝君等，2003）。

在韩国，1988 年在釜山的赤松和黑松的枯死木中发现松材线虫，发病面积约为 100hm^2 。该市及时防治，在清除疫木的同时，在第二年天牛补充营养时飞机喷洒杀螟松，防治松墨天牛，有效控制了松材线虫病的扩散。但于 1997 年南部的威安和求礼两地又发现线虫病，之后于 1998 年在晋州又发生了线虫病。虽然目前松材线虫分布零星且范围有限，但还是在逐渐蔓延。

在美国，尽管 1934 年就报道过蓝变松木中发现松材线虫，由于未引起较大损失，为此一直没有被重视过。直至 1979 年日本学者 Seiji Ouchi 看到密苏里大学枯死的黑松时，给当地建议可能是松材线虫引起的，才得以重视。之后开展相关调查，结果发现松材线虫在美国普遍存在，至少 36 个州发现线虫。尽管美国普遍分布，但并未对松林引起危害。有

关学者研究认为有以下原因造成：一是松材线虫是北美的土生种，经过多年的适应，生物间已经形成平衡，这种平衡对松材线虫病起到一定的控制作用；二是美国乡土松树树种比较能抗病；三是北美媒介昆虫不像日本的媒介昆虫有效。此外还有认为北美生态保护较好，鸟比较多，这对控制天牛的数量发展起了一定的作用。

在加拿大，1982 年 Knowles 等人在马尼托巴省南部班克松 (*Pinus banksiana* Lamb) 木材中发现线虫 (Knowles 等, 1983)。此后调查发现，松材线虫在加拿大南部各省均有分布，包括安大略省、魁北克省、新不伦瑞克省、纽芬兰省、新斯科舍省、马尼托巴省、艾伯塔省、萨斯喀彻温省、不列颠哥伦比亚省。加拿大情况与美国相似，因此并未造成大的危害。

在我国，松材线虫病于 1982 年在南京中山陵被首次发现，现已蔓延至江苏、浙江、安徽、山东、湖北、广东、江西、重庆、贵州等省份的 95 个县（市、区）以及台湾和香港的部分地区，发病面积超过 8.7 万 hm^2 ，死亡松树 3.5×10^7 株，造成林业经济、森林生态上的巨大损失和自然景观的严重破坏，并严重威胁著名风景区以及主要乡土树种马尾松的安全 (李兰英等, 2006)。1986 年中国把松材线虫和松墨天牛定为检疫对象。2004 年中国松材线虫病发生面积已超过 8.7 万 hm^2 ，死亡松树 3.5×10^7 株。2005 年我国松材线虫病疫区有达 10 个省市的 80 个县（市、区）以及台湾和香港的部分地区。其中，浙江省是我国松材线虫病危害最严重的地区。松材线虫病危害面积由 1991 年的 2107 hm^2 扩大到 2004 年的 3.019 万 hm^2 ，病死松树由当初的 12.9 万株，发展到 2004 年的 165.84 万株 (浙江省森防简报总第 19 期)，是全国松材线虫病发生最严重的省份，发生面积将近全国发生总面积的一半。截至 2005 年浙江省松材线虫病病区已涉及 7 市 20 个县（市、区），发生面积达 30 多万 hm^2 ，死亡松树 3 000 余万株。已侵入佛教胜地普陀山和闻名遐迩的西湖风景区，对千岛湖、天目山、溪口、雁荡山等国家风景名胜区构成严重威胁。

防治现状：日本真正对松材线虫病进行全面和系统的研究是从 20 世纪 70 年代初期病害的病原和传播媒介昆虫明确以后。其特点：一是研究的领域广，1971 年到 1990 年的 20 年时间里，日本发表松材线虫病方面的论文 1700 多篇，在这段时间里，研究的领域除了分子技术鉴定外其他领域都已涉足；二是基础性研究深入，对病害发生的 4 个因素（病原、寄主、媒介昆虫和环境及其关系）进行了深入细致的研究，日本虽然国土面积小，但各县均开展对当地媒介昆虫的生活史研究，奠定了防治的基础；三是注重应用性的研究与开发，日本的研究工作防治与紧密工作结合，综合治理、监测调查、药剂种类、抗性育种都是研究的主要方向，并且处于世界领先水平；四是注重多学科的结合，如调查监测与航空、遥感、光学等学科相互结合，研究了航空照相、红外线和 TM 数据。但是在病原学研究方面日本花费的时间较长，用了 60 多年的时间。在应用分子生物学技术探索病害的发病机制、寄主抗性机理方面有待加强 (王明旭, 2004)。

