

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.02.006

基于遥感技术的植物非生物胁迫性研究进展

车永飞¹, 肖 策^{2,3}, 王正庆^{2,3,4*}, 唐振平^{2,3,4}, 宋 静^{2,3},
李新春¹, 王 升^{2,3}, 马 艳^{2,3}

(1. 核工业北京地质研究院 遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室, 北京 100029; 2. 南华大学 资源环境与
安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 3. 衡阳市核燃料循环地质理论与技术重点实验室, 湖南 衡阳 421001;
4. 稀有金属矿产开发与废物地质处置技术湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 利用遥感技术研究植物的非生物胁迫性具有明显的优势。首先介绍了 Cu、Cd、Pb、Zn、Fe、U、干旱及水分等非生物因素胁迫下植物光谱曲线的特征, 然后介绍了植物光谱信息的分析处理方法, 最后对利用遥感研究非生物胁迫性进行了一定展望。

关键词: 遥感; 植物; 非生物胁迫; 光谱

中图分类号: P612; P624 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-0062(2020)02-0034-08

Advances in Studies on Plant Abiotic Stress Based on Remote Sensing Technology

CHE Yongfei¹, XIAO Ce^{2,3}, WANG Zhengqing^{2,3,4*}, TANG Zhenping^{2,3,4},
SONG Jing^{2,3}, LI Xinchun¹, WANG Sheng^{2,3}, MA Yan^{2,3}

(1. National Key Laboratory of Remote Sensing Information and Image Analysis Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. Hengyang Key Laboratory of Nuclear Fuel Cycle Geology Theory and Technology, Hengyang, Hunan 421001, China; 4. Hunan Key Laboratory of Rare Metal Minerals Exploitation and Geological Disposal of Wastes, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Using remote sensing technology to study abiotic stress of plants has obvious advantages. The characteristics of plant spectral curve under abiotic stress of Cu, Cd, Pb, Zn, Fe, U, drought and water are introduced firstly, then the analysis and processing methods of plant spectral information are introduced, and finally the prospect of plant Remote Sensing Research on abiotic stress is given.

key words: remote sensing; plant; abiotic stress; spectral information

收稿日期: 2019-11-29

基金项目: 国防科技重点实验室稳定支持项目子专题(遥 ZS1902)

作者简介: 车永飞(1982-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事高光谱遥感方面的研究。E-mail: cheyongfei@163.com。

* 通信作者: 王正庆(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要从事铀矿地质及地学信息处理方面的研究。E-mail: wzqh20082008@126.com

0 引言

自然界中的植物所处的环境均为暴露性环境,在生物和非生物胁迫作用下会表现出特定的生理及分子反应^[1]。重金属是常见的非生物胁迫之一,它最先影响到土壤。据报道,全球每年向土壤排放的重金属量十分巨大,如汞约为15 000万t,锰约为1 500万t,铅约为500万t;我国大多数地区的农田也难免遭受铬、汞、铅、砷及镉等重金属的污染,约为3万亩,每年因此造成的粮食损失约为1 000万t^[2-3]。铜、锌、锰等重金属会影响土壤成分及其形成过程,破坏固液气三态的平衡,降低水的渗透性^[4]。除了重金属,还有其他对植物影响比较显著的非生物胁迫,像干旱、高盐及低温胁迫等,它们会引起一些相似的应答反应,如植物体内积累大量的渗透调节剂、重建细胞内离子动态平衡、修复被破坏的膜系统等^[5-6]。遥感技术具有范围广、获取速度快、周期短及数据综合性强等特点。从植物遥感来看,卫星遥感数据可用于监测植被动态变化、物种组成及识别生态系统;航空遥感数据可用于研究植被性状、结构及识别物种,再结合多元化的传感器可获取物种的数量、性状及群落组成等信息^[7]。低空遥感数据可见光、近红外两波段可用来监测病害树叶,同时利用手持光谱辐射计对图像进行分析、校准,可测量受感染叶片的光谱趋势^[8]。此外,利用光谱信息并借助多重分形等理论可探寻叶片叶绿素含量在不同波段范围内光谱有效信息的差异,也可探寻不同播种方式植物样本的特征性光谱波段^[9]。近年来,高光谱技术在土壤重金属含量、植被异常、找矿识别方面具有明显的优势。本文拟基于遥感技术角度,对非生物条件胁迫下的植物光谱数据测量手段、植物光谱信息特征及植物光谱数据处理与分析等开展初步的总结,并提出当前亟待开展深入研究的方向。

1 植物光谱测量概述

光谱测量分室内光谱测量、野外光谱测量及遥感光谱3种。光谱仪是获取植物光谱信息的有效手段,具有波段数多、光谱响应范围宽,分辨率高、光谱信息连续等优势。如前人使用Field Spec FR分光辐射光谱仪、ASD FieldSpec SV光谱仪、CHR-1 024光谱仪、SVC HR-768型便携式光谱仪及SE590-CCD硅阵列便携式光谱仪开展了小麦

