

调控松林树种结构防控松材线虫病技术*

黄焕华 黄华毅 黄咏槐 钱明惠 黄泽翰 方海鹏 李琨渊

(广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 松材线虫 (*Bursaphelenchus xylophilus*) 从入侵、定居、适应到蔓延、扩散和危害, 是一个多点、多次、长期、复杂的生态过程, 其随机性、突发性和长期性的发生特点决定了防控松材线虫病是一项复杂性、长期性和艰巨性的任务, 目前常规的防控技术显然存在局限性。从森林演替的角度来看, 松材线虫病是松林的生态灾害, 在森林生态系统范畴内探讨松材线虫等林业有害生物的发生和防控问题, 十分必要。本论文在深入分析松材线虫病的发生特点、流行规律, 以及监测和防控难点的基础上, 阐述了调控树种结构防控松材线虫病等林业有害生物的理论、实践和技术, 为持续控制松材线虫病, 实现森林避灾、御灾、防灾、减灾目标, 促进马尾松林生态系统良性演替提供技术支撑。

关键词 松材线虫; 林业有害生物; 立体化监测; 调控松林树种结构; 防控

中图分类号: S763.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2018) 04-0129-06

Discussion on the Technology of Controlling Pine Nematode Disease by Regulating the Structure of Pine Tree

HUANG Huanhua HUANG Huayi HUANG Yonghuai QIAN Minghui
HUANG Zehan FANG Haipeng LI Kunyuan

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/ Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract The occurrence of *Bursaphelenchus xylophilus* is a multisite, frequent, long-term and complex ecological process, which run through its invasion, settlement, adaptation and spreading. The occurrence characteristics make the control of *B. xylophilus* a complex, long-term and arduous task. There are obvious limitations in the current control methods. *B. xylophilus* is an ecological disaster of pine forests on the perspective of forest succession, thus it is very necessary to discuss the occurrence and control of forest pests such as *B. xylophilus* in the forest ecosystem category. Based on in-depth analysis of occurrence characteristics, epidemic regularity, monitoring and control difficulties of *B. xylophilus*, the theory, practice and technology of controlling forest pests by regulating tree structure were set out in this article. These would provide technical support for continuous control of *B. xylophilus*, for accomplishing the goal of disaster avoidance, disaster prevention and disaster reduction, and for promoting the benign succession of *Pinus massoniana* forest ecosystem.

Key words *Bursaphelenchus xylophilus*; forestry pests; three-dimensional monitoring; regulate the structure of pine tree; prevention and control

* 基金项目: 广东省林业科技创新专项资金项目 (2013KJCX015-01、2015KJCX042); “十三五”国家重点研发计划 (2017YFD06001)。

第一作者: 黄焕华 (1962—), 男, 研究员, 主要从事林业有害生物防控技术研究、推广、标准化工作, E-mail: hhh87@126.com。

松材线虫 (*Bursaphelenchus xylophilus*) 从入侵、定居、适应到蔓延、扩散和危害, 是一个多点、多次、长期、复杂的生态过程, 其主要通过松褐天牛 (*Monochamus alternatus*) 等媒介昆虫自然扩散, 通过疫木运输等人为因素造成远距离、跳跃式扩散, 因此其发生具有随机性、突发性、长期性, 其防控具有复杂性、长期性和艰巨性。我国大陆于 1982 年首次发现松材线虫病, 迄今该病已广泛分布于我国大陆的 16 个省 (市、自治区) 的 316 个县级疫区 (其中 2017 年度新增县级疫区 78 个), 累计已致死松树 5 亿多株, 毁灭松林 33.33 万 hm^2 。

三十多年来, 我国在松材线虫病致病机理、发生规律、早期诊断、防治技术研究等方面取得了较大进展, 采取了疫情监测、封锁和重点除治等一系列举措, 取得了一定的成效。一是拨除了一些孤立的疫点和疫区, 取得了局部性灭疫成果; 二是延缓了松材线虫病在我国的蔓延速度; 三是保护了一些重点风景区的自然景观。但由于我国现有的松林大部分处于松材线虫的适生范围, 松材线虫病疫情扩散蔓延速度快, 发病疫点仍在不断增加, 发生范围还在不断扩大, 呈现出由东南沿海向内陆地区、一般林区向重点林区、由低海拔向高海拔、由低纬度向高纬度蔓延的势头, 危害情况日趋严重, 防灾控灾形势日益严峻, 对我国的 3 401 万 hm^2 松林资源 (全国第八次全国森林资源清查数据)、自然景观和国土生态安全构成严重威胁, 对一些地区的生态环境、外贸出口和经济社会发展造成了严重的影响。

