

云南切梢小蠹危害云南松监测模型与判定规则

汪红^{1,2}, 石雷^{2*}, 马云强^{2*}, 舒清态¹, 廖怀建², 杜婷²

(1. 西南林业大学林学院, 云南昆明 650224; 2. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南昆明 650224)

摘要: [目的] 通过分析云南切梢小蠹危害下的云南松枝梢高光谱特征, 建立其危害程度监测模型和判定规则。 [方法] 使用便携式地面成像光谱仪采集云南切梢小蠹蛀梢期的云南松中、幼龄林枝梢光谱反射率数据, 分析光谱特征并提取特征参数, 以此构建云南松受云南切梢小蠹危害程度的监测模型和判定规则。 [结果] 随危害程度加重, 在绿波段(510~560 nm)和近红外波段(720~1 036 nm), 光谱反射率逐渐降低; 一阶微分曲线在红边(680~760 nm)的峰值向短波方向移动; 云南切梢小蠹危害程度与光谱反射率及其一阶微分在509~539、549~564、595~677、687~692、702~807、838~875、891~1 031 nm显著相关; 以高光谱特征参数 S_{Dr} 、 D_y 、 $(D-H)/(D+H)$ 、 S_{Dmir} 、 $(S_{Dmir}-S_{Dr})/(S_{Dmir}+S_{Dr})$ 构建的4个监测模型的实测值与预测值的线性拟合关系较好($R^2 > 0.9$), 可准确估算云南切梢小蠹危害程度; 根据4个监测模型建立的判定规则准确率高($\geq 80\%$), 其中, 多元线性回归模型 $y = -7.720x_1 + 1.275x_2 + 1.251x_3 - 4.835x_4 + 1.135x_5 + 6.632$ 的判定规则准确率最高(健康(< 1.589)、轻度受害[1.589, 2.465)、中度受害[2.465, 3.381)、重度受害(≥ 3.381)), 达93.333%。 [结论] 根据云南松高光谱特征参数, 建立的监测模型和判定规则可有效监测云南切梢小蠹危害程度, 研究结果可用于云南切梢小蠹危害发生发展的监测。

关键词: 云南切梢小蠹; 成像高光谱; 光谱特征参数; 逐步回归分析

中图分类号: S763.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)04-0053-08

Research of Damage Monitoring Models and Judgment Rules of *Pinus yunnanensis* with *Tomicus yunnanensis*

WANG Hong^{1,2}, SHI Lei², MA Yun-qiang², SHU Qing-tai¹, LIAO Huai-jian², DU Ting²

(1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] By analyzing the hyperspectral features of *Pinus yunnanensis* in different damage levels and building monitoring models, to establish the damage monitoring model and judgment rules for integrated control of *Tomicus yunnanensis*. [Method] In shoot damage period of *T. yunnanensis*, the imaging hyperspectral data of young and middle-aged *P. yunnanensis* in study area were obtained by SOC710VP, and hyperspectral features were analyzed to extract hyperspectral features parameters to build damage levels detection models and judgment rules. [Result] With the aggravation of damage level of *T. yunnanensis*, the reflectance spectral curves of *P. yunnanensis* gradually declined at green bands (510–560 nm) and near-infrared bands (720–1 036 nm), and the peak values of spectral first derivative curves gradually decreased at red edge (680–760 nm). In 509–539, 549–564, 595–677, 687–692, 702–807, 838–875 nm, and 891–1 031 nm, the damage levels and reflectance and first derivative of *P. yunnanensis* needle were significantly correlated. Hyperspectral parameters S_{Dr} , D_y , $(D-H)/(D+H)$

收稿日期: 2018-01-12

基金项目: 国家重点专项“人工林重大灾害防控关键技术研究”; 云南省技术创新人才培养计划(2012HB054); 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”(2018YFD0600201)

作者简介: 汪红(1991—), 女, 硕士研究生. 主要研究方向: 3S技术在林业中的应用. E-mail: 18313743194@163.com

* 通讯作者: 石雷, 马云强.

H), $S_{D_{nir}}$, and $(S_{D_{nir}} - S_{Dr}) / (S_{D_{nir}} + S_{Dr})$ were used to establish the monitoring models, the R^2 of measured value and predicted value all reached 0.9. The accuracy of quantitative judgment rules based on 4 monitoring models were higher than 80%, the rules (Healthy (< 1.589), Slight damage [$1.589, 2.465$), Moderate damage [$2.465, 3.381$), Severe damage (≥ 3.381)) based on multivariable linear regression model $y = -7.720x_1 + 1.275x_2 + 1.251x_3 - 4.835x_4 + 1.135x_5 + 6.632$, reached the highest precision (93.33%). [Conclusion] The monitoring models and judgment rules based on hyperspectral feature parameters can monitor the damage level of *T. yunnanensis* effectively.

