

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.02.015

基于高光谱特征和光合参数监测松小蠹 不同危害时期的相关分析

刘梦盈^{1,2}, 石雷^{1*}, 马云强^{1,3*}, 张忠和¹, 刘雪莲¹,
姚俊¹, 杜婷¹

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南昆明 650224; 2. 南京林业大学, 江苏南京 210037; 3. 西南林业大学, 云南昆明 650224)

摘要: [目的] 测定云南松枝梢针叶高光谱数据及光合数据, 建立松小蠹危害时期监测模型及光合参数模拟方程, 有效、快速地预测松小蠹危害时期, 诊断云南松健康状况, 为大面积应用高光谱遥感技术实现森林病虫害监测提供依据。[方法] 调查松小蠹危害情况, 获取不同危害时期针叶高光谱及光合数据, 选取与松小蠹危害时期显著相关的参数, 建立危害时期监测模型; 对针叶光合与高光谱特征参数进行相关分析, 建立光合参数的相关方程。[结果] 危害时间越久, 在 740~1 036 nm, 云南松枝梢针叶光谱反射率逐渐降低; 光谱一阶微分曲线在 660~740 nm, 出现“红边”“蓝移”现象, 且峰值逐渐降低; 基于光谱特征建立的松小蠹危害时期多元线性回归模型拟合效果最优; 松小蠹危害时期与净光合速率 $Photo$ 密切相关, 其三次函数模型拟合效果较好; 建立光谱指数和光合参数之间的联系, 得到光合参数最优拟合方程。[结论] 根据云南松光谱指数和光合参数分别建立的模型可有效监测松小蠹危害时期; 云南松光谱指数与光合参数存在显著相关性, 可建立相关模型预估云南松生长健康状况。

关键词: 高光谱; 光谱特征参数; 松小蠹; 光合作用; 相关性

中图分类号: S763.38

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)02-0118-10

云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.) 是我国西南地区主要树种, 云南省主要森林植被类型之一, 占林地面积 52%, 在林业生产中占有举足轻重的地位^[1]。松小蠹 (*Tomicus* spp.) 是云南松的主要害虫之一, 云南至今已有超过 600 km² 的云南松林死亡^[2]。松小蠹蛀梢和蛀干习性使其长时间隐藏在树体内部, 不易发现和防治。5—11 月为蛀梢为害期, 成虫蛀食当年生枝梢; 11 月至次年 4 月为蛀干为害期, 成虫在树干韧皮部和木质部钻蛀、产卵, 蛀梢和蛀干交替出现, 历时长, 危害严重。松小蠹还具备迁飞习性, 扩散快, 导致松林成片死亡^[3]。

高光谱遥感技术主要用于研究植被受病虫害危害前后变化及受害程度和植被光谱曲线、植被指数

变化之间的关系, 确定不同树种的危害敏感波段和时期, 建立病虫害监测模型。刘畅^[4]、Ju^[5] 等利用非成像高光谱仪测量锐齿栎、马尾松叶片光谱曲线, 测定其光合色素含量, 建立了光谱和光合的联系。王震^[6]、伍南^[7] 等基于高光谱特征建立了马尾松松材线虫病、赤枯病的病情程度反演模型。地面成像光谱能获取地物光谱数据及实现“图谱合一”, 利于混合光谱分析和病虫害监测模型反演。徐爽^[8]、Shafri^[9] 等利用地面成像高光谱仪实现了长枣表面虫伤、灵芝基茎腐病监测。于泉州^[10]、宋小宁^[11] 基于高光谱数据进行森林资源调查, 提取森林冠层光谱特征、冠层含水量等信息。刘良云等^[12] 利用多时相高光谱航空影像, 实现了冬小麦锈病监测。

收稿日期: 2019-06-19 修回日期: 2019-09-22

基金项目: 国家重点研发计划课题“林业有害生物检测、监测与预警关键技术”子课题“云南松小蠹监测预警关键技术与 GIS 应用平台研究” (2018YFD0600201-4)

* 通讯作者: 石雷, E-mail: leishi@139.com; 马云强

目前, 利用遥感技术监测松小蠹危害的研究多基于多光谱遥感进行, 而对地面高光谱成像仪监测松小蠹危害情况的关注较少。因此, 本研究通过实地调查松小蠹危害时期和发生情况, 室内采集云南松枝梢针叶光谱反射率, 分析光谱特征, 建立松小蠹危害时期监测模型, 实现危害早期监测。并结合野外测定的不同危害时期云南松针叶光合参数, 建立光谱与光合的联系, 利用光谱数据实现光合参数预测, 估算云南松的生长健康状况。

1 试验地概况与研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于石林彝族自治县西街口镇, 海拔 1 700~1 950 m, 地处 103°29'20" E, 24°49'25" N。亚热带低纬度高原山地季风气候, 干湿分明, 5—10 月为雨季, 11 月到次年 4 月为旱季, 年均气温 14.7 ℃。试验地以云南松为优势种, 属针叶林, 大多为中幼龄林, 约 80% 为纯林, 林分单一, 且云南松大多生长在土壤贫瘠、水分条件缺乏, 立地条件差的地段, 易受病虫害侵扰, 具体采样地点如图 1 所示。

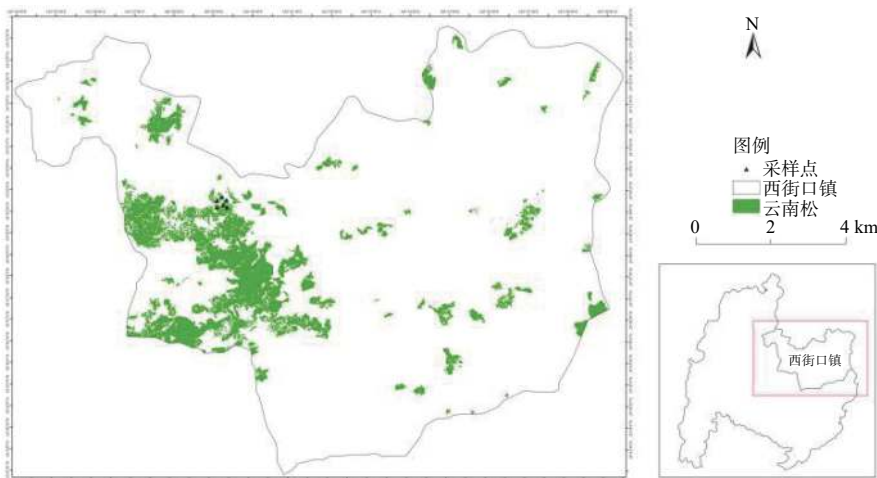


图 1 采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points

表 1 松小蠹危害时期划分

Table 1 Hazard time division of *Tomicus* spp.