松材线虫病的发生、蔓延和扩散, 从内外因分析, 内因是松材线虫的致病性、松属 (*Pinus*) 树种的感病性、媒介昆虫传播的有效性等; 外因是检疫、防控不力, 人为因素造成的扩散、蔓延等。从树种与林业有害生物发生及危害的角度分析, 是相对比较单一、连片的马尾松 (*Pinus massoniana*), 为松材线虫等林业有害生物的发生和危害创造了有利的环境条件。从森林演替的角度来分析, 松材线虫将是促进松林演化为阔叶混交林过程的主要因子, 也就是说松材线虫病是松林的生态灾害。由此可见, 应把松材线虫等林业有害生物的发生和危害问题置于森林生态系统中, 根据松材线虫病的发生特点和流行规律, 以合理配置树种结构为基础, 采取应急除治与持续控制相

结合的技术措施, 维护森林生态系统的相对稳定, 才有可能实现避灾、御灾、防灾、减灾目标, 为林业生产和生态建设提供技术支撑。

1 松材线虫病防控技术中存在的问题

1.1 难以及时发现、扑灭疫情

扑灭松材线虫病的最佳时机是及时发现并处置新的疫木, 全面把握疫情的发生动态, 采取有针对性的措施防控, 因此监测疫情是重中之重, 但是多种客观原因影响了监测的准确性。

1.1.1 疫源传入呈现随机性 由于疫源人为传播具有随机性, 不能及时发现初始小范围疫情, 往往错过了扑灭疫情和有针对性治理的最佳时机。

1.1.2 存在潜伏侵染现象 由于从松材线虫侵染松树到出现症状存在潜伏侵染的现象, 出现症状的时间和初始特征与松材线虫的致病性、侵染部位、松树的抗性、气候和环境条件都有相关性, 增加了监测疫源、疫点分布边界的难度。

1.1.3 松树枯死原因的复杂性 由于目前林间监测技术手段仍很落后, 常规的取样监测方法难以排查疫情。首先, 从林间症状来看, 当感染松材线虫病的少数枝条或植株出现症状时, 若与松枯梢病 (*Diplodia pinea*)、松突圆蚧 (*Hemiberlesia pitysophila*)、马尾松毛虫 (*Dendrolimus punctatus*)、萧氏松茎象 (*Hylobitelus xiaoi*)、雷击致死、过度采脂等因子致死的症状并存时, 基层监测人员难于分辨, 未能及时引起注意; 其次, 从病原体角度来说, 由于松材线虫在松树上分布不均匀, 有时不能直接分离到松材线虫成虫, 有时即使分离到松材线虫若虫, 但又不能完全与其它线虫区别开来, 无法及时确定是否存在松材线虫。

1.1.4 松林分布广, 监测不到位 目前松材线虫病疫情监测主要采取人工线路踏查和标准地调查的方法, 监测设备主要依靠望远镜、诱捕器等常规仪器, 对于面积大, 分布范围广的松林, 不能及时、定期、全面监测疫情发生动态。因此, 疫情监测调查的时效性、系统性不强, 难以精准监测疫情发生情况和变化动态。

1.2 松林树种相对单调, 结构不合理

松树是我国的主要造林树种, 马尾松则是南方荒山造林的先锋树种。由于广东地区主要通过飞机播种和人工栽植营造马尾松林, 二十世纪 90 年代, 马尾松林中树种相对单调, 树种结构不合

理, 尤其以马尾松为主的针叶林比例过大, 曾占广东省森林面积的 65.0%^[1], 相继遭受松树梢枯病、马尾松毛虫、松突圆蚧、松褐天牛等对松树专化性较强的病虫害的叠加危害, 松树成为受林业有害生物危害最严重、损失最大的树种, 给松材线虫病蔓延扩散创造了有利条件。

