

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

徐华潮^{1, 2}, 骆有庆^{1*}, 张廷廷², 施拥军³

- 1 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083
- 2 浙江农林大学林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300
- 3 浙江农林大学环境科技学院, 浙江 临安 311300

摘要 采用 ASD 野外光谱仪测量了黑松和马尾松在松材线虫自然侵染后不同感病阶段的反射光谱, 分析了其中光谱特征参数及叶绿素变化情况。研究表明: (1) 中红外波段反射光谱曲线对松树发病初期有一定的指示作用; (2) 红边位置、绿峰高度、红谷反射率、红边斜率、水分胁迫波段反射率等参数的动态变化趋势与松材线虫侵染后两种松树的病害特征是一致的; (3) 随病害程度加深两种松树叶绿素含量逐渐降低, 且与光谱特征参数之间存显著线性关系。研究结果为利用高光谱遥感技术进行松材线虫病监测与预警提供参考, 同时为针对不同发病阶段采用不同的措施治理松材线虫病提供新的实验依据。

关键词 松材线虫; 黑松; 马尾松; 光谱分析; 叶绿素

中图分类号: O657.3 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)05-1352-05

引言

松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhrer) Nickle 在分类地位上属线虫纲(Nematoda)、滑刃科(Aphelenchoididae), 最早起源于北美洲, 是一种外来入侵生物, 借助松墨天牛(*Monochamus alternatus* Hope) 等媒介昆虫的传播, 能侵染包括黑松(*Pinus thunbergii*)、马尾松(*P. massoniana*)、湿地松(*P. elliotii*)、云南松(*P. yunnanensis*) 等在内的数十种松属植物和非松属植物, 从而引起一种毁灭性森林病害——松材线虫病(Pine Wilt Disease, PWD)^[1]。

20 世纪 80 年代以来, 松材线虫病在我国不断扩散蔓延, 除了其自身的发病规律及成灾机理外, 究其原因, 不能及时发现疫情也是目前该病迅速扩散的因素之一。松材线虫病疫情监测仅仅靠人工地面普查难度很大, 尤其在山高地险的山区, 很难及时发现^[2]。

高光谱技术是 20 世纪末迅速发展起来的一种全新遥感技术, 能利用很窄的电磁波段从地物获取连续光谱信息, 它在电磁波谱的紫外、可见光、近红外和中红外区域获取许多非常窄且连续的图像数据。由于不同的植物具有不同的反射光谱特征, 且同一种植物在不同生长发育阶段和不同生长条件下的反射光谱特征也不尽相同, 而这种光谱特性, 因植物

种类、生长阶段、叶形结构、叶绿素含量、细胞含水量及健康状况(是否受病虫害危害等)而异^[3]。比如, 病虫害感染导致叶片叶子色素、细胞构造以及细胞液、细胞膜等发生变化, 从而影响叶子的光谱反射率及特征参数。因此应用成像光谱遥感技术, 研究和利用受害植物光谱特性的变异信息, 可以为大规模地监测植物病虫害发生动向提供可靠的依据。据此, 在地面对受害林木的实测光谱进行研究和分析就显得非常有意义, 它能为下一步应用光谱遥感技术监测森林资源动态变化以及林木发病进程提供实验依据。

目前, 针对受松材线虫病危害的松树林木光谱特征研究还不多见, 王震等^[4]选择了四种自然侵染下不同受害程度的马尾松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。表明不同受害程度的马尾松光谱特征变化明显, 而且总体呈现出较好的光谱变化规律, 从而为研究松材线虫入侵过程及相应的监测管理提供了实验基础。由于松树一旦遭受松材线虫病危害, 则在短时期内就能萎蔫致死, 因此, 在未知情况下, 能否利用植物反射光谱曲线及特征参数等对发病早期植株进行探测性研究更具实践意义。在高光谱遥感数据中, 从红光过渡到近红外的“红边”(680~780 nm)是描述植被色素状态和健康状况的重要指示波段^[5], 也是植物光谱曲线最明显的特征, 试验和理论都证明, 红边位置 REP(red