危害时期Hazard periods	特征描述Feature description
健康时期Health	云南松枝梢的针叶为绿色, 未受到松小蠹的危害, 枝梢上没有蛀孔
危害早期Early damage	松小蠹开始蛀食枝梢, 枝梢出现蛀孔, 但枝梢的针叶仍显绿色或嫩绿色
危害中期Mid-hazard	松小蠹仍停留在枝梢内, 即将完成对枝梢的蛀食, 枝梢的针叶颜色为嫩黄色或黄绿色
危害末期Terminal stage	松小蠹完成对枝梢的蛀食, 针叶逐渐发生变化, 枝梢的针叶颜色表现为红褐色, 最后呈现灰褐色

1.2 研究方法

1.2.1 材料 试验材料为受松小蠹危害的云南松枝梢, 根据松小蠹对云南松的实际危害情况, 以单梢为单位, 将松小蠹危害时期分为 4 个时期, 健康时期、危害早期、危害中期与危害末期 (表 1) [13]。通过前期调查, 根据外观特征分别选择不同危害时期的云南松枝梢, 每个时期各选择 30 个枝梢。

1.2.2 云南松枝梢光谱反射率测定 本研究采用的高光谱成像系统由 SOC710VP 光谱仪、2 个 500 W 的钨灯、计算机、暗箱等组成。针叶光谱测定在可控光照条件的实验室进行, 光谱仪架设在暗箱中, 用钨灯进行照明。在图像采集时, 设置以下参数: 曝光时间 35 ms, 光圈大小 5.6, 物镜高度 50 cm; 钨灯光源入射点与镜头垂直于载物台的焦点重合。将针叶平铺在载物台上, 打开钨灯, 用标准参考板校正。启动光谱仪, 进行光谱采集。

1.2.3 气体交换实验 2018 年 10—12 月, 于晴朗天气下午 15:00—17:00, 在野外使用 LI-6400 便携式光合作用测定系统测定健康时期、危害早期、危害中期 3 个时期的云南松枝梢针叶净光合速率 (Photo)、气孔导度 (Cond)、胞间 CO₂ 浓度

(C_i) 及蒸腾速率 ($Trmmol$) 等参数 (危害末期云南松枝梢接近枯死, 故不测定其气体交换参数)。在自然光源条件下, 选取阳面枝梢针叶进行测定, 每组处理中每个枝梢重复测定 5 次, 取平均值。利用 Photo 和 $Trmmol$ 计算水分利用效率^[14] ($WUE=Photo/Trmmol$); 利用 C_i 和空气中的 CO_2 浓度 (Ca) 计算气孔限制值^[15] ($Ls=1-C_i/Ca$)。

1.3 数据分析

1.3.1 高光谱数据处理 利用 SRAnal710 软件,

对高光谱图像数据进行光谱、黑场、空间光谱辐射标定等预处理, 将 DN 值转换为反射率。采用 Savitzky-Golay 滤波法对针叶光谱反射率曲线进行平滑, 以消除原始数据中的噪声干扰^[16], 在 OriginPro8.0 中绘制针叶光谱曲线。

采用 Pearson 相关分析与逐步回归分析筛选出特征变量, 用以建模。本研究基于前人研究基础, 结合云南松光谱反射率数据定义了 8 个植被指数、23 个高光谱特征参数^[17-23] (表 2)。

表 2 特征变量表

Table 2 Characteristic variable scale

变量类别 Variable categories	变量定义和公式 Variable definitions and formulas
植被指数 Vegetation indexes	$NDVI1 = (\bar{R}_{(650-670)} - \bar{R}_{(760-850)}) / (\bar{R}_{(650-670)} + \bar{R}_{(760-850)})$ $NDVI2 = (R_{838} - R_{677}) / (R_{838} + R_{677})$ $NDVI_{705} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$ $SR1 = \bar{R}_{(650-670)} / \bar{R}_{(760-850)}$ $SR2 = R_{838} / R_{677}$ $WBI = R_{900} / R_{970}$, 水波段指数 $PRI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$, 光化学植被指数 $HI = (R_{739} - R_{399}) / (R_{739} + R_{399}) - 0.5R_{404}$, 植被健康指数 R_g (绿峰), 波长 520~560 nm 范围内最大的波段反射率 R_r (红谷), 波长 640~680 nm 范围内最小的波段反射率
反射率位置特征参数 Reflectance location parameters	$D = 1 - \frac{R_{670}}{R_{560} + \frac{R_{760} - R_{560}}{760 - 560} \times (670 - 560)}$ $H = 1 - \frac{R_{500} + \frac{R_{670} - R_{500}}{670 - 500} \times (560 - 500)}{R_{560}}$
一阶微分位置特征参数 First derivative location parameters	D_b , 蓝边(470~520 nm)内一阶微分光谱中的最大值 D_y , 黄边(560~590 nm)内一阶微分光谱中的最大值 D_r , 红边(660~740 nm)内一阶微分光谱中的最大值 D_{nr} , 近红外(760~1036 nm)内一阶微分光谱中的最大值 λ_r , 红边(660~740 nm)内一阶微分光谱中的最大值对应的波段
高光谱特征参数 Hyperspectral Features	SD_b , 蓝边内一阶微分值的总和 SD_y , 黄边内一阶微分值的总和 SD_r , 红边内一阶微分值的总和 SD_{nr} , 近红外范围内一阶微分值的总和
一阶微分面积特征参数 First derivative area parameters	R_g/R_r D/H SD_r/SD_b SD_r/SD_y SD_{nr}/SD_b SD_{nr}/SD_r
植被指数特征参数 Vegetation indexes parameters	$(R_g - R_r) / (R_g + R_r)$ $(D - H) / (D + H)$ $(SD_r - SD_b) / (SD_r + SD_b)$ $(SD_r, SD_y) / (SD_r + SD_y)$

