

# 高光谱技术——生态学领域研究的新方法

姜庆虎<sup>1</sup>, 童芳<sup>1,2</sup>, 余明珠<sup>1,2</sup>, 章影<sup>1,2</sup>, 廖畅<sup>1,2</sup>, 刘峰<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 高光谱技术是一种新的地物探测技术, 该技术以其敏锐的地物光谱特征探测能力为精准识别地物属性提供了强有力的手段, 在生态系统过程与属性研究中具有广阔的应用前景。该文以可见光-近红外光谱分析技术为例概述了高光谱技术的原理、特点与优势, 以及高光谱技术分析的流程; 总结并归纳了其在土壤、植物生理、农产品品质检测、凋落物分解方面的研究应用, 指出高光谱技术与遥感成像技术结合在生态监测研究中的优势; 归纳了高光谱技术应用中面临的问题, 并希望高光谱技术在生态学领域研究中得到更广泛的应用。

**关键词:** 高光谱; 分析流程; 生态监测; 信息提取; 参数反演

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2015)05-0633-08

## Hyperspectral Technique: An Opportunity in Ecology

JIANG Qing-Hu<sup>1</sup>, TONG Fang<sup>1,2</sup>, YU Ming-Zhu<sup>1,2</sup>, ZHANG Ying<sup>1,2</sup>, LIAO Chang<sup>1,2</sup>, LIU Feng<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The hyperspectral technique is a robust method that can accurately identify surface features via the high resolution detection of spectral features. It has wide application prospects in the study of ecological processes and properties. Here, we systemically reviewed the implication of the hyperspectral technique in soil, plant physiology, quality detection of agricultural products and litter decomposition based on its principles, characteristics, advantages and analysis processes. Its disadvantages and drawbacks were also discussed to allow for better application in ecology.

**Key words:** Hyperspectra; Analysis process; Ecological monitoring; Information extraction; Parametric inversion

近年来, 随着人类活动和全球环境变化的加剧, 生态系统过程及其功能发生了显著的变化。为此, 学者们在国家、区域尺度上开展了一系列的土壤、植被调查, 并通过不同时空尺度信息的挖掘来分析人类活动及气候变化对生态系统演替过程中生物量、生物多样性、稳定性以及碳、氮、水养分循环等生态系统过程及其属性的影响<sup>[1]</sup>。然而, 由于生态系统自身的复杂性和时空异质性, 传统的依靠野外采样—化学分析获取数据的方式耗时费力, 严重制约了大尺度上生态系统过程的研究。高光谱技术的发

展, 突破了传统数据调查高成本的限制, 为更快地获取生态系统各种复杂地物的属性提供了可能。

高光谱技术是指利用很多很窄的电磁波波段(一般光谱分辨率为 nm 级)获取研究对象的光谱数据, 并通过化学计量学方法探寻研究对象本身属性与光谱数据的关系模型, 从而识别、获取物体的组成和结构信息。该技术正是由于其极高的光谱分辨率, 在精确测量生态系统各种地物属性和生化参数的研究中表现出巨大的潜力。高光谱技术具有高效、无损、低成本和可重复等优势, 使得该技术不

收稿日期: 2015-06-10, 退修日期: 2015-07-15。

基金项目: 中国科学院百人计划项目(2012148); 国家自然科学基金青年科学基金项目(31400463)。

作者简介: 姜庆虎(1986-), 男, 博士后, 主要从事高光谱遥感、全球变化生态学相关研究(E-mail: jiang8687@163.com)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: liufeng@wbpcas.cn)。

仅可以加深人类感知地物的能力,而且可以大大提高人们获取多种生态系统模型输入参数的类型和精度<sup>[1]</sup>。本文以可见光-近红外光谱分析技术为例,简要概述了高光谱技术的原理、特点与优势、基本分析流程,总结了该技术在生态系统过程研究中的应用现状,指出了高光谱技术当前面临的关键问题,并希望为促进高光谱技术在生态学领域研究中得到更广泛的应用提供参考。

## 1 高光谱技术简介

### 1.1 高光谱技术的原理

高光谱技术利用地物反射的电磁波信息,依托于化学计量学方法,定量获取地物的生化属性及结构特征<sup>[2]</sup>。在电磁波的作用下,不同物体在特定的波长区域会形成反映物体组成和结构信息的光谱反射特性。其作用原理如图1所示:地物光谱反射特征源自地物内部的分子振动和电子跃迁;对于不同的物质,组成其自身的分子、原子团不同,且原子内部电子的运动轨迹也不同;当能量以光波的形式作用于地物时,在不同的波长处地物吸收和反射电磁波的强度不同,就会产生不同的光谱反射特性<sup>[2,3]</sup>。

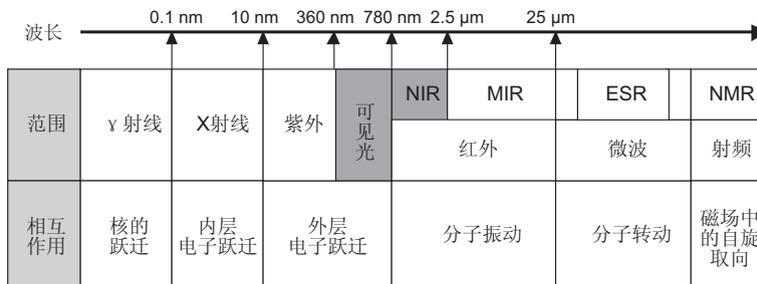
地物的光谱反射特征是物体的基本性质之一。任何物体的反射光谱中均包含其自身的本质信息,物体的光谱特征与其自身属性的密切关系是进行地物识别和反演研究的物理基础,为研究物体的理化性质提供了一个新的途径。