Keywords: *Tomicus yunnanensis*; imaging hyperspectral; spectral feature parameters; stepwise regression analysis

云南松 (*Pinus yunnanensis* (Franch.)) 是中国西南地区最重要的针叶用材树, 以滇中高原为中心分布^[1]。云南松是石林彝族自治县的主要优势树种, 面积 26 049.5 hm², 蓄积 975 240 m³, 占乔木林面积的 47.48%, 占乔木林蓄积的 53.43%^[2]。云南切梢小蠹 (*Tomicus yunnanensis* (Kirkendall & Faccoli)) 隐蔽性强、危害期长、扩散速度快, 蛀梢和蛀干习性对云南松造成双重危害, 堪称云南松的“癌症”^[3]。在入侵树干 3 到 5 个月, 即可造成云南松枯萎死亡^[2]。因此, 监测云南松受云南切梢小蠹的危害程度十分重要。

20 世纪 80 年代以来, 高光谱遥感被广泛用于监测各种环境胁迫下的地表植被^[4]。地面高光谱遥感在农业病虫害监测上已取得了许多成果。王利民等^[5]、尹小君等^[6]、Das 等^[7]利用非成像高光谱遥感分别对春玉米大斑病 (*Exserohilum turcicum* (Pass.))、加工番茄早疫病 (*Alternaria solani* (Elliset-Martin))、水稻白叶枯病 (*Xanthomonas oryzae* (Ishiyama)) 进行监测和研究, 监测效果较好。地面非成像光谱仪仅能获取地物的光谱数据, 而地面成像光谱仪可以实现“图谱合一”, 有利于混合光谱分析和病虫害参数反演模型的建立^[8]。胡耀华等^[9]、Qin 等^[10]利用成像光谱仪分别对马铃薯晚疫病 (*Phytophthora infestans* (Mont.))、柑橘溃疡病 (*Xanthomonas citri* (Hasse)) 建立了相应的监测模型, 实现了病虫害的有效监测。高光谱遥感逐渐被用于森林病虫害的监测和研究, 其中, 非成像高光谱遥感的研究已经有许多, Ju 等^[11]、Ismail 等^[12]使用 ASD 分别对马尾松松材线虫病 (*Bursaphelenchus xylophilus* (Steineret Buhner))、云杉蓝树蜂 (*Sirex noctilio* (Hymenoptera: Siricidae)) 建立了高光谱监测模型, 对病虫害实现了有效监测。但目前国内利用地面成像高光谱遥感监测森林病虫害的研究还较少, 胡荣明等^[13]基于成像高光谱, 分别采用波谱角和面向对象

分类法, 提取感染落叶斑点病的苹果树叶片的病害区域, 发现面向对象分类法比波谱角分类法提取效果更优。地面成像高光谱遥感在森林病虫害监测中具有巨大的应用潜力和优势^[14]。

目前, 对云南切梢小蠹的研究, 主要集中于其光合生理反应^[15]、生活习性^[16]、蛀梢蛀干危害习性^[17]、危害模式及生殖生态学^[18]等方向的研究, 而使用地面成像光谱对云南切梢小蠹危害程度进行监测的研究还未见相关报道。因此, 利用成像高光谱遥感对云南切梢小蠹危害程度进行监测, 建立高光谱监测模型, 实现其危害程度的判定, 可为云南切梢小蠹危害的综合防治提供科学依据。

本研究通过实地调查云南切梢小蠹危害程度, 基于室内采集的不同危害程度的云南松枝梢光谱反射率数据, 分析云南松光谱反射率和光谱一阶微分特征, 建立危害程度监测模型和定量化判定规则, 以便为今后利用无人机遥感和卫星遥感进行森林病虫害监测、森林健康评价提供必要的信息和技术支持。

1 试验材料

试验材料为石林彝族自治县西街口镇受云南切梢小蠹危害的云南松中幼龄林的枝梢, 云南切梢小蠹对当地云南松造成的危害十分严重。根据《林业有害生物发生及成灾标准》(LY/T 1681 - 2006) 与试验区云南切梢小蠹危害云南松的实际情况, 以单株枝梢被害率为指标, 将云南切梢小蠹危害程度分为 4 级 (表 1)。

表 1 云南切梢小蠹危害程度划分

Table 1 Damage levels division of *Tomicus yunnanensis*

危害程度 Damage level	健康 Healthy	轻度危害 Slight	中度危害 Moderate	重度危害 Severe
枝梢被害率/% The damaged rate of shoot	<10	10~20	21~50	>51

枝梢被害率 = 出现被害状样枝梢数 / 样枝梢总数 × 100%

2017年8月,在试验区内按照云南切梢小蠹危害程度、云南松林龄和地形设置了8个样地,试验区的地理坐标为:103°29'10"~103°29'40" E, 24°49'15"~24°49'40" N。每个样地分别随机选取10棵云南松取样,在每棵树的上、中、下3个部位,分别从东、南、西、北4个不同的方位进行采样,每棵云南松采集10个左右的枝梢,用塑封袋放于冷藏箱中带回实验室,进行光谱数据的测定。在80组样本数据中,健康云南松的样本16个,轻度危害样本15个,中度危害样本7个,重度危害样本42个。

2 研究方法

2.1 云南松枝梢光谱反射率的测定

光谱测定在可控制光照条件(钨灯照明)实验室内进行,高光谱成像系统主要由2个500 W的钨灯、便携式地面成像光谱仪(SOC710VP, 美国Surface Optics Corporation)、C-mount成像镜头、计算机和暗箱等辅助设备构成。

