

网络出版时间:2015-05-11 15:03 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.06.011
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150511.1503.011.html

基于蒸腾速率与光谱特征的松材线虫病害预测

刘 宁, 张晓丽, 王书涵, 黄雅婷

(北京林业大学 林学院/省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

【摘 要】 【目的】明确马尾松感染松材线虫病初期蒸腾速率与光谱特征的变化规律及相互关系,以解决病害潜伏期表征不易鉴别的问题,为在遥感监测中特征参数的选取提供理论参考。**【方法】**以福建省泰宁县马尾松林为例,分别对感染松材线虫病后 4 个病害阶段(健康期及病害初期、中期、末期)马尾松的蒸腾速率进行测定,分析其不同病害阶段的变化规律;再对健康期及病害初期马尾松的光谱数据进行采集,以这 2 个阶段的蒸腾速率为基准,分析其蒸腾速率与原始光谱及光谱特征参数(红边位置、红边斜率、红谷位置、红谷反射率、红边比值植被指数和红边归一化植被指数)的关系。**【结果】**马尾松蒸腾速率随着病害的加重而逐渐减弱;健康期及病害初期马尾松蒸腾速率与原始光谱有一定的相关性,相关关系因波长的不同而不同,最大值在 753 nm 处,相关系数达到 0.86;蒸腾速率与红边参数有较高相关性,拟合结果 R^2 均大于 0.7,其中与红边比值植被指数相关性最高, R^2 达到 0.851 5。**【结论】**在外界因素一致的情况下,马尾松蒸腾速率对预测病害的发生有一定的指示作用,近红外波段及红边参数与蒸腾速率有较高相关性,可以利用特征光谱对松材线虫病进行早期预测。

【关键词】 马尾松;光谱特征;蒸腾速率;松材线虫病;红边参数;病害预测

【中图分类号】 S431.9

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2015)06-0129-07

Prediction of *Bursaphelenchus xylophilus* based on transpiration rate and spectral characteristics

LIU Ning, ZHANG Xiao-li, WANG Shu-han, HUANG Ya-ting

(College of Forestry/Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education,
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the changes in transpiration rate and spectral characteristics of *Pinus massoniana* at the initial stage of *Bursaphelenchus xylophilus* infection and their relationship to improve the identification of *Bursaphelenchus xylophilus* during incubation and the selection of feature parameters in remote sensing monitoring. **【Method】** Transpiration rates at four different disease periods (HP, EPD, MPD, and TPD) of *P. massoniana* infected by *B. xylophilus* were measured to investigate the change laws in Taining, Fujian. Then transpiration rates at HP and EPD were analyzed with collected spectral data and spectral characteristics (REP, RES, RBP, RRB, RERVI, and RENDVI). **【Result】** The transpiration rate of *P. massoniana* gradually weakened with the deterioration of disease. There was certain relationship between the transpiration rates and raw spectral data at health and early disease stages. The correlation coefficients were dependent on wave length (the maximal value was 0.86 at 753 nm). Transpiration rate and red edge parameters had high relationship with R^2 of larger than 0.7, especially for RERVI

【收稿日期】 2014-08-15

【基金项目】 国家自然科学基金项目(30871964)

【作者简介】 刘 宁(1987—),男,吉林白城人,在读硕士,主要从事 3S 技术在资源环境中的应用研究。E-mail:103807711@qq.com

【通信作者】 张晓丽(1967—),女,河北张家口人,教授,博士生导师,主要从事林业遥感和地理信息系统研究。

E-mail: zhang-xl@263.net

with R^2 of 0.851 5.【Conclusion】 The transpiration rate of *P. massoniana* could be an indicator of disease. Transpiration rate had high correlation with infrared band and red edge parameters. Thus spectral characteristics can be used for early forecast of *B. xylophilus*.