1.3 缺乏安全、经济、有效治理松材线虫病疫区的技术

尽管松材线虫病可防可控, 但防治技术客观上存在局限性。一是对处于潜伏侵染阶段的松树, 未有有效的检测技术及时排查、处置; 二是对已发病的松树, 迄今依然未有高效、简便、经济的药物治疗; 三是对松材线虫病疫区防控, 仍局限于人工清除感病枯死松树并消毒处理, 诱捕松褐天牛, 对寄主松树进行林分改造等, 治标不治本; 四是对部分疫区采用飞机喷洒噻虫啉等杀虫剂的防治方法, 因喷药不及时或降水等原因, 防控效果也缺乏保障; 五是有的松材线虫病疫情发生在山高路陡的林区, 甚至是悬崖峭壁、特高压电线附近、河流水源和建筑物周边等特殊地段, 人力器械无法达到, 防治作业风险极高, 普遍存在防治作业不及时、不规范、不标准等问题。由此可见, 在松材线虫病防控过程中, 容易出现死角, 出现水桶效应, 导致前功尽弃, 从而造成了年年有死树和新发病疫点, 疫木不断增多, 疫区面积不断增加的局面。

2 调控树种结构防控病虫害的理论与实践

2.1 调控树种结构防控病虫害的理论基础

森林生态系统是森林群落与其环境在功能流的作用下形成一定结构、功能和自调控的自然综合体, 是以乔木为主体的生物群落(包括植物、动物和微生物)及其非生物环境(光、热、水、气、土壤等)综合组成的生态系统, 其稳定性是靠诸多因子共同维持, 如生物种的多样性、生物间的比例关系、生物相生相克作用、环境因子相互影响等。

树种间的关系表现为机械、生物、生物物理和生物化学等相互作用方式, 一个树种受到其它相邻树种的影响, 可能降低被病虫害危害的可能性或为害程度, 即联合抗性(反之称联合易感性)^[2]。树种间联合作用受邻近树种相对多度、物

理和化学特征等影响, 同时受寄主特异性、害虫的发生规律, 以及病害的流行规律等影响。

树种配置的方式多种多样, 按种植方式可分为孤植、列植、丛植和群植等; 按混交方式可分为株间混交(行内混交)、行间混交(隔行混交)、带状混交、块状混交(镶嵌式混交、团状混交)、植生组混交(种植点配置成群状); 按经营目的可分为主栽树种、辅助树种、配套树种等; 按树龄可分为异龄(不同轮伐期)混交; 按树种的属性可分为针叶树、阔叶树, 阳生与半耐荫或耐荫树种, 速生、中生和慢生等; 按树种的特定功能可分为驱避树种、诱饵树种等。客观上, 混交林比纯林具有较为复杂的生态系统, 营养结构复杂, 有利于鸟兽栖息和害虫天敌繁衍, 众多的生物种类相生相克, 任何种类都难于大发生; 而树种间的机械隔离, 混交林的病虫害将发生量可能较低, 蔓延速度较慢, 受害较轻, 恢复较容易。

总的来说, 根据森林的经营目的、立地条件, 适地适树, 按照树种的生物学、生态学特性和经营要求, 合理配置树种, 充分利用树种(品种)间的相生、相克关系, 形成一个多树种(品种)、空间分布多样化、多龄化、具有一定调控能力、相对稳定的森林, 提高树种(品种)、林分对林木病虫害的抗性, 抵御病虫害的发生和危害, 减灾防灾, 充分发挥森林的生态、经济和社会效益。当然, 由于人们对树种生物学、生态学特性以及与立地条件关系的认识存在局限性, 树种配制的优点是相对的, 不乏因立地条件和树种选择不当而造成混交林配置失败的实例。

2.2 调控树种结构防控病虫害的实践

2.2.1 调控树种结构防控杨树天牛的实践 吴斌^[3]对多树种配置抗御杨树天牛灾害的初步评价结果表明: 目标树种、非寄主树种与诱饵树混交模式的经济效益优于目标树种与非寄主树种的混交模式, 目标树种纯林经济效益最差。其中“65% 目标树种+25% 非寄主树种+10% 诱饵树”配置模式的农田林网经济效益最佳, 且抗风险能力最强, 在一定程度上说明了合理配置树种对控制杨树天牛的效果。

2.2.2 调控桉树无性系结构防控桉树害虫的实践 国营雷州林业局自二十世纪 50 年代以来, 连续营造桉树(*Eucalyptus Angophora Corymbia*)纯林, 现有桉树林 3.46 万 hm^2 。2006 年曾遭受桉树