1.3.2 监测模型及精度评价 将数据量的70%作为建立模型的数据,30%作为精度验证的数据。主要涉及以下模型:

多元线性回归模型: $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n$

线性函数模型: $y = \beta_0 + \beta_1 x$

二次函数模型: $y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2$

三次函数模型: $y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3$

式中: y 代表拟合值; $x, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 代表主要特征参数; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ 代表拟合系数。

本研究使用决定系数 R^2 和均方根误差 $RMSE$ 进行精度验证。 R^2 值在0~1之间, R^2 越接近1,说明预测模型参考价值越高。 $RMSE$ 值越小,说明预测模型精度更高。

2 结果与分析

2.1 云南松受松小蠹攻击后不同危害时期针叶的光谱变化

2.1.1 不同危害时期云南松光谱反射率分析 不同危害时期针叶光谱反射率见图2。针叶光谱反射率变化可反映松小蠹危害时期变化,健康时期、危害早期和危害中期针叶光谱反射率曲线具有一致性:在740~1 036 nm,随着危害时期变化,反射率逐渐降低;在680~740 nm(“红边”),健康时期斜率最大,然后依次为危害早期和危害中期;在510~560 nm(“绿峰”)和640~680 nm(“红谷”),健康时期光谱反射率低于危害中期和危害早期。危害末期光谱反射率曲线“绿峰”、“红谷”消失,大致为一条缓慢上升的曲线。从整体上看,反射率大小依次为健康时期、危害早期、危害中期、危害末期。

2.1.2 不同危害时期的云南松光谱微分曲线分析 不同危害时期云南松光谱一阶微分曲线见图3,在500~540 nm,健康时期、危害早期和危害中期存在明显波峰,且值大小依次为危害早期、危害中期、健康时期,而危害末期曲线不存在明显波峰;在660~740 nm,存在明显波峰,且峰值达到最高,其值大小依次为健康时期、危害早期、危害中期。随着危害时期变化,出现“红边”“蓝移”现象,峰值向短波方向移动且逐渐降低;在760~1 036 nm,各危害时期的波峰、波谷出现波段范围大致相似。

2.1.3 不同危害时期的云南松光谱相关性分析 松小蠹危害时期与光谱反射率、光谱一阶微分值相关

性分析见图4、图5,在399、409、503~539、553~574、610~677、687~697、708~791、807~838、849~870、881~988、1 004、1 025~1 036 nm,松小蠹危害时期与针叶光谱反射率及光谱一阶微分值显著相关,可有效反映松小蠹危害时期,利用以上波段构建的高光谱参数建立松小蠹危害时期监测模型是可行的。

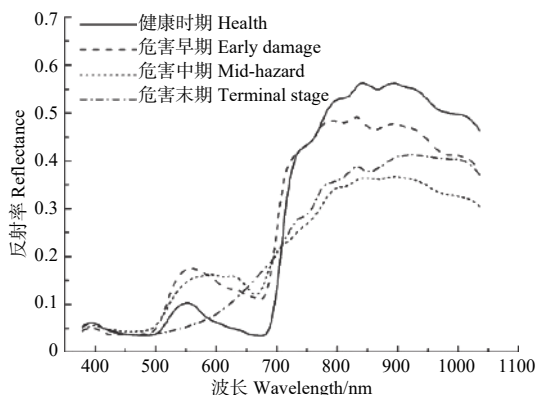


图2 不同危害时期云南松枝梢针叶光谱反射率曲线

Fig. 2 Spectral reflectance curve of *Pinus yunnanensis* in different damage periods

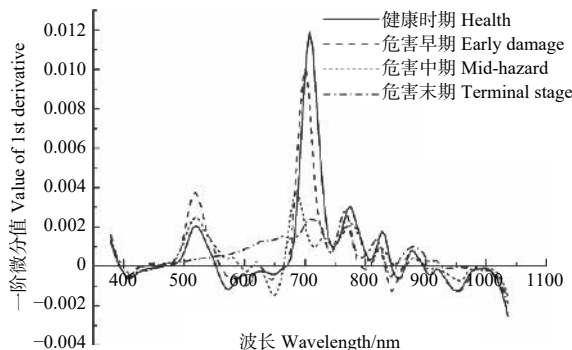


图3 不同危害时期针叶光谱反射率一阶微分曲线

Fig. 3 First order differential curve of spectral reflectance of *Pinus yunnanensis* in different damage periods

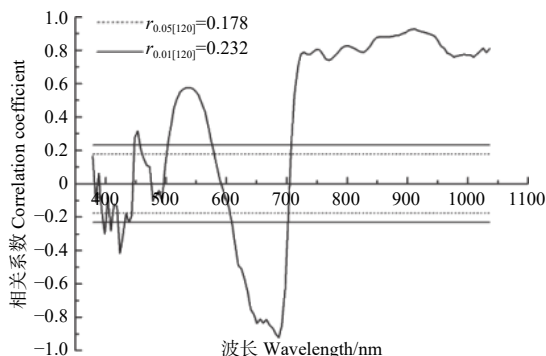


图4 松小蠹不同危害时期与光谱反射率的相关性分析
Fig. 4 The correlation between hazard time division of *Tomicus* spp. and spectral reflectance