Key words: *Pinus massoniana*; spectral characteristics; transpiration rate; *Bursaphelenchus xylophilus*; red edge parameters; disease forecast

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”,已成为我国森林病虫害之首,是我国目前发生最严重、危害最大的外来入侵森林病害,其传播媒介主要为松墨天牛。感染了松材线虫病的松树,从发病到死亡只要 2~3 个月的时间,从出现症状到死亡只要 40 d 左右,从单株发病到整片松树毁灭只需 3~5 年。在我国,松材线虫病的发生形势十分严峻,其发病周期短、危害性极强,给防治工作带来了极大困难^[1]。在松材线虫病监测方面,虽然有部分学者已运用遥感技术对病害区进行了大尺度的监测^[2-11],但大多数研究局限在病害已出现外部症状的前提下,由于松材线虫病周期极短,因此预测预报效果难以得到保证。松材线虫病的发生会引起植物生理指标的变化,如树脂分泌减少、蒸腾速率降低、乙烯含量增加、叶绿素及水分含量变化等^[12]。部分学者已对叶绿素及水分含量变化的特点做了相应研究^[13-19],但叶绿素及水分变化与诸多因素有关,且通常与外部特征变化同时发生,因此能否用其对病虫害进行早期预测仍有待进一步研究。1977 年,日本学者真宫靖治与田村弘忠对感染了松材线虫病的赤松蒸腾速率的日变化进行了研究,结果表明,蒸腾速率起初每日下降,然后有一个剧烈下降过程,最后趋缓以至可以忽略不计;而出现明显枯萎和针叶变黄的时间,比蒸腾速率开始下降要延迟 15~30 d^[12]。说明蒸腾速率的变化先于外部特征,这一结论有助于在潜伏期内诊断病害。马菁等^[20]利用 Yaxin-1102 便携式光合蒸腾仪对不同病害时期马尾松的蒸腾速率进行了测定,结果显示,随着病害的加重,蒸腾速率在减弱。还有部分学者研究表明,病害的发生改变了植被的光谱特征,如王震等^[21]运用 ASD FieldSpec HH 采集了不同病害时期马尾松的光谱特征,发现马尾松不同受害类型的光谱特征变化明显,而且呈现出较好的变化规律。由于植物感染松材线虫病后其蒸腾速率变化先于外部特征,如果能运用这一特点进行病害预测,对松材线虫病的防治将有极大帮助。为此,本研究以马尾松蒸腾速率作为判断松材线虫病严重程度的标准,分析其与病害马尾松光谱数

据之间的关系,寻找出对病害变化敏感的波段范围,建立生理指标变化与光谱变化的联系,以期为利用光谱特征对病害进行早期预测提供理论参考。

1 研究区概况

泰宁县隶属福建省三明市,位于福建省西北部,武夷山脉中段的杉岭支脉东南侧,居两省三地市交界处。地理坐标为北纬 26°33′~27°07′,东经 116°53′~117°24′,其北靠邵武,东连将乐,南邻明溪,西接建宁。年降雨量 1 725 mm,年均气温 17℃,总面积 1 533.8 km²(图 1)。泰宁县是闽西北重要林业县之一,全县林地面积 11.47 万 hm²,其中马尾松(含混交林)面积 7.4 万 hm²,约占全县林地面积的 65.9%。自 2007 年发生松材线虫病以来,全县累计发生面积 1 440.53 hm²,枯死木 17.6 万株,主要分布在杉城(含国有林场)、朱口和下渠 3 个乡镇^[22]。



图 1 福建三明市泰宁县的地理位置示意图
Fig. 1 Location of Taining, Sanming, Fujian Province

2 研究方法

2.1 松材线虫病病害阶段的划分

在多数情况下,植株染病后,于当年秋季即表现为全株枯死。根据马尾松的生长状况、外部症状、内部生理指标的变化情况及研究区松材线虫病现状,将染病马尾松病害程度大致分为 4 个阶段:(1)健康期(Health period, HP)。外观健康,树脂分泌正常。(2)病害初期(Early period of disease, EPD)。植株少量针叶失去光泽、略变黄,树脂分泌减少。(3)病害中期(Middle period of disease, MPD)。植株多数针叶变黄,植株开始萎蔫。(4)病害末期(Terminal period of disease, TPD)。整个树