收稿日期: 2010-07-01, 修订日期: 2010-10-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB119205)资助

作者简介: 徐华潮, 1971 年生, 浙江农林大学林业与生物技术学院教授 e-mail: xhcinsect@zafu.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: youqingluo@126.com

edge position) 随叶绿素含量、叶面积指数、生物量、年龄、植被的健康程度、季节而变化, 因此, REP 成为植被胁迫和衰老的指示器。常用来研究植物的生长和健康状况^[6-8]。杜华强等^[9]利用野外光谱仪, 对三个样地未知病害马尾松进行反射光谱连续测量, 在对随机抽取的样本反射光谱数据红边位置、绿峰反射高度和红谷吸收深度等特征参数计算的基础上, 进一步采用分形理论来分析发病早期马尾松高光谱数据, 探讨其对马尾松松材线虫病发病早期探测预测的可行性, 结果表明, 这3个参数特别是红边位置对松材线虫病的发生具有一定的预测作用, 但这种预测还存在不确定因素, 若能结合生化参数如叶绿素含量、含水量等可能会改进预测结果。

本文将以黑松、马尾松为研究对象, 分析在松材线虫对其自然侵染后不同感病时期的光谱特征变化, 揭示寄主感病后光谱特征变化与发病进程间关系, 旨在为利用高光谱遥感技术进行松材线虫病监测与预警提供参考, 同时为针对不同发病阶段采用不同的措施治理松材线虫病提供新的实验依据。

1 病害阶段划分及数据采集

在自然感病状态下, 根据树势生长状况、松针颜色及松脂流量变化, 结合线虫分离, 将不同受害程度的松树分为五个阶段, 同时选择健康的一类(分离到无线虫)作为对照, 具体标准如下: (1) 外观健康, 松脂分泌正常, 未分离到线虫; (2) 外观健康, 松脂分泌明显减少或停止, 天牛取食点附近有少量松针褪色、萎蔫; (3) 松脂分泌完全停止。部分针叶失去光泽成灰绿色, 与天牛取食枝相近的部分枝条出现少量黄色针叶, 主干出现黄色至褐色针叶, 其余正常; (4) 顶梢及其他1年生嫩枝仅基部偶见黄色针叶, 其余枝条上出现部分黄色针叶, 其他针叶失去光泽; (5) 顶梢及1年生嫩枝成灰绿色、萎蔫, 部分针叶黄绿色, 多年生枝条大多无绿色针叶; (6) 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^[10]。

根据上述标准把两种松树的病态划分为: 健康(Healthy, H), 开始侵染(infected, I), 病害早期(early stage of disease, ESD), 病害中期(middle stage of disease, MSD), 严重病害(serious stage of disease, SSD)和病害晚期或死亡(terminal stages of disease, TSD)。

研究区域设在浙江省平湖市平湖林场和余姚市牟山镇, 分别在平湖选取黑松和余姚选取马尾松为研究对象, 对每棵树分上中下东西南北利用 ASD FieldSpec Pro FR 野外光谱辐射仪进行光谱测量。ASD 野外光谱辐射仪的波段范围为 350~2500 nm, 共 2151 个波段。测量时每隔 15 min 测一次白板。每个样本测量 10 次求平均作为该样本的反射率光谱数据。再将每棵样树的 12 个样本的光谱反射率平均, 作为该阶段的反射率光谱数据。

叶绿素(Chlorophyll, CHL)测定是将已进行测量的叶片部分剪取、称重并磨碎, 用丙酮和乙醇的混合液浸泡提取叶绿素, 待浸提完全后, 利用 UNICO-UV2102C 型分光光度计

分别测量叶绿素 a、b 的吸光度, 再依据公式将其转为各自的含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 最后计算出叶绿素总量即叶绿素 a、b 之和。