2.1.4 松小蠹危害时期诊断模型建立及验证 通过相关分析和逐步回归分析 (a) 分别对植被指数和

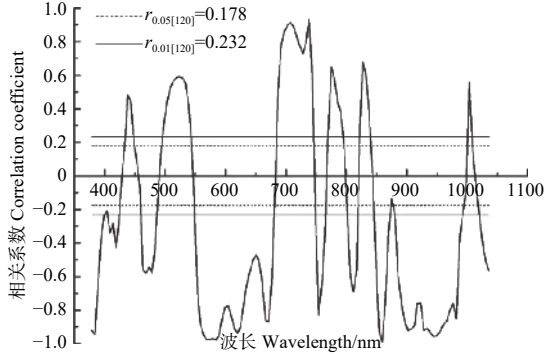


图5 不同危害时期与光谱一阶微分值的相关性分析
Fig. 5 The correlation between hazard time division of *Tomiscus spp.* and the first derivative of the spectrum

高光谱特征参数筛选用于建模的变量, 获得显著或极显著变量: $NDVI2$ 、 PRI ; D 、 D_r 、 SD_b 、 SD_y (表3)。将植被指数和高光谱特征变量共同输入SPSS中, 进行逐步回归分析(b), 获得显著或极显著变量: D 、 D_r 、 $NDVI_{705}$ (表3)。

基于筛选的变量分别建立松小蠹危害时期的预测模型, 并进行精度验证, 根据拟合精度和预测精度的 R^2 、 $RMSE$ 选择精度最高的预测模型(表4), 其中以 D 、 D_r 、 $NDVI_{705}$ 为变量的多元线性回归模型精度最高。植被指数类参数中, 以 $NDVI2$ 为变量的模型精度更高; 高光谱特征位置参数中, 以 D 为变量的模型精度更高。几个模型中, 多元线性回归模型精度较高。

表3 植被指数变量和高光谱特征参数变量筛选结果

Table 3 The screening results of vegetation index and hyperspectral characteristic parameter

特征变量Characteristic variables	相关分析Correlation analysis	逐步回归分析Stepwise regression analysis(a)	特征变量Characteristic variables	相关分析Correlation analysis	逐步回归分析Stepwise regression analysis(b)
$NDVI2$	0.918**	<0.001**	D	0.923**	<0.001**
PRI	0.740**	0.003**	D_r	0.911**	<0.001**
D_r	0.911**	0.019*	$NDVI_{705}$	0.773**	<0.001**
D	0.923**	0.031*	$(SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)$	0.267	<0.001**
SD_b	0.381*	0.001**			
SD_y	-0.887**	0.005**			

注: *、 $P < 0.05$, 显著相关; **、 $P < 0.01$, 极显著相关, 下同。

Note: $P < 0.05$, significant correlation; **、 $P < 0.01$, extremely significant correlation, the same below.

表4 危害时期监测模型 (n=84) 及检验 (n=36)

Table 4 Monitoring models (n = 84) and validation (n = 36) of damage time

变量类型 Variable categories	监测模型 Monitor models	回归方程 Regression equations	拟合精度 Fitted precision		预测精度 Predicted precision	
			R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$
植被指数 Vegetation index	$NDVI2$	$y = 0.355 + 4.460x_1 - 6.974x_1^2 + 7.410x_1^3$	0.872	0.415	0.854	0.424
	PRI	$y = 3.637 + 13.108x_2 - 31.072x_2^2 - 208.144x_2^3$	0.623	0.711	0.636	0.791
	$NDVI2, PRI$	$y = 0.622 + 3.662x_1 + 3.780x_2$	0.878	0.391	0.889	0.357
高光谱特征参数 Hyperspectral characteristic parameters	D	$y = 1.139 + 0.811x_3 - 3.174x_3^2 + 6.235x_3^3$	0.900	0.367	0.895	0.498
	D_r	$y = 0.755 + 83.599x_4 + 27496.449x_4^2 - 1321854.674x_4^3$	0.839	0.465	0.796	0.517
	SD_b	$y = -0.802 + 935.581x_5 - 67441.244x_5^2 + 1450214.907x_5^3$	0.441	0.867	0.106	1.010
	SD_y	$y = 2.019 - 235.870x_6 + 6602.191x_6^2 + 1404056.992x_6^3$	0.828	0.481	0.804	0.508
	D, D_r, SD_b, SD_y	$y = 1.343 + 1.121x_3 + 97.985x_4 - 47.574x_5 - 80.177x_6$	0.916	0.314	0.918	0.331
	$D, D_r, NDVI_{705}$	$y = 0.540 + 1.107x_3 + 108.960x_4 + 2.545x_7$	0.937	0.276	0.925	0.258
综合Comprehensive	$D, D_r, NDVI_{705}, (SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)$	$y = 0.886 + 1.332x_3 + 86.860x_4 + 3.636x_7 - 0.794x_8$	0.969	0.189	0.946	0.212

注: y代表松小蠹的危害时期预测值, $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$ 分别代表 $NDVI2, PRI, D, D_r, SD_b, SD_y, NDVI_{705}, (SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)$ 。

Note: y represents the predicted value of damage period, $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ and x_8 represent $NDVI2, PRI, D, D_r, SD_b, SD_y, NDVI_{705}, (SD_r - SD_b) / (SD_r + SD_b)$, respectively.