食叶害虫严重危害,连片发生面积达 5 308.7 hm²,2009 年开始遭受桉树枝瘿姬小蜂 (*Leptocybe invasa*) 的危害,并迅速蔓延扩散,而且还潜在多种病虫害共同危害的风险。2007 年以来,国营雷州林业局致力于不断筛选适合在雷州半岛种植的桉树品种,尤其是抗病虫害、抗风和抗旱的优良品种,并以每年至少推广 5 个新的无性系的速度,在全局每年需更新的林地,以种植不同轮伐期、块状混交的方式,广泛配置桉树不同无性系,特别是在筛选出对桉树枝瘿姬小蜂高抗的雷 9 (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus tereticornis*) 之后,以每年 400 hm² 的速度推广^[4]。目前,桉树食叶害虫、桉树枝瘿姬小蜂都已经处于有虫不成灾的状态。

2.2.3 调控树种结构防御林业有害生物灾害的实践 香港陆地总面积 1 108 km²,林业用地面积 4.5 万 hm²,现有林地面积 1.92 万 hm²,以亚热带树种为主。香港林业经历了三个发展阶段:初创阶段、经营利用阶段和发挥森林生态效益阶段。1970 年开始推行,郊野公园计划,并建成 24 个郊野公园。原有的树种以马尾松、湿地松 (*P. elliotii*)、台湾相思 (*Acacia confusa*)、鰲蒴锥 (*Castanopsis fissa*)、红胶木 (*Tristania conferta*) 为主。由于 1970 年代之后陆续遭受松材线虫病、松突圆蚧危害,从 1993—2004 年,香港选用 70 多个亚热带阔叶树种,根据不同景观、功能的需要进行配置,更新营造人工林,树种多样化,配置较合理,郊野公园森林生态系统的生物多样性丰度大,生态环境较稳定,有效地抵御了林木病虫害的发生和危害。2005—2006 年,广东省林业厅应邀对香港郊野公园的林木病虫害进行调查,共发现 137 种林木病虫害(其中:食叶害虫 72 种,枝干害虫 59 种),除松材线虫病和松突圆蚧曾经造成危害外,其它病虫害没有造成危害。曾绮微等^[5]通过香港大榄郊野公园森林群落的样地调查,利用物种的丰富度、多样性指数和均匀度指数对群落的类型、结构和物种多样性进行了分析,结果表明:香港大榄郊野公园的植物群落经多年的培育与保护,正向着植物组成更丰富、群落结构更稳定的演替方向发展。古琳和王成^[6]从城市森林建设实践、科学研究、保障体系等方面的调研表明,香港的原生热带雨林已消失,8% 属次生林和风水林,其余均为人工林;森林资源十分丰富,乡土和外来植物约 2700 种,构成了城区的绿色生态屏障,在

植被生态恢复和生物多样性保育取得了显著成效。从另外一个角度说明了较合理的树种配置对人工林病虫害有一定的调控作用。

2.2.4 调控树种结构防控松材线虫病的实践 范军祥等^[7]根据“松林、病虫害、环境”之间的相互关系,在松材线虫病危害严重的老疫区进行松林植物群落结构改造。2006 年 2 月—4 月,对广州市黄埔区龙头山森林公园内已感染松材线虫病的 70.6 hm² 松林进行林分改造,在林窗或稀疏的松林内套种阔叶树 11.2 万株。到 2009 年底调查,套种的阔林分已经全部郁闭,长势良好,形成了阔叶树和松树混交的复层混交的植物群落。迄今,大部分林班的优势树种仍然是马尾松,而同期感病的森林公园外围马尾松已基本感病枯死。

2.2.5 寄主比例的下降遏制了马尾松毛虫的发生和危害 据广东省森林资源管理总站 2016 年统计,广东省现有森林面积达 1 078.14 万 hm²,主要造林树种面积位居前 5 位的树种分别是:马尾松 197.12 万 hm²、桉树 166.22 万 hm²、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 112.37 万 hm²、湿地松 41.56 万 hm²、竹子 (*Bambusoideae*) 32.93 万 hm²,面积合计占全省现有森林面积的 51.02%。从 2003 年到 2016 年,广东省主要造林树种面积的比例发生了巨大的变化,马尾松林面积虽然仍居第一位,但已由 353.3 万 hm² 减少为 197.12 万 hm²,下降了 44.21%;桉树面积则由 60 万 hm² 增加到 166.22 万 hm²,增长了 177.03%。相应地,曾经在广东省长期大面积发生的马尾松毛虫已由常发性转化为偶发性食叶害虫,发生面积在 1981 年—1990 年平均每年达到 29.43 万 hm²,最严重的 1991 年为 66.58 万 hm²,而近 6 年的发生面积已控制在每年 2 万 hm² 左右,仅为 1981 年—1990 年平均值的 7%。