2 研究方法

本研究选取的高光谱特征参数包括: 绿峰反射率(reflectance of green peak, RGP)、绿峰位置(green peak position, GPP)、红边位置(red edge position, REP)、绿峰反射高度(green peak height, GH)、红谷反射率(reflectance of red band, FRB)、红边斜率(red edge slope, RES)以及水分胁迫波段反射率(reflectance of water stress band, RWSB)等。

其中 RGP 指波长 510~580 nm 范围内最大的波段反射率、GPP 指绿峰反射率对应的波长位置(nm)、FRB 指波长 640~700 nm 范围内最小的波段反射率、而 RWSB 指波长 1550~1750 nm 范围内最大的波段反射率。GH 的计算方法如式(1)所示^[11]

$$\text{GH} = 1 - \frac{R_s + \frac{R_E - R_s}{\lambda_E - \lambda_s} \times (\lambda_c - \lambda_s)}{R_c} \quad (1)$$

其中 R_c , R_s , R_E 分别为吸收特征中心点、起点和结束点处的光谱反射率, λ_c , λ_s , λ_E 分别为反射特征中心点、起点和结束点处的波长。

红边是植物光谱的最显著标志, 通常指 680~780 nm 间反射率突然变化的区域, 它是由于叶绿素的强吸收和近红外叶子内部散射导致的高反射所形成的^[7, 12-15], 而 REP 是反映植被健康状况的重要参数, 目前关于红边位置的计算方法很多, 本文采用导数光谱分析技术计算 REP, 即一阶导数最大值所对应的波长来计算红边位置^[16-18], 相应的计算公式如下

$$\frac{dR}{d\lambda} = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}} \quad (2)$$

式中 R_i 和 λ_i 分别为第 i 波段的反射率和波长。RES 指红边内一阶导数光谱的最大峰值^[19]。

在分析以上光谱特征参数的基础上, 进一步分析了叶绿素与这些参数之间的关系。

3 结果与分析

3.1 不同感病阶段松树光谱曲线分析

图1和图2分别表示平湖黑松和余姚马尾松在松材线虫侵染后不同时期的光谱反射率曲线。从图中可看出, 在可见光波段(约350~700 nm 光谱范围内), 开始侵染及发病初期的反射率与健康状态的光谱差异较小, 而在发病的中期及以后, 可见光范围内光谱特征开始出现明显的变化, 主要表现为蓝光特别是红光范围内的吸收谷明显消失, 红光到近红外陡峭的红边被逐渐拉平。在近红外和中红外波段(波长大于800 nm), 发病初期就出现了明显的差异。因此, 针对不同的发病阶段, 应选择不同的光谱范围进行分析。

3.2 不同感病阶段松树光谱特征参数动态变化

根据光谱分析数据, 分别计算两种松树不同感病阶段的光谱特征参数。图3是这些参数的动态变化曲线, 分析如下:

(1) 指示植被健康状况的两个重要的光谱特征参数 REP 和 GH 均呈现逐渐降低的趋势[图 3(a), (b)]。红光吸收反射率(FRB)的增加和红边斜率(RES)的降低[图 3(c), (d)]反映了当植被受病虫害影响时,会出现绿峰降低、红边蓝移、红谷抬高的变化,并且随着受害程度的加剧,可见光到近红外反射光谱曲线的波峰、波谷特征会逐渐消失,并有变平、拉直的趋势。因此,这两个参数能够很好的描述两种松树不

同感病阶段的病害程度。(2) 在不同阶段 RWSB 逐渐增大[图 3(e)],在 1 550~1 750 nm 范围的植被的反射光谱通常由植被的细胞液、细胞膜以及吸收水分所决定,反映水分吸收特征。随着两种松树病害程度加深,叶片细胞结构破坏,细胞液即含水量逐渐减少,因而对太阳光的吸收减少、反射增加。