冠部针叶呈红褐色,植株表面多处出现天牛取食坑道,全株枯死^[23]。

2.2 不同病害阶段马尾松蒸腾速率的测定

蒸腾作用是指植物体内的水分通过体表向外散失的过程,蒸腾作用的强弱通常用蒸腾速率(植物在一定时间内单位叶面积蒸腾的水量)来衡量。影响植被蒸腾速率的因素有很多,包括光照、空气相对湿度、温度、病虫害及内部的气孔频度、气孔大小等^[24]。为了有效地反映病虫害对蒸腾速率的影响,避免其他因素的干扰,笔者运用美国 LI-COR 公司生产的第 3 代气体交换测量系统 LI-6400XT 进行测定。此仪器可以测定叶片的光合速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度和蒸腾速率,同时具有较好地控制其他环境因子干扰的能力^[25-26]。选择 LI-6400XT 选配的 LED 红蓝光源,将光照强度设定为 1 000 μmol/(m² · s),对其进行恒定控制;选择远离道路、立地条件相似、人为干扰较少的成片马尾松林区,加装 2.5 L 自制缓冲瓶,减少人员走动,保证测试过程中气流的稳定性;选择晴朗、天气状况相似的午间 10:00—14:00 进行测量,减小温度及湿度变化的影响。本试验选取了 60 株马尾松进行测量,处于健康及病害初期、中期、末期的马尾松各 15 株,每个阶段的样本依次编号。在当地工人的协助下,按照东南西北 4 个方向逐一剪取植株外侧短枝,在每个方位的短枝中选取 3 束针叶,平铺在 2 cm×3 cm 的标准叶室上,分别进行离体测定(4 个方位共计 4 次),将其平均值作为该病害阶段所测样本的蒸腾速率值,如健康时期 1 号样本的蒸腾速率值,标记为 HP_1。针叶的选取原则为:在健康时期保证针叶全部健康;病害初期选取有少量针叶变黄的短枝中表征为绿色的针叶,便于后期的预测分析;病害中期选取表征变黄的针叶;病害末期选取表征变红褐色的针叶。同

时,为减小时间对测定结果的影响,首先完成各病害时期马尾松针叶 1 号样本的测定,再按照相同的病害选取顺序对各时期 2 号样本进行测定,依次类推,重复 15 次,完成对所有病害时期样本的测定。在测定时,每更换一个样本,仪器需要重新匹配一次,以保证测定的可靠性。

2.3 光谱数据的采集

采用美国 ASD 公司生产的手持野外光谱辐射仪,该设备可在 325~1 075 nm 波长连续测定,采样间隔为 1.6 nm,光谱分辨率为 3.5 nm,视场角 25°,共 512 个波段。测定光谱时按照上述蒸腾速率的测定顺序接替进行,将采集的东南西北 4 个方位共 12 束针叶放置在预先备好的黑布上,防止地表反射的干扰,每次测定新样本时,进行 10 次光谱采集,取平均值作为该样本的反射光谱值。以白板为标准进行校正。由于仪器稳定性的限制,仅在 400~900 nm 波长进行光谱分析。

2.4 马尾松蒸腾速率与光谱数据的相关性分析

运用的软件包括 ViewSpec Proversion 4. 02、SPSS 18、Excel 2010、ENVI 4. 8、MATLAB R2012b。分析方法如下:(1)选取不同病害阶段马尾松,分析其受害情况与蒸腾速率的关系;(2)运用 MATLAB R2012b 软件,分析健康和病害初期马尾松蒸腾速率与相应阶段原始光谱的相关性,寻找预测病虫害发生的最佳波长范围;(3)运用 ENVI 4. 8+IDL 对健康和病害初期马尾松光谱进行一阶导数变换,分析其蒸腾速率与相应阶段光谱特征参数的相关性,寻找出预测病虫害发生的最佳光谱特征参数。

3 结果与分析

3.1 不同病害阶段马尾松的蒸腾速率

病害马尾松蒸腾速率的变化规律见图 2。

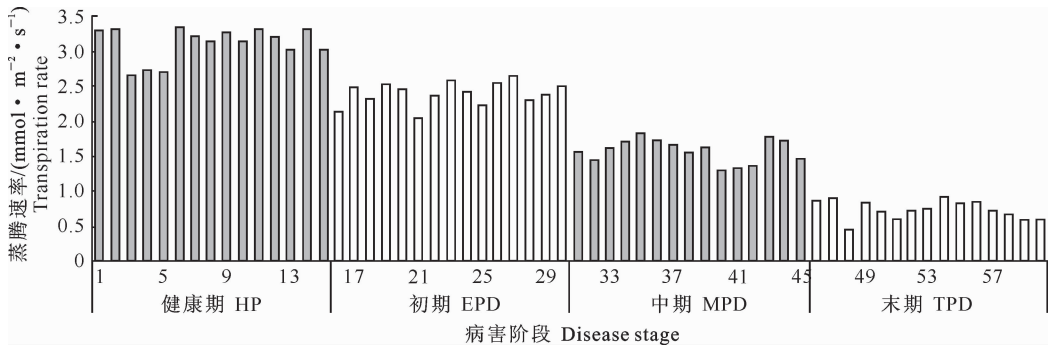


图 2 供试 60 株马尾松蒸腾速率随病害阶段的变化

Fig. 2 Changes of transpiration rate of *Pinus massoniana* at different disease stages