叶片、水稻冠层及叶片、茄子叶片及大豆残茬光谱信息测量研究,取得了良好的效果^[10-14]。其中,使用ASD FieldSpec光谱仪野外测量时,需选择晴朗、无云、无风的天气,正午前后两小时测量为宜,为优化测量精度,选用白板或灰板作为参考板,测量过程中应将光谱仪探头保持垂直向下^[15-16];使用SVC HR-1024光谱仪采集叶片光谱数据时,实验室光源为卤素灯,高度角为45°,距目标50cm,镜头距叶片高度30cm,确保叶片充满视场^[12];使用SVC HR-768光谱仪野外测量时,需要测量3次参考板的反射辐射亮度^[13];使用SE590-CCD硅阵列便携式光谱仪测量水稻群体反射率时,注意水稻冠层与标准板反射测定交替进行^[14]。

2 非生物胁迫下植物的光谱特征

植被在不同外界条件的胁迫下,通常会表现出特定的光谱特征。正常植被的光谱特征规律明显,在可见光波段0.55 μm 处有一处反射峰,称为“绿峰”,其两侧0.45 μm 、0.67 μm 则有两处吸收谷,分别称为“蓝谷”、“红谷”。在近红外波段0.7~0.8 μm 处有一处反射陡坡,反射率增高明显,至1.1 μm 附近有一反射率峰值,达40%左右(图1)。其中,正常植被在0.68~0.74 μm 之间出现一个反射率增高的点,也是一阶导数光谱在该区域的拐点,被称作“红边”,它是描述植物色素状态及健康状况的重要指示波段。故可根据红边拐点的变化判断植物是否被感染,若植物受到污染或病变,红边斜率和位置会发生一定变化,造成红边“蓝移”现象^[17-20]。常见的重金属胁迫元素有Cu、Cd、Pb、Zn、Ni、Cr。下面简要介绍多种植物在不同非生物胁迫下产生的光谱特征。

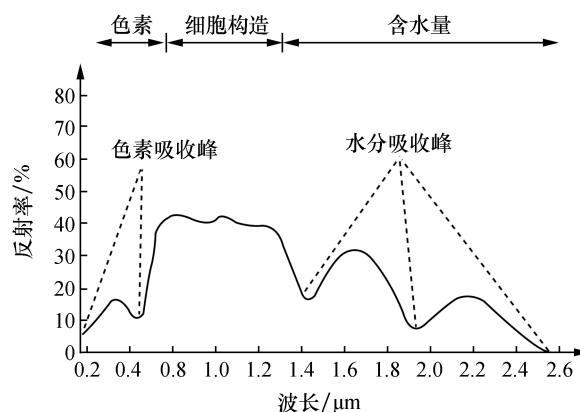


图1 健康绿色植物的光谱曲线

Fig.1 The spectral curves of healthy green

2.1 铜胁迫下的植物光谱特征

铜胁迫是常见的重金属胁迫之一。相关研究发现,小麦叶片、冠层均会出现“红边蓝移”现象;在可见光区域,各浓度(CuL1 ~ CuL4)铜胁迫下的小麦叶片(CK)光谱反射率均高于未受铜胁迫的小麦叶片光谱反射率,近红外区域反之;分蘖期和拔节期,小麦冠层光谱在可见光反射率总体随着铜浓度增加而升高,近红外区域反之;抽穗期,小麦冠层在两个波段区间的反射率显得很 irregular (图 2)^[10,21]。小麦的紫谷(指 382 ~ 500 nm 范围内叶片光谱的最小值)、蓝边(指叶片反射光谱一阶导数在 450 ~ 550 nm 的最大值)、绿峰(指叶片反射光谱在 500 ~ 600 nm 的最大值)、黄边(指叶

片反射光谱一阶导数在 550 ~ 650 nm 的最小值)及红谷(指叶片反射光谱在 600 ~ 720 nm 的最小值)等几个波段特征位置,随着叶片铜含量的增加均没有发生明显改变,最大偏移量均小于 3 nm^[22]。玉米叶片也会出现红边“蓝移”现象;在可见光波段,随 Cu^{2+} 浓度增大玉米叶片反射率升高;相同 Cu^{2+} 浓度下,不同玉米叶片红边位置也不同^[23-24]。德兴铜矿区植被实地光谱测试研究显示,木本、草本植物部分样品光谱出现红边“蓝移”,可见光波段吸收减弱反射增强,红谷明显减弱甚至几乎消失;盐肤木叶片反射率出现随铜含量增大明显升高且红边斜率增大并蓝移的现象^[18,25]。