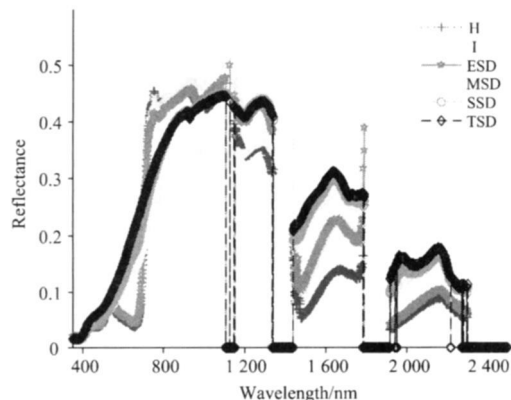


Fig 1 Spectral curve in different disease period for *Pinus thunbergii* in Pinghu

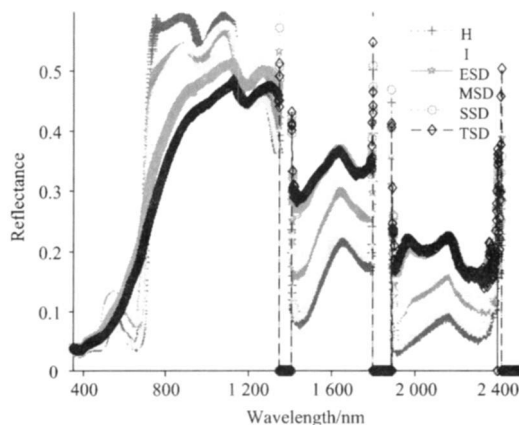


Fig 2 Spectral curve in different disease period for *P. massoniana* in Yuyao

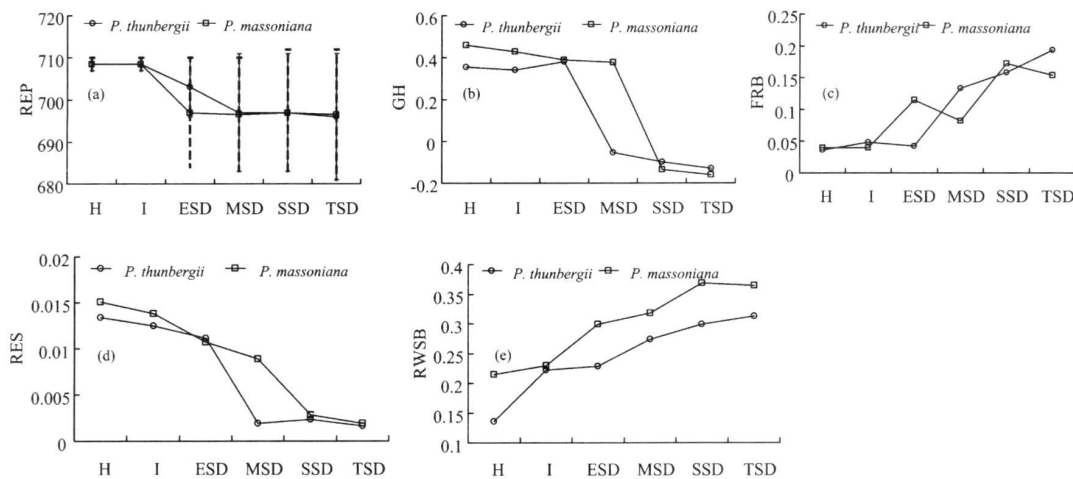


Fig 3 Dynamic trend of spectral parameters in different infection period

3.3 不同感病阶段松针叶绿素含量及其与光谱特征参数之间的关系

随着病害程度的加深,两种松树总叶绿素含量逐渐降低(图 4)。事实上,决定植被光反射光谱曲线谱特征的生物学参数除水外,还包括叶绿素。已有研究表明,REP 随叶绿素含量等参数变化,当植被健康并有高的叶绿素含量时,红边位置将会往长波方向移动,当遭受病虫害时,红边位置将向短波方向移动,且红边位置与叶绿素含量之间的这种变化呈正相关,相关系数在 0.9 以上。表 1 为不同光谱特征与叶绿素之间的关系,可以看出光谱特征参数与叶绿素含量之间均有显著的相关性。其中黑松红边位置 REP 与叶绿素含量之间的相关关系最好,而马尾松的红边斜率 RES 与叶绿素含量之间的相关关系最好,这种差异可能与光谱测量误差即