目前，松材线虫病的防控措施主要有四方面：

一是及时清理松树枯死木。清理松树枯死木是目前最直接有效的防治松材线虫病的办法之一。清除病害的枯木需要集中成堆，用塑料布密封，以溴甲烷熏蒸 5~10h，药量为 69~83 g/m^3 ，可杀灭天牛成虫及幼虫。树丫集成小堆烧毁。用天牛化学引诱剂 I 号诱杀天牛或放养肿腿蜂 (*Scleroderma guani*) 寄生于天牛幼虫对其诛杀。

二是加强木材流通领域的管理。加强检疫，严防带病苗木、木材及其制品的外来输入；

从严查处木材及其木质包装材料的非法经营和流通，防止病源的人为传播。

三是加大树种结构调整力度。松材线虫病的侵害对象主要为马尾松、黑松、湿地松、火炬松等松属植物。大力发展阔叶林，加快针叶林阔叶化改造，从根本上根除松材线虫病。

四是全面开展综合防治措施。松墨天牛是松材线虫病的传播媒介，积极开展生物、人工、化学、诱杀等综合防治措施，做好松墨天牛的防治工作。采用预防性喷药，包括树冠喷药和地面喷药达到预防目的。前者在天牛羽化出来取食补充营养时喷药，后者在羽化开始时喷药，喷药一次可持效 2.5~3 个月。可用 25% 的杀螟松乳剂，每公顷 3~3.6 kg。

松材线虫病的疫情监测是其综合防治技术措施中的一项重要基本组成部分，如果监测准确、及时，可将其消灭在病害的初发阶段。监测的主要内容包括对松材线虫病发生、发展和危害规律的基本掌握，对疫情发生地域、发生面积和危害程度以及潜在威胁性等方面的正确分析和准确了解。目前，对松材主要采取地面普查，媒介昆虫的引诱监测、可疑样本的病原鉴定、“3S”系统等技术手段和通过松材线虫病发病因素的综合分析来实现疫情监测。现在常采用的调查和监测手段如下：

(1) 监测时间时段的选择：

① 7 月初至 9 月中旬，为松材线虫病发生发展动态调查阶段。

② 9 月下旬，为松材线虫病疫情详查阶段。

(2) 调查范围：

各个行政区域内的所有树（含松木有林地、松木疏林、松杂混交林、散生松、四旁松树）。

(3) 方法：

利用 1/10000 山林现状图和望远镜，调查各个小班的病死木数量，逐个小班进行登记，最后汇总上报。

其样例表格如表 1-1 所示。根据以上调查和监测手段，会形成如表 1-1 所示的统计表格。并且，各个表格中小斑号能够与林业专题图小斑号一致，因此可以将发病数据展布于林业基础数据地图上。

表 1-1 现采用的发病调查样例表
××县××镇重点地段××××年枯死松树汇总表

村名	发病小 斑面 积/亩	发病 小斑数	发病小 斑松林 面积/亩	发病 细斑数	实际发病面积/亩				枯死松 树数/棵	散生 死松 树数	枯死松 树蓄积/ m ³	去年死 树数/棵	增减/%
					合计	轻	中	重					
	3 507	23	3 248	56	1 536	1 536			207		14	577	
	944	7	903	17	521	521			63		5	258	
	920	6	857	12	255	255			41		3	102	
	232	2	225	6	130	130			14		0.5	15	
	694	5	571	14	330	330			60		3	142	
	717	3	692	7	300	300			39		2.5	60	

汇总人：

汇总日期：

1.2.2 松材线虫病遥感监测

20 世纪 30 年代, 国外首次进行了森林病虫害的航空遥感监测。40 年代美国昆虫学家开始利用雷达监测迁飞性沙漠蝗虫。自美国的第一颗地球资源卫星发射之后, 就开始了航天遥感监测森林病虫害的应用研究, 研究多集中在 TM 图像和 SPOT 图像方面, 主要应用了电磁波谱中的可见光至短红外波段, 主要有植被指数模型、特定形式的各波段变换模型等 (Ciesla, 2000; Lambert 等, 1995)。80 年代末, 美国林务局研制和发展了监测森林病虫害与 GPS 连接的航空录像技术, 并于 1994 年开始与中国合作。遥感监测内容主要有森林失叶、缺素、受害程度分级、预警和损失评估等。我国于 1978 年在云南腾冲首次用遥感图像进行森林病虫害监测, 此后进行了一些用 TM 图像进行病虫害监测的研究 (武红敢, 1995; 廖志文等, 2003; 马占山等, 1993; 黄麟等, 2006)。