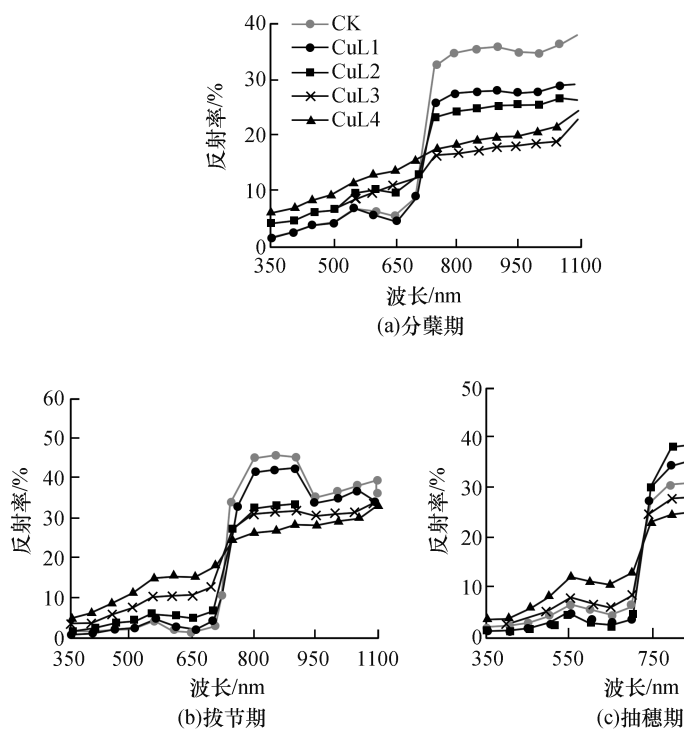


图 2 小麦叶片反射光谱

Fig. 2 The reflection spectrum of wheat leaves

2.2 铀胁迫下的植物光谱特征

铀胁迫下的植物光谱特征研究主要针对铀矿区地域。如,彭玛丽等^[20]对四川若尔盖尾矿堆植物光谱特征研究显示,多数样本光谱特征基本一致,其中马先蒿样本的光谱曲线在 680 nm 位置红谷变浅,绿峰位置反而出现吸收谷,红谷位置出现峰值;距矿堆 50 m 的一个样本在近红外波段反射率高于其他样本;铀矿区典型植物黄荆、地锦、商陆及芒萁骨在光谱特性上存在一定差异,相对非铀矿区,在铀矿区上述植物在“绿峰”、“红谷”及

近红外的反射率较高,黄荆、地锦及商陆在近红外处两区域的反射率均值的差值较大,而芒萁骨在绿峰处两区域的反射率的差值较大(图 3)^[26-27]。

2.3 其他重金属胁迫下的植物光谱特征

镉胁迫。在土壤镉的污染下,水稻在可见光区的光谱反射率随着镉的浓度增加而增高^[28]。受镉的胁迫,脐橙叶片的新叶样品在 715 nm 附近区域的光谱反射率随着镉的胁迫程度增加而增高,脐橙老叶样品则没有明显变化^[29]。