3 广东地区调控树种结构防控松材线虫病技术

3.1 精准监测松材线虫病疫情

建立松材线虫病立体化监测体系,综合运用“松材线虫专项自动化检测系统”、昆虫信息素、特定光源诱虫灯、多旋翼无人机侦查、固定翼无人机航摄大面积监测等技术,随时排查疑似松材线虫病疫木、疫点,明确松材线虫病的分布范围、发生程度、流行动态,划分松材线虫病疫区、非

疫区，为分类施策，防控松材线虫入侵、定居，应急除治和灭疫技术提供技术支持。

3.2 非疫区调控松林树种结构防御松材线虫病等林业有害生物技术

在非松材线虫病疫区，坚持预防为主、统筹兼顾的原则，把松林生态系统作为控制对象，把控制松材线虫病等林业有害生物贯穿于营林及其管理全过程，以适地适树，合理配置和调控树种结构为基础，提高林分抗性为目标，营造有利于松林正常生长发育，不利于松林有害生物发生和危害的环境，防御松材线虫病等林业有害生物。

在广东地区，适生的松属树种较多，但种植面积较大的主要是马尾松和湿地松，分别是197.12、41.56万 hm^2 ，占全省森林面积分别为18.28%、3.85%。由于湿地松和松材线虫原产地都是美国，在长期的进化过程中，已对松材线虫有较好的抗性，林间感病率相对较低，暂时可予以保留，需要重点调控树种结构的是马尾松林。

虽然马尾松林迟早会演替成为地带性的顶极群落——亚热带常绿阔叶林^[1]，但松林自然演替的历程多则几百年，少则几十年，松材线虫病的发生，则可能明显加快松林演替的历程，因此，着眼于森林健康景观格局的相对稳定，应因地制宜，适地适树，根据树种相生相克原理，通过调控松林树种结构，形成多树种、多类型、多层次的混交林，改造单层纯松林，点（斑块）、带、片相结合，营造多树种镶嵌式块状混交的林分，使连片的纯松林碎片化，形成天然隔离带，发挥物理隔离、化学驱避等作用，提高对松材线虫病等主要林业有害生物的抵御能力，促进松林演替，逐步地把马尾松林改造树种结构协调、森林景观特色明显，进入良性循环的区域性森林生态系统。

3.3 疫区调控树种结构遏制松材线虫病技术

在松材线虫病疫区，立足于以时间换空间，采取应急防控与持续防控相结合，从松林景观格局的角度，尽可能采用适度隔离疫区、封闭治理（也称“围治”）以防患疫木流失，逐步压缩发生范围，根除疫点，降低危害程度，有序推进松材线虫病等主要林业有害生物防控技术科学化、规范化和标准化。在调控树种结构方面，区别松材线虫病发生情况，分类施策。

在松材线虫入侵初期，感病松树较少，面积较小的疫点，尽可能在第一时间皆伐松林，以期

从根本上拔除疫点。腾空的林地、林窗，选用非松材线虫寄主树，营造多树种合理配置，林分结构多样化的抗性林分，形成镶嵌式块状混交林。

对于已蔓延扩散的老疫点或疫区，如果疫点或疫区存留的松树较少，又是相对孤立，尽可能采取皆伐方式，更新营造为多树种镶嵌式块状混交的阔叶林，压缩发生面积，扩大隔离区的范围和面积；如果疫点或疫区的面积较大，枯死树较多，尽可能采用适度隔离疫区、封闭治理方式，避免疫木扩散，即在疏林地套种不同阔叶树，逐步替代松树，形成针阔混交林。与此同时，在林间喷洒松材线虫病新型生防菌剂嗜麦芽糖寡养单胞菌 Smal-007 (*Stenotrophomonas maltophili*)、释放花绒寄甲 (*Dastarcus helophoroides*) 等生物防治措施来控制松材线虫病。