从图 2 可以看出,随着病害的加重,马尾松蒸腾速率整体呈减弱的趋势。从表 1 可知,蒸腾速率的

标准差和标准误均在合理范围,说明实测的样本数据具有一定的代表性,可以评估整体的变化规律。因此,在生长条件相似、环境因素大致相同的情况

下,马尾松蒸腾速率可以作为预测松材线虫病害发生的有效因子,其蒸腾速率越快,马尾松越健康,反之病害越严重。

表 1 不同病害阶段马尾松蒸腾速率的统计分析

Table 1 Analysis of <i>Pinus massoniana</i> transpiration rate at different disease stages mmol/(m ² · s)				
病害阶段 Disease stage	测定值 Test value	均值 Mean value	标准差 Standard deviation	标准误 Standard error
健康期 HP	2.63~3.33	3.100	0.237	0.061
初期 EPD	2.03~2.63	2.387	0.168	0.043
中期 MPD	1.29~1.82	1.573	0.166	0.042
末期 TPD	0.45~0.92	0.741	0.135	0.035

3.2 马尾松蒸腾速率与原始光谱的相关性

图 3 为健康期和病害初期马尾松的光谱特征曲线。由图 3 可知,健康期和病害初期的马尾松在 550 nm 波长(绿峰)处光谱差别不大,而在 680 nm 处及大于 740 nm 的范围光谱差别明显,进一步说明试验选取的健康期及病害初期样本在表征颜色方面

差别不大,从而保证了运用蒸腾速率预测的优势。选取试验中健康期及病害初期马尾松样本数据(共 30 株),将其蒸腾速率与其在 400~900 nm 波长的光谱值做相关性分析,得到相关系数随波长变化的曲线,结果如图 4 所示。

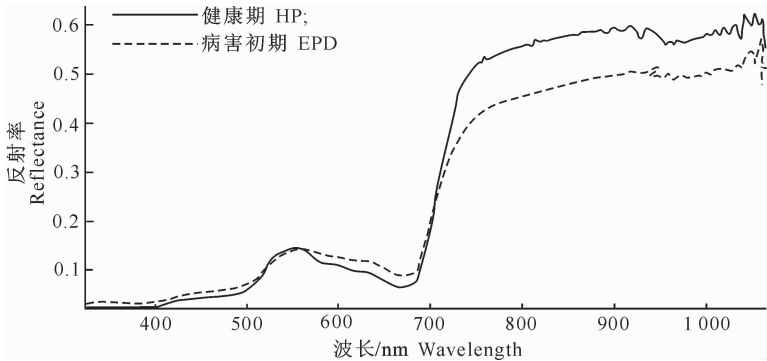


图 3 健康期和病害初期马尾松的原始光谱曲线
Fig. 3 Raw spectrum curve of *Pinus massoniana* at HP and EPD

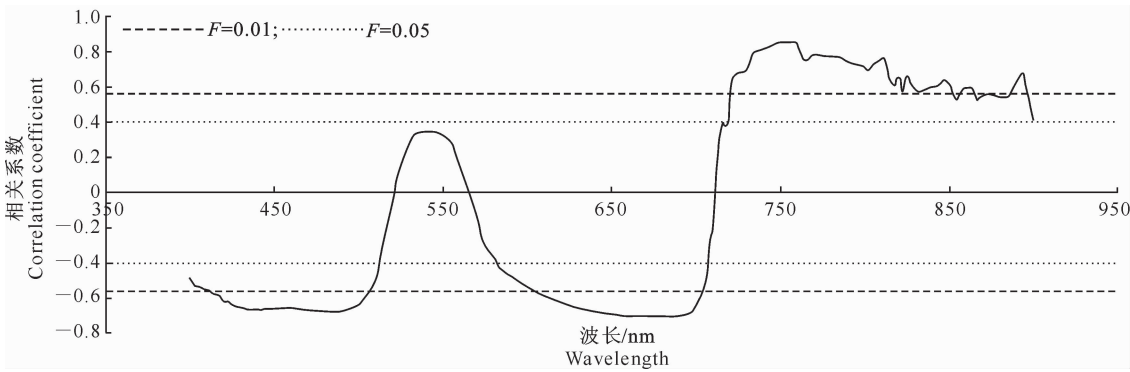


图 4 健康期和病害初期马尾松蒸腾速率与原始光谱的相关系数曲线

Fig. 4 Correlation coefficient curve between transpiration rate and raw spectrum of *Pinus massoniana* at HP and EPD