将光谱仪SOC710VP(光谱范围400~1000 nm,光谱分辨率4.68 nm,共128个波段)架设在一个小暗室(高120 cm,长100 cm,宽100 cm)中。光谱仪目镜高度设置离暗箱底部50 cm,光圈设置为5.6,曝光时间为30 ms;同时,在光谱仪两侧各放1盏钨灯光源。当采集样本光谱数据时,将云南松枝梢平铺在光谱仪目镜正下方,之后打开光源,光源与枝梢成45°入射角。然后,将光谱仪打开,封闭暗室,开始采集光谱数据。每次测量都用标准参考板进行校正,并获取暗电流文件。一共获取80组有效的云南松针叶光谱反射率数据,随机选取50个样本用于建模,其余30个样本用于验证。

2.2 数据分析与建模方法

2.2.1 高光谱数据预处理 经过光谱标定、黑场标定和辐射标定3个步骤,将所测亮度值转换为反射率。为消除原始光谱数据中干扰因素对所建模型的影响,采用Savitzky-Golay 9点平滑方法对原始光谱反射率数据进行平滑处理^[19]。

采用OriginPro8.0计算光谱反射率的一阶微分值^[20],计算公式如下:

$$\rho'_{(\lambda_i)} = \frac{[\rho_{(\lambda_{i+1})} - \rho_{(\lambda_{i-1})}]}{2\Delta\lambda}$$

式中: λ_i 是波段*i*的波长值; $\rho'_{(\lambda_i)}$ 是波长 λ_i 的光谱值; $2\Delta\lambda$ 是波长 λ_{i-1} 到 λ_{i+1} 的差值,由光谱采样间隔决定。

2.2.2 高光谱特征参数提取 采用Pearson相关系数表征云南松针叶光谱反射率以及光谱一阶微分与危害程度的相关性^[21],选择达到显著相关的波段提取高光谱特征参数。

光谱吸收特征、光谱一阶微分、光谱吸收指数、比值指数和归一化指数是高光谱特征提取的常用方法^[22]。本研究以云南松的光谱反射率和光谱一阶微分为基础,参考前人的研究方法^[23-25],定义了4个基于反射率的位置特征参数、4个基于一阶微分值的位置特征参数、4个面积特征参数以及12个植被指数特征参数,共24个高光谱特征参数,各参数的定义见表2。使用逐步回归分析对高光谱特征参数进行筛选,将达到显著性水平($P < 0.05$)的特征参数用于建立危害程度监测模型。

2.2.3 危害程度监测模型及精度评价 采用逐步回归分析达到显著性的特征参数,建立云南切梢小蠹危害程度监测模型。监测模型主要采用多元线性回归模型、指数模型、二次函数模型和三次函数模型,具体模型公式如下:

多元线性回归模型(Multiple Linear):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n$$

指数模型(Exponential): $y = b_0 + b_1 \exp(b_2x)$

二次函数模型(Quadratic): $y = b_0 + b_1x + b_2x^2$

三次函数模型(Cubic):

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3$$

式中: y 代表切梢小蠹危害程度的拟合值; x, x_1, x_2, \dots, x_n 代表高光谱特征参数; $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ 代表拟合系数。

本研究使用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)对模型精度进行验证。 R^2 越大,则模型预测精度越高;RMSE值越小,则模型预测精度越高。

2.2.4 判定规则 根据多元线性回归模型、最佳指数模型、最佳二次函数模型和最佳三次函数模型,计算健康、轻度危害、中度危害和重度危害云南松建模样本的平均值以及平均值的中间值。以平均值的中间值为阈值,建立云南松危害程度的定量判定规则,并使用验证样本对不同监测模型的判定规则进行精度评价^[26]。

3 结果分析

3.1 光谱特征分析

3.1.1 不同危害程度云南松光谱反射率特征分析 云南切梢小蠹不同危害程度的云南松光谱反射率

见图1。光谱反射率可以反映云南切梢小蠹危害的程度,在绿光波段(510~560 nm),随危害程度的加重,光谱反射率由高到低变化。在红光波段(640~680 nm),光谱反射率最高的是重度危害,其次是中