在松材线虫病监测方面, 韩国在 1998—1999 年选用 TM 图像和 Ikonos 图像, 用马氏距离法和最大似然法对图像进行分类, 同时通过 GIS 的空间分析功能并结合地面调查信息进行灾害的预测预报。2002 年用 2001.2.20 和 2002.2.13 两个时间的 Ikonos 图像, 结合 1:5 000、1:25 000 的数字地图和 1:25 000 的数字林相图、GPS 地面调查等辅助资料, 建立受害和未受害地区每一种地形条件下植被指数与地形条件的关系, 并用由 GPS 地面调查得到的数据进行检查, 以确定实际受害区域的分布 (Kim 等, 2001; Kim 等, 2002)。

1999 年中国林科院在宁波选用 TM 图像进行松材线虫病监测。此后在安徽黄山、福建三明、广东部分地区等进行了航空录像监测试验研究。以安徽为例, 航空录像系统设备包括数字摄像机、导航与定位用 GPS 接收机、GPS₃ 时间编码/译码器、提取和转换软件、图像处理软件、地理信息系统监视器、B-8177 运五飞机、专用软件 (GPS 信息软件) 等。健康的松树在数码带上表现为绿色, 而感染松材线虫病的松树及部分变色的阔叶树在数码带上则表现为红色 (变色点), 将影像通过视频捕捉卡输入电脑播放, 并按时间进程保存画面成 bmp 文件, 通过目视解译确定变色点, 再用专用软件确定坐标, 根据坐标用手持 GPS 到现地寻找变色点。本次找到的变色点均与理论点不远, 但这些点均是由于阔叶树叶子变红引起的, 说明监测区内没有发现松材线虫病 (石进等, 2006)。

2007 年, 王震等通过对马尾松 4 种不同受害类型的林木进行反射光谱测量, 并对光谱反射曲线进行一阶微分分析, 研究了绿光区、红光区和近红外区反射光谱的变化特征, 其研究发现: 在绿波段和红波段, 它们的光谱反射率存在一定显著的差异, 但在近红外区域, 大部分受害类型的光谱反射率存在极显著差异 (王震等, 2007)。

1.2.3 GIS 在松材线虫病管理中的应用

地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 是一种决策支持系统, 指在计算机硬、软件系统支持下, 对现实世界 (资源与环境) 的研究和变迁的各类空间数据及描述这些空间数据特性的属性进行采集、储存、管理、运算、分析、显示和描述的技术系统, 它作为集计算机科学、地理学、测绘遥感学、环境科学、城市科学、空间科学、信息科学和管理科学于一体的新兴边缘学科而迅速地兴起和发展起来。地理信息系统处理的对象是多种地理空间实体数据及其关系, 包括空间定位数据、图形数据、遥感图像数据、属性数

据等,用于分析和处理在一定地理区域内分布的各种现象和过程,解决复杂的规划、决策等问题。GIS 重视对拓扑结构的管理,重视拓扑关系的自动生成,强调与空间相关的查询统计,强调空间分析,强调三维模型分析。

地理信息系统是灾害信息集成与分析的有力工具和方法(Patrick A. W., 2000),表现为对各种监测系统提供的信息进行综合处理和空间数据分析,具有空间定位、定性和定量分析的功能。还可以在灾害评估和预报中发挥作用,比如,对灾害进行预报预警、动态监测、灾害发生成因与规律分析、灾害损失调查、灾情评估等,还可以为制定减灾预案和指导灾后重建工作提供依据。

在松材线虫病害管理方面,安徽省林业有害生物检疫局和中国林科院资源信息研究所合作建立了安徽省松材线虫病疫情管理系统,该系统是国内首例真正意义上用于森林病虫害监测、管理与分析的地理信息系统,实现了对全省 1988 年松材线虫病发病以来档案信息的管理与应用,并可及时进行数据信息更新(江顺利, 2007)。另外,也有研究基于 ArcView 进行二次开发松材线虫病害的信息系统,该系统以安徽省松材线虫病疫情相关的空间数据和多项属性数据为基础,建立了以地区、县、乡三级区划为管理单元,系统具有信息查询、数据维护、信息存贮与管理、显示、输出五大功能的计算机管理系统(蒋丽雅等, 2007)。