3.4 调控松林树种结构的适宜树种选择的基本要求和树种配置方法

3.4.1 调控松林树种结构的适宜树种选择的基本要求 考虑统筹调控松林树种结构之后所能产生的功能，即：（1）林间配置要求；（2）多样性与混交方式相结合；（3）优良的生态适应性；（4）生态功能与经济、景观功能相结合；（5）外引树种应与原生境具有相似性。对拟用于调控松林树种结构的适宜树种的基本要求：（1）驱避松褐天牛与对松材线虫等林业有害生物的抗性；（2）耐干旱和防火功能；（3）建群性、地带性和观赏性相结合；（4）以生态功能好的树种为主，兼顾景观功能为辅；（5）不同属性的树种相结合，以乡土阔叶树种为主，乡土树种与速生树种相结合，适当选用经过驯化的外来树种；（6）乔木、灌木树种相结合，以乔木为主体，乔、灌相结合，建立相对稳定和多样化的复层种植结构，用以改善植物空间分布的状况；（7）森林文化功能。

3.4.2 调控松林树种结构的适宜树种配置的基本方法 根据造林地的气候、地理条件和树种特性及改造目标进行配置。原则上，每小班配4~8个树种，上坡地段采用耐旱、耐贫脊的树种，如：荷木 (*Schima superba*)、火力楠 (*Michelia macclurei*)、山杜英 (*Elaeocarpus sylvestris*)、枫香 (*Liquidambar formosana*) 等；中坡地段种植适应强、速生和花期较长的树种，如：铁刀木 (*Senna siamea*)、米老排 (*Mytilaria laosensis*)、凤凰木 (*Delonix regia*) 等；下坡地段立地条件好，则

配种建群优势树种,如:黄樟(*Cinnamomum porrectum*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)、米锥(*Castanopsis chinensis*)、红花荷(*Rhodoleia championii*)等。为方便施工,尽量采用如下三种方式配置:

(1)带状混交;(2)大斑块状混交,即按不同坡位安排树种,每个作业段(坡位)分4个小单元,采用2个树种混交,两两交叉配置,每个树种连续种植150~200株,保障每个树种的种群数量和群落混交度;(3)随机小块状混交,根据改造小班的立地条件和建设需要配置4~8个树种,然后模仿森林群落自然规律进行树种配置,进行25~32株/小块状随机混交;为使混交相对均匀和自然,遵循小方块大混交的原则布置树种。每个小方块,必须保证有5~7株的建群树种,同一树种在同一混交块内不得多于16株,本配置方式适合于大多数生态林。

3.5 调控松树树种结构与实现生态调控相结合

根据松材线虫等主要林业有害生物防控、森林生态系统功能和森林经营目标的需求,以自然控制和自组织理论为基础,通过深入研究“寄主—林业有害生物—共生体—天敌”种间级联对灾害形成的作用,以及森林生物多样性和景观尺度的异质性,进一步探索利用树种或树种结构等抗性种质资源调控生态系统结构和功能,以及景观安全格局阻遏林业有害生物的扩散蔓延途径,规范林业有害生物生态调控的行为,包括生态系统、协调性、生态平衡、生态位、环境保护、协

同进化、林副产品安全、生态系统稳定性、生态系统的高功能、森林生态系统生物灾害的持续控制,创造条件实施松材线虫等主要林业有害生物生态调控和效果评价^[8-9]。

参考文献

- [1] 古炎坤. 从森林生态学观点浅谈广东营造马尾松林及其林分改造问题[J]. 广东林业科技, 1995, 11(3): 1-5.
- [2] BARBOSA P, HINES J, KAPLAN I, et al. Associational resistance and associational susceptibility: Having right or wrong neighbors[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2009, 40(1): 1-20.
- [3] 吴斌. 多树种配置抗御杨树天牛灾害的综合效益初步评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
- [4] 黄咏槐, 张宁南, 何普林, 等. 不同桉树品系对桉树枝瘿姬小蜂抗性研究[J]. 中国生物防治学报, 2014, 30(3): 316-322.
- [5] 曾绮微, 陈桂珠, 黄超弘. 香港郊野公园森林群落结构和物种多样性[J]. 中国城市林业, 2008, (6)3: 20-23.
- [6] 古琳, 王成. 中国香港和台湾城市森林发展的经验与启示[J]. 世界林业研究, 2012, 25(3): 50-54.
- [7] 范军祥, 黄焕华, 钱明惠, 等. 老疫区松材线虫病持续控制技术[J]. 广东林业科技, 2011, 27(1): 33-38.
- [8] 梁军, 张星耀. 森林有害生物生态控制[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 168-176.
- [9] 孙志强, 张星耀, 肖文发, 等. 景观病理学: 森林保护学领域的新视角[J]. 林业科学, 2010, 46(3): 139-145.