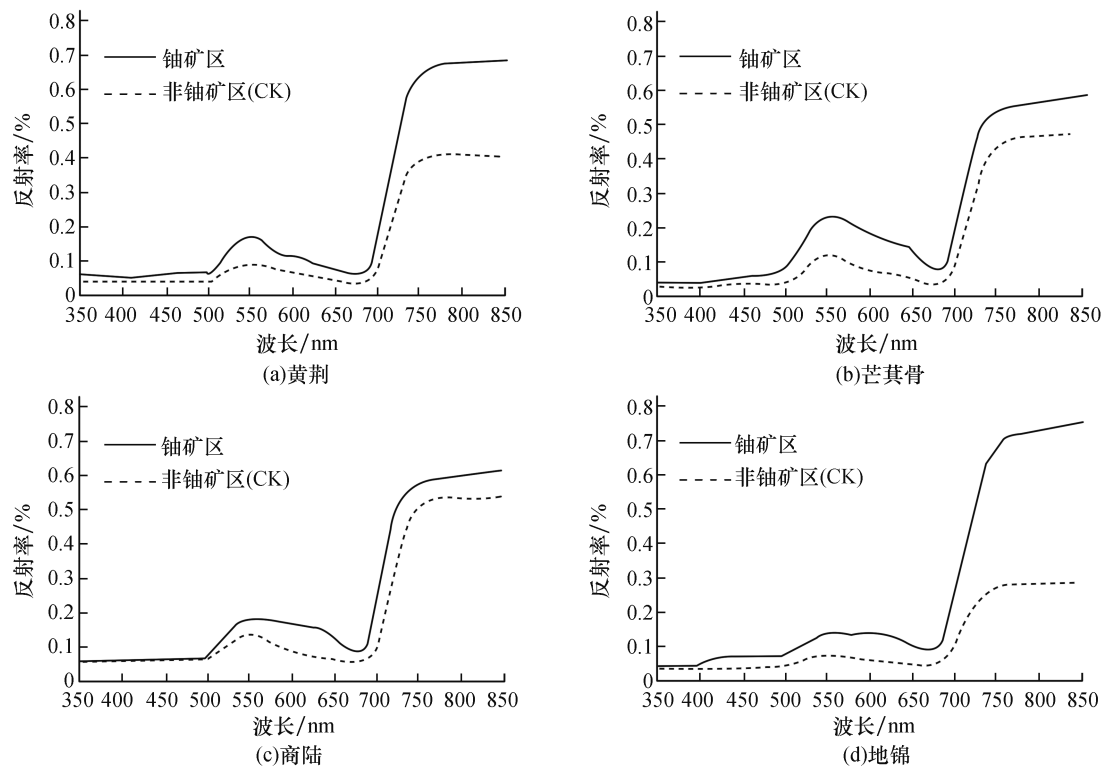


图3 铀矿区与非铀矿区两地的植物光谱特征

Fig. 3 The spectral characteristics of plants in uranium and non-uranium areas

铅胁迫。铅离子污染下的玉米叶片随着重金属浓度增加,光谱吸收能力减弱,反射率有所增高,存在红边“蓝移”现象^[23]。锌处理下的小麦冠层,分蘖期和拔节期的反射率在可见光区均随锌浓度增加而增高,近红外区则相反;而抽穗期小麦冠层在两个波段区间的反射率很不规律^[21]。锌胁迫下的白菜叶片光谱在460~680 nm可见光区波段反射率升高趋势显著,而在近红外波段反射率呈下降趋势,同样在红边处发生“蓝移”^[30]。铅锌矿区毛轴蕨在450~670 nm处叶面反射率高于对照区,尤其是在555 nm处的绿峰较为明显,而矿区毛轴蕨在近红外反射率低于对照组^[31]。

铁胁迫。在 Fe^{2+} 胁迫下,460~670 nm波段区间水稻叶片光谱反射率随 Fe^{2+} 浓度增加而增高,在760~1 000 nm波段区间则相反,光谱曲线红边发生“蓝移”^[32]。丛楠等^[33]发现冀东水厂铁矿区植被反射光谱曲线均出现“红边蓝移,绿峰降低”的现象,仅不同测点程度有所不同。

2.4 其他非生物胁迫下的植物光谱特征

非金属物质胁迫。唐延林等^[11]发现随氮含量的提高,水稻冠层光谱反射率在可见光区域降低,在近红外区域增高。郭世忠等^[28]发现被 SO_2 污染后的棉花在可见光区域的光谱反射率有所增

加,但550 nm处的反射峰值却降低,近红外波段的反射率有所下降。

干旱胁迫。相对于铜胁迫,干旱胁迫下的植物总体上光谱反射率较高,但比对照组的反射率低;在红光波段,干旱胁迫下的植物与对照组反射率相当;而在1 400 nm、1 900 nm附近,铜胁迫下的植物反射率高于干旱胁迫组与对照组^[12]。徐琳煜等^[34]发现在可见光区域,白术叶片对照组、干旱2天及4天的光谱反射率相近;750 nm处,干旱8天的反射率骤减低于对照组;1 000 nm处干旱胁迫下的白术叶片均低于对照组(图4)。谷艳芳等^[35]发现冬小麦孕穗期和开花期的反射率在可见光区域随干旱胁迫加重而降低,在近红外波段则相反。

水胁迫。该类非生物胁迫主要研究地区为沙漠、荒地等地区。350~610 nm波段内水的胁迫量影响梭梭树叶片的反射率大小为 $\rho_{100\text{ mL}} > \rho_{500\text{ mL}} > \rho_{200\text{ mL}}$;611~738 nm波段内,随水分胁迫的增多,光谱反射率随之减小;700~800 nm内,反射率大大增加形成陡坡^[36]。

大气污染胁迫。美国佛蒙特州大气污染严重区域杉树叶片光谱反射率红边蓝移5 nm,国内对环境污染下的植物胁迫性研究主要集中在矿区和

油田等地区,针对大气污染的研究则相对较少^[37]。生产区(炼铁区、焦化区、轧钢区)植物叶片的光谱反射曲线与生活区相比,在可见光区域和近红外区域的反射率均有所下降,其中轧钢区的植物反射率比起炼铁区和焦化区还低^[38]。刘殿伟等^[39]对比了净月潭国家森林公园的树种,发现被城市污染的行道树在 550 nm 处及近红外波段之间的反射率差异比公园里的明显。

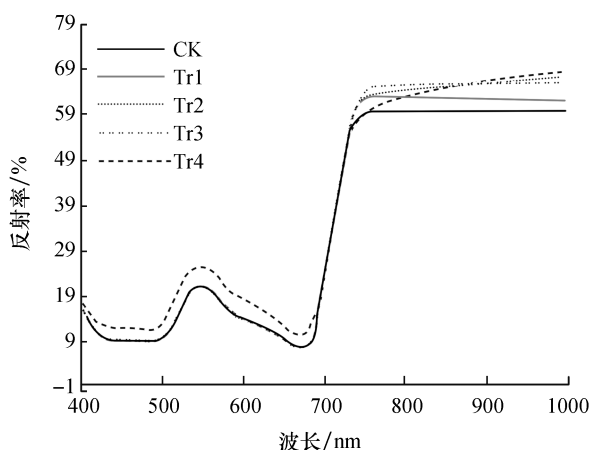


图4 不同程度干旱胁迫下白术叶片反射光谱

Fig. 4 The reflection spectra of the leaves of *Atractylodes* under different degrees of drought stress