度危害,轻度危害及健康云南松的最低。在近红外光波段(720~1 036 nm),光谱反射率随危害程度加重而显著降低。

表2 高光谱特征参数及其定义

Table 2 Hyperspectral features parameters and definitions

参数类别 Parameter categories	参数 Parameters	定义 Definitions
反射率位置 特征参数 Reflectance location parameters	R_g	绿峰,波长510~560 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
	$D = 1 - \frac{R_C}{R_S + \frac{R_E - R_S}{\lambda_E - \lambda_S} \times (\lambda_C - \lambda_S)}$	红谷的吸收深度, 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 分别为吸收特征中心点、起点和结束点处的波长,分别为670、560、760 nm
	$H = 1 - \frac{R_C}{R_S + \frac{R_E - R_S}{\lambda_E - \lambda_S} \times (\lambda_C - \lambda_S)}$	绿峰的反射峰高度, R_C 、 R_S 、 R_E 的定义如上, λ_C 、 λ_S 、 λ_E 分别为吸收特征中心点、起点和结束点处的波长,分别为560、500、670 nm
一阶微分位置 特征参数 First derivative location parameters	D_b	蓝边(490~530 nm)内一阶微分光谱中的最大值
	D_y	黄边(550~582 nm)内一阶微分光谱中的最大值
	D_r	红边(680~780 nm)内一阶微分光谱中的最大值
	D_{nir}	近红外平台(780~1 300 nm)内一阶微分光谱中的最大值
面积特征参数 Area parameters	S_{Db}	蓝边波长范围内(490~530 nm)一阶微分值的总和
	S_{Dy}	黄边波长范围内(550~582 nm)一阶微分值的总和
	S_{Dr}	红边波长范围内(680~780 nm)一阶微分值的总和
	S_{Dnir}	近红外平台范围内(780~1 300 nm)一阶微分值的总和
植被指数特征参数 Vegetation indexes parameters	R_g/R_r	绿峰反射率(R_g)与红谷反射率(R_r)的比值
	D/H	红谷的吸收深度(D)与绿峰的反射峰高度(H)的比值
	S_{Dr}/S_{Db}	红边内一阶微分值的总和(S_{Dr})与蓝边内一阶微分值总和(S_{Db})的比值
	S_{Dr}/S_{Dy}	红边内一阶微分值的总和(S_{Dr})与黄边内一阶微分值总和(S_{Dy})的比值
	S_{Dnir}/S_{Db}	近红外平台一阶微分值的总和(S_{Dnir})与蓝边内一阶微分值总和(S_{Db})的比值
	S_{Dnir}/S_{Dr}	近红外平台一阶微分值的总和(S_{Dnir})与红边内一阶微分值总和(S_{Dr})的比值
	$(R_g - R_r)/(R_g + R_r)$	绿峰反射率(R_g)与红谷反射率(R_r)的归一化值
	$(D - H)/(D + H)$	红谷的吸收深度(D)与绿峰的反射峰高度(H)的归一化值
	$(S_{Dr} - S_{Db})/(S_{Dr} + S_{Db})$	红边内一阶微分值的总和(S_{Dr})与蓝边内一阶微分值总和(S_{Db})的归一化值
	$(S_{Dr} - S_{Dy})/(S_{Dr} + S_{Dy})$	红边内一阶微分值的总和(S_{Dr})与黄边内一阶微分值总和(S_{Dy})的归一化值
$(S_{Dnir} - S_{Db})/(S_{Dnir} + S_{Db})$	近红外平台一阶微分值的总和(S_{Dnir})与蓝边内一阶微分值总和(S_{Db})的归一化值	
$(S_{Dnir} - S_{Dr})/(S_{Dnir} + S_{Dr})$	近红外平台一阶微分值的总和(S_{Dnir})与红边内一阶微分值总和(S_{Dr})的归一化值	

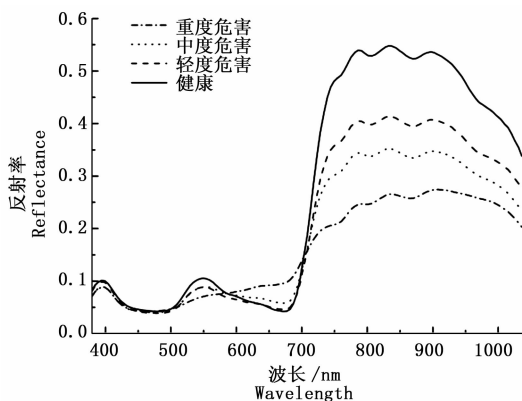


图1 不同危害程度的云南松针叶光谱反射率曲线

Fig. 1 *Pinus yunnanensis* needle spectral reflectance curves of different damage levels

云南松光谱反射率与云南切梢小蠹危害程度的相关性,可以反映切梢小蠹不同危害程度之间的显著差异性(图2)。在379~429、514~569、708~1 036 nm波段范围内二者呈显著负相关,在600~697 nm波段范围内呈显著正相关。

3.1.2 不同危害程度云南松光谱微分特征分析

云南松光谱反射率一阶微分能够反映切梢小蠹危害程度(图3)。光谱一阶微分曲线在绿边(500~540 nm)有明显的波动,在黄边(550~582 nm)有明显的波谷,在红边(680~760 nm)有明显的波峰,且随着危害程度的加重,峰高逐渐降低,红边位置逐渐向短波方向移动,表明云南松针叶微分光谱的“红边”位置随着云南切梢小蠹危害程度的加重依次发生“蓝移”,红边斜率逐渐减小。

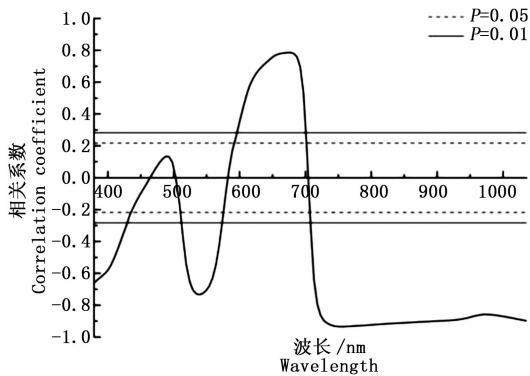


图2 光谱反射率与危害程度的相关性
($r_{0.05[80]} = 0.217$, $r_{0.01[80]} = 0.283$)

