

板栗树红蜘蛛虫害无人机高光谱遥感监测研究

马书英^{1,2} 郭增长^{1,3} 王双亭¹ 张 凯²

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454003;

2. 河南工业职业技术学院城市建设学院, 南阳 473009; 3. 河南测绘职业学院, 郑州 451464)

摘要: 为了快速、高效、无损监测板栗树的红蜘蛛病虫害,以实地采集的板栗树局部感染明显叶片、感染轻重不均匀叶片、恢复中的感染叶片及不同感染程度叶片为研究对象,利用 UHD185 型高光谱相机和数码相机获取各种叶片的高光谱图像和 RGB 图像,以 RGB 图像为参考,选择各种叶片的感兴趣区,在高光谱图像上提取感兴趣区的光谱曲线,通过微分运算提取光谱曲线的绿峰、红谷、低位、红边、高位、高肩 6 种光谱特征及特征波长,利用大量实测数据分析板栗树叶各个光谱特征及特征波长随红蜘蛛病虫害危害程度的叶片级变化规律,得到识别红蜘蛛病虫害最佳的光谱特征。利用无人机(Unmanned aerial vehicle,UAV)搭载 UHD185 型相机,获取了实验区高光谱影像。结果表明,监测板栗树红蜘蛛病虫害危害程度的最佳光谱特征为红边和低位,其与红蜘蛛病虫害的决定系数均超过 0.6,当发生轻度红蜘蛛病虫害时,红边波长和低位波长出现“蓝移”,说明无人机高光谱遥感系统具有早期发现红蜘蛛病虫害的能力,可为板栗树红蜘蛛病虫害的及时治理提供科学依据。

关键词: 板栗树; 红蜘蛛虫害; 光谱特征; 无人机; 高光谱遥感

中图分类号: S127; S431 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0171-10

OSID:



Hyperspectral Remote Sensing Monitoring of Chinese Chestnut Red Mite Insect Pests in UAV

MA Shuying^{1,2} GUO Zengzhang^{1,3} WANG Shuangting¹ ZHANG Kai²

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

2. School of Urban Construction, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473009, China

3. Henan College of Surveying and Mapping, Zhengzhou 451464, China)

Abstract: In order to quickly, nondestructively and efficiently monitor the diseases and insect pests of red mite in chestnut trees, the hyperspectral images and RGB images of each leaf were collected from locally infected leaves, unevenly infected leaves, recovered infected leaves and infected leaves with different degrees of infection by using UHD185 hyperspectral camera and digital camera. The RGB images were used as reference to select the regions of interest (ROI) of each leaf. The spectral curves of ROI were extracted from the hyperspectral images, and six spectral features and characteristic wavelengths of green peak, red valley, low position, red edge, high position and high shoulder of the spectral curves were extracted by differential operation. A large number of measured data were used to analyze the leaf-level variation of the spectral characteristics and characteristic wavelengths of chestnut leaves with the damage degree of red mite pests and diseases, so as to obtain the best spectral characteristics for identifying red mite pests. After that, the hyperspectral image of the experimental area was obtained by using the UHD185 camera carried by the unmanned aerial vehicle (UAV). The results showed that the best spectral characteristics of monitoring the harm degree of Chinese chestnut red mite were low position and red edge, and the coefficient of determination between red mite and disease and pest exceeded 0.6. The blue shift of characteristic wavelength could be found in mild red mite pest by using these two characteristics, which proved that the red mite pest could be found in 14 ~ 21 d before the large-scale occurrence of red mite in chestnut tree by UAV hyperspectral remote sensing. The research

收稿日期: 2020-12-06 修回日期: 2021-01-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41871333)和智慧中原协同创新中心项目(2016A002)

作者简介: 马书英(1977—),女,博士生,河南工业职业技术学院副教授,主要从事农业遥感研究,E-mail: msy1977@163.com

通信作者: 王双亭(1962—),男,教授,主要从事摄影测量、遥感图像处理与识别、生物识别研究,E-mail: wst@hpu.edu.cn

result can provide a scientific basis for the timely management of diseases and insect pests.

Key words: Chinese chestnut tree; insect pests of red mite; spectral characteristic; unmanned aerial vehicle; hyperspectral remote sensing

0 引言

红蜘蛛病虫害是影响板栗品质与产量的主要威胁之一^[1]。据有关资料统计,近几年,仅邢台县西部太行山区坡面种植板栗已达年产4万余吨,价值5亿元左右。而因红蜘蛛病虫害造成的当年损失约占5%,病情严重时,不仅当年减产、绝收,而且影响到次年整株颗粒无收。传统的监测林业、农业病虫害的方法主要采取林间或田间定点监测和随机调查等方法,在病虫害发生较早时期,仅凭肉眼进行观察,这种方法费时、费力、效率低,也极易造成农药喷洒过量,增加对环境的污染。

近年来,高光谱与高光谱成像技术在农林业信息采集与检测方面的应用日益广泛。利用高光谱成像技术可以实现对农作物病害的早期识别和检测,比传统检测手段更加快速、准确,并且无需使用化学试剂,可有效降低污染^[2]。

高光谱遥感技术在农作物分类识别^[3-6]、品质鉴定^[7-10]、病虫害监测^[11-15]等方面已有很多研究和不同程度的应用^[16]。伍南等^[17]为实现对杉树炭疽病的早期检测预报,采用手持野外光谱辐射仪 (Analytica spectra devices, ASD) 对杉树冠层光谱进行测试,由回归分析方法获得与色素含量相关性最高的原始光谱和一阶微分波段。LAWRENCE 等^[18]从探测器-1传感器上采集高光谱图像,利用亚冠层空间分辨率高光谱图像区分道格拉斯冷杉树甲虫攻击道格拉斯冷杉,对逐步判别分析分类 (Discrim) 和回归树分析 (Classification and regression tree, CART) 的准确性进行了对比,发现 CART 在树健康类中具有最佳的可行性 (总体上为93%),通过交叉验证数据集的交叉验证,利用刀重采样技术对 CART 方法的预测精度进行估计,其总体分类准确率达到69%。文献[19-22]对马尾松受到的毛虫危害进行了研究。CALDERÓN 等^[23]利用无人机载窄带多光谱、高光谱和热相机获取叶片、冠层图像,对由土传真菌 (dahliae kleb) 引起的橄榄黄萎病 (Verticillium wilt, VW) 进行了研究。ZARCO-TEJADA 等^[24]研究表明,在症状出现之前,可由机载成像光谱和热成像中检索到的植物功能性状变化揭示橄榄树中叶缘焦枯病菌的感染情况,其检测准确性可达80%以上。胡荣明等^[25]对带病斑苹果树叶片的高光谱图像进行病斑提取与分析。郭伟