基于逐步回归分析(b)得到的4个参数(D 、 D_r 、 $NDVI_{705}$ 、 $(SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)$)建立危害时期的多元线性回归模型(表4),其模型精度大于以 D 、 D_r 、 $NDVI_{705}$ 为变量的多元线性回归模型。对上述4个参数进行建模重要性分析,重要性依次为0.129、0.114、0.575、0.183,结果表明: $(SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)$ 参数虽未与松小蠹的危害时期显著相关,但仍具有一定重要性,将其纳入模型变量中可提高模型精度。

2.2 松小蠹不同危害时期光合变化分析

2.2.1 松小蠹不同危害时期针叶光合参数变化 主要光合指标见表5,健康时期、危害早期、危害中期针叶Photo分别为4.621、2.089、0.643 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,健康时期是危害中期的7倍,受松小蠹危害后,云

南松针叶Photo逐渐下降。方差分析及Duncan's多重比较显示:松小蠹不同危害时期的Photo、Cond、Ci及Ls存在显著差异($P<0.05$),健康时期、危害早期、危害中期的值依次下降;相较于健康时期针叶,危害早期和危害中期Trmmol明显下降,存在显著差异;危害中期针叶WUE显著低于健康时期和危害早期。结合松小蠹不同时期针叶Ci和Ls分析,表明:针叶Photo降低是松小蠹危害云南松导致叶肉细胞中与光合作用相关的酶活性下降引起,气孔因素并非主要因素,其下降是为了减少针叶蒸腾引起的水分损失。

2.2.2 松小蠹不同危害时期针叶主要光合参数的相关性分析 不同危害时期针叶Photo与其他光合参数的相关性发生了不同程度变化(表6)。简单相

表5 云南松受松小蠹危害的不同时期的针叶气体交换参数的影响

Table 5 The effects of gas exchange parameters in different periods of *Pinus yunnanensis* damaged by *Tomicus* spp.

主要光合指标Principal photosynthetic indexes	云南松受松小蠹危害的不同时期Different periods of harm		
	健康时期Health	危害早期Early damage	危害中期Mid-hazard
净光合速率Photo/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	4.621 ± 0.105a	2.089 ± 0.087b	0.643 ± 0.048c
气孔导度Cond/ $(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	0.047 ± 0.001a	0.023 ± 0.002b	0.016 ± 0.001c
胞间CO ₂ 浓度Ci/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	129.098 ± 19.591a	174.854 ± 48.175b	235.635 ± 26.579c
蒸腾速率Trmmol/ $(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	1.938 ± 0.014a	1.053 ± 0.111b	0.889 ± 0.034b
水分利用效率WUE/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})$	2.385 ± 0.053a	2.631 ± 0.201a	0.755 ± 0.058b
气孔限制值Ls	0.578 ± 0.011a	0.425 ± 0.026b	0.277 ± 0.013c

注:表中数据为测得数据的平均值±标准误差,同行中不同字母表示不同处理间Duncan's多重比较差异显著($P<0.05$, $n=90$)。

Note: the data in the table is the mean ± standard error of the measured data. Different letters in the same line indicate that there are significant differences in Duncan's multiple comparisons between different treatments ($P < 0.05$, $n = 90$).

表6 针叶主要光合参数的相关性分析

Table 6 The correlation analysis of main photosynthetic parameters of needles

危害时期Hazard periods	因子Factors	净光合速率Photo	气孔导度Cond	胞间CO ₂ 浓度Ci	蒸腾速率Trmmol
健康时期Health	净光合速率Photo	1	0.708**	-0.989**	0.383
	气孔导度Cond	-0.410*	1	0.623**	0.371
	胞间CO ₂ 浓度Ci	-0.732**	0.315	1	0.486**
	蒸腾速率Trmmol	0.218	0.967**	0.497**	1
危害早期Early damage	净光合速率Photo	1	0.309	-0.476**	-0.320
	气孔导度Cond	-0.520**	1	-0.278	0.999**
	胞间CO ₂ 浓度Ci	-0.730**	0.528**	1	0.291
	蒸腾速率Trmmol	-0.543**	0.999**	0.551**	1
危害中期Mid-hazard	净光合速率Photo	1	-0.360	-0.508**	0.702**
	气孔导度Cond	0.205	1	-0.519**	0.663**
	胞间CO ₂ 浓度Ci	0.069	0.124	1	0.691**
	蒸腾速率Trmmol	0.579**	0.512**	0.401	1

注:主对角线左下方为简单相关系数,右上方为偏相关系数。

关分析表明：3个不同危害时期针叶 Photo 与 Cond、Ci、Trmmol 均呈不同相关性，Photo 与 Ci 呈显著负相关 ($r_{\text{健康时期}}=-0.989^{**}$, $r_{\text{危害早期}}=-0.476^{**}$, $r_{\text{危害中期}}=-0.508^{**}$)，而 Photo 与其他因子在不同危害时期呈不一致相关性和显著性。偏相关分析表明：健康时期、危害早期针叶 Photo 与 Ci 均呈极显著负相关 ($r_{\text{健康}}=-0.732^{**}$, $r_{\text{危害早期}}=-0.730^{**}$)，而危害中期呈正相关 ($r_{\text{危害中期}}=0.069$)；健康时期针叶 Photo 与 Cond 呈显著负相关 ($r_{\text{健康}}=-0.410^{*}$)，危害早期呈极显著负相关 ($r_{\text{危害早期}}=-0.520^{**}$)，而危害中期呈正相关 ($r_{\text{危害中期}}=0.205$)；针叶 Photo 与 Trmmol 在 3 个不同危害时期呈不一致相关性和显著性。说明云南松受到松小蠹危害后针叶净光合速率变化是多个因子共同作用的结果。

对松小蠹危害时期和针叶主要光合参数进行简单相关分析、偏相关分析及复相关分析 (表 7)。简单相关分析表明：危害时期与 Photo、Cond、

Trmmol 呈极显著正相关 ($r_{\text{Photo}}=0.943^{**}$, $r_{\text{Cond}}=-0.797^{**}$, $r_{\text{Trmmol}}=0.688^{**}$)，与 Ci 呈极显著负正相关 ($r_{\text{Ci}}=-0.764^{**}$)。偏相关分析表明：危害时期与 Photo 呈极显著正相关 ($r=0.588^{**}$)，与其他光合参数相关性均未达到显著性水平；复相关分析表明危害时期与光合参数的相关性达到极显著水平 ($r=0.909^{**}$)。

2.2.3 监测模型的建立与精度验证 分别建立危害时期与 Photo、Cond、Ci 及 Trmmol 的预测模型，拟合和预测精度的 R^2 、RMSE 选择精度最高的预测模型 (表 8)：危害时期与 Photo、Cond 及 Trmmol 的三次函数模型，以及与 Ci 的线性函数模型。其中危害时期与 Photo 的三次函数模型的精度最高 (拟合： $R^2=0.931$, $RMSE=0.204$ ；预测： $R^2=0.961$, $RMSE=0.240$)。