总体上,重金属污染下的植物胁迫性研究是植物非生物胁迫研究的热点方向,并且红边“蓝移”是植物受到各种污染时其光谱所表现出来的最明显特征之一。另外,非金属物质、干旱及大气污染等对植物的胁迫性研究也趋势明显。

3 植物光谱数据处理与分析

获取植物的遥感光谱数据时,难免受到一些噪声和信号的干扰,此时需要对植物的光谱数据进行处理和相关的分析,从而获得较为完整、客观的植物光谱信息。

3.1 光谱数据预处理

光谱数据预处理就是解决光谱噪音、数据的筛选、光谱范围的优化等问题,常用的方法包括光谱数据的平滑、基线校正、数据求导、归一化处理、小波变换等^[40-41]。S. S. R. M. Lazim 等^[42]采用滑动平均法、多元散射校正、平滑滤波、标准正态变量、均值归一化等方法对蔗糖节间样品的光谱数据做了预处理,并比较评估了处理效果。因近红外波段是水分吸收较强烈的波段,水分会造成很大的噪声,修丽娜等^[43]避开了 1 300 ~ 1 600 nm 和

1 830 ~ 2 008 nm 两个水的吸收谷,而选择了 350 ~ 1 300 nm 波段作为镉污染下水稻的研究光谱。

小波变换是较为综合的处理方法。其很好地实现了光谱数据平滑、降噪及消除基线漂移,常用的高斯函数导数小波是效果较为理想的小波形式^[41]。其中,高斯函数形式为: $\theta(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$,

是一类起到平滑作用的低通函数。很多学者采用该处理方法对植物进行相关研究。如,高翔等^[44]以玉米叶片电信号为材料,分析了基于小波变换模极大值降噪、阈值降噪及空域相关性降噪三种方法,结果表明小波阈值降噪在植物电信号中是理想的降噪方法(图5)。候振雨等^[45]以烟草样品为材料做了相关研究,得出了 CWT(连续小波变换)-SVR(支持向量回归)方法优于基于全谱数据的 SVR 和偏最小二乘法的结论,该方法为近红外光谱定量分析提供了一种建模方法。吉曹翔等^[46]用 dbN 小波函数对砷污染下的水稻光谱进行研究,并采用小波变换的模极大值点来监测水稻砷污染原始光谱的奇异点。

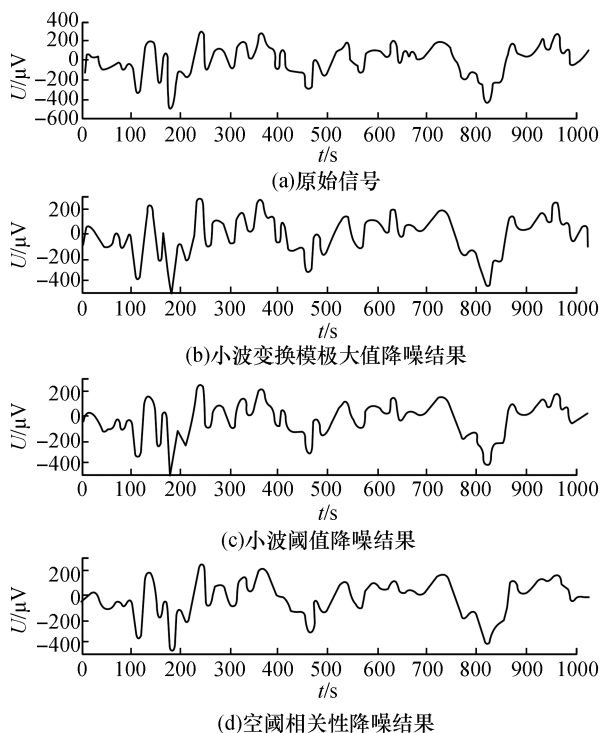


图5 玉米叶片原始信号与三种降噪结果时域图

Fig. 5 The time domain diagram of original signal and three kinds of noise reduction results of maize leaves

3.2 光谱数据分析

光谱分析对于植物来说具有一定的意义,包

括识别植物类型、认识植物的特性及机理等。目前,遥感监测植物污染胁迫的主要指标有两个:植被指数和红边参数,而常用的分析方法有微分、多项式拟合、逐步回归、偏最小二乘回归及人工神经网络等^[17]。

植被指数是因不同植物的特性,选择卫星合适的可见光和近红外波段进行组合,而形成的能够反应植物某些方面状况的指数^[47-48]。目前常用的植被指数有归一化植被指数、垂直植被指数、权重差值植被指数、比值植被指数、绿度植被指数、土壤调节植被指数等^[49]。R. B. Myneni 等^[50]指出大多数植被指数可以推广到植物表面反射率对相应波长的导数,其中该导数是叶片和土壤颗粒光学性质的函数;此外在光密度植被下,光谱导数及其指数可以严格地表明叶片中吸收剂的丰度和活性。李娜^[51]研究了矿区植物的反射率,发现725 nm与675 nm对应的反射率比值与Mn、Cu、Pb等多种金属元素的含量有较高的相关性,可以作为监测植被金属污染的一个指标,且Cu的含量与植被指数的相关性高于其他的金属。张玮等^[52]也采取一些常见植被指数对雷竹叶的叶绿素含量进行了相关性分析。另外,植被指数不仅可以分析植物健康状况或与其某些元素含量的相