在松材线虫病害潜在适应空间分析方面,主要采用 GIS 空间分析功能对松材线虫病害影响因子(温度、降雨和地形因子)进行叠加、缓冲区分析等,区划病害适应性区域。高景斌等利用现有的对降雨和气温数据作叠加、建立拓展区、拼接、逻辑运算等必要的空间分析,并且可以演绎出新的空间关系型数据,分析病害潜在发生区域(高景斌等, 1997)。吕全等依据松材线虫的生物学特性及其生长发育与环境的关系,以国家气象局气象资料室获取的近 30 年全国 639 个台站的原始气象数据为依据,选取年均温(T), 6、7、8 月均温(TN), 海拔(H), 25℃ 以上的天数(D)和年降水量(w) 5 项气候生态因子,应用模糊综合评判的数学方法定义 5 因子的隶属函数,定量地刻画松材线虫在我国的潜在适生区(吕全等, 2005)。张志诚等利用 GIS 对传媒昆虫、寄主树木、病原线虫以及气候等空间信息处理和分析,得出松材线虫病在中国有着极大扩散和传播的可能,其中广东部分地区、广西和福建部分地区为理论上发生松树萎蔫病最为严重的区域;安徽、江苏、浙江、上海、湖南、湖北、贵州、四川、河南和山东部分地区为理论上发生松树萎蔫病的适宜区(张志诚等, 2005)。

也有应用频次分析方法研究松材线虫萎蔫病死木和林分中原有松树的分布型,研究认为:松材线虫萎蔫病病死木在马尾松林内的分布为聚集分布,主要为泊松二项分布。林分内原有松树的分布为随机分布,说明松材线虫萎蔫病病死木的聚集分布不是由林分内原有松树的分布所引起(嵇保中等, 2000)。张志诚等通过 GIS 对发病信息的空间定位以及发病林型几何质心的探讨,对空间点(单元)发病属性数据建立距离矩阵,利用空间自相关性指数 Moran's I , 研究探寻安徽滁州地区松树萎蔫病发生的空间扩散机制,研究发现,松树萎蔫病发病的 Moran's I 的空间自相关指数高达 74.86% (0.05 水平检验),认为在安徽滁州和马鞍山地区 1316 个以林型为发病单元的发病点的分布格局为高度聚集型(张志诚等, 2006)。

1.2.4 无人机遥感

无人飞行器是一种由动力驱动、机上无人驾驶、可重复使用的航空器，其控制方式可分为遥控式、半自主式、程控式或三者兼备等。无人飞行器的种类包括：固定翼无人机、无人直升机、无人飞艇等。无人飞行器具有机动快速、经济便捷的技术优势，是未来航空器的重要发展方向，已成为当今世界各国争相研究的热点课题，该技术的成果水平也成为各国科技发展水平的重要标志之一。根据重量和飞行高度等，国际无人飞机协会划分的无人机种类如表 1-2 所示（Eisenbeiss, 2004）。

表 1-2 无人机种类划分标准

分类名称	重量/kg	航程/km	飞行高度/m	飞行时间/h
Micro	<5	<10	250	1
Mini	<25/30/150	<10	150/250/3 000	<2
Close Range	25~150	10~30	30 000	2~4
Medium Range	50~250	30~70	3 000	3~6
High Alt. Long Endurance	>250	>70	>3 000	>6

无人机遥感（Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing），既是利用先进的无人驾驶飞行器技术、遥感传感器技术、遥测遥控技术、通信技术、GPS 差分定位技术和遥感应用技术，又是具有自动化、智能化、专用化快速获取国土、资源、环境等空间遥感信息，完成遥感数据处理、建模和应用分析的应用技术（Ambrosia 等，2003；Herwitz 等，2003；Wegener 等，2002；Zhou 等，2005）。无人机遥感系统由于具有机动、快速、经济等优势，已经成为世界各国争相研究的热点课题，现已逐步从研究开发发展到实际应用阶段，是高分辨率遥感数据快速获取和处理的高新技术装备，成为未来的主要航空遥感技术之一。

无人飞行器遥感监测系统目前已在土地利用调查、地形图测绘、“数字城市”建设等领域得到应用，并将在土地执法监察、矿山资源勘察、地质环境与灾害监测、海洋资源与环境、林业、农业、水利、交通等领域进行示范应用与推广（毛洁娜等，2007；吕书强等，2007；孙杰等，2003；孙锋，2007；马瑞升等，2006）。