另根据危害时期与 Photo、Cond、Ci 及 Trmmol 的复相关分析结果，建立多元线性回归模型 (拟合： $R^2=0.918$, $RMSE=0.236$ ；预测： $R^2=0.930$,

表 7 松小蠹危害时期和针叶主要光合参数的相关性分析

Table 7 The correlation between damage time of *Tomicus* spp. and main photosynthetic parameters

因子 Factors	危害时期 Hazard periods	净光合速率 Photo	气孔导度 Cond	胞间 CO ₂ 浓度 Ci	蒸腾速率 Trmmol
危害时期 Hazard periods	0.909**	0.943**	0.797**	-0.764**	0.688**
净光合速率 Photo	0.588**	0.926**	0.758**	-0.821**	0.635**
气孔导度 Cond	0.187	0.293**	0.979**	-0.433**	0.972**
胞间 CO ₂ 浓度 Ci	-0.155	-0.484**	-0.016	0.772**	-0.287**
蒸腾速率 Trmmol	-0.076	-0.217*	0.960**	0.169	0.971**

注：主对角线上为复相关系数，其左下方为简单相关系数，右上方为偏相关系数。

Note: on the main diagonal is the complex correlation coefficient, the lower left is the simple correlation coefficient, and the upper right is the partial correlation coefficient.

表 8 危害时期监测模型 ($n=63$) 及检验 ($n=27$)

Table 8 Monitoring models ($n=63$) and validation ($n=27$) of damage time

监测模型 Monitoring models	回归方程 Regression equations	拟合精度 Fitted precision		预测精度 Predicted precision	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE
危害时期与 Photo	$y = 1.637 + 0.738x_1 - 0.030x_1^2 - 0.004x_1^3$	0.931	0.204	0.961	0.240
危害时期与 Cond	$y = 3.735 - 186.107x_2 + 8349.646x_2^2 - 91980.434x_2^3$	0.646	0.459	0.608	0.411
危害时期与 Ci	$y = 5.116 - 0.011x_3$	0.609	0.488	0.632	0.560
危害时期与 Trmmol	$y = 10.319 - 20.166x_4 + 15.464x_4^2 - 3.476x_4^3$	0.854	0.295	0.871	0.361
危害时期与 Photo、Cond、Ci、Trmmol	$y = 2.358 - 0.259x_1 - 17.174x_2 + 0.003x_3 + 0.092x_4$	0.918	0.236	0.930	0.272
危害时期与 Photo、Cond、Ci	$y = 2.27 + 0.309x_1 + 11.608x_2 - 0.002x_3$	0.916	0.225	0.911	0.261

注：y 代表松小蠹的危害时期预测值， x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别代表 Photo、Cond、Ci、Trmmol。

Note: y represents the predicted value of damage period of pine bark beetle, and x_1 , x_2 , x_3 and x_4 represent photo, Cond, Ci and Trmmol respectively.

$RMSE=0.272$), 能较好的模拟预测松小蠹的危害时期。此外, 还对 Photo、Cond、Ci、Trmmol 在建模分析中进行了重要性分析, 前三个参数重要依次为 0.707、0.247、0.047, 而 Trmmol 在模型中的可以忽略, 因此建立基于 Photo、Cond、Ci 的多元线性回归模型 (拟合: $R^2=0.916$, $RMSE=0.225$; 预测: $R^2=0.911$, $RMSE=0.261$)。

2.3 云南松针叶光谱指数与光合参数的相关分析

Hernandez^[18] 在针叶树木上研究发现 PRI 与气孔导度显著相关; NDVI 与 SR 均能与 Photo 建立一定的相关性。结合本研究, 对植被指数、高光谱特征参数与 Photo、Cond、Ci 及 Trmmol 进行相关性分析和逐步回归分析, 筛选显著或极显著变量 (表 9), 分别建立植被指数高光谱特征参数的拟合方程, 并进行精度验证, 根据拟合和预测精度的 R^2 、 $RMSE$ 选择精度最高的拟合方程 (表 10)。其中以参数 $NDVI_{705}$ 为变量的 Photo 拟合方程精度最高, 拟合和预测 R^2 均大于 0.8。对 Ci 植被指数拟合方程的 $NDVI_{705}$ 、 HI 及高光谱特征参数拟合方程的 λ_r 、 SD_b 、 SD_{nir}/SD_b 进行重要性分析, 结果表明: $NDVI_{705}$ 和 HI 的重要性分别为 0.825、0.125;

λ_r 、 SD_b 、 SD_{nir}/SD_b 的重要性依次为 0.370、0.419、0.211。 HI 、 SD_{nir}/SD_b 虽与 Ci 未呈现显著相关, 但该变量对其预测具有一定贡献, 将该变量纳入方程中, 提高方程拟合效果。

表 9 特征变量筛选结果

Table 9 The screening results of characteristic parameter

光合参数 Photosynthetic parameters	特征变量 Characteristic variables	相关分析 Correlation analysis	逐步回归分析 Stepwise regression analysis
净光合速率Photo	$NDVI_{705}$	0.899**	<0.001**
	λ_r	0.832**	<0.001**
气孔导度Cond	SR2	0.773**	<0.001**
	SD_r	0.643**	0.002**
	SD_r/SD_b	0.731**	0.019*
胞间CO ₂ 浓度Ci	$NDVI_{705}$	-0.815**	<0.001**
	HI	-0.241	0.008**
	λ_r	-0.767**	0.005**
	SD_b	0.478*	0.003**
蒸腾速率Trmmol	SD_{nir}/SD_b	0.232	0.024*
	SR1	0.715**	<0.001**
	SD_r	0.625**	0.011*
	SD_r/SD_b	0.660**	0.026*

表 10 光合参数估算方程 (n=63) 及验证 (n=27)

Table 10 Estimation equation (n = 63) and validation (n = 27) of photosynthetic parameters