Fig. 2 The correlation between spectral reflectance and damage levels

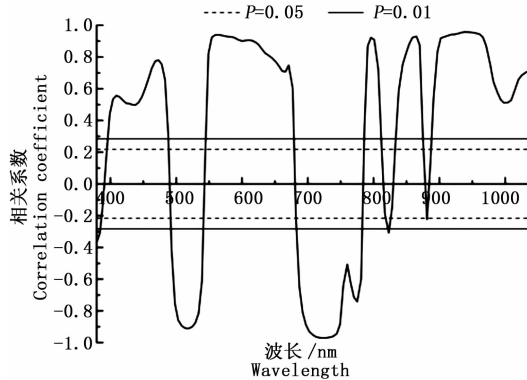


图4 一阶微分与危害程度的相关性
($r_{0.05[80]} = 0.217$, $r_{0.01[80]} = 0.283$)

Fig. 4 The correlation between spectral first derivative and damage levels

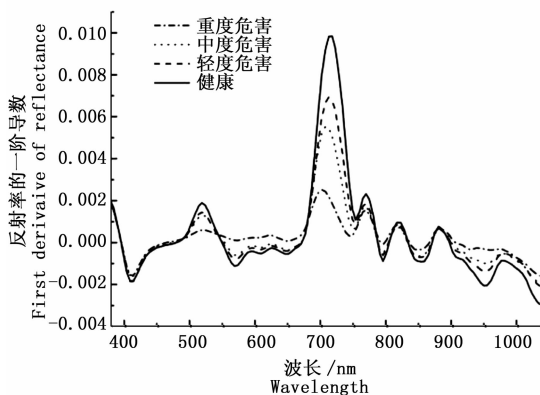


图3 不同危害程度的云南松针叶光谱一阶微分曲线
Fig. 3 Pinus yunnanensis needle spectral first derivative curves of different damage levels

云南松光谱反射率一阶微分与危害程度的相关性,可以反映云南切梢小蠹不同危害程度之间的显著差异性(图4)。在399~488、549~677、786~807、838~875、891~1036 nm 波段范围二者呈极显著正相关,在493~593、687~781 nm 波段范围内呈极显著负相关。

综上所述,在549~564、509~539、595~677、687~692、702~807、838~875、891~1031 nm

内,云南切梢小蠹危害程度与云南松光谱反射率和光谱一阶微分均极显著相关,在这些波段范围内构造高光谱特征参数,建立云南切梢小蠹危害等级检测模型是可行的。

3.1.3 不同危害程度最佳监测波段窗口 两两对比不同危害程度之间的光谱反射率差值和光谱一阶微分差值,将差值的绝对值最大的前10个波段作为最佳监测波段窗口(表3)。各危害程度间的光谱反射率最佳监测波段窗口主要在749~801、823~859 nm 的近红外波段范围内,各危害程度之间的光谱一阶微分最佳监测波段窗口多在692~749 nm,说明可见光的红波段的一阶微分可有效监测云南切梢小蠹的危害程度。

3.2 云南切梢小蠹危害监测模型与判定规则的建立

3.2.1 特征参数的筛选 通过相关性分析发现,24个高光谱特征参数中的22个都与危害程度显著相关。对高光谱特征参数进行逐步回归分析,达到显著或极显著的参数为 S_{Dr} 、 D_y 、 $(D-H)/(D+H)$ 、 S_{Dnir} 、 $(S_{Dnir}-S_{Dr})/(S_{Dnir}+S_{Dr})$ (表4)。

表3 不同危害程度最佳监测波段窗口

Table 3 The best monitor windows of different damage levels

危害程度 Damage levels	反射率最佳监测窗口/nm The best monitor windows of reflectance	一阶微分最佳监测窗口/nm The best monitor windows of first derivative
健康/轻度危害 Healthy/Slight	786, 791, 838, 833, 781, 844, 828, 796, 849, 823	718, 723, 713, 728, 708, 734, 702, 739, 697, 744
健康/中度危害 Healthy/Moderate	838, 786, 833, 791, 844, 828, 781, 849, 796, 823	723, 718, 728, 713, 734, 708, 739, 702, 697, 744
健康/重度危害 Healthy/Severe	786, 781, 791, 775, 796, 770, 801, 833, 828, 838	718, 723, 713, 728, 708, 734, 702, 739, 697, 744
轻度/中度危害 Slight/Moderate	838, 844, 833, 849, 854, 791, 828, 786, 859, 796	723, 728, 718, 734, 713, 739, 708, 744, 702, 749
轻度/重度危害 Slight/Severe	781, 786, 775, 791, 770, 796, 765, 760, 754, 801	718, 713, 723, 708, 728, 734, 702, 739, 697, 744
中度/重度危害 Moderate/Severe	781, 775, 786, 770, 765, 791, 760, 754, 749, 796	713, 718, 708, 723, 702, 728, 697, 734, 692, 739