等^[26]采用无人机高光谱对冬小麦全蚀病进行了监测研究。利用高光谱技术对板栗树病虫害监测方面,王植等^[27]对高光谱在板栗病虫害监测上的应用可行性进行了探讨。文献[28-29]应用高光谱图像对板栗果实进行了品质鉴定和霉变监测。

本文利用高光谱成像技术采集板栗树健康叶片、受“红蜘蛛”不同程度侵染叶片的高光谱图像,及实验区无人机高光谱图像,通过提取各光谱曲线的光谱特征,定量和定性分析各光谱特征对红蜘蛛虫害的响应规律,探究板栗树红蜘蛛虫害的诊断性光谱特征,以期实现利用无人机高光谱遥感技术预警早期红蜘蛛虫害。

1 实验数据采集

1.1 叶片样本采集

叶片采样时间为2018年4月下旬至2018年8月下旬,采样地点为河北省邢台县西部太行山区板栗树种植区。共选取20棵板栗树作为叶片来源,对每棵树进行编号,分别在树干处粘贴标签,注明编号、品种、树龄、地点、时间等信息,如图1a所示。根据板栗树的生长变化情况,在有经验的技术人员指导下按一定的时间间隔进行采样,初期采样间隔较小,3~5 d 一次,中后期基本固定在约10 d 一次。方法为:根据树龄、植株大小及叶片疏密长势等状况,选取每棵树上受红蜘蛛危害较严重的区域,采集5~10片染病树叶;同时选取该树未受红蜘蛛危害的区域,采集5~10片健康树叶;采集未感染病虫害的板栗树每株5~20片。每棵树叶片采集后立刻用保鲜袋装好,贴上相应标签,记录样株编号、采样日期、时间、数量 (病叶+健康叶) 及天气等信息,如图1b所示。回到室内立刻放进保鲜柜保存。



图1 样株及样本

Fig.1 Sample plant and sample leaves

对20棵树共进行18次摘叶采样,得到健康和染病叶片共1000余片,除特殊说明外,本文样本采集时间为2018年6月21日。将每片叶片用薄双面

胶粘贴在纯黑色不透明硬纸片上,并单独编号,标明实验日期、样本号、有无病虫害等信息,如图 1c 所示。

1.2 叶片高光谱图像采集

利用德国 Cubert 公司生产的 UHD185 型相机采集实验叶片的高光谱影像,其技术参数如表 1 所示。该相机可在 0.001 s 内得到波段 450 ~ 950 nm 范围内 125 个通道的数据立方体。由于在波段 450 ~ 500 nm 和 900 ~ 950 nm 范围内,光谱曲线的信噪比相对较低,所以,研究选取 500 ~ 900 nm 之间作为高光谱图像数据的分析处理波段。图像采集时,用两个 (200 W、120 V、250 W、120 V) 可调节的卤素标准光源照明。

表 1 高光谱传感器技术参数

Tab.1 Technical parameters of hyperspectral sensor

参数	数值
光谱波段/nm	450 ~ 950
光谱分辨率/nm	8
光谱采样间隔/nm	4
波长精度 Δλ/nm	±2.5
光谱通道	125
数字分辨率/位	12
Cube 分辨率/(像素 × 像素)	1 000 × 1 000

采集叶片图像前,先进行黑、白校正,扫描两次标准白板,得到全白标定图像;盖上镜头盖,得到全黑标定图像。然后将样品放在标准光源下的纯黑棉布上,手动点击按钮拍摄叶片,获取高光谱图像。使用 Cubert 软件简单预处理后融合输出,图像处理的进一步工作在 ENVI 5.3 软件平台完成。

1.3 原始光谱曲线获取

参考数码相机的 RGB 图像,在对应的高光谱图像上提取叶片相应部位感兴趣区域,按照 4 种类型:①局部感染分明的叶片。按照感染部位、健康部位及混合全叶分别提取。②感染轻、重不均匀的叶片。按照轻度部位、重度部位及全叶混合分别提取。③恢复中的感染叶片。按照正在恢复、尚未恢复及全叶混合分别提取。④健康叶片、轻度感染、中度感染、重度感染的叶片分别提取,分别计算出感兴趣区域的平均波谱。

1.4 光谱特征提取

利用 Matlab 平台编程实现对原始光谱曲线的特征提取。分别通过一阶微分为 0 提取绿峰、红谷、高肩,二阶微分为 0 提取红边,一阶微分为 1 提取低位、高位。低位是红谷与红边之间曲线切线斜率为 1 的点,高位为红边与高肩之间曲线切线斜率为 1 的点。

2 光谱特征分析

2.1 局部感染明显叶片光谱特征分析

对局部感染明显的叶片选取感兴趣区域(图 2),计算其平均波谱曲线,并提取 6 种光谱特征,如图 3 所示,其中绿峰、红谷、高肩用蓝点表示,红边采用红点,低位、高位采用黑点(下同)。

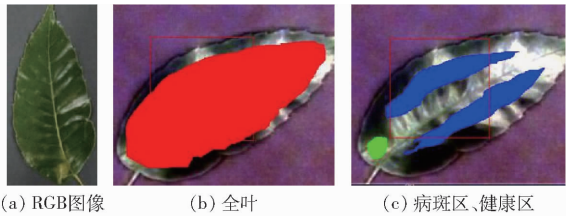


图 2 局部感染明显的叶片感兴趣区域

Fig.2 Regions of interest of leaves with obvious local infection

在绿光波段 540 ~ 550 nm 处,反射率光谱曲线呈现波峰,波峰特征波长向长波方向移动,发生“红移”,“红移”量由大到小为病斑区域、全叶平均、健康区域。“红移”量从健康波长 543.7 nm 到感染波长 548.6 nm,移动值为 4.9 nm。

在红光波段 640 ~ 670 nm 处,反射率光谱曲线呈现波谷,波谷“凹陷”程度由大到小为病斑区域、全叶平均、健康区域,“红谷”出现 3 个,取波长平均值。特征波长向长波方向移动,发生“红移”,“红移”量由大到小为病斑区域、全叶平均、健康区域。“红移”量从健康波长 657.3 nm 到感染波长 667.2 nm,移动值为 9.9 nm。

在波段 670 ~ 680 nm,由红谷向红边转折的低位处,波谱反射率由小到大为病斑区域、全叶平均、健康区域。特征波长向短波方向移动,发生“蓝移”,“蓝移”量由大到小为病斑区域、全叶平均、健康区域。“蓝移”量从健康波长 677.1 nm 到感染波长 673.5 nm,移动值为 3.6 nm。

在波段 700 ~ 720 nm,反射率光谱曲线线性急剧上升,红边位置反射率由大到小为病斑区域、全叶平均、健康区域,特征波长向短波方向移动,发生“蓝移”,“蓝移”量由大到小为病斑区域、全叶平均、健康区域。“蓝移”量从健康波长 712.5 nm 到感染波长 703.9 nm,移动值为 8.6 nm。

在波段 750 ~ 800 nm,反射率光谱曲线由急剧转为缓和上升,转折点为高位,其反射率由小到大为病斑区域、全叶平均、健康区域,特征波长向短波方向移动,发生“蓝移”,“蓝移”量由大到小为病斑区域、健康区域、全叶平均。“蓝移”量从健康波长 778.4 nm 到感染波长 764.6 nm,移动值为 13.8 nm。

在波段 820 ~ 850 nm,反射率光谱曲线呈现波

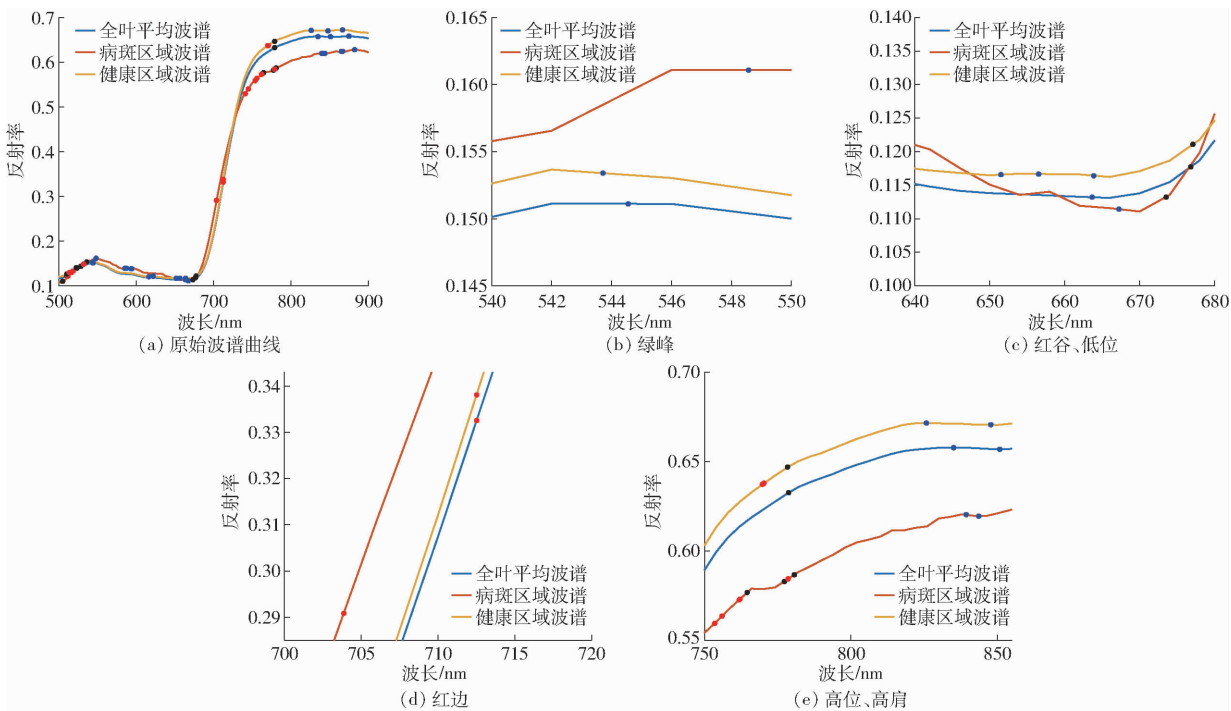


图 3 局部感染明显叶片各光谱特征

Fig. 3 Characteristic points of locally infected leaves

峰,波峰由小到大为病斑区域、全叶平均、健康区域,特征波长向长波方向移动,发生“红移”,“红移”量由大到小为病斑区域、全叶平均、健康区域。“红移”量从健康波长 825.8 nm 到感染波长 839.4 nm,移动值为 13.6 nm。

2.2 感染不均匀叶片光谱特征分析

感染不均匀叶片感兴趣区域如图 4 所示,其光谱特征如图 5 所示。

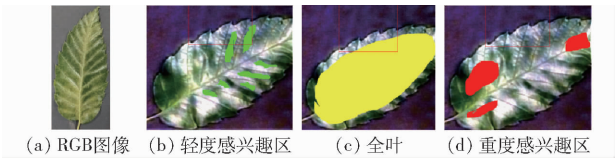


图 4 感染不均匀叶片的感兴趣区域

Fig. 4 Region of interest of infected non-uniform leaf

在绿光波段 540 ~ 550 nm 处,波峰由大到小为重度感染、全叶平均、轻度感染,特征波长向长波方向移动,发生“红移”,“红移”量由大到小为重度感染、全叶平均、轻度感染。从轻度感染波长 544.1 nm 到重度感染波长 546.8 nm,移动值为 2.7 nm。

在红光波段 640 ~ 670 nm 处,波谷“凹陷”程度由大到小为重度感染、全叶平均、轻度感染,特征波长向长波方向移动,发生“红移”,“红移”量由大到小为重度感染、全叶平均、轻度感染。“红移”量从轻度感染波长 645.2 nm 到重度感染波长 659.2 nm,移动值为 14 nm。

在波段 670 ~ 680 nm 低位处,特征波长向短波方向移动,发生“蓝移”,“蓝移”量由大到小为重度

感染、全叶平均、轻度感染。“蓝移”量从轻度感染波长 673.8 nm 到重度感染波长 671.5 nm,移动值为 2.3 nm。

在波段 700 ~ 720 nm 红边处,红边位置反射率由大到小为重度感染、全叶平均、轻度感染,特征波长向短波方向移动,发生“蓝移”,“蓝移”量由大到小为重度感染、全叶平均、轻度感染。“蓝移”量从轻度感染波长 714.1 nm 到重度感染波长 701.7 nm,移动值为 12.4 nm。

在波段 750 ~ 800 nm 高位处,其反射率由小到大为重度感染、全叶平均、轻度感染,特征波长向短波方向移动,发生“蓝移”,“蓝移”量由大到小为重度感染、全叶平均、轻度感染。“蓝移”量从轻度感染波长 775.4 nm 到重度感染波长 759.8 nm,移动值为 15.6 nm。

在波段 820 ~ 850 nm 高肩处,波峰由小到大为重度感染、全叶平均、轻度感染,特征波长向长波方向移动,发生“红移”,“红移”量由大到小为重度感染、全叶平均、轻度感染。“红移”量从轻度感染波长 841.7 nm 到重度感染波长 847.0 nm,移动值为 5.3 nm。

2.3 恢复中感染叶片光谱特征分析

叶片经过用药或彻底雨淋后,“红蜘蛛”消灭一次,叶片组织开始恢复,其波谱曲线也发生相应变化。以 2018 年 6 月 12 日采样叶片为例。

恢复中感染叶片感兴趣区域如图 6 所示,其光谱特征如图 7 所示。

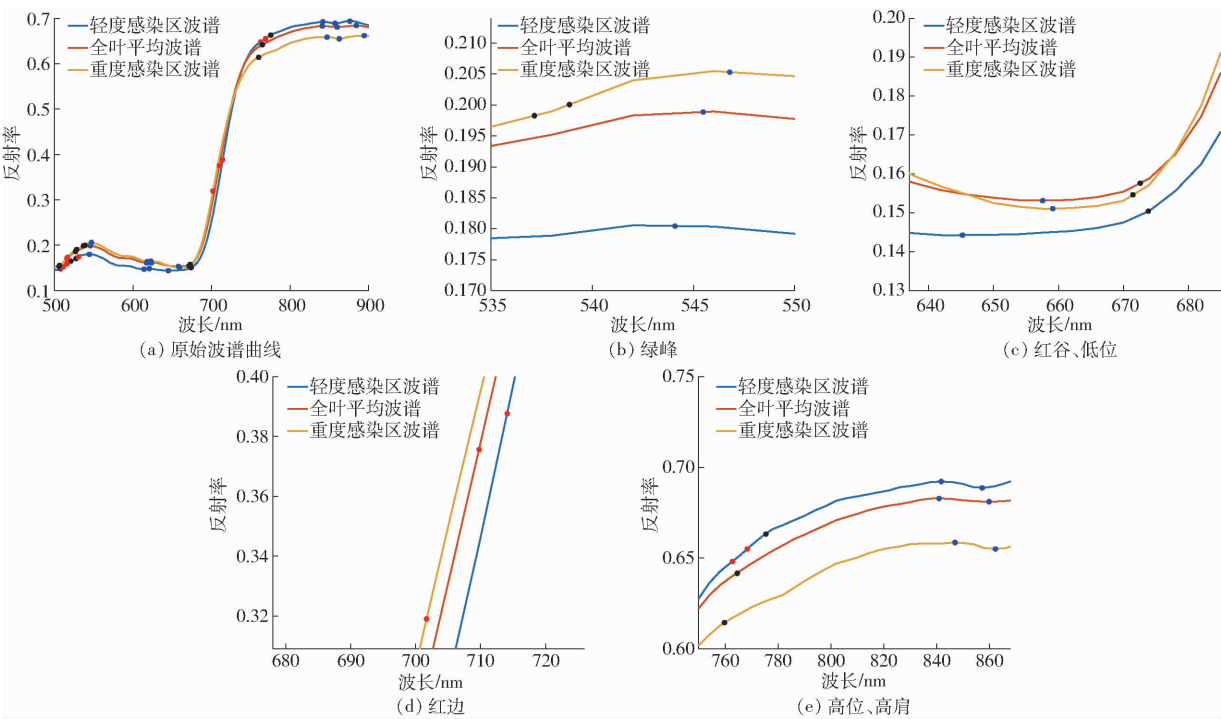


图 5 感染不均匀叶片各光谱特征

Fig. 5 Characteristic points of infected non-uniform leaves

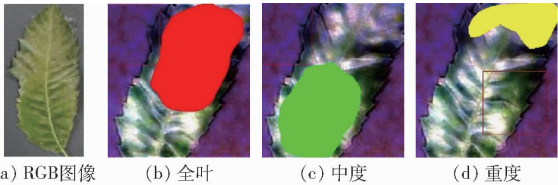


图 6 恢复中感染叶片的感兴趣区域

Fig. 6 Regions of interest in recovering infected leaves

在绿峰波段 540 ~ 560 nm 处,波峰由小到大为重度感染、全叶平均、恢复中,特征波长由大到小为重度感染、全叶平均、恢复中。从正在恢复中波长 546.8 nm 到尚未恢复波长 550.1 nm,移动值为 3.3 nm。

在红谷波段 650 ~ 670 nm 处,波谷“凹陷”程度

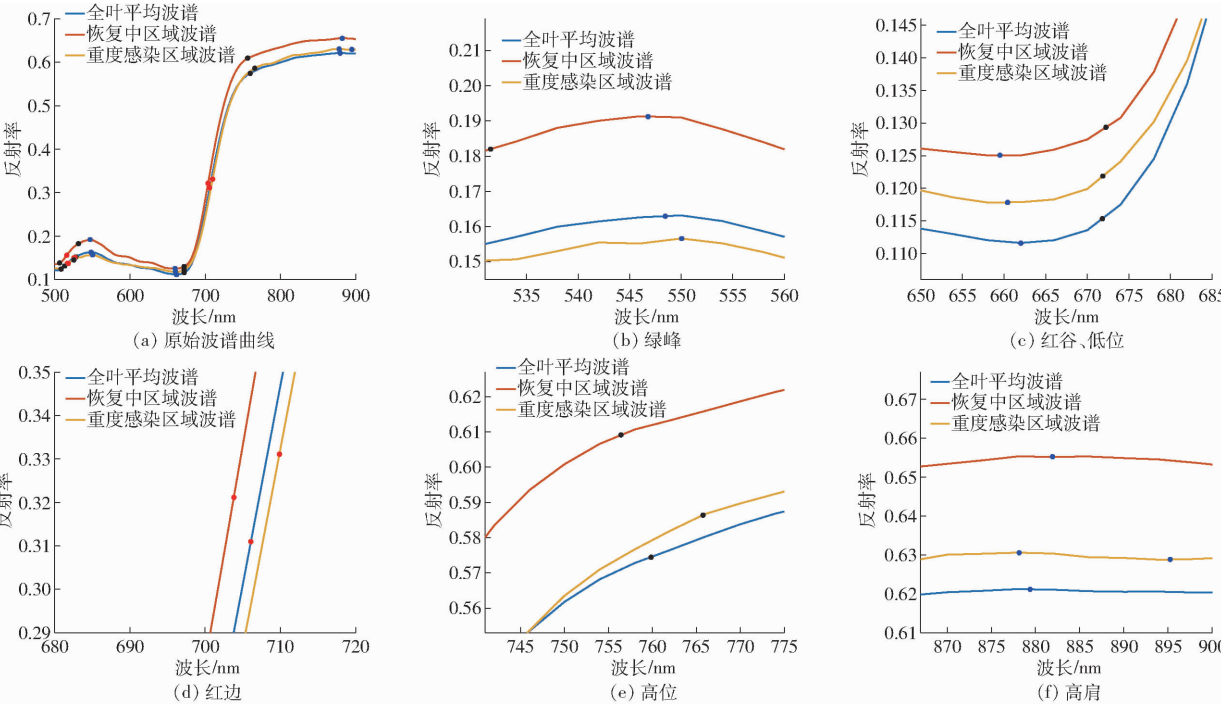


图 7 恢复中感染叶片各光谱特征

Fig. 7 Characteristic points of infected leaf in recovering

由大到小为全叶平均、重度感染、恢复中,特征波长由大到小为全叶平均、重度感染、恢复中。三者之间最大差值为2.5 nm。

在低位波段 670 ~ 680 nm 处,特征波长由大到小为恢复中、重度感染、全叶平均。三者之间最大差值为 0.4 nm。

在红边波段 700 ~ 720 nm 处,红边位置反射率由大到小为重度感染、恢复中、全叶平均,特征波长由大到小为重度感染、全叶平均、恢复中。从正在恢复中波长 703.8 nm 到尚未恢复波长 709.9 nm,移动值为6.1 nm。

在高位波段 750 ~ 800 nm 处,其反射率由小到大为

全叶平均、重度感染、恢复中,特征波长由大到小为重度感染、全叶平均、恢复中。从正在恢复中波长 756.4 nm 到尚未恢复波长 765.7 nm,移动值为 9.3 nm。

在高肩波段 870 ~ 910 nm 处,波峰由大到小为恢复中、重度感染、全叶平均,重度感染部分特征波长不唯一,出现 3 个,取最小波长值,则特征波长由大到小为恢复中、全叶平均、重度感染。从正在恢复中波长 881.9 nm 到尚未恢复波长 878.2 nm,移动值为 3.7 nm。

2.4 不同感染程度叶片光谱特征分析

以 2018 年 6 月 21 日采样 1#10 样株高光谱图像数据为例进行研究说明,其为具有代表性的 10 片不同程度感染叶片。样本编号为 1 ~ 10 (图 8)。

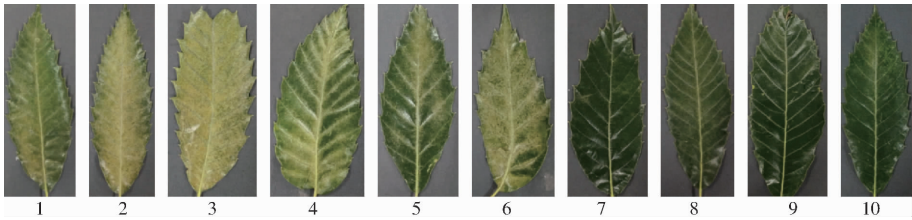


图 8 1#10 样株各叶片样本
Fig. 8 Leaf samples of sample No. 1#10

由图 9 可知,绿峰数据相对单一,取波段 540 ~ 550 nm 之间的极值点波长。红谷存在多个,在波段 640 ~ 670 nm 之间选择。低位数据单一,取值波段 670 ~ 680 nm 之间的变速点波长。红边数据相对单一,取值波段 700 ~ 720 nm 之间的转折点波长。高位存在多个,取值波段 760 ~ 790 nm 之间的波长较小变速点的波长。高肩存在多个,取值波段 830 ~ 890 nm 之间较小高肩的波长。

对各特征波长按照一定顺序进行相应图像排列(图 10)。绿峰特征波长从小到大进行排列,呈现出较优由轻到重不同感染程度规律,表明了感染“红蜘蛛”后其具有“红移”现象;感染初期样本 8 排到了尚未感染样本 7 和 9 前面,说明在绿峰处具有监测板栗树病虫害初期阶段感染的敏感性。红谷特征波长从小到大进行排列,呈现出较好的由轻到重不同感染程度规律,表明了感染“红蜘蛛”后其具有

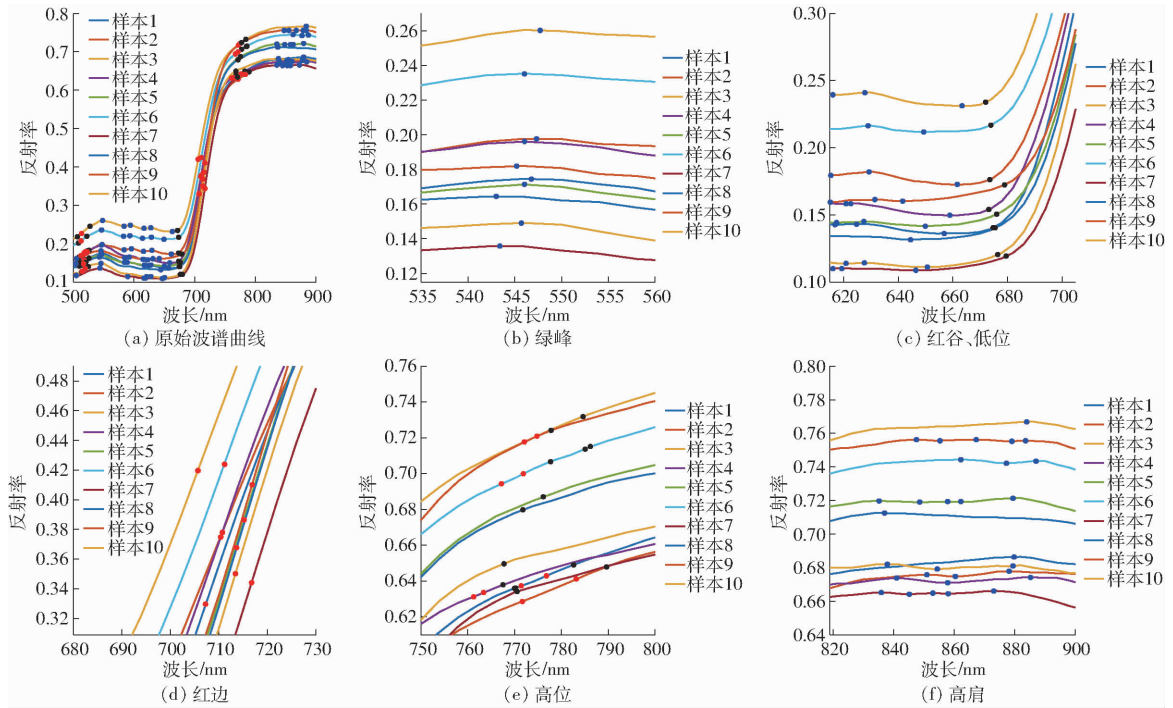


图 9 1#10 样株叶片原始波谱曲线各光谱特征

Fig. 9 Characteristic points of original spectrum curve of leaves of sample No. 1#10

“红移”现象；感染初期样本 8 排到了尚未感染样本 7 和 9 之间，是感染初期阶段回到感染状态的一个过渡点。低位特征波长从大到小进行排列，将未感染与已感染叶片分离开来，呈现出较优由轻到重不同感染程度规律，同时也证明了感染“红蜘蛛”后其具有“蓝移”现象。红边特征波长从大到小进行排列，同样能够严格地将未感染与已感染叶片分离开来，总体上呈现出较好的由轻到重不同感染程度规律，并且证明了感染“红蜘蛛”后其具有“蓝移”现象。高位特征波长

从大到小进行排列，呈现出较为凌乱的感染规律。高肩特征波长从小到大进行排列，个别样本位置不太合适，但基本能够呈现出由轻到重不同感染程度规律。

由分析可知，叶片级光谱特征中的绿峰、红谷、低位和红边都能较为准确地分辨叶片感染红蜘蛛病虫害的程度，而高位和高肩辨识红蜘蛛危害程度的能力较弱，在实际应用中可以排除。但在冠层级红蜘蛛病虫害识别中，绿峰、低位、红谷、红边表现如何，仍需做进一步研究。

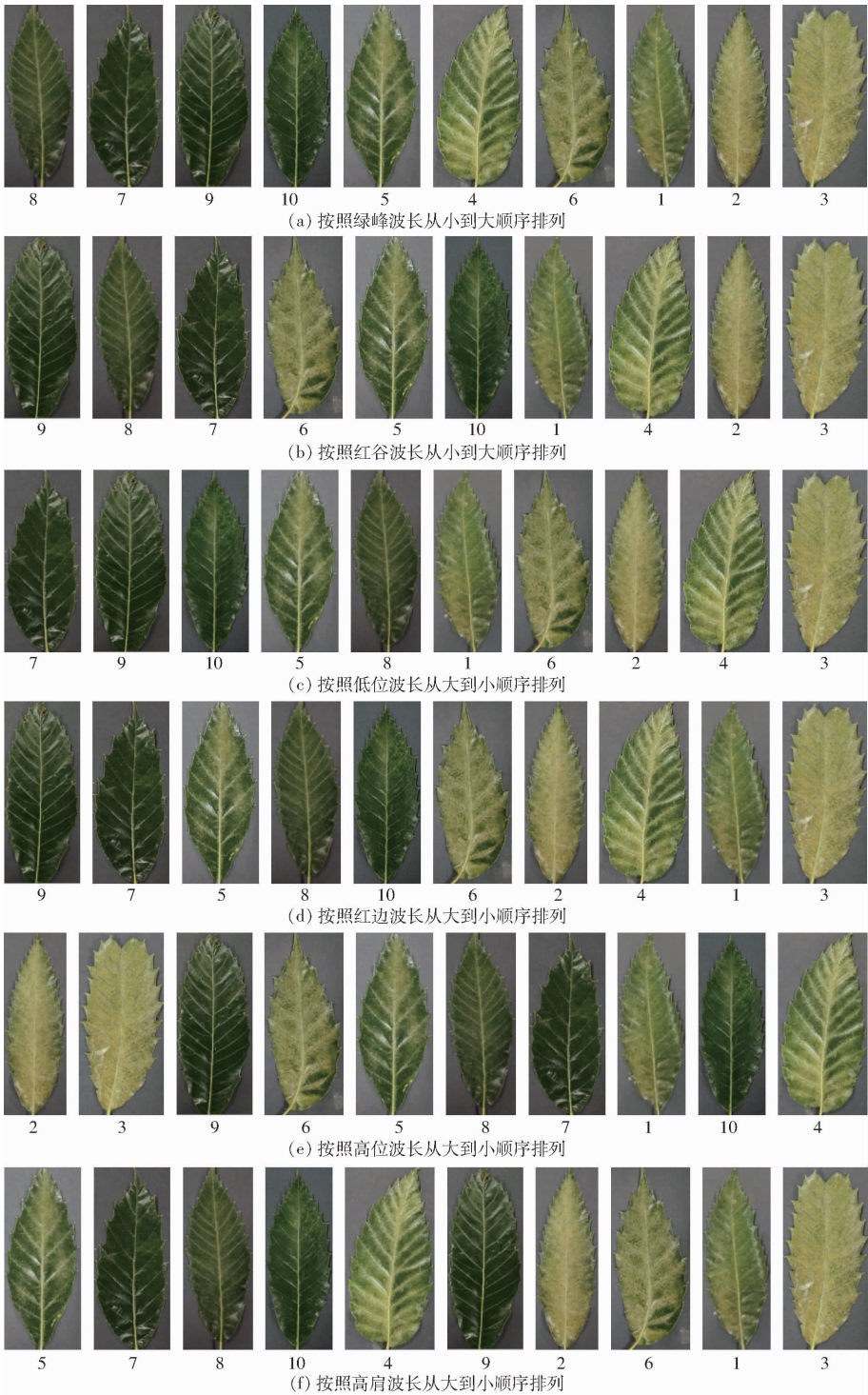


图 10 按照 6 个光谱特征对 10 个样本图像进行的排序

Fig. 10 Sort 10 sample images according to six spectral features

3 无人机高光谱影像光谱特征分析

3.1 实验区实地调查

本研究于2018年5月20日,利用大疆 M600 型无人机搭载 UHD185 型高光谱相机对实验区进行了高光谱遥感,获取了实验区 657 幅高光谱图像,经拼接后得到实验区完整的高光谱影像,其波段组合后的真彩色影像如图 11 所示。同时,对实验区进行红蜘蛛病虫害实地调查,确定每个实验样株的红蜘蛛病虫害等级。本次实验将板栗树冠层的红蜘蛛病虫害感染程度划分为健康(未感染)、轻度感染、中度感染、重度感染 4 个等级,并对每个等级分别按 0、0~25%、25%~50%、50%~100% 的病斑所占叶面积百分比进行赋值。每级感染程度的实地情况如图 12 所示。

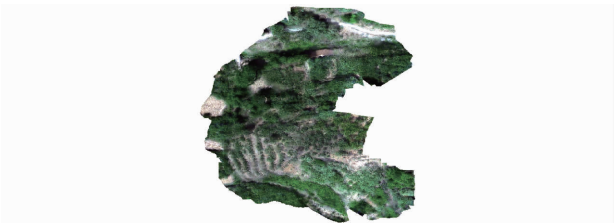


图 11 实验区高光谱影像
Fig. 11 Hyperspectral image of experiment area

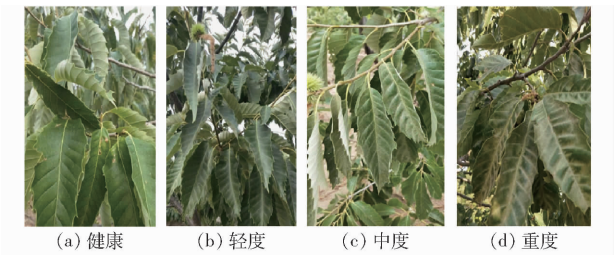


图 12 感染程度实况
Fig. 12 Real situation of infected degree

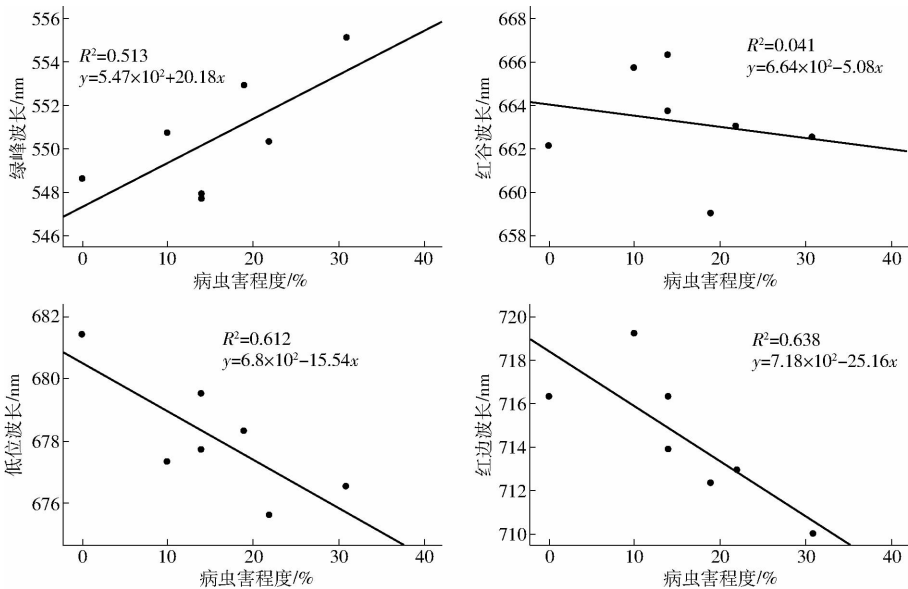


图 13 光谱特征与红蜘蛛感染程度的相关性
Fig. 13 Correlation between pest degree and spectral feature

3.2 光谱特征与红蜘蛛病虫害相关性分析

在实验区无人机高光谱影像上,提取每个样株冠层的绿峰、低位、红谷和红边 4 个光谱特征,结合样株的红蜘蛛感染程度,对这 4 个特征与红蜘蛛病虫害的相关性进行数值分析,结果如图 13 所示。

从图 13 可以看出,绿峰与虫害程度呈现正相关关系,决定系数 R^2 为 0.513,关系式为 $y = 5.47 \times 10^2 + 20.18x$,基本呈线性关系;红谷与虫害程度有较弱的相关性,决定系数 R^2 为 0.041,接近零,其线性关系式为 $y = 6.64 \times 10^2 - 5.08x$,低位与虫害程度呈现负相关关系,决定系数 R^2 为 0.612,线性关系式为 $y = 6.8 \times 10^2 - 15.54x$,有较强的相关性;红边与虫害程度呈现较强负相关关系,决定系数 R^2 为 0.638,线性关系式为 $y = 7.18 \times 10^2 - 25.16x$ 。

从决定系数可以看出(图 13),各个特征和红蜘蛛危害程度的相关性从高到低依次为红边、低位、绿峰、红谷,且红边、低位与红蜘蛛病虫害的决定系数大于 0.6,说明通常情况下引起红边、低位变化的主要原因是板栗树红蜘蛛病虫害的发生,可以由此判断板栗树是否发生红蜘蛛病虫害,以及其危害程度。绿峰的决定系数为 0.513,其与红蜘蛛病虫害发生的相关性不是太强,说明绿峰在检测红蜘蛛病虫害的实际应用中并不能得到可靠的结果。红谷的决定系数仅有 0.041,说明其与红蜘蛛病虫害没有直接的因果关系。拟合直线斜率的绝对值是反映光谱特征对红蜘蛛病虫害敏感性的一个重要指标。从图 13 可以看出,红边的直线斜率绝对值为 25.16,绿峰、低位、红谷则分别为 20.18、15.54、5.08,斜率绝对值越大越有利于探测板栗树的红蜘蛛病虫害,说明红边对红蜘蛛病虫害敏感程度最高,其次为绿峰、

低位和红谷。

若综合考虑光谱特征对红蜘蛛病虫害的相关性和敏感性,则识别板栗树红蜘蛛病虫害的最佳光谱特征是红边和低位。从图 13 可得,当板栗树红蜘蛛出现轻度感染时,红边波长的“蓝移”量可达 7 nm,低位波长的“蓝移”量约为 5 nm,而 UHD185 相机的物理光谱间隔为 4 nm,拟合后波长间隔可优于 1 nm,因此在无人机高光谱影像上用红边、低位特征波长的变化完全可以在大规模发生前 14 ~ 21 d 检测到板栗树是否发生了红蜘蛛病虫害,以及感染程度。

4 结束语

利用大量实测的板栗树叶片和冠层光谱数

据,通过进行稳定性、准确性、相关性、敏感性分析,得到了绿峰、红谷、低位、红边、高位、高肩 6 个光谱特征随红蜘蛛病虫害危害程度的变化规律。研究表明,基于无人机高光谱技术监测板栗树红蜘蛛病虫害危害程度的最佳光谱特征是红边和低位,其与红蜘蛛病虫害的决定系数均大于 0.6,利用红边波长和低位波长的“蓝移”量和 UHD185 型相机的技术参数,由无人机和 UHD185 型相机组成的高光谱遥感系统辨识板栗树红蜘蛛病虫害危害程度是可行的。该系统具有发现早期(轻度感染)红蜘蛛病虫害的能力,这为在板栗树红蜘蛛病虫害大规模暴发前杀灭红蜘蛛争取了 14 ~ 21 d,具有重要的实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] 张海旺,张国珍,曹庆昌,等. 北京地区板栗主要病虫害种类初步调查[J]. 植物保护,2009,35(2):121-124.
ZHANG Haiwang,ZHANG Guozhen,CAO Qingchang,et al. Investigations of main kinds of pests on Chinese chestnut in Beijing [J]. Plant Protection,2009,35(2):121-124. (in Chinese)
- [2] 王彦翔,张艳,杨成娅,等. 基于深度学习的农作物病害图像识别技术进展[J]. 浙江农业学报,2019,31(4):669-676.
WANG Yanxiang,ZHANG Yan,YANG Chengya,et al. Advances in new nondestructive detection and identification techniques of crop diseases based on deep learning[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2019,31(4):669-676. (in Chinese)
- [3] MORSIER F D, BORGEAUD M, GASS V, et al. Kernel low-rank and sparse graph for unsupervised and semi-supervised classification of hyperspectral images[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,2016,54(6):3410-3420.
- [4] 邹维娜,张利权,袁琳. 基于光谱特征的沉水植物种类识别研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2014(4):132-140.
ZOU Weina, ZHANG Liquan, YUAN Lin. Study on species identification of submerged aquatic vegetation based on spectral characteristics[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science),2014(4):132-140. (in Chinese)
- [5] 程权,杨方,王丹红,等. 近红外光谱技术对闽南乌龙茶品种的识别研究[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(3):656-659.
CHENG Quan,YANG Fang,WANG Danhong,et al. Discrimination of Minnan oolong tea varieties by NIR spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2014,34(3):656-659. (in Chinese)
- [6] 张富华,黄明祥,张晶,等. 利用高光谱识别草地种类的研究——以锡林郭勒草原为例[J]. 测绘通报,2014(7):66-69.
ZHANG Fuhua,HUANG Mingxiang,ZHANG Jing,et al. Identification of grass species based on hyperspectrum—a case study of Xilin GOL grassland[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2014(7):66-69. (in Chinese)
- [7] CHEN S. The advancing on hyperspectral imagery to non-destructive detection for agri-products [J]. Journal of Ankang University,2011,23(6):1-6.
- [8] TIAN Y C, GU K J, CHU X, et al. Comparison of different hyperspectral vegetation indices for canopy leaf nitrogen concentration estimation in rice[J]. Plant and Soil,2014,376(1-2):193-209.
- [9] WANG Z, ZHU X, FANG X, et al. Hyperspectral models for estimating chlorophyll content of young apple tree leaves[J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2015,21(3):383-393.
- [10] 章海亮,高俊峰,何勇. 基于高光谱成像技术的柑橘缺陷无损检测[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(9):177-181.
ZHANG Hailiang,GAO Junfeng,HE Yong. Nondestructive detection of citrus defection using hyper-spectra imaging technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(9):177-181. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130931&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.031. (in Chinese)
- [11] 高超,赵玥,赵燕东. 基于茎干含水率的紫薇病虫害等级早期诊断方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):189-194.
GAO Chao,ZHAO Yue,ZHAO Yandong. Early diagnosis method of disease and pest level on *Lagerstroemia indica* based on stem water content[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(11):189-194. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181122&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.022. (in Chinese)
- [12] 宋余庆,谢熹,刘哲,等. 基于多层 EESP 深度学习模型的农作物病虫害识别方法[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(8):196-202.
SONG Yuqing,XIE Xi,LIU Zhe,et al. Crop pests and diseases recognition method based on multi-level EESP model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(8):196-202. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200822&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.