监测模型 Monitor models	变量 Variable	回归方程 Regression equations	拟合精度 Fitted precision		预测精度 Predicted precision	
			R^2	RMSE	R^2	RMSE
净光合速率 Photo	$NDVI_{705}$	$y = 0.770 - 2.041x_1 + 66.972x_1^2 - 97.740x_1^3$	0.822	0.426	0.863	0.539
	λ_r	$y = -101.808 + 0.149x_5$	0.692	0.704	0.674	0.720
	SR2	$y = 0.023 - 0.005x_3 + 0.001x_3^2 - 3.103E^{-5} \cdot x_3^3$	0.632	0.018	0.629	0.018
气孔导度 Cond	SD_r	$y = 0.010 + 0.339x_6$	0.414	0.012	0.381	0.012
	SD_r/SD_b	$y = 0.012 + 0.003x_7$	0.535	0.011	0.552	0.010
	$SD_r, SD_r/SD_b$	$y = 0.005 + 0.202x_6 + 0.002x_7$	0.648	0.009	0.560	0.009
胞间CO ₂ 浓度 Ci	$NDVI_{705}$	$y = 211.338 - 450.203x_1 - 3444.328x_1^2 + 4506.702x_1^3$	0.733	23.636	0.695	25.658
	$NDVI_{705}, HI$	$y = 180.597 - 302.673x_1 + 101.860x_4$	0.766	22.148	0.672	27.904
	λ_r	$y = 2794.375 - 3.737x_5$	0.588	29.347	0.500	31.132
	$\lambda_r, SD_b, SD_{nir}/SD_b$	$y = 1731.709 - 2.309x_5 + 4379.721x_8 + 6.697x_9$	0.745	23.112	0.693	29.808
蒸腾速率 Trmmol	SR1	$y = 0.784 - 0.061x_2 + 0.026x_2^2 - 0.001x_2^3$	0.544	0.476	0.604	0.467
	SD_r	$y = 0.547 + 13.504x_6$	0.391	0.503	0.385	0.495
	SD_r/SD_b	$y = 0.710 + 0.106x_7$	0.435	0.485	0.436	0.450
	$SD_r, SD_r/SD_b$	$y = 0.373 + 8.712x_6 + 0.075x_7$	0.561	0.427	0.564	0.415

注: y代表Photo、Cond、Ci、Trmmol的预测值, $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$ 分别代表 $NDVI_{705}, SR1, SR2, HI, \lambda_r, SD_r, SD_r/SD_b, SD_b, SD_{nir}/SD_b$ 。

Note: y represents the predicted values of Photo, Cond, Ci and Trmmol, and $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$ and x_9 represent $NDVI_{705}, SR1, SR2, HI, \lambda_r, SD_r, SD_r/SD_b, SD_b, SD_{nir}/SD_b$, respectively.

3 讨论

传统森林病虫害监测费时费力,误差大。近年来,高光谱遥感在农林业上得到广泛应用,可快速获取植被、作物的有效信息,植被光谱及一阶微分信息能有效反映病虫害危害情况,光谱各波段组合可以估测植被生理特性。伍南^[23]等在对油茶炭疽病研究时发现光谱一阶微分信息可反映炭疽病病情指数,在 496 nm 和 680 nm 附近存在波峰,547 nm 附近存在波谷,且随着病情指数增大,波谷逐渐消失,峰值逐渐降低,“红边”出现“蓝移”。本研究发现,随着松小蠹危害时期变化,云南松枝梢针叶光谱反射率和光谱一阶微分曲线总体降低,光谱曲线在 510~560 nm、640~680 nm 和 740~1 036 nm 区域变化明显;在 660~740 nm,光谱一阶微分曲线峰值逐渐向短波方向移动并逐渐降低,出现“红边”“蓝移”现象。表明云南松枝梢针叶光谱和光谱一阶微分信息变化可以反映松小蠹危害时期变化。随着危害时期变化,云南松枝梢针叶颜色、光谱信息变化明显。

以往研究表明:植被光谱指数与光合参数存在一定关系,可用线性或非线性表示,能反映植被健康状况。本研究对 8 个植被指数和 23 个高光谱特征参数与 Photo、Cond、Ci、Trmmol 进行相关分析,Photo 与 $NDVI_{705}$ 和 λ_r 、Cond 与 $SR2$ 和 SD_r/SD_b 、Trmmol 与 SRI 和 SD_r/SD_b 均呈极显著正相关,Ci 与 $NDVI_{705}$ 和 λ_r 呈极显著负相关;以 $NDVI_{705}$ 为参数的 Photo 三次函数方程、以 $SR2$ 为参数的 Cond 三次函数方程、以 $NDVI_{705}$ 和 HI 为参数的 Ci 多元线性回归方程及以 SD_r 、 SD_r/SD_b 为参数的 Trmmol 多元线性回归方程精度最高。

4 结论

研究松小蠹不同危害时期的针叶光谱与光合特征,基于光谱特征及光合参数建立松小蠹危害时期监测模型。针叶光谱曲线在 510~560 nm、640~680 nm 和 740~1 036 nm 区域变化明显;危害时间越久,光谱一阶微分曲线在 660~740 nm 出现“红边”“蓝移”,且峰值逐渐降低;以 D 、 D_r 、 $NDVI_{705}$ 、 $(SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)$ 为变量的松小蠹危害时期多元线性回归模型拟合效果最优(拟合 $R^2=0.969$,预测 $R^2=0.946$ 、 $RMSE=0.212$)。松小蠹危害时期与 Photo 密切相关($r_{\text{简单相关分析}}=0.943^{**}$, $r_{\text{偏相关分析}}=$

0.588^{**}),其三次函数模型拟合效果较好(拟合 $R^2=0.931$,预测 $R^2=0.961$, $RMSE=0.240$)。基于光谱指数建立了光合参数的拟合方程,Photo 的拟合效果最优。研究结果对于利用成像高光谱技术监测森林病虫害具有重要意义,为今后“天空地”一体化监测奠定了一定基础。光合参数能反应植被的生长状况,可作为森林健康监测的一个指标,建立高光谱特征参数与光合参数之间的模型简单可行,可预估森林植被健康状况,有利于森林健康监测。