两种松树的不同特征有关,但这两个参数都与红边位置有关,说明红边的动态变化可明显反映出两种松树不同感病阶段的叶绿素含量变化。

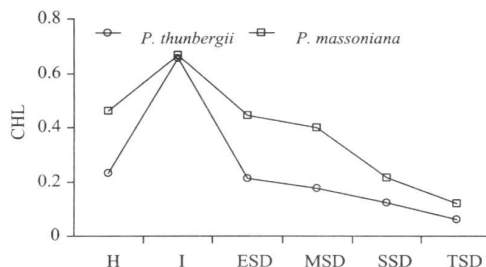


Fig 4 Dynamic trend of the total chlorophyll content in different infection period

Table 1 Relationships between total chlorophyll and spectral feature parameters

相关系数	REP	GH	FRB	RES	RWSB
<i>P. thunbergii</i>	0.747*	0.621*	-0.623*	0.652*	-0.415*
<i>P. massoniana</i>	0.724*	0.885*	-0.869*	0.9069*	-0.865*

* 0.05 水平下显著相关

4 结果与讨论

(1) 在松材线虫开始侵染及寄主发病初期, 可见光波段(约 350~700 nm 光谱范围内)很难反映寄主病害状况, 而近红外和中红外波段(波长大于 800 nm)光谱差异明显。另外, 在发病的中期及以后, 可见光波段光谱曲线能够较好地反映两种松树的病变。

(2) 红边位置、绿峰反射高度、水分胁迫波段反射率、红边斜率能够很好的反映针叶不同侵染阶段所处的病害状态,

即针叶由健康逐渐失绿, 再到枯死, 红边位置蓝移而绿峰反射高度逐渐降低、1 550~1 750 nm 处反射率逐渐增加、红边斜率减小。

(3) 随着病害程度的加深, 叶绿素含量降低, 且光谱特征参数与叶绿素含量之间均有显著的相关性。

从以上结果可以看出, 虽然在病态初期从外观上很难看出树体的病症来, 但通过光谱测定分析, 就可以通过不同波段的反射光谱曲线或光谱特征参数分析病害情况, 为深入研究松材线虫病的致病机理及针对不同感病阶段采取不同的防治措施提供依据。

光谱特征与叶绿素之间的关系模型将为树木的生态系统遥感监测、乃至病害的早期预测提供参考。目前已有一些高光谱遥感卫星数据(如 Hyperion 等)能够提供波段足够窄的图像数据, 且覆盖红光、近红外等波段。因此, 研究结果也可以为利用图像影像进行大面积松材线虫病遥感监测提供理论支撑, 这方面的研究还有待于进一步的深入。

References

[1] WANG Ming-xu(王明旭). Hunan Forestry Science & Technology(湖南林业科技), 2007, 34(5): 4.

[2] SHI Jin, MA Sheng-an, JIANG Li-ya, et al(石进, 马盛安, 蒋丽雅, 等). Forest Pest and Disease(中国森林病虫), 2006, 25(1): 18.

[3] SHEN Guang-rong, WANG Ren-chao(申广荣, 王人潮). Journal of Zhejiang University, Agriculture and Life Science Edition(浙江大学学报·农业与生命科学版), 2001, 27(6): 682.