关性^[53-54],还可以进行光谱数据误差的消除^[55]。

红边是研究植物胁迫效应的另一重要方面,其与植物叶绿素含量有关,叶绿素含量减少会使红光波段范围变窄,红边位置会发生蓝移;红边斜率与植被覆盖度或叶面积指数有关,红边位置与叶片叶绿素有关^[56-57]。不同铜浓度的胁迫下,植物的红边变化基本一致,随着铜胁迫程度的加深,350~800 nm处玉米的光谱反射率曲线不断抬升,呈现“绿峰”明显上升、而“红谷”的深度变浅的规律,相应的玉米的红边位置有规律地沿着波长轴不断向蓝光方向移动^[58-59]。白菜叶片可见光波段光谱反射率及红边蓝移的程度均与叶片的铜含量呈正相关^[60]。红边的描述离不开一阶微分光谱,胡军杰等^[27]就利用一阶导数光谱图像分析了铀矿区的不同植物光谱特征(图6),光谱一阶导数最大位置商陆比芒其骨和黄荆都要靠左,说明商陆红边蓝移现象比其他两种植物程度深一些。简季等^[61]则利用一阶导数光谱曲线分析了矿区红薯叶和南瓜叶随铬浓度变化而发生红边蓝移的现象。对光谱曲线求一阶导数,还有一个作用是寻找特征点,以便进一步分析,方式是从导数光谱中找到一些导数为零或者导数最大、最小的点^[62]。

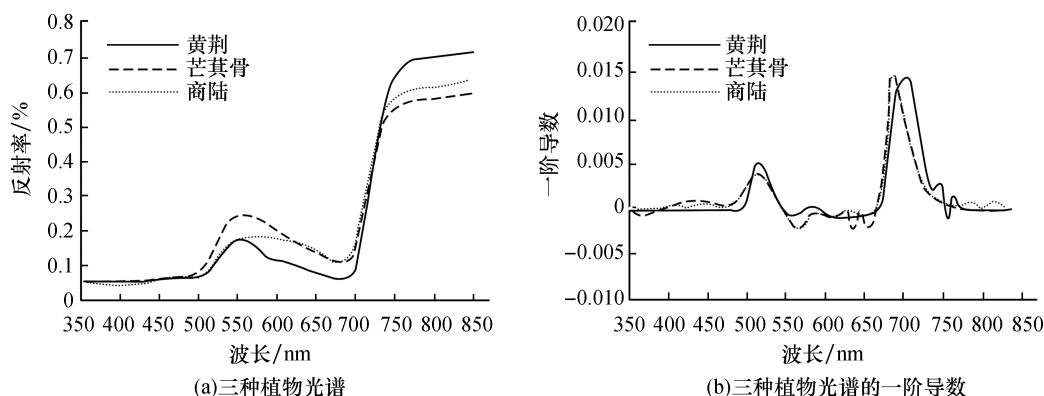


图6 铀矿区三种植物的光谱及其一阶导数

Fig. 6 The spectra of three plants in the uranium deposit and their first derivatives

4 结 论

目前,植物遥感研究已相对广泛而深入。大量研究者利用光谱仪对不同植物进行光谱测定,建立了相应的光谱数据库,利用遥感卫星对地球上不同区域的植物进行监测,了解该地区的植物类别以及这些植物的动态变化,利用专业软件对植物的光谱数据进行去噪、优化等预处理,采用植

被指数、导数光谱等方式选择特征波段,分析对应特征波段的光谱变化特征等。尽管如此,植物遥感还有不少方面值得开展进一步研究,现提出来仅供商榷。

1) 目前,当用光谱仪室外测量植物光谱信息时,对天气要求较高,不利于长期观测,需要对仪器进行优化。此外,测定不同大小的植物叶片或根茎时,光谱仪探头孔径难以满足测量精度要求。

2) 高光谱遥感研究中, 图像对于异质土壤的识别能力、质量较低的图像的预测能力、植物胁迫的敏感度及影响因素分析, 有待进一步提升。

3) 植物数据收集过程中会有斑点、亮线等卫星影像噪声和光谱曲线失真现象。针对不同的噪声, 应结合植物污染的类型及生理参数建立相应的预处理方法, 使图像更加清晰, 光谱信息更加准确。

4) 不同植物对同一种污染源有不同的生理响应, 同一种植物对不同污染源也有不同的生理响应。应进一步加强植物生理生化参量和光谱信息之间关系的研究, 尤其是非生物污染类型与植物生理生化参量之间的关系研究。

参考文献:

- [1] RAMEGOWDA V. The interactive effects of simultaneous biotic and abiotic stresses on plants: Mechanistic understanding from drought and pathogen combination[J]. *Journal of plant physiology*, 2015, 176: 47-54.
- [2] 王丽. 农田土壤重金属污染现状及防治对策[J]. *新农业*, 2019(3): 21-21.
- [3] 孙新宗, 项羽丰. 探析土壤重金属污染的现状及防止对策[J]. *农家参谋*, 2019(9): 219-219.
- [4] MATCHAVARIANI L, KALANDADZE B, LAGIDZE L, et al. Soil quality changes in response to their pollution by heavy metals, Georgia[J]. *Journal of environmental biology*, 2015, 36(1): 85-90.
- [5] 周宜君, 冯金朝, 马文文, 等. 植物抗逆分子机制研究进展[J]. *中央民族大学学报(自然科学版)*, 2006, 15(2): 169-176.
- [6] 杨献光, 梁卫红, 齐志广, 等. 植物非生物胁迫应答的分子机制[J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(6): 158-161.
- [7] 郭庆华, 胡天宇, 姜媛茜, 等. 遥感在生物多样性研究中的应用进展[J]. *生物多样性*, 2018, 26(8): 789-806.
- [8] HAMID N B, GHANI Z A, MAHSURI I, et al. Rubber leaf disease detection from low altitude remote sensing techniques[J]. *Advanced science letters*, 2018, 24(6): 4281-4285.
- [9] WANG X Q, WANG F, LIAO G P, et al. Multifractal analysis of rapeseed spectrum for chlorophyll diagnosis modeling[J]. *Spectroscopy and spectral analysis*, 2016, 36(11): 3657-3663.
- [10] 迟光宇, 刘新会, 刘素红, 等. Cu 污染与小麦特征光谱相关关系研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(7): 1272-1276.
- [11] 唐延林, 王人潮, 黄敬峰, 等. 不同供氮水平下水稻高光谱及其红边特征研究[J]. *遥感学报*, 2004, 8(2): 185-192.
- [12] 马保东, 徐奥, 方丹梅, 等. 不同胁迫条件下茄子叶片理化参数与光谱特征差异研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(2): 17-20.
- [13] ZHANG M, MENG J H, DONG T F, et al. Spectral responses analysis of soybean residues[J]. *Journal of remote sensing*, 2012(6): 1115-1121.
- [14] 刘伟东, 项月琴, 郑兰芬, 等. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析[J]. *遥感学报*, 2000, 4(4): 279-283.
- [15] LIU L Y, GUAN L L, PENG D L, et al. Detection of the photosynthesis protective mechanisms of C3 and C4 crops from hyper spectral data[J]. *Journal of remote sensing*, 2012(4): 783-788.
- [16] 袁琳, 张利权. 大型沉水植物狐尾藻不同盖度的光谱特征[J]. *遥感学报*, 2007, 11(4): 609-615.
- [17] 郭登巍, 吴昀昭, 马洪瑞. 植物污染胁迫遥感监测研究综述[J]. *遥感技术与应用*, 2009, 24(2): 238-244.
- [18] 刘圣伟, 甘甫平, 王润生. 用卫星高光谱数据提取德兴铜矿区植被污染信息[J]. *国土资源遥感*, 2004, 16(1): 6-10.
- [19] 张杰林, 刘德长, 张静波, 等. 基于地面光谱测量的砂岩型铀矿地物波谱特征分析[J]. *国土资源遥感*, 2004, 16(4): 23-26.
- [20] 彭玛丽, 叶娇珑, 何中海, 等. 基于高光谱数据的铀尾矿植被污染信息分析[J]. *地理空间信息*, 2015, 13(1): 111-114.
- [21] 王慧, 曾路生, 孙永红, 等. 重金属铜和锌胁迫下的小麦冠层反射光谱特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 171-176.
- [22] ZHU Y Q, QU Y H, LIU S H, et al. Spectral response of wheat and lettuce to copper pollution[J]. *Journal of remote sensing*, 2014, 18(2): 335-343.
- [23] 郭辉, 杨可明, 张文文, 等. 铜铅离子胁迫下玉米污染程度的光谱识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(1): 212-217.
- [24] 史钢强, 杨可明, 孙阳阳, 等. 玉米叶片光谱红边位置的铜胁迫响应与污染监测[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(13): 3234-3239.
- [25] 李庆亨, 杨锋杰, 张兵, 等. 重金属污染下盐肤木的生化效应及波谱特征[J]. *遥感学报*, 2008, 12(2): 284-290.
- [26] 吴连喜, 胡军杰, 游党呈, 等. 含铀植物的光谱特征研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(24): 32-35.
- [27] 胡军杰, 陈美兰, 吴连喜, 等. 铀矿区植物的光谱特性分析[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 34(4): 374-378.
- [28] 郭世忠, 田国良, 汪水花. 二氧化硫和重金属镉、铜等物质对植物光谱特性的影响[J]. *环境科学*, 1984, 5