致谢:感谢石林县林业局森防站在实地调查中给予努力支持,作者在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 邓喜庆, 皇宝林, 温庆忠, 等. 云南松林在云南的分布研究[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(6): 843-848.
- [2] 段兆尧, 杨子祥, 王健敏, 等. 云南切梢小蠹的室内饲养及隐蔽期生活习性的观察方法[J]. 林业科学研究, 2013, 26(3): 389-392.
- [3] 李 燕. 云南玉溪松小蠹成灾原因及防治对策[J]. 林业资源管理, 2013(3): 40-42.
- [4] 刘 畅, 孙鹏森, 刘世荣. 基于反射光谱指数的锐齿栎叶片色素含量估算[J]. 林业科学研究, 2017, 30(1): 88-98.
- [5] Pan J, Ju Y, Zhang H, et al. Detection of *Bursaphelenchus xylophilus* infection in *Pinus massoniana* from hyperspectral data[J]. Nematology, 2014, 16(10): 1197-1207.
- [6] 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, 22(3): 367-370.
- [7] 伍 南, 刘君昂, 闫瑞坤, 等. 马尾松赤枯病冠层光谱特征及严重度反演[J]. 中国农学通报, 2012, 28(4): 51-57.
- [8] 徐 爽, 易 东. 利用高光谱成像技术检测红枣表面虫伤[J]. 电子制作, 2013, (21): 47-48.
- [9] Helmi Zuhaidi M S, 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.
- [10] 于泉洲, 周 蕾, 王绍强, 等. 基于EO-1 Hyperion的中国典型森林冠层高光谱特征分析[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2018, 40(5): 125-132.
- [11] 宋小宁, 马建威, 李小涛, 等. 基于Hyperion高光谱数据的植被冠层含水量反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2833-2837.
- [12] 刘良云, 黄木易, 黄文江, 等. 利用多时相的高光谱航空图像监测冬小麦条锈病[J]. 遥感学报, 2004, 8(3): 275-281.
- [13] 季 梅, 刘宏屏, 董琼琼, 等. 林木受小蠹虫危害的表征及其遥感监测[J]. 西部林业科学, 2016, 35(4): 150-153.
- [14] 马华文, 许翠清, 李海朝. 立地条件对长白落叶松光合特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(8): 4-7.
- [15] 刘 琦, 崔世茂, 宋 阳, 等. NaCl胁迫对番茄苗期根形态和光合作用的影响[J]. 北方农业学报, 2018, 46(3): 32-36.
- [16] Savitzky A, Golay M. Smoothing and Differentiation of Data by Sim-

- plified Least Squares Procedures[J]. Analytical Chemistry, 1964, 36(8): 1627-1639.
- [17] 汪红, 石雷, 马云强, 等. 云南切梢小蠹危害云南松监测模型与判定规则[J]. 林业科学研究, 2018, 31(4): 53-60.
- [18] Rocío Hernández-Clemente, Navarro-Cerrillo R M, Lola Suárez, *et al.* Assessing structural effects on PRI for stress detection in conifer forests[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(9): 2360-2375.
- [19] Gamon J A, Surfus J S. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer[J]. New Phytologist, 2010, 143(1): 105-117.
- [20] Gamon J A, Pe Uelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41(1): 35-44.
- [21] Merzlyak M N, Chivkunova O B, Gitelson A A, *et al.* Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening[J]. Physiologia Plantarum, 2010, 106(1): 135-141.
- [22] 王晓庆, 冉烈, 彭萍, 等. 炭疽病胁迫下的茶树叶片高光谱特征分析[J]. 植物保护, 2014, 40(6): 13-17.
- [23] 伍南, 刘君昂, 周国英, 等. 利用高光谱微分指数反演油茶炭疽病情指数的研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 777-781.

Correlation Analysis of Different Hazard Periods of *Tomicus* spp. Based on Hyperspectral Features and Photosynthetic Parameters

LIU Meng-ying^{1,2}, SHI Lei¹, MA Yun-qiang^{1,3}, ZHANG Zhong-he¹, LIU Xue-lian¹, YAO Jun¹, DU Ting¹

(1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry; Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] To establish monitoring models and photosynthetic parameter simulation equations by measuring the hyperspectral data and photosynthetic data of *Pinus yunnanensis*, so as to effectively and quickly predict the damage period of *Tomicus* spp. and diagnose the health status of *P. yunnanensis*, and provide a reference for large-area application of hyperspectral remote sensing technology to achieve forest pest monitoring. [Method] The damage caused by *Tomicus* spp. was investigated and the hyperspectral and photosynthetic data were obtained. The parameters which were significantly correlated with the damage period of *Tomicus* spp. were selected to establish monitoring models. The correlation between photosynthetic parameters and hyperspectral characteristic parameters was analyzed and the correlation equations of photosynthetic parameters were established. [Result] As the hazard period prolonged, the spectral reflectance gradually decreases in the range of 740-1036 nm. "Red edge" and "blue shift" appeared in the first-order differential curve of the spectrum at 660-740 nm, and the peak value gradually decreased. The multivariate linear regression model which was established based on spectral characteristics showed the best fitting effect. The damage period of *Tomicus* spp. was closely correlated with Photo, and its cubic function model fitted well. The correlation between spectral index and photosynthetic parameters was established to obtain the optimal fitting equation of photosynthetic parameters. [Conclusion] The models based on spectral index and photosynthetic parameters of *P. yunnanensis* can effectively monitor the hazard period of *Tomicus* spp. There is a significant correlation between the spectral index and photosynthetic parameters of *P. yunnanensis*, and a correlation model can be established to estimate the growth and health status of *P. yunnanensis*.

Keywords: hyperspectral; spectral characteristic parameter; *Tomicus* spp.; photosynthesis; correlation

(责任编辑: 崔 贝)