由图 4 可知,蒸腾速率与原始光谱反射率的最大相关系数为 0.86,位于 753 nm 处,呈正相关。从总体上看,光谱反射值在 400~521 nm 及 565~711 nm 与蒸腾速率呈负相关,且在 406~507 nm、600~704 nm 处达到了极显著相关水平;在 522~564 nm 及 712~900 nm 呈正相关,且在 721~896 nm 达到极显著相关水平;在 522~564 nm 相关系数较低,没有达到显著水平。综上所述,在马尾松外部特征没有明显变化的前提下,随着蒸腾速率的改变,首先变化的是蓝光(425~480 nm)、红光(600~700 nm)及

近红外(700~900 nm)这 3 个光谱范围,在蓝光与红光范围内,蒸腾速率越快,植物对此处光谱的吸收率越高,相反,蒸腾速率越慢,吸收率越低,反射率就会越高;而在近红外范围内,随着蒸腾速率的加快,光谱反射率升高,相反,蒸腾速率越慢,光谱反射率越低。马尾松原始光谱反射率与蒸腾速率的相关系数较大值主要集中在近红外范围内,说明近红外波段是预测松材线虫病害发生的最佳波长范围。

3.3 马尾松蒸腾速率与光谱特征参数的相关性分析

鉴于马尾松蒸腾速率与近红外波段有较高的相关性,进一步分析其与此范围光谱特征参数之间的关系,这对松材线虫病害的预测有着积极的作用,这些参数包括:

(1)红边位置(Red edge position, REP):指绿色植物在 680~740 nm 处反射率增高最快点的位置,也是一阶导数光谱在该区间内拐点的位置。运用 ENVI 4.8+IDL 调用计算一阶导数函数,获取红边信息,其名称及代码如式(1)。(2)红边斜率(Red edge slope, RES):指在红边范围内一阶导数最大峰值^[14]。(3)红谷位置(Red band position, RBP):指 600~700 nm 内反射率最低值的波长。(4)红谷反

射率(Reflectance of red band, RRB):指 600~700 nm 内反射率最低值。(5)红边归一化植被指数(Red edge normalized difference vegetation index, RENDVI):借鉴 NDVI 在红边范围内构建一个指数(如式(2)),式中 R_x 代表在 x 波长处的反射率,下同),可以指示植被的生长状况;(6)红边比值植被指数(Red edge ratio vegetation index, RERVI):借鉴植被指数 RVI 构建红边比值植被指数(如式(3))。

```
pf_1st_derivative.pro;  
function pf_1st_derivative,x,y,bbl,bbl_list,  
_extra=_extra  
ptr=where(bbl_list eq 1,count)  
result=fltarr(n_elements(y))  
if(count ge 3) then $  
result(ptr)=deriv(x[ptr],y[ptr])  
return,result  
end
```

$$RENDVI=(R_{740}-R_{680})/(R_{740}+R_{680})。$$
 (2)

$$RERVI=R_{740}/R_{680}。$$
 (3)