无人机出现在 1917 年，早期的无人驾驶飞行器的研制和应用主要用作靶机，应用范围主要是在军事上，后来逐渐用于作战、侦察及民用遥感飞行平台。20 世纪 80 年代以来，随着计算机技术、通信技术的迅速发展以及各种数字化、重量轻、体积小、探测精度高的新型传感器的不断面世，无人机的性能不断提高，应用范围和应用领域迅速拓展。世界范围内的各种用途、各种性能指标的无人机的类型已达数百种之多。续航时间从一小时延长到几十个小时，任务载荷从几公斤到几百公斤，这为长时间、大范围的遥感监测提供了保障，也为搭载多种传感器和执行多种任务创造了有利条件。

传感器由早期的胶片相机向大面阵数字化发展，目前国内制造的数字航空测量相机拥有 8000 多万像素，能够同时拍摄彩色、红外、全色的高精度航片；中国测绘科学研究院使用多台哈苏相机组合照相，利用开发的软件再进行拼接，有效地提高了遥感飞行效率；

德国禄来公司推出的 2200 万像素专业相机,配备了自动保持水平和改正旋偏的相机云台,开发了相应的成图软件。另外激光三维扫描仪、红外扫描仪等小型高精度遥感器为无人机遥感的应用提供了发展的余地。

1.2.5 病害复杂系统建模

(1) 复杂系统

复杂系统 (Complex Systems),是具有复杂性 (Complexity) 属性的系统。其系统的复杂性主要体现在:系统具有一定的规模,即中等大小数目的主体,具有智能性、自适应性、非线性、涌现性,另外,具有不稳定性、不确定性、不可预测性等特征。复杂性科学就是要研究复杂系统中的共性问题,它是建立在系统科学的基础上,是对系统科学的深化和发展 (王成红等, 2005)。复杂性科学是 20 世纪 80 年代中期,由美国圣塔菲学派提出的,并在近二三十年间,受到了学术界的广泛关注,并渗透到自然科学,以至社会科学、人文科学等各个领域,并被称为“21 世纪的科学”(戴汝为, 1997)。

复杂系统主要研究复杂系统由微观层次上各元素(主体之间、主体与总体之间)的相互作用所导致的宏观层次上的系统结构与行为的问题。它涉及自然科学、工程学、经济学、管理学和人文与社会科学等各个领域,可概括为自然界演化过程中形成的复杂系统、社会经济复杂系统、工程和过程复杂系统。复杂系统的研究是现代社会和高技术发展的需求,也是基础研究所面临的重大科学挑战,可能会给人类社会的各个领域带来深远的影响。从现代科学研究的途径来看,模拟是科学研究中的一条途径。由于复杂系统所具有的涌现性、非线性和复杂关联性等特点,很难建立传统的自上而下的数学分析模型,对系统的微观行为与宏观行为也不能有效地结合起来进行分析,同时复杂系统具有的本质不可计算性,使得数学分析方法无能为力,只有通过模拟这个重要的甚至是唯一的手段加以研究(胡海棠, 2007; 张健钦, 2006)。

(2) 病害传播模型

松材线虫病害是媒介昆虫传播松材线虫导致松树发病的一种传染性病害。1927 年 Kermack 建立的 SIR 传染病模型是目前使用最为广泛的病害传播模型 (Kermack 等, 1927)。

SIR 模型将总人口分为以下三类:易感者 (susceptibles)、染病者 (infectives)、恢复者 (recovered),其数量都是时间的函数,设总人口为 $N(t)$,三类人口分别表示为 $S(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$,则有 $N(t) = S(t) + I(t) + R(t)$ 。

SIR 模型的建立基于以下三个假设:

① 不考虑人口的出生、死亡、流动等种群动力因素。人口始终保持一个常数,即 $N(t) \equiv K$ 。

② 一个病人一旦与易感者接触就必然具有一定的传染力。假设 t 时刻单位时间内,一个病人能传染的易感者数目与此环境内易感者总数 $S(t)$ 成正比,比例系数为 β ,从而在 t 时刻单位时间内被所有病人传染的人数为 $\beta S(t) I(t)$ 。

③ t 时刻,单位时间内从染病者中移出的人数与病人数量成正比,比例系数为 γ ,单位时间内移出者的数量为 $\gamma I(t)$ 。

在以上三个基本假设条件下,易感者从患病到移出的过程框图表示如下: