植物保护学报 Journal of Plant Protection，2021，48(5)：1096-1103 DOI：10.13802/j.cnki.zwbhxb.2021.2021862

基于无人机成像高光谱的棉叶螨为害等级估测模型构建

郭 伟[1] 李成伟[1] 王锦翔[2] 丁瑞丰[3] 张万臻[1] 裴鹏程[1]
王成博[1] 陆宴辉[4] 乔红波[1*]

（1. 河南农业大学信息与管理科学学院，郑州 450046；2. 武汉大学计算机学院，武汉 430072；3. 新疆农业科学院植物保护研究所，乌鲁木齐 830091；4. 中国农业科学院植物保护研究所，北京 100193）

摘要：为快速、实时、准确地了解新疆棉田棉叶螨(优势种为土耳其斯坦叶螨 *Tetranychus turkestani*)的发生情况，利用高光谱图像中的7种植被指数，使用一般线性回归分析方法分别构建不同棉叶螨为害等级棉花冠层叶片叶绿素相对含量(用 soil and plant analyzer development(SPAD)值表征)遥感估测模型和棉叶螨为害等级遥感估测模型，实现棉叶螨为害的实时监测。结果显示：不同棉叶螨为害等级对应的棉花冠层光谱反射率存在明显差异，棉叶螨为害等级与棉花冠层叶片SPAD值呈显著负相关关系。在7个不同棉叶螨为害等级对应的棉花冠层叶片SPAD遥感估测模型中，SPAD-红边归一化植被指数估测模型的估测决定系数为0.915，均方根误差为3.451，识别精确度显著高于其他模型。表明利用棉花冠层叶片SPAD遥感估测模型可快速无损地获取棉叶螨为害数据，构建的棉叶螨为害等级估测模型可用于植保人员快速准确获取棉叶螨为害情况。

关键词：无人机；成像高光谱；棉叶螨；为害等级；叶绿素相对含量

Construction of estimation models for the damage levels of cotton spider mites based on hyperspectral imaging of unmanned aerial vehicle (UAV)

Guo Wei[1] Li Chengwei[1] Wang Jinxiang[2] Ding Ruifeng[3] Zhang Wanzhen[1] Pei Pengcheng[1]
Wang Chengbo[1] Lu Yanhui[4] Qiao Hongbo[1*]

(1. School of Information and Management Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan Province, China; 2. School of Computer Science, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China; 3. Institute of Plant Protection, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; 4. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to understand the occurrence of spider mites (the dominant species was *Tetranychus turkestani*) in cotton fields in Xinjiang quickly, in a real-time mode and accurately and provide agricultural production in time and reasonably, based on seven vegetation indexes in hyperspectral images, the single factor and partial least squares regression methods were used to construct remote sensing estimation models of the relative contents of chlorophyll in leaves, which represented by soil and plant analyzer development (SPAD), and different damage levels of cotton spider mites. The results showed that there were significantly differences in the spectral reflectance of cotton canopy corresponding to different spider mite damage levels. There was a significant negative correlation between the damage level of cotton spider mites and chlorophyll content in the cotton canopy. Among the seven models, the R^2 of SPAD-Red edge NDVI model was 0.915, with a root mean square error (RMSE) of 3.451, which was significantly higher than those of other models, showing a higher modeling accuracy. The results

基金项目：“十三五”国家重点研发计划(2017YFD0201900)
* 通信作者(Author for correspondence)，E-mail：qiaohb@henau.edu.cn
收稿日期：2021-06-03

showed that the data could be obtained quickly and nondestructively by using this technology, and the remote sensing estimation models of cotton spider mites could provide a technical support for plant protection personnels in obtaining the damage levels of cotton spider mites.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); hyperspectral imaging; cotton spider mites; damage level; chlorophyll relative content

棉花是我国重要的经济作物之一。新疆维吾尔自治区（简称新疆）是我国棉花第一大产区，2019年其棉花产量占全国的84.9%（张贺轩和徐爱武，2020），连续26年居全国第一（娄善伟等，2021）。棉叶螨又称棉红蜘蛛，是世界性棉花害虫，在国内外的主要棉区均有分布，是新疆棉区3大类主要害虫之一（李新华，2017）。棉叶螨是典型的刺吸式口器害虫（曾娟等，2017），棉花受害后叶片上会出现红色斑块，叶绿素和水分等生理指标明显降低，然后逐渐干枯脱落（郭纪萍，2019）。2019年新疆棉田棉叶螨发生面积为29.8万hm^2次，占总种植面积的16.6%（热依汗古丽·阿布都热合曼等，2019），棉叶螨发生严重时可造成30%以上的减产，使棉花生产遭受了巨大的损失（王守会等，2018）。快速、无损、准确的监测和预警可为棉叶螨防治和棉花产量提高提供重要保障（黄文江等，2015）。

传统的田间棉叶螨发生情况主要是由专业的植物保护工作人员实地调查获取，取样范围小、费时费力，对整块棉田的棉叶螨发生情况无法进行准确评估。近年来，遥感技术因其速度快、周期短等优点被广泛应用于作物病虫害的监测和预警中。其中无人机遥感技术因其成本低、机动性高和速度快等优势（蒋浩，2019）在农业中的应用愈加广泛，逐渐成为植物病虫害监测的主要手段（崔美娜等，2018）。Huang et al.（2007）基于无人机高光谱图像，运用光化学植被指数成功监测了小麦条锈病的发生情况；兰玉彬等（2019）利用无人机获取低空柑橘果园的高光谱影像，采用K邻近和支持向量机进行建模和分类，分类准确率达到94.7%。但是利用该技术对棉叶螨发生情况进行监测的研究较少。

叶绿素含量可以表征作物的健康状态，棉花植株受到棉叶螨为害后，叶片水分和叶绿素含量都会产生相应变化，并随着胁迫程度增加而产生变化（曾娟等，2017）。叶绿素含量与SPAD（soil and plant analyzer development）值有较好的相关性（Lichtenthaler & Wellburn, 1983; Kawashima & Nakatani, 1998; Darvishzadeh et al., 2008），作物叶片SPAD值是表征叶片叶绿素相对含量高低的有效指标。本研究利用无人机搭载成像高光谱设备结合地面调查数据，获取棉叶螨不同为害等级棉田的成像高光谱影像，利用SPAD值构建棉花冠层叶片叶绿素相对含量遥感估测模型，探究棉叶螨为害等级与棉花冠层叶片SPAD值的关系，建立棉叶螨为害等级最优监测模型，绘制地块尺度棉叶螨为害情况空间分布图，以期为实现棉叶螨发生程度的实时监测及对其进行精准施药提供有效的技术辅助。

1 材料与方法

1.1 材料

供试棉田：本研究在新疆库尔勒市中国农业科学院植物保护研究所库尔勒试验站棉田开展，棉花品种为中棉所49。试验小区长100 m，宽30 m，于2019年4月下旬覆膜播种，膜上点播，膜下滴灌，株距20 cm，行距50 cm，棉田棉叶螨自然发生，其中优势种为土耳其斯坦叶螨 *Tetranychus turkestani*，还包括少量敦煌叶螨 *Tetranychus dunchuangensis*。试验期间不使用任何药剂，其他农事操作为常规管理。

仪器：SPAD-502型手持型叶绿素仪，日本Konica Minolta公司；AZUP-T8八旋翼无人机，零度智控（北京）智能科技有限公司；UHD-185成像高光谱仪，德国Cubert公司；GeoExplorer 6000差分全球定位系统（global positioning system，GPS），美国Trimble（天宝）公司；Field HandHeld便携式手持ASD非成像光谱仪，美国Analytical Spectral Devices公司。

1.2 方法

1.2.1 棉田地面样点确定及棉株冠层SPAD值测量

新疆的棉花种植模式和农田环境比较特殊，棉叶螨为害后病株表型与国家标准存在一定差异，本研究参考杨丽丽等（2019）分级标准，结合新疆实际情况确定划分标准，共分为4个等级：0级，无为害；1级，叶片完整，叶片上出现散乱的白点或叶茎低端出现零星的黄色斑块；2级，叶片完整，叶片出现轻微的变形，或叶片出现显著的黄斑或者红斑，且占叶面积1/3以下；3级，叶片出现受损或者孔洞，或叶片因为受害严重出现卷曲和变形，或棉花叶片出现大面积红斑或者黄斑且占叶面积1/3及以上。

试验时期为棉花花铃期，此时棉田基本封垄，有利于光谱信息采集。在试验小区内，随机均匀选择4个等级的棉株各20株，然后以定级棉株为中心，划定0.5 m×0.5 m的范围为样点面积，共调查80个样点。使用GeoExplorer 6000差分GPS记录每个中心棉株的地理信息。在每个样点范围内选取中心植株周围的5株，每株随机选取冠层5片棉叶，使用手持型叶绿素仪测量SPAD值，每个叶片叶尖、叶中和叶柄各测量1次并取平均值，最终取5个叶片的平均值作为该样点棉株的SPAD值，并记录该样点棉株的棉叶螨发生等级。将获得的80组数据，每个等级随机选取15组共60组用于建模，其余20组作为验证数据。

1.2.2 棉田棉株高光谱影像获取与处理

高光谱影像数据的采集与1.2.1地面数据SPAD值的测定同期进行，选择晴朗、无风无云、光线充足且太阳处于正射的天气采集。使用UHD-185成像高光谱仪进行采集，波长范围为450~950 nm，光谱采样间隔为4 nm，镜头视场角为15°，镜头垂直向下，地面分辨率为1 cm。UHD-185成像高光谱仪搭载平台为AZUP-T8八旋翼无人机，该平台飞行稳定，可载质量10 kg，续航时间超过30 min，飞行高度设定为50 m，航速设定为6 m/s。无人机起飞前在地面对该光谱仪进行暗电流校正，并使用参考板进行辐射标定等处理。

UHD-185机载高光谱影像数据包含高光谱立方体影像和全色jpg图像。UHD-185成像高光谱仪获取遥感数据处理主要包括高光谱影像的辐射校正和拼接以及调查样点区域冠层平均光谱数据提取3个部分（图1）。影像拼接采用UHD-185成像高光谱仪自带Cube-Pilot软件与Photoscan软件完成高光谱影像的拼接。在ENVI 5.5软件中对拼接完成的影像进行解译，根据设置的地面调查样点的差分GPS信息，在影像中构建感兴趣区域（region of interest，ROI），计算出ROI范围内的平均光谱反射率作为该样点棉株冠层光谱反射率。

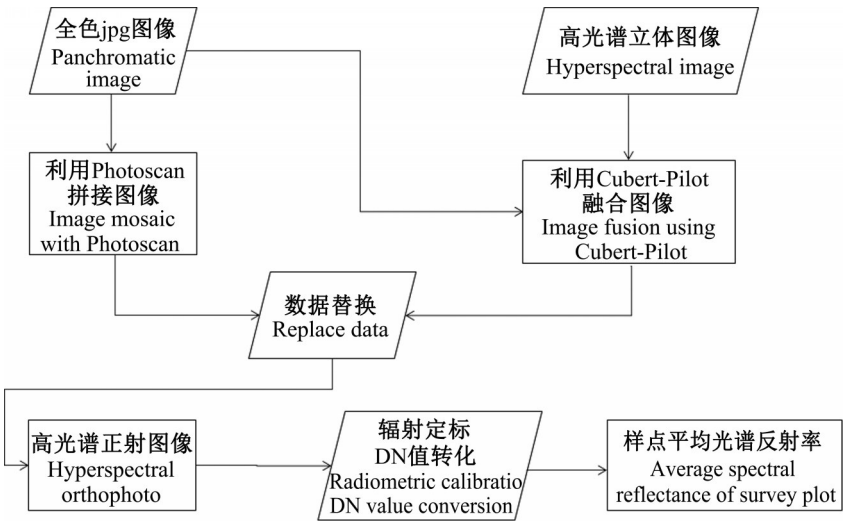

图1 无人机UHD-185遥感数据处理流程

Fig. 1 UHD-185 remote sensing data processing of UAV

1.2.3 棉田棉株地面高光谱数据获取

地面冠层光谱采集使用便携式手持ASD非成像光谱仪，其波长范围为325~1 075 nm，光谱分辨率为3 nm。选取晴朗无风的天气进行测量，时间为10: 00至14: 00，操作员身穿深色实验服手持该设备在目标物垂直上方0.5 m处进行光谱反射率测定。为保证光谱反射率的准确性，每次进行光谱采集前进行白板校正，对80个样点分别进行10次重复采样，所获得数据将用来评价UHD-185影像对应地物点上高光谱数据的准确性。

1.2.4 建模所用植被指数选取

植被指数是2个以上波长范围内的地物反射率的组合运算，可以将高光谱信息由多维压缩为一个通道，简化光谱信息，从而增强植被某一种特性或者细节。通过分析筛选多种植被指数，结合UHD-185成像高光谱数据的光谱分辨率高及光谱范围广等特点，本研究选取了7个对植物叶绿素敏感的植被指数用于棉叶螨为害等级估测模型的构建，分别为归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）（Rouse et al.，1973）、红边归一化植被指

数（red edge normalized difference vegetation index，Red edge NDVI）（Sharma et al.，2015）、新型植被指数（new vegetation index，NVI）（Gupta et al.，2001）、结构不敏感色素指数（structure insensitive pigment index，SIPI）（Penuelas et al.，1995）、归一化叶绿素指数（normalized difference chlorophyll index，NDCI）（Marshak et al.，2000）、优化土壤调节植被指数（optimization of soil-adjusted vegetation indices，OSAVI）（Rondeaux et al.，1996）和冠层反射指数（species reflectance index，SRI）（Deering et al.，1975），计算公式分别为$(R_{802}-R_{678})/(R_{802}+R_{678})$、$(R_{750}-R_{706})/(R_{750}+R_{706})$、$(R_{778}-R_{746})/R_{674}$、$(R_{802}-R_{450})/(R_{802}+R_{678})$、$(R_{762}-R_{526})/(R_{762}+R_{526})$、$[(1+0.16)/(R_{802}-R_{678})]/(R_{802}+R_{678}+0.16)$、$R_{NIR}/R_{RED}$（$R_{NIR\sim802}$；$R_{RED\sim678}$），$R$表示相应波段的反射率。

1.2.5　*数据建模及模型精度评价方法*

按照自变量的个数，回归分析可分为一元回归分析和多元回归分析；而根据因变量与自变量的函数关系，又可以分为线性回归与非线性回归。本研究采用Excel 2016软件进行一般线性回归分析，共设置80个样点，其中60个样点的数据参与建模，20个样点的数据参与验证。根据棉叶螨害为害等级与植被指数之间可能存在的函数关系，基于1.2.4选择的7个植被指数构建棉叶螨为害等级估测模型，分析棉叶螨为害等级与棉花冠层叶片SPAD值、棉花冠层叶片SPAD值与植被指数的相关关系，采用单因素方差分析对模型进行显著性检验。

本研究采用决定系数R^2和均方根误差（root mean square error，RMSE）对模型精度进行评价。决定系数反映模型拟合程度，RMSE反映数据的离散程度。

$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-\bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y}_i)^2},\quad RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-y_i)^2},$$

式中，n为预测样本数量；y_i表示检验样本的实测值；$\hat{y}_i$表示模型的预测值；$\bar{y}_i$表示样本实测值的平均值。当决定系数R^2越大，RMSE越小，说明模型精度越高，所得到的预测值更加贴近实测值。

1.2.6　*成像高光谱图像反演方法*

在ENVI 5.5软件中，使用1.2.5筛选的最优模型解算试验区棉田UHD-185高光谱影像，得到基于该模型反演的研究区各像元所对应的SPAD估测值，在ArcGIS 10.2软件中对SPAD值反演图进行填图，设置各个螨害等级所对应的SPAD值区间，定义各个螨害等级影像色彩属性，最终得到研究区域叶螨发生情况空间分布图。

2 结果与分析

2.1 UHD-185影像光谱反射率精度验证

ASD非成像光谱仪的光谱分辨率为3 nm，而UHD-185成像高光谱仪的光谱分辨率为4 nm，因此依据ASD非成像光谱数据对UHD-185成像高光谱数据进行质量评价之前，需将ASD非成像光谱仪获取的光谱数据重采样至UHD-185波段，然后将UHD-185成像高光谱仪影像中提取的样点平均光谱曲线与该点重采样后的ASD非成像光谱曲线进行对比，发现在可见光–近红外范围内（450~950 nm），2种光谱数据略有不同，但总体趋势相近（图2-A），表明UHD-185成像高光谱数据是可靠的。

通过分析UHD-185成像高光谱数据和重采样后ASD非成像光谱数据的相关性，结果表明两者的光谱反射率在482~818 nm范围内高度相关，决定系数R^2为0.999，在450~482 nm和818~950 nm范围内，UHD-185成像高光谱数据波动明显（图2-B），可能是UHD-185成像高光谱仪在探测边界噪声较大。综合上述分析，UHD-185成像高光谱仪在有效波段482~818 nm范围内有较好的光谱质量。

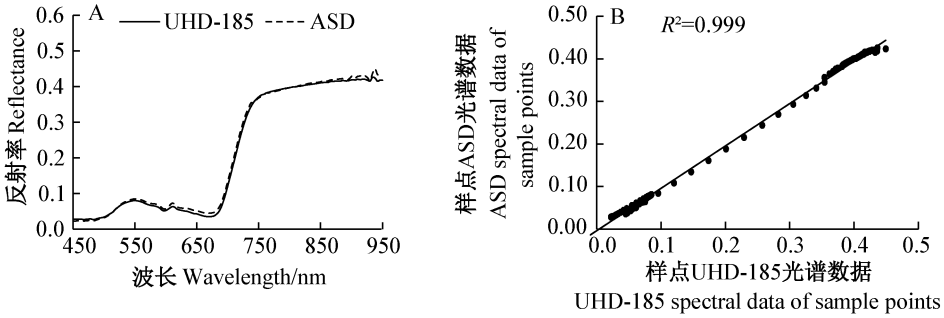

图2　UHD-185成像高光谱数据与重采样后ASD非成像高光谱数据的对比（A）和相关性（B）

Fig. 2　Comparison (A) and correlation (B) between the UHD-185 imaging hyperspectral data and the ASD non-imaging hyperspectral data after resampling

2.2 不同棉叶螨为害等级棉叶SPAD与光谱特征分析

随着棉叶螨为害等级的增加，棉花冠层叶片SPAD平均值呈现逐渐下降的趋势（图3），SPAD值与棉株受棉叶螨为害等级呈负相关，且4个为害等级间棉株冠层叶片SPAD值无交叉区间，表明可以使用棉花冠层叶片SPAD值监测棉株受棉叶螨为害的情况。

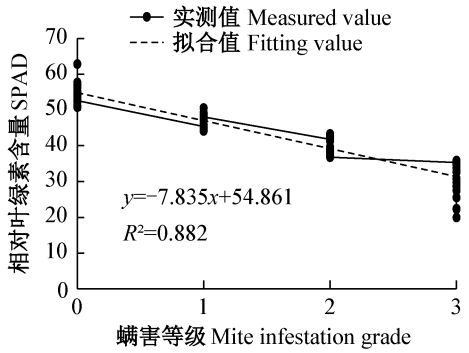

图3 不同棉叶螨为害等级对应棉株冠层叶片SPAD值的变化

Fig. 3 Changes in the SPAD values of cotton leaves with different mite infestation grades

随着棉叶螨为害等级增加，棉花冠层叶片SPAD值逐渐降低，这将直接影响棉叶的光谱特征。在可见光区（波长为528~574 nm时），棉株冠层光谱反射率随着棉叶螨为害等级的增加而增加，但1级和2级之间变化不明显；在近红外区（波长为722~950 nm时），棉株冠层光谱反射率随着棉叶螨为害等级的增加而逐渐减小，不同棉叶螨为害等级棉叶的光谱反射率在722~918 nm波段差异显著（图4）。因此，选取包含近红外波段的植被指数来构建监测模型，其估测效果会更好。

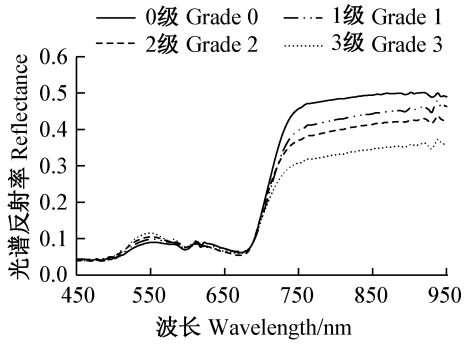

图4 不同棉叶螨为害等级样点棉株冠层平均光谱反射率

Fig. 4 Average spectral reflectance of the canopy at the sample points with different mite infestation grades

2.3 基于植被指数的棉叶螨监测模型构建与验证

在使用基于供试7个植被指数NDVI、Red edge NDVI、NVI、SIPI、NDCI、OSAVI和SRI构建的模型监测棉叶螨为害情况时，将其与建模样点的棉花冠层叶片SPAD值分别进行相关性分析，相关系数分别为0.784、0.852、0.739、0.760、0.792、0.806和0.734，经单因素方差分析所有相关系数均通过显著性检验，且达到极显著相关水平。其中棉花冠层叶片SPAD值与Red edge NDVI的相关系数最大，高于棉花冠层叶片SPAD值与其他植被指数的相关系数。以棉花冠层叶片SPAD值为因变量，分别以NDVI、Red edge NDVI、NVI、SIPI、NDCI、OSAVI和SRI为自变量构建光谱参数与棉花冠层叶片SPAD值的回归模型（图5），其中SPAD−红边归一化植被指数（SPAD-Red edge NDVI）估测模型的建模决定系数R^2为0.715，明显高于其他模型，且7个模型的RMSE分别为5.440、5.391、5.074、5.152、5.275、5.260和5.053，SPAD-Red edge NDVI模型的RMSE略低于SPAD-NDVI模型，表明SPAD-Red edge NDVI模型建模精度较高。

将SPAD-NDVI、SPAD-Red edge NDVI、SPAD-NVI、SPAD-SIPI、SPAD-NDCI、SPAD-OSAVI和SPAD-SRI这7个模型估算的SPAD值所在区间对应的棉叶螨为害等级与实测棉叶螨为害等级进行对比，经计算这7个模型的RMSE分别为3.314、3.451、3.303、3.328、3.249、3.640和3.719，其中SPAD-Red edge NDVI模型的估测决定系数最高，为0.915（图6），表明使用该模型估算的棉花冠层叶片SPAD值能间接反映棉叶螨为害情况。

2.4 UHD-185高光谱图像反演棉叶螨为害等级分布图

基于研究区棉田UHD-185成像高光谱原始影像（图7-A），使用SPAD-Red edge NDVI模型解算后进行高光谱图像反演填图，得到研究区棉叶螨发生情况空间分布图（图7-B）。为验证填图精度，随机输入采样点对应的GPS坐标信息，发现该对应像元所对应SPAD值均位于该采样点螨害等级所对应的SPAD值区间内，表明该模型具有较高的反演精度。

3 讨论

当前我国使用最广泛的棉叶螨防控方式是化学防控，但长期使用农药会使棉叶螨产生抗药性并污染农田。本研究利用搭载在无人机平台的成像高光谱仪获取棉株冠层成像高光谱遥感数据，结合地面调查数据，建立棉叶螨为害等级监测模型。将构建的SPAD-Red edge NDVI模型用于无人机成像高光

谱图像，生成研究区域棉叶螨为害情况空间分布图，可以为棉叶螨的精准防治提供参考依据。

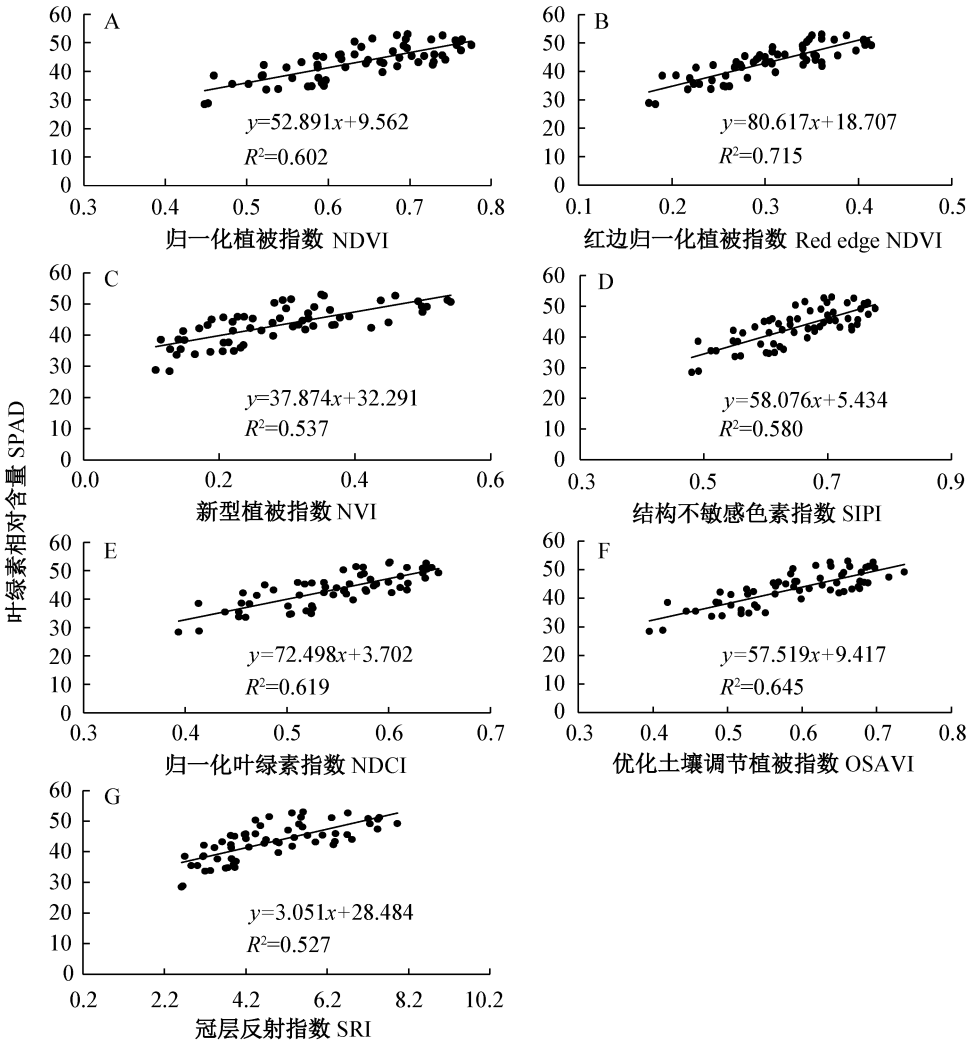

图5 棉花冠层叶片SPAD值与各植被指数的相关性

Fig. 5 The correlations between cotton canopy SPAD values and vegetation indexes

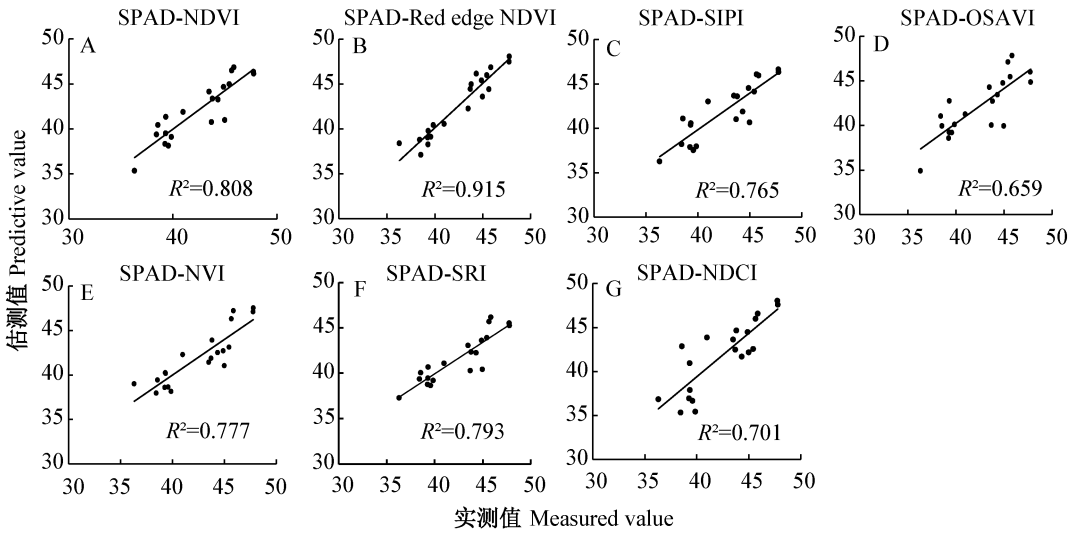

图6 不同模型对棉花叶片SPAD估测值与实测值的拟合结果

Fig. 6 The fitting results of the SPAD estimated values and the measured values by using different models

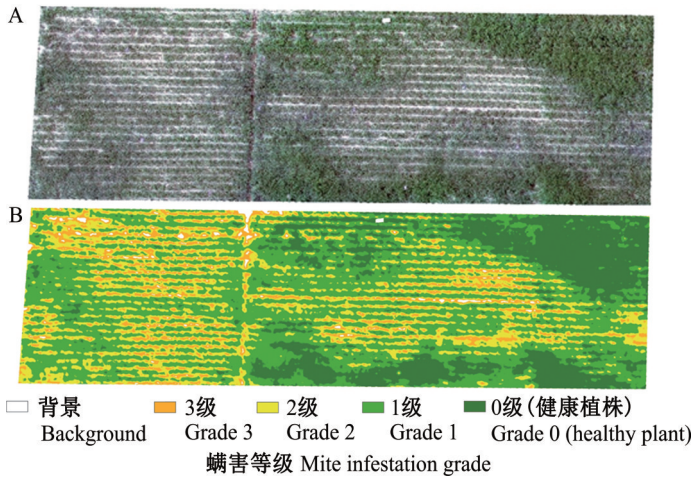

图7 研究区棉田UHD-185成像高光谱原始影像(A)及棉叶螨为害等级反演空间分布图(B)

Fig. 7 UHD-185 imaging hyperspectral original images of cotton field in the study areas (A) and inversion spatial distribution map of infestation grades of cotton spider mites (B)

高光谱设备能够获取可见光-近红外和短波红外范围内的数百个波段信息(Gitelson & Merzlvak, 1994)。本试验中,UHD-185成像高光谱仪与ASD非成像光谱仪获取的不同棉叶螨为害等级的棉花冠层光谱特征,在482~818 nm范围的光谱反射率高度相关,说明其数据具有较高的准确性。在作物病虫害监测中,高光谱常用的波段为可见光400~700 nm和近红外700~1 100 nm(Bock et al.,2010),对于绿色植物,色素的吸收会影响可见光波段的光谱反射率,细胞结构决定近红外波段的光谱反射率(Yuan et al.,2014)。在近红外区(波长为722~950 nm时),棉株冠层光谱反射率随着棉叶螨为害等级的增加而逐渐减小,不同棉叶螨为害等级棉叶的反射光谱在722~918 nm波段差异显著。

目前,对于病虫为害严重程度进行高光谱遥感定量分析的研究分为基于回归的连续严重度估计以及基于机器学习分类的离散严重度估计2大方向(张凝等,2021)。一般线性回归分析方法是最常用的回归方法。本研究采用一般线性回归分析方法构建的7个模型中,SPAD-Red edge NDVI模型最优,估测决定系数R^2为0.915,RMSE为3.451,显著高于其他模型。程帆等(2017)利用随机蛙跳、回归系数法和偏最小二乘回归法实现了以过氧化酶为衡量指标的黄瓜病害危害程度定量分析。本研究构建的模型是基于统计数据的经验模型,以常见的植被指数为自变量,虽然能使回归模型中包含所有自变量,去除共线性问题,但是建模方式单一且模型精度依赖于统计数据的质量,下一步可以使用其他方法进一步进行研究,如随机森林、人工神经网络等方法。

目前,棉叶螨还依赖人工调查来监测其发生,存在调查效率低和时效性差的缺点。本研究使用无人机平台搭载成像高光谱传感器,可实现棉叶螨为害区域监测,监测结果对于其精准防治具有重要意义。而且无人机平台具有灵活性高、数据获取便捷等优势,是棉叶螨快速监测的有效平台。

参 考 文 献 (References)

Abudoureheman R, Wusiman A, Wei XZ, Yu HX, Kuang M. 2019. Overview of main cotton diseases and insect pests in Xinjiang in 2019. China Cotton, 46(11): 7–9 (in Chinese) [热依汗古丽·阿布都热合曼, 艾合买提·吾斯曼, 魏新政, 于海霞, 匡猛. 2019. 2019年新疆棉花主要病虫害发生概况. 中国棉花, 46(11): 7–9]

Bock CH, Poole GH, Parker PE, Gottwald TR. 2010. Plant disease severity estimated visually, by digital photography and image analysis, and by hyperspectral imaging. Critical Reviews in Plant Sciences, 29(2): 59–107

Cheng F, Zhao YR, Yu KQ, Lou BG, He Y. 2017. Application of hyperspectra for detecting peroxidase content in cucumber leaves with early disease stress. Spectroscopy and Spectral Analysis, 37(6): 1861–1865 (in Chinese) [程帆, 赵艳茹, 余克强, 楼兵干, 何勇. 2017. 基于高光谱技术的病害早期胁迫下黄瓜叶片中过氧化物酶活性的研究. 光谱学与光谱分析, 37(6): 1861–1865]

Cui MN, Dai JG, Wang SH, Zhang GS, Xue JL. 2018. Research on identification method of mite infection cotton based on of UAV multi-spectral image. Xinjiang Agricultural Sciences, 55(8): 1457–1466 (in Chinese) [崔美娜, 戴建国, 王守会, 张国顺, 薛金利. 2018. 基于无人机多光谱影像的棉叶螨识别方法. 新疆农业科学, 55(8): 1457–1466]

Darvishzadeh R, Skidmore A, Schlerf M, Atzberger C, Corsi F, Cho M. 2008. LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63(4): 409–426

Deering DW, Rouse JW, Haas RH, Schell JA. 1975. Measuring forage production of grazing units from Landsat MSS data.//Proceedings of Tenth International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor: ERIM, pp. 1169−1178

Gitelson A, Merzlyak MN. 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. Journal of Plant Physiology, 143(3): 286−292

Guo JP. 2019. Occurrence and comprehensive control of cotton spider mite in cotton field. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 42(6): 29−30 (in Chinese) [郭纪萍. 2019. 棉田棉叶螨的发生特点与综合防治. 新疆农垦科技, 42(6): 29−30]

Gupta RK, Vijayan D, Prasad TS. 2001. New hyperspectral vegetation characterization parameters. Advances in Space Research, 28(1): 201−206

Huang WJ, Lamb DW, Niu Z, Zhang YJ, Liu LY, Wang JH. 2007. Identification of yellow rust in wheat using *in situ* spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging. Precision Agriculture, 8(4): 187−197

Huang WJ, Zhang JC, Luo JH, Zhao JL, Huang LS, Zhou XF. 2015. Remote sensing monitoring and prediction of crop diseases and insect pests. Beijing: Science Press, pp. 4 (in Chinese) [黄文江, 张竞成, 罗菊花, 赵晋陵, 黄林生, 周贤锋. 2015. 作物病虫害遥感监测与预测. 北京: 科学出版社, pp. 4]

Jiang H. 2019. Research on automatic navigation system of agricultural machinery based on RTK technology. Ph. D thesis. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese) [蒋浩. 2019. 基于RTK技术的农业机械自动导航系统研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学]

Kawashima S, Nakatani M. 1998. An algorithm for estimating chlorophyll content in leaves using a video camera. Annals of Botany, 81(1): 49−54

Lan YB, Zhu ZH, Deng XL, Lian BZ, Huang JY, Huang ZX, Hu J. 2019. Monitoring and classification of citrus Huanglongbing based on UAV hyperspectral remote sensing. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 35(3): 92−100 (in Chinese) [兰玉彬, 朱梓豪, 邓小玲, 练碧桢, 黄敬易, 黄梓效, 胡洁. 2019. 基于无人机高光谱遥感的柑橘黄龙病植株的监测与分类. 农业工程学报, 35(3): 92−100]

Li XH. 2017. Occurrence rule and control measures of "three pests" in cotton field. Rural Science & Technology, (6): 28−29 (in Chinese) [李新华. 2017. 棉田"三虫"发生规律及防治措施. 农村科技, (6): 28−29]

Lichtenthaler HK, Wellburn AR. 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. Biochemical Society Transactions, 11(5): 591−592

Lou SW, Dong HZ, Tian XL, Tian LW. 2021. The "short, dense and early" cultivation of cotton in Xinjiang: history, current situation and prospect. Scientia Agricultura Sinica, 54(4): 720−732 (in Chinese) [娄善伟, 董合忠, 田晓莉, 田立文. 2021. 新疆棉花"矮、密、早"栽培历史、现状和展望. 中国农业科学, 54(4): 720−732]

Marshak A, Knyazikhin Y, Davis AB, Wiscombe WJ, Pilewskie P. 2000. Cloud-vegetation interaction: use of normalized difference cloud index for estimation of cloud optical thickness. Geophysical Research Letters, 27(12): 1695−1698

Penuelas J, Filella I, Gamon JA. 1995. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. New Phytologist, 131(3): 291−296

Rondeaux G, Steven M, Baret F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 55(2): 95−107

Rouse J Jr., Haas RH, Schell JA, Deering DW. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.//Freden SC, Mercanti EP, Becker MA. Goddard Space Flight Center 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium-Volume I: Technical presentations. Washington DC: NASA, pp. 309−317

Sharma LK, Bu HG, Denton A, Franzen DW. 2015. Active-optical sensors using red NDVI compared to red edge NDVI for prediction of corn grain yield in North Dakota, USA. Sensors, 15(11): 27832−27853

Wang SH, Dai JG, Li SM, Zhang GS, Cui MN. 2018. Study on prediction of cotton spider mites based on multi-source data. Jiangsu Agricultural Sciences, 46(13): 96−100 (in Chinese) [王守会, 戴建国, 李栓明, 张国顺, 崔美娜. 2018. 基于多源数据的棉叶螨预测研究. 江苏农业科学, 46(13): 96−100]

Yang LL, Zhang DW, Luo J, Wang ZP, Wu CC. 2019. Automatic recognition for cotton spider mites damage level based on SVM and AdaBoost. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 50(2): 14−20 (in Chinese) [杨丽丽, 张大卫, 罗君, 王振鹏, 吴才聪. 2019. 基于SVM和AdaBoost的棉叶螨危害等级识别. 农业机械学报, 50(2): 14−20]

Yuan L, Huang YB, Loraamm RW, Nie CW, Wang JH, Zhang JC. 2014. Spectral analysis of winter wheat leaves for detection and differentiation of diseases and insects. Field Crops Research, 156: 199−207

Zeng J, Lu YH, Jian GL, Li XJ, Liu J, Jiang YY. 2017. Investigation, diagnosis and decision support of cotton diseases, insect pests and weeds. Beijing: China Agriculture Press, pp. 60−64 (in Chinese) [曾娟, 陆宴辉, 简桂良, 李香菊, 刘杰, 姜玉英. 2017. 棉花病虫草害调查诊断与决策支持. 北京: 中国农业出版社, pp. 60−64]

Zhang HX, Xu AW. 2020. The problems and countermeasures of cotton industry in Xinjiang. China Cotton Processing, (5): 18−20 (in Chinese) [张贺轩, 徐爱武. 2020. 新疆棉花产业的现状问题及对策. 中国棉花加工, (5): 18−20]

Zhang N, Yang GJ, Zhao CJ, Zhang JC, Yang XD, Pan YC, Huang WJ, Xu B, Li M, Zhu XC, et al. 2021. Progress and prospects of hyperspectral remote sensing technology for crop diseases and pests. National Remote Sensing Bulletin, 25(1): 403−422 (in Chinese) [张凝, 杨贵军, 赵春江, 张竞成, 杨小冬, 潘瑜春, 黄文江, 徐波, 李明, 朱西存, 等. 2021. 作物病虫害高光谱遥感进展与展望. 遥感学报, 25(1): 403−422]

(责任编辑:李美娟)