图 5 为马尾松健康期及病害初期蒸腾速率与 6 个光谱特征参数之间的相关曲线。

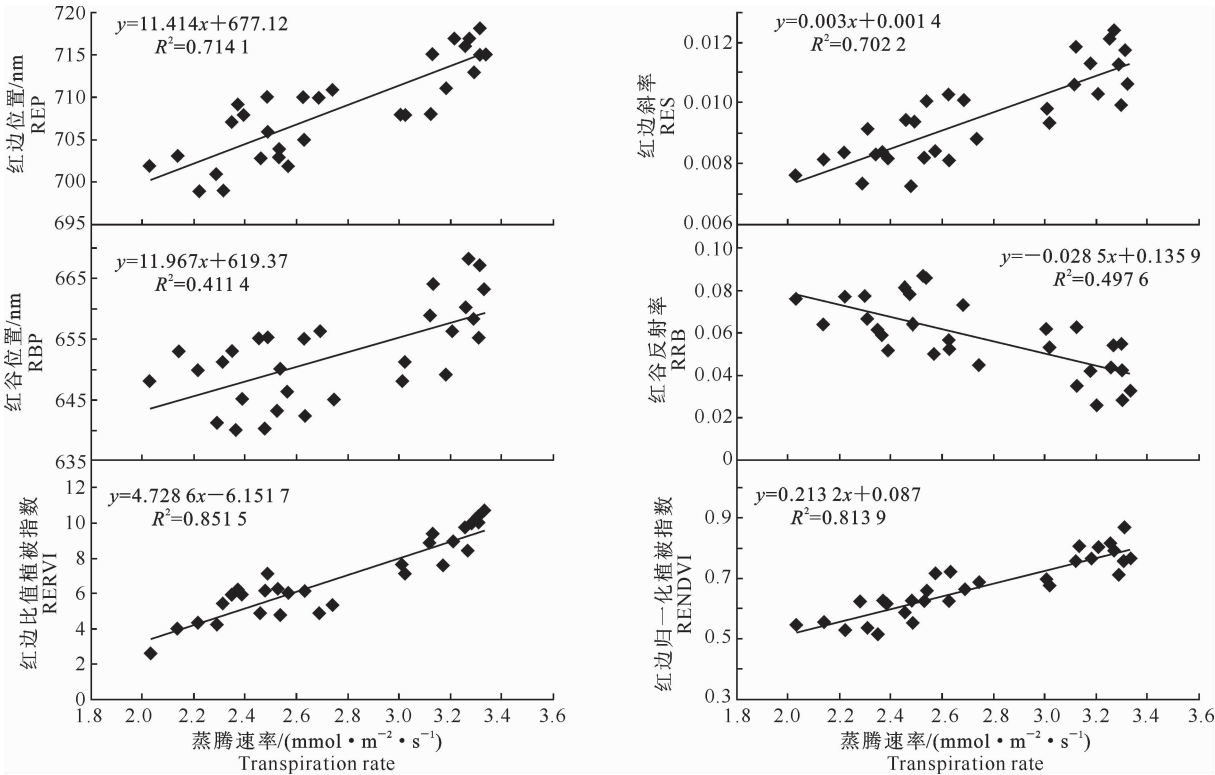


图 5 健康期和病害初期马尾松蒸腾速率与光谱特征参数之间的关系

Fig. 5 Relationship between transpiration rate and spectral characteristics parameters of *Pinus massoniana* at HP and EPD

以线性函数关系模拟蒸腾速率与光谱特征参数之间的关系,结果(图 5)显示,除红谷反射率与蒸腾

速率呈负相关外,其余光谱特征参数均与蒸腾速率呈正相关, R^2 介于 0.411 4~0.851 5。从图 5 可以看出,随着蒸腾速率的降低,红边位置及红谷位置向短波方向移动,红边斜率降低,红谷反射率增高, $RERVI$ 及 $RENDVI$ 的值有所降低。由图 5 还可知,蒸腾速率与红边特征参数有较高的相关性,其中相关性最高的是 $RERVI$, R^2 达到了 0.851 5,说明随着蒸腾速率的变化,红边范围内光谱特征变化明显,从而得出红边参数,尤其是红边范围内 2 个植被指数是预测病虫害发生的有效参数。

4 结论与讨论

本研究分析了不同病害阶段马尾松蒸腾速率的变化情况,再以健康期及病害初期马尾松蒸腾速率为基准,分析其与相应时期光谱特征的相关性,寻找相关性较高的光谱波段和光谱特征参数作为预测病害的因子。其研究结果表明:

1)松材线虫病对马尾松蒸腾速率有一定影响,随着病害的加重,蒸腾速率逐渐减慢;蒸腾速率可以作为马尾松染病前期病害诊断的依据,有效解决了病害潜伏期内从外观不易鉴别的弊端。

2)染病马尾松蒸腾速率与其原始光谱有一定的相关性,在 406~507 nm、600~704 nm、721~896 nm 相关性较高,达到了极显著水平,其中在波长为 753 nm 时相关性最高,而此波长处于近红外光谱范围内,说明在利用光谱特征预测松材线虫病时,近红外波段应作为重点考虑的波段。

3)染病马尾松蒸腾速率与 6 个光谱特征参数存在一定的相关性,其中与红边参数的相关性较高, R^2 均在 0.7 以上,与红边比值植被指数相关性最高, R^2 更是达到了 0.851 5,说明光谱红边特征、特别是红边比值植被指数对松材线虫病有较好的指示作用。

4)利用马尾松蒸腾速率与其光谱特征的相关性来诊断病害,能有效克服由于潜伏期等原因导致的外观特征不明显的问题,为遥感监测中特征参数的选取提供了参考。

由于仪器、环境、人为等因素对试验结果有一定影响,如何更为合理地排除其他因素的干扰变得较为重要,这方面仍有待进一步研究。在遥感应用中,由于机载、星载等传感器在监测尺度上与地测光谱存在差异,本研究在“林木叶组分”范畴内分析的蒸腾速率与光谱特征的相关性,仅为遥感应用中光谱特征参数的选取提供理论参考,在后续的应用中仍

有待进一步加以验证。

[参考文献]

[1] 黄明祥,龚建华,张健钦. 松材线虫病遥感监测与传播模拟研究 [M]. 北京:中国环境科学出版社,2012:144.
Huang M X,Gong J H,Zhang J Q. Study on pine wilt disease remote sensing monitoring and diffusion simulation [M]. Beijing:China Environmental Science Press,2012:144. (in Chinese)

[2] White J C,Wulder M A,Darin B,et al. Detection of red attack stage mountain pine beetle infestation with high spatial resolution satellite imagery [J]. Remote Sensing Environment,2005,96:340-351.

[3] Qin J,Burks T F,Ritenour M A,et al. Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence [J]. Journal of Food Engineering,2009,93(2):183-191.

[4] 张增光. 基于过程模型的松材线虫灾害的遥感早期识别 [D]. 北京:北京林业大学,2011:53.
Zhang Z G. The early identification of remote sensing about *Buraphelenchus xylophilus* based on process model [D]. Beijing:Beijing Forestry University,2011:53. (in Chinese)

[5] 陈福海. 马尾松毛虫害遥感监测及其影响因子分析 [D]. 福州:福建农林大学,2012:70.
Chen F H. *Dendrolimus punctatus* damage remote sensing monitoring and influence factors analysis [D]. Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University,2012:70. (in Chinese)

[6] 亓兴兰. SPOT-5 遥感影像马尾松毛虫害信息提取技术研究 [D]. 福州:福建农林大学,2011:122.
Qi X L. Study on information extraction technology of *Dendrolimus punctatus* damage based on SPOT-5 remote sensing images [D]. Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University,2011:122. (in Chinese)

[7] 云丽丽,高国平,栾庆书,等. 辽西油松毛虫害的 TM 影像监测技术 [J]. 安徽农业科学,2010,38(1):201-204.
Yun L L,Gao G P,Luan Q S,et al. Monitoring technique for Chinese pine caterpillars by TM imagery in West Liaoning Province [J]. Journal of Anhui Agriculture Science,2010,38(1):201-204. (in Chinese)

[8] Franklin S E,Raske A G. Satellite remote sensing of spruce budworm forest defoliation in western New found land [J]. Canadian Journal of Remote Sensing,1994,20(1):30-48.

[9] 张田. 福建省三明市松材线虫病遥感监测预测研究 [D]. 北京:北京林业大学,2010:63.
Zhang T. Remote sensing monitoring and predicting of *Buraphelenchus xylophilus* in Sanming of Fujian Province [D]. Beijing:Beijing Forestry University,2010:63. (in Chinese)

[10] Shafri H Z M,Hamdan N. Hyperspectral imagery for mapping disease infection in oil palm plantation using vegetation indices and red edge techniques [J]. American Journal of Applied Sciences,2009,6(6):1031-1035.