[4] WANG Zhen, ZHANG Xiao-li, AN Shu-jie(王震, 张晓丽, 安树杰). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2007, 26(3): 367.

[5] ZHANG Jin-heng, WANG Ke, WANG Ren-chao(张金恒, 王珂, 王人潮). Journal of Shanghai Jiaotong University, Agriculture Science Edition(上海交通大学学报·农业科学版), 2003, 21(1): 74.

[6] Jago R A, Curran P J. RSS95: Remote Sensing in Action (Nottingham: Remote Sensing Society), 1995. 442.

[7] Dawson T P, Curran P J. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(11): 2133.

[8] Boochs F, Kupfer G, Dockter K, et al. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11: 1741.

[9] DU Hua-qiang, GE Hong-li, FAN Wen-yi, et al(杜华强, 葛宏立, 范文义, 等). Scientia Silvae Sinicae(林业科学), 2009, 45(6): 68.

[10] XIE Li-qun, JU Yun-wei, ZHAO Bo-guang(谢立群, 巨云为, 赵博光). Scientia Silvae Sinicae(林业科学), 2004, 40(4): 125.

[11] WU Tong, NI Shao-xiang, LI Yun-mei, et al(吴彤, 倪绍祥, 李云梅, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2007 11(1): 103.

[12] Horler D N H, Dockray M, Barber J. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2): 273.

[13] Miller J R, Hare E W, Wu J. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(10): 1175.

[14] Helmi Z M S, Mohamad A M S, Azadeh G. American Journal of Applied Sciences, 2006, 3(6): 1864.

[15] Moses A C, Andrew K S. Remote Sensing of Environment, 2006, 101(2): 181.

[16] WU Ji-you, YANG Xu-dong, ZHANG Fu-jun, et al(吴继友, 杨旭东, 张福军, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 1997, 5(2): 124.

[17] FAN Wen-yi, DU Hua-qiang, LIU Zhe(范文义, 杜华强, 刘哲). Journal of Northeast Forestry University(东北林业大学学报), 2004, 32(2): 45.

[18] ZHANG Feng-li, YIN Qiu, KUANG Ding-bo, et al(张风丽, 尹球, 匡定波, 等). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2005, 25(12): 3155.

[19] DAI Hui, HU Chun-sheng, CHENG Yi-song(代辉, 胡春胜, 程一松). Chinese Journal of Eco-Agriculture(中国生态农业学报), 2007, 15(5): 80.

Changes of Reflectance Spectra of Pine Needles in Different Stage after Being Infected by Pine Wood Nematode

XU Hua-chao^{1, 2}, LUO Yong-qing^{1*}, ZHANG Ting-ting², SHI Yong-jun³

1. The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China

3. School of Environmental Sciences and Technology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China

Abstract In the present study, seedlings of *Pinus Thunbergii* and *Pinus Massoniana* were planted and used for reflectance spectrum measurement. In different stage after being infected by pine wood nematode, reflectance spectra were measured by ASD spectrometer and the features of spectral parameters and the change of chlorophyll were analyzed. The results showed that (1) Disease could be estimated in the early stage according to the curve of mid-infrared reflectance; (2) Dynamic parameters such as the position of red edge, green peak height, reflectance of red band, slope of red edge and reflectance of water-stressed wave band were consistent with the disease features of two pine species after being infected by pine wood nematode; (3) To both of two pine species, content of chlorophyll tended to reduce with the development of disease and obvious linear relationship was observed between chlorophyll content and spectral parameters. These results might be able to provide some theoretical basis for the application of remote sensing technology in monitoring of pine wood disease. In addition, it might be also used as theoretical support for the controlling measures in different stage after being infected by pine wood nematode.

Keywords Pine wood nematode(*Bursaphelenchus xylophilus*); *Pinus thunbergii*; *Pinus massoniana*; Spectrum analysis; Chlorophyll

(Received Jul. 1, 2010; accepted Oct. 20, 2010)

* Corresponding author