表4 特征参数筛选结果

Table 4 The results of filtered features parameters

特征参数 Parameters	相关分析 Correlation analysis	逐步回归分析 Stepwise regression analysis	特征参数 Parameters	相关分析 Correlation analysis	逐步回归分析 Stepwise regression analysis
R_g	-0.683 **	0.387	R_g/R_r	-0.944 **	0.274
R_r	0.794 **	0.649	D/H	-0.835 **	0.346
D	-0.887 **	0.150	S_{Dr}/S_{Db}	-0.505 **	0.461
H	-0.839 **	0.148	S_{Dr}/S_{Dy}	0.302 **	0.905
D_b	-0.917 **	0.958	S_{Dmir}/S_{Db}	0.961 **	0.644
D_y	0.913 **	<0.001 **	S_{Dmir}/S_{Dr}	0.483 **	0.790
D_r	-0.962 **	0.562	$(R_g - R_r)/(R_g + R_r)$	-0.927 **	0.186
D_{mir}	-0.192	0.102	$(D - H)/(D + H)$	-0.772 **	<0.001 **
S_{Db}	-0.894 **	0.959	$(S_{Dr} - S_{Db})/(S_{Dr} + S_{Db})$	-0.497 **	0.358
S_{Dy}	0.931 **	0.647	$(S_{Dr} - S_{Dy})/(S_{Dr} + S_{Dy})$	-0.818 **	0.684
S_{Dr}	-0.964 **	<0.001 **	$(S_{Dmir} - S_{Db})/(S_{Dmir} + S_{Db})$	0.075 **	0.794
S_{Dmir}	0.929 **	0.003 **	$(S_{Dmir} - S_{Dr})/(S_{Dmir} + S_{Dr})$	0.445 **	0.020 *

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

3.2.2 监测模型的建立与精度验证 以这5个特征参数为变量,分别建立多元线性回归模型、指数模型、二次函数模型和三次函数模型,并进行精度验证(表5),其中,多元线性回归模型的精度最高(拟合 $R^2 = 0.958$, 拟合 $RMSE = 0.260$; 预测 $R^2 = 0.948$, 预测 $RMSE = 0.265$); 指数模型中,以 $(D - H)/(D + H)$ 为输入变量的模型 $y = -2.264E - 5e^{(11.963x_3)} + 4.043$ 的精度最高(拟合 $R^2 = 0.954$, 拟合 $RMSE =$

0.258; 预测 $R^2 = 0.926$, 预测 $RMSE = 0.293$); 二次函数模型中,以 S_{Dr} 为输入变量的模型 $y = -3.733x_1 - 0.1005x_1^2 + 4.403$ 的精度最高(拟合 $R^2 = 0.924$, 拟合 $RMSE = 0.333$; 预测 $R^2 = 0.904$, 预测 $RMSE = 0.315$); 三次函数模型中,以 S_D 为输入变量的模型 $y = 2.595x_1 - 16.444x_1^2 + 10.968x_1^3 + 3.941$ 的精度高(拟合 $R^2 = 0.951$, 拟合 $RMSE = 0.251$; 预测 $R^2 = 0.939$, 预测 $RMSE = 0.278$)。

表5 危害程度监测模型($n = 50$)及检验($n = 30$)Table 5 Monitoring models ($n = 50$) and validation ($n = 30$) of damage levels

检测模型 Detection models	回归方程 Regression equations	拟合精度 Fitted precision		预测精度 Predicted precision	
		R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$
多元线性回归模型 Multiple linear model	$y = -7.720x_1 + 1.275x_2 + 1.251x_3 - 4.835x_4 + 1.135x_5 + 6.632$	0.958	0.260	0.948	0.265
指数模型 Exponential model	$y = 440.893e^{(-0.009x_1)} - 436.477$	0.924	0.333	0.904	0.327
	$y = -5.308e^{(-1.311x_2)} + 5.821$	0.842	0.480	0.921	0.305
	$y = -2.264E - 5e^{(11.963x_3)} + 4.043$	0.954	0.258	0.926	0.293
	$y = 866.547e^{(0.004x_4)} - 865.887$	0.829	0.499	0.849	0.323
	$y = 1.351e^{(-12.820x_5)} + 2.912$	-0.016	1.217	-0.026	0.038
二次函数模型 Quadratic model	$y = -3.733x_1 - 0.1005x_1^2 + 4.403$	0.924	0.333	0.904	0.315
	$y = 6.689x_2 - 2.951x_2^2 + 0.502$	0.846	0.474	0.931	0.284
	$y = 5.515x_3 - 7.558x_3^2 + 3.459$	0.842	0.480	0.832	0.409
	$y = 4.967x_4 - 1.067x_4^2 + 0.834$	0.834	0.492	0.852	0.351
	$y = -6.561x_5 + 8.038x_5^2 + 3.720$	0.330	0.988	0.216	0.454
三次函数模型 Cubic model	$y = 2.595x_1 - 16.444x_1^2 + 10.968x_1^3 + 3.941$	0.951	0.251	0.939	0.278
	$y = 3.089x_2 + 5.897x_2^2 - 5.898x_2^3 + 0.805$	0.851	0.460	0.949	0.245
	$y = -6.989x_3 + 22.830x_3^2 - 19.076x_3^3 + 4.289$	0.917	0.344	0.935	0.272
	$y = -1.666x_4 + 14.780x_4^2 - 10.183x_4^3 + 1.020$	0.858	0.449	0.892	0.337
	$y = -23.517x_5 + 48.348x_5^2 - 26.386x_5^3 + 5.443$	0.476	0.864	0.361	0.544

注: y 代表云南切梢小蠹的危害程度预测值, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 分别代表 $S_{Dr}, D_y, (D - H)/(D + H), S_{Dmir}, (S_{Dmir} - S_{Dr})/(S_{Dmir} + S_{Dr})$ 。

3.2.3 云南切梢小蠹危害程度定量判定规则的建立 根据多元线性回归模型、指数模型、二次函数模型和三次函数模型分别计算50个建模样本的预测

值以及各模型不同危害程度的平均值和平均值的中间值,建立云南切梢小蠹危害程度定量判定规则,并使用验证样本进行精度验证(表6)。根据4个模型

建立的判定规则检测精度都在80%以上,其中,多元线性回归模型的判定规则精度最高,达到93.333%。最佳定量判定规则为健康(<1.589)、轻

度受害[1.589, 2.465)、中度受害[2.465, 3.381)、重度受害(≥ 3.381),可有效检测云南切梢小蠹的危害程度。

表6 云南松切梢小蠹危害等级判别规则及检测精度

Table 6 The judgement rules and precision of different Tomicus damage levels

检测模型 Detection model	危害等级 Detection levels	健康云南松 Healthy	轻度危害 Light	中度危害 Moderate	重度危害 Severe	检测精度 Precision/%
多元线性回归模型 Multiple linear	平均值(Mean) 判定规则(Rules)	1.039 <1.589	2.139 [1.589, 2.465)	2.792 [2.465, 3.381)	3.969 ≥ 3.381	93.333
指数模型 Exponential	平均值(Mean) 判定规则(Rules)	1.101 <1.598	2.096 [1.598, 2.364)	2.633 [2.364, 3.309)	3.984 ≥ 3.309	80.000
二次函数模型 Quadratic	平均值(Mean) 判定规则(Rules)	1.060 <1.680	2.301 [1.680, 2.441)	2.581 [2.441, 3.261)	3.940 ≥ 3.261	80.000
三次函数模型 Cubic	平均值(Mean) 判定规则(Rules)	1.048 <1.628	2.207 [1.628, 2.399)	2.591 [2.399, 3.283)	3.974 ≥ 3.283	86.667

4 讨论

植被的光谱反射率和光谱一阶微分可有效反映病虫害危害程度。Xie等^[27]研究番茄叶片灰霉病发现,随接种时间的增加,在绿波段和近红外波段,光谱反射率和光谱一阶微分降低,且一阶微分曲线在红边(680~780 nm)存在“蓝移”现象。窦玉青等^[28]研究烤烟发病叶片发现,随病情程度的增加,绿波段和近红外波段的光谱反射率和光谱一阶微分增加,一阶微分曲线在红边(670~750 nm)存在“蓝移”现象。本研究发现,随着云南切梢小蠹危害程度的加重,光谱反射率和光谱一阶微分降低,一阶微分曲线在红边(680~760 nm)存在“蓝移”现象。这说明病虫害的危害程度可以通过光谱反射率和光谱一阶微分得到有效反映。

高光谱特征参数被广泛用于病虫害监测^[29-30]和植被生化参数^[31]估算。沈文颖等^[30]采用小麦叶片高光谱参数MCARI、PSRI、VARI_{green}和AI对小麦白粉病严重程度进行估算,取得了较好拟合效果,决定系数为0.77~0.82,标准误差为9.34~10.14。本研究使用的 S_{Dr} 、 D_y 、 $(D-H)/(D+H)$ 、 S_{Dmir} 、 $(S_{Dmir}-S_{Dr})/(S_{Dmir}+S_{Dr})$ 等5个高光谱特征参数,与云南切梢小蠹危害程度显著相关,以此建立的监测模型的预测精度都达到了0.904以上。说明使用高光谱特征参数监测病虫害危害是可行的。

本研究建立了云南切梢小蠹危害程度监测模型和判定规则。以5个特征参数构建的多元线性回归模型的监测精度最高,实测值与预测值的拟合决定系数为0.948,判定规则的精度达93.333%。许章

华等^[32]采用空间距离法、相关系数法及光谱角制图法分别建立松毛虫危害等级定量判定规则,发现空间距离法的判定规则最优。说明建立危害程度监测模型和定量判定规则可实现病虫害的有效监测。

成像光谱遥感获取的光谱数据为一个感兴趣区域的平均光谱反射率,而非成像光谱遥感获取的对象光谱数据通常取几个点的光谱数据做平均,具有随机性,数据质量受光谱测定点的影响大。白雪琪等^[33]使用ASD获取油松针叶的光谱数据,并测定叶绿素和含水量,构建的最佳油松毛虫危害程度监测模型的 R^2 为0.786。本研究的最佳监测模型的 R^2 为0.948,且是在没有测定生化参数的情况下建立的模型,大大提高了模型监测精度,同时达到了简化实验方案、节约时间和成本的目的,但要验证监测模型和判定规则的适用性仍需进行大量的测试和检验。

5 结论

本研究在云南切梢小蠹的蛀梢期测定了云南松枝梢的室内光谱反射率,建立了云南切梢小蠹危害监测模型和判定规则。研究发现,随危害程度的加重,在绿波段(510~560 nm)和近红外波段(720~1036 nm)光谱反射率逐渐降低;随危害程度加重,一阶微分曲线在红边(680~760 nm)的峰值向短波方向移动,出现“蓝移”;多元线性回归模型的拟合效果最优,拟合 $R^2=0.958$,预测 $R^2=0.948$, $RMSE=0.265$;根据多元线性回归模型建立的云南切梢小蠹危害程度判定规则的精度达93.333%,可有效判定云南切梢小蠹危害程度。研究结果对于利用成像

高光谱遥感技术进行森林病虫害的地面监测具有重要意义,为后续研究无人机遥感、卫星遥感数据的光谱信息与地面遥感数据光谱信息的关系奠定了一定的基础。

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] 杨光照. 石林县云南松纵坑切梢小蠹危害及其综合治理措施[J]. 林业调查规划, 2007, 32(3): 140-143.
- [3] 邓 樵. 基于 TVDI 的石林县云南松切梢小蠹遥感监测研究[D]. 北京:北京林业大学, 2016.
- [4] 童庆禧, 郑兰芬, 王晋年, 等. 湿地植被成象光谱遥感研究[J]. 遥感学报, 1997, 1(1): 50-57.
- [5] 王利民, 刘 佳, 邵 杰, 等. 基于高光谱的春玉米大斑病害遥感监测指数选择[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 170-177.
- [6] 尹小君, 宁 川, 张永才. 加工番茄早疫病高光谱遥感识别研究[J]. 遥感信息, 2015, 30(2): 94-98.
- [7] Das P K, Laxman B, Rao S V C K, et al. Monitoring of bacterial leaf blight in rice using ground-based hyperspectral and LISS IV satellite data in Kurnool, Andhra Pradesh, India [J]. International Journal of Pest Management, 2015, 61(4): 359-368.
- [8] 乔红波, 师 越, 郭 伟, 等. 利用近地成像高光谱遥感对小麦全蚀病的监测[J]. 植物保护学报, 2015, 42(3): 475-476.
- [9] 胡耀华, 平学文, 徐明珠, 等. 高光谱技术诊断马铃薯叶片晚疫病的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(2): 515-519.
- [10] 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.
- [11] Ju Y, Pan J, Zhang H, et al. Detection of *Bursaphelenchus xylophilus* infection in *Pinus massoniana* from hyperspectral data[J]. Nematology, 2014, 16(10): 1197-1207.
- [12] Ismail R, Mutanga O. Discriminating the early stages of *Sirex noctilio* infestation using classification tree ensembles and shortwave infrared bands[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(15): 4249-4266.
- [13] 胡荣明, 魏 曼, 竞 霞, 等. 基于成像高光谱的苹果树叶片病害区域提取方法研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2012, 40(8): 95-99.
- [14] Rullan-Silva C D, Olthoff A E, de la Mata J A D, et al. Remote Monitoring of Forest Insect Defoliation-A Review[J]. Forest Systems, 2013, 22(3): 377-391.
- [15] 梁军生, 陈晓鸣, 王健敏, 等. 受小蠹虫不同阶段为害的云南松光合生理反应分析[J]. 林业科学研究, 2009, 22(3): 407-412.
- [16] 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.
- [17] Lieutier F, Ye H, Yart A. Shoot damage by *Tomicus* sp. (Coleoptera: Scolytidae) and effect on *Pinus yunnanensis* resistance to subsequent reproductive attacks in the stem[J]. Agricultural and Forest Entomology, 2003, 5(3): 227-233.
- [18] Chen P, Lu J, Haack R A, et al. Attack pattern and reproductive ecology of *Tomicus brevipilosus* (Coleoptera: Curculionidae) on *Pinus yunnanensis* in Southwestern China[J]. Journal of Insect Science, 2015, 15(1): 1-8.
- [19] Savitzky A, Golay M. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures [J]. Analytical Chemistry, 1964, 36(8): 1627-1639.
- [20] 许章华, 刘 健, 余坤勇, 等. 松毛虫危害马尾松光谱特征分析与等级检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(2): 428-433.
- [21] 伍 南. 基于地面高光谱遥感的南方人工林主要病害监测研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2012.
- [22] 苏红军, 杜培军. 高光谱数据特征选择与特征提取研究[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(4): 288-293.
- [23] 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.
- [24] 黄明祥, 龚建华, 李 顺, 等. 松材线虫病害高光谱时序与敏感特征研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(6): 954-960.
- [25] 伍 南, 刘君昂, 周国英, 等. 基于高光谱微分指数的杉木炭疽病病情指数反演[J]. 林业科学, 2012, 48(8): 94-98.
- [26] 邢东兴, 常庆瑞. 基于光谱反射率的果树病虫害级别定量化测评——以红富士苹果树黄叶病害、红蜘蛛虫害为例[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(11): 143-148.
- [27] Xie C, Yang C, He Y. Hyperspectral imaging for classification of healthy and gray mold diseased tomato leaves with different infection severities[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 135: 154-162.
- [28] 窦玉青, 李新举, 王 梅, 等. 烤烟发病叶片高光谱特征分析[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(1): 49-52.
- [29] Shi Y, Huang W, Luo J, et al. Detection and discrimination of pests and diseases in winter wheat based on spectral indices and kernel discriminant analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 171-180.
- [30] 沈文颖, 冯 伟, 李 晓, 等. 基于叶片高光谱特征的小麦白粉病严重度估算模式[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(1): 129-137.
- [31] Sun Y, Wang Y, Xiao H, et al. Hyperspectral imaging detection of decayed honey peaches based on their chlorophyll content [J]. Food Chemistry, 2017, 235: 194-202.
- [32] 许章华, 刘 健, 陈崇成, 等. 松毛虫危害下的马尾松林冠层光谱特征可辨性分析[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(2): 41-47.
- [33] 白雪琪, 张晓丽, 张 凝, 等. 基于高光谱遥感的油松毛虫危害程度监测模型[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(11): 16-22.

(责任编辑:张 玲)