[11] Radeloff V C,Mladenoff D J,Boyce M S. Detecting jack pine

- budworm defoliation using spectral mixture analysis, separating effects from determinants [J]. Remote Sensing Environment, 1999, 69: 156-169.
- [12] 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: 263.
Yang B J, Pan H Y, Tang J, et al. *Bursaphelenchus xylophilus* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2003: 263. (in Chinese)
- [13] 刘秀英, 熊建利, 臧卓, 等. 马尾松叶绿素含量与高光谱数据相关性分析 [J]. 广东农业科学, 2012(10): 35-37, 50.
Liu X Y, Xiong J L, Zang Z, et al. Study on correlation between chlorophyll content with hyperspectral data *Pinus massoniana* Lamb [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012(10): 35-37, 50. (in Chinese)
- [14] 杜华强, 葛宏立, 范文义, 等. 马尾松针叶光谱特征与其叶绿素含量间关系研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009(11): 3033-3037.
Du H Q, Ge H L, Fan W Y, et al. Study on relationships between total chlorophyll with hyperspectral features for leaves of *Pinus massoniana* forest [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009(11): 3033-3037. (in Chinese)
- [15] 伍南, 刘君昂, 闫瑞坤, 等. 利用光谱特征参数估算病害胁迫下杉木叶绿素含量 [J]. 植物保护, 2012(4): 72-76, 88.
Wu N, Liu J A, Yan R K, et al. Using spectral feature parameters to estimate the chlorophyll content of Chinese fir under disease stress [J]. Plant Protection, 2012(4): 72-76, 88. (in Chinese)
- [16] 姚付启, 张振华, 杨润亚, 等. 基于红边参数的植被叶绿素含量高光谱估算模型 [J]. 农业工程学报, 2009(S2): 123-129.
Yao F Q, Zhang Z H, Yang R Y, et al. Hyperspectral models for estimating vegetation chlorophyll content based on red edge parameter [J]. Transactions of CSAE, 2009(S2): 123-129. (in Chinese)
- [17] 梁守真, 施平, 马万栋, 等. 植被叶片光谱及红边特征与叶片生化组分关系的分析 [J]. 中国生态农业学报, 2010(4): 804-809.
Liang S Z, Shi P, Ma W D, et al. Relational analysis of spectra and red-edge characteristics of plant leaf and leaf biochemical constituent [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010(4): 804-809. (in Chinese)
- [18] 王洁, 徐端松, 马跃良, 等. 植被含水量的遥感反演方法及研究进展 [J]. 遥感信息, 2008(1): 100-105, 90.
Wang J, Xu D S, Ma Y L, et al. Methods and research developments for retrieval of vegetable water content by remote sensing [J]. Remote Sensing Information, 2008(1): 100-105, 90. (in Chinese)
- [19] 于君明, 王世新, 周艺, 等. 植被水分遥感监测研究综述 [J]. 遥感信息, 2008(2): 97-102.
Yu J M, Wang S X, Zhou Y, et al. Review on monitoring models of vegetation water using remote sensing [J]. Remote Sensing Information, 2008(2): 97-102. (in Chinese)
- [20] 马菁, 张晓丽, 刘维, 等. 松材线虫病对马尾松蒸腾速率和光谱特征的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2013(11): 115-117.
Ma J, Zhang X L, Liu W, et al. Influence of *Bursaphelenchus xylophilus* on transpiration rate and spectral characteristics of *Pinus massoniana* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013(11): 115-117. (in Chinese)
- [21] 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(3): 367-370.
Wang Z, Zhang X L, An S J. Spectral characteristics analysis of *Pinus massoniana* suffered by *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007(3): 367-370. (in Chinese)
- [22] 詹远顺. 泰宁县松材线虫病发生现状与防控对策 [J]. 生物灾害科学, 2014(1): 91-94.
Zhan Y S. Status quo of *Bursaphelenchus xylophilus* (Sternier et Buhner) nickle occurrence in Taining and its prevention and control measures [J]. Biological Disaster Science, 2014(1): 91-94. (in Chinese)
- [23] 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(5): 1352-1356.
Xu H C, Luo Y Q, Zhang T T, et al. Changes of reflectance spectra of pine needles in different stage after being infected by pine wood nematode [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011(5): 1352-1356. (in Chinese)
- [24] 杨世杰. 植物生物学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 365.
Yang S J. Plant biology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 365. (in Chinese)
- [25] 刘灿, 李宏, 李丕军. 不同土壤水分对九里香光合特性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2009(9): 61-67.
Liu C, Li H, Li P J. Effect of photosynthetic characteristics of *Murraya exotica* under different soil water conditions [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009(9): 61-67. (in Chinese)
- [26] 张向峰, 王玉杰, 李云霞, 等. 模拟酸雨对盆栽马尾松叶片光合特性的影响 [J]. 水土保持学报, 2013(1): 197-202.
Zhang X F, Wang Y J, Li Y X, et al. Effect of simulated acid rain on photosynthetic characteristics of potted *Pinus massoniana* [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013(1): 197-202. (in Chinese)