022. (in Chinese)
- [13] ZHANG J C, PU R L, WANG J H, et al. Detecting powdery mildew of winter wheat using leaf level hyperspectral measurements [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2012, 85(1): 13–23.
- [14] ZHANG H, HU H, ZHANG X B, et al. Estimation of rice neck blasts severity using spectral reflectance based on BP-neural network [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2011, 33(6): 2461–2466.
- [15] MISHRA A, KARIMI D, EHSANI R, et al. Evaluation of an active optical sensor for detection of Huanglongbing (HLB) disease [J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(3): 302–309.
- [16] 谢亚平, 陈丰农, 张竞成, 等. 基于高光谱技术的农作物常见病害监测研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2233–2240.
- XIE Yaping, CHEN Fengnong, ZHANG Jingcheng, et al. Study on monitoring of common diseases of crops based on hyperspectral technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2233–2240. (in Chinese)
- [17] 伍南, 刘君昂, 周国英, 等. 基于高光谱数据的病害胁迫下杉木冠层色素含量估算研究 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(1): 73–79.
- WU Nan, LIU Jun'ang, ZHOU Guoying, et al. Study on estimating pigment contents in canopy of Chinese fir under disease stress based on hyperspectral data [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(1): 73–79. (in Chinese)
- [18] LAWRENCE R, LABUS M. Early detection of douglas-fir beetle infestation with subcanopy resolution hyperspectral imagery [J]. Western Journal of Applied Forestry, 2003, 18(3): 202–206.
- [19] 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.
- XU Zhanghua, LIU Jian, YU Kunyong, et al. Spectral features analysis of *Pinus massoniana* with pest of *Dendrolimus punctatus* walker and levels detection [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(2): 428–433. (in Chinese)
- [20] 彭隆赞, 金时超, 孟凡凡, 等. 马尾松毛虫危害程度的高光谱监测方法 [J]. 湖北林业科技, 2017, 46(3): 1–6.
- PENG Longzan, JIN Shichao, MENG Fanfan, et al. Monitoring *Dendrolimus punctatus* harmed on *Pinus massoniana* with hyperspectral data [J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2017, 46(3): 1–6. (in Chinese)
- [21] 杜华强, 葛宏立, 范文义, 等. 分形理论在马尾松松材线虫病发病早期高光谱探测中的应用 [J]. 林业科学, 2009, 45(6): 68–76.
- DU Huaqiang, GE Hongli, FAN Wenyi, et al. Application of fractal theory in hyperspectral detecting the early stage of pine wood nematode disease (*Bursaphelenchus xylophilus*) of *Pinus massoniana* with hyperspectrum [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(6): 68–76. (in Chinese)
- [22] 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.
- WANG Zhen, ZHANG Xiaoli, AN Shujie. Spectral characteristics analysis of *Pinus massoniana* suffered by *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(3): 367–370. (in Chinese)
- [23] CALDERÓN R, NAVAS-CORTÉS J A, LUCENA C, et al. High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of verticillium wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 139(139): 231–245.
- [24] ZARCO-TEJADA P J, CAMINO C, BECK P S A, et al. Previsual symptoms of *Xylella fastidiosa* infection revealed in spectral plant-trait alterations [J]. Nature Plants, 2018, 4: 432–439.
- [25] 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, 2012, 40(8): 94–99.
- HU Rongming, WEI Man, JING Xia, et al. Research for extracting method of apple leaf ill spots based on hyperspectral image [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2012, 40(8): 94–99. (in Chinese)
- [26] 郭伟, 朱耀辉, 王慧芳, 等. 基于无人机高光谱影像的冬小麦全蚀病监测模型研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 162–169.
- GUO Wei, ZHU Yaohui, WANG Huifang, et al. Monitoring of winter wheat take-all based on UAV imaging hyperspectral [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 162–169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190918&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.018. (in Chinese)
- [27] 王植, 贾劲松, 李红, 等. 基于高光谱遥感对板栗品质预测的实际意义及可行性分析 [J]. 辽宁林业科技, 2009(4): 47–49, 60.
- WANG Zhi, JIA Jinsong, LI Hong, et al. Practical significance and feasibility analysis of forecast on chestnut quality with hyperspectral remote sensing [J]. Liaoning Forestry Science And Technology, 2009(4): 47–49, 60. (in Chinese)
- [28] 章林忠, 丁玲玲, 蔡雪珍, 等. 基于近红外高光谱图像技术的栗果品质无损检测 [J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(1): 166–172.
- ZHANG Linzhong, DING Lingling, CAI Xuezen, et al. Non-destructive detection of Chinese chestnut (*Castanea mollissima*) nut qualities based on near-infrared hyperspectral imaging techniques [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, 46(1): 166–172. (in Chinese)
- [29] FENG L, ZHU S S, LIN F C, et al. Detection of oil chestnuts infected by blue mold using near-infrared hyperspectral imaging combined with artificial neural networks [J]. Sensors, 2018, 18(6): 1944.