- (6):13-18.
- [29] 石荣杰,潘贤章,王昌昆,等. 污染土壤对脐橙叶片镉含量影响的光谱预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2015,35(11):3140-3145.
- [30] 陈思宁,刘新会,侯娟,等. 重金属锌胁迫的白菜叶片光谱响应研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007,27(9):1797-1800.
- [31] 李高飞,胡光道. 铅锌矿区毛轴蕨反射波谱特征及其机理分析[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2010,34(6):96-100.
- [32] 迟光宇,陈欣,史奕,等. 水稻叶片光谱对亚铁胁迫的响应[J]. 中国科学, 2009,39(4):413-419.
- [33] 丛楠,徐刚,郑达兴,等. 冀东水厂铁矿区地物波谱特征分析[J]. 地质力学学报, 2007,13(4):376-383.
- [34] 徐琳煜,刘守赞,白岩,等. 白术叶片对于旱胁迫的光谱特征响应[J]. 中国生态农业学报, 2018,26(5):719-727.
- [35] 谷艳芳,丁圣彦,陈海生,等. 干旱胁迫下冬小麦高光谱特征和生理生态响应[J]. 生态学报, 2008,28(6):2690-2697.
- [36] 邓来飞,张飞,张海威,等. 水胁迫下典型盐生植被梭梭光谱特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2019,39(1):210-215.
- [37] 另青艳. 大气污染胁迫下植物光谱特征变化[J]. 现代园艺, 2015(7):11-13.
- [38] 张金恒. 植物大气污染响应高光谱监测实例研究[J]. 中国环境监测, 2008,24(5):40-42.
- [39] 刘殿伟,宋开山,张柏. 行道树叶绿素变化的高光谱神经网络模型[J]. 生态学杂志, 2006,25(3):238-242.
- [40] 张银,周孟然. 近红外光谱分析技术的数据处理方法[J]. 红外技术, 2007,29(6):345-348.
- [41] 高荣强,范世福,严衍禄,等. 近红外光谱的数据预处理研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2004,24(12):1563-1565.
- [42] LAZIM S S R M, NAWI N M, CHEN G, et al. Influence of different pre-processing methods in predicting sugarcane quality from near-infrared (NIR) spectral data[J]. International food research journal, 2016,23(增刊):231-236.
- [43] 修丽娜,刘湘南,刘美玲. 镉污染水稻高光谱诊断与建模[J]. 光谱学与光谱分析, 2011,31(1):192-195.
- [44] 高翔,习岗,刘锴,等. 基于小波的植物电信号降噪方法研究[J]. 西安理工大学学报, 2013,29(1):92-97.
- [45] 侯振雨,王国庆,蔡文生,等. 连续小波变换-支持向量回归用于植物样品多组分分析[J]. 计算机与应用化学, 2005,22(9):714-716.
- [46] 吉曹翔,李崇,关艳玲,等. 基于小波变换的水稻砷污染光谱奇异性研究[J]. 现代农业科技, 2015(3):199-215.
- [47] 田庆久,闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998,13(4):327-333.
- [48] 郭铤. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象, 2003,21(4):71-75.
- [49] 潘霞,高永,汪季,等. 植被指数遥感演化研究进展[J]. 北方园艺, 2018(20):162-169.
- [50] MYNENI R B, HALL F G, SELLERS P J, et al. The interpretation of spectral vegetation indexes[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1995,33(2):481-486.
- [51] 李娜. 重金属胁迫下矿区植物波谱异常与图像特征研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2007:1-65.
- [52] 张玮,王鑫梅,潘庆梅,等. 干旱胁迫下雷竹叶片叶绿素的高光谱相应特征及含量估算[J]. 生态学报, 2018,38(18):6677-6684.
- [53] 张玉萍,马占鸿. 氮素和小麦条锈病胁迫下高光谱遥感估产模型研究[J]. 中国农学通报, 2014,30(36):133-140.
- [54] 肖国增,吴雪莲,滕珂,等. 盐胁迫下匍匐剪股颖高光谱分析与电解质渗透率反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2016,36(11):3630-3636.
- [55] 乔晓英,马少阳,候会芳,等. 矿区植物重金属污染的高光谱特性及其反演模型[J]. 安全与环境学报, 2018,18(1):335-341.
- [56] 迟光宇,刘新会,刘素红,等. 环境污染监测中的植物光谱效应研究[J]. 环境与科学技术, 2005,28(增刊1):16-19.
- [57] DANIDL A S, GAMON J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. Remote sensing of environment, 2002,81(1):337-354.
- [58] 杨璐,高永光,胡振琪. 铜胁迫下植被光谱变化规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2008,28(4):74-76.
- [59] 杨璐,高永光,胡振琪. 利用“红边”估算铜胁迫下玉米叶绿素浓度研究[J]. 矿业研究与开发, 2008,28(5):77-79.
- [60] 刘素红,刘新会,侯娟,等. 植物光谱应用于白菜铜胁迫相应研究[J]. 中国科学, 2007,37(5):693-699.
- [61] 简季,宋练,谢洪斌,等. 重庆万盛采矿区主要农作物的光谱测量和分析[J]. 红外, 2013,34(8):30-34.
- [62] 薛楠. 土壤铜对植物生长及叶片反射光谱的影响研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学, 2016:1-93.

(责任编辑:周泉)