自然界中的一切物体,由于其自身组成和属性结构的不同,其反射的光谱特征亦有较大差异。如图2所示,土壤、植被以及水体在可见光和近红外

区间内的光谱反射曲线有显著差别。其中,植物叶片的光谱反射特征由其化学和形态学特征决定,这种特征与植被的发育、健康状况以及生长条件密切相关<sup>[4]</sup>,其主要影响因素包括叶片中的水分、叶绿素以及其他生物化学成分(如木质素、纤维素等)。作为一个复杂的混合物,土壤的光谱反射率有随波长变大而升高的趋势。土壤光谱反射特性曲线主要由于土壤中有有机质、氧化铁、水分对光波的吸收形成,而质地和母质同样对其光谱特征有显著影响。相对于土壤和植被,水体对太阳辐射能量的吸收明显要高,其光谱特征取决于三方面的贡献,即水的表面反射、底物反射和悬浮物反射<sup>[3]</sup>。在近红外和短波红外波段,水体几乎吸收全部的入射能量,反射率几乎趋近于零。

### 1.2 高光谱技术的特点和优势

一般来说,高光谱技术利用的波谱区间为可见光(400 ~ 760 nm)和近红外(760 ~ 2500 nm)光谱。该光谱区间内的地物光谱具有精度高、信息范围广、信息量大、信息强度弱和谱峰重叠等特点<sup>[5]</sup>。具体而言,高光谱技术的首要特点是光谱的分辨率很高,其精度一般为10 nm左右;并且高光谱数据可以完全涵盖地物的探测谱段范围(400 ~ 2500 nm);从而可以有效地反映不同地物分子、原子和离子的晶格振动信息,大幅度提高了精细信息的表达能力;使得基于高光谱信息分析和探测地物属性成为可能。然而,由于地物在近红外区的摩尔吸光系数较低,导致该谱段的信息强度较弱;加上地物分子倍频、合频吸收的组合方式很多,存在“同谱异物、同物异谱”的谱峰重叠现象,加大了地物组分定量分析的难度。



NIR 代表近红外; MIR 代表中红外; ESR 代表电子自旋共振; NMR 代表核磁共振。  
NIR indicates near-infrared; MIR indicates mid-infrared; ESR indicates electron spin resonance;  
NMR indicates nuclear magnetic resonance.

图1 高光谱作用原理<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Hyperspectral principle<sup>[2]</sup>

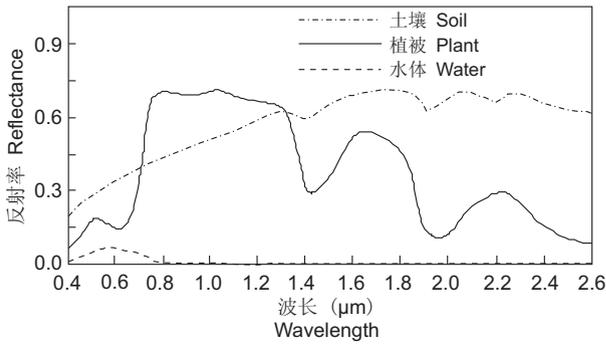


图2 典型地物可见光和近红外光谱反射率曲线<sup>[3]</sup>  
 Fig. 2 Visible and near-infrared reflectance spectra of typical objects<sup>[3]</sup>

相对于以往的化学分析方法，高光谱技术具有如下优势<sup>[5]</sup>：(1)测试简单，无繁琐的前处理和化学反应过程；(2)测试速度快，测试过程大多可在1 min内完成，大大缩短了测试周期；(3)测试过程无污染，可有效避免传统化学分析中产生的废气、废液和废渣；(4)测试人员专业化要求较低，可单人完成多个化学指标的大量测试；(5)对样品无损伤，可以在不破坏动植物活体和微生物生境的情况下进行测试；(6)重复性好，并且可以实现在线分析。

## 2 高光谱技术分析的基本流程

### (1) 样品光谱的测定

高光谱技术分析的成功与否与光谱测定仪器及测量环境的稳定性和重现性直接相关。从测定仪器的角度来看，高信噪比、高稳定性和仪器间的一致性是人们一直追求的目标。当前，性能较好的国内外主流仪器有 ASD FieldSpec 4 分光辐射光谱仪、

GER 2600 光谱仪、SVC HR-1024 光谱仪、NIRQuest 近红外光谱仪和傅里叶光谱仪等。从测量环境的角度来看，选择相对稳定的光源及传输环境是获取高质量光谱数据的基础。野外光谱测量的光源为太阳光，而室内测量为人造光源(如卤光灯)。因此，在野外测量时，应选择晴空天气，测量时间以 10:00 ~ 15:00 为宜，此时大气中的水分和其他干扰因素较少；而室内测量一般选择在暗室中进行。地物的野外和室内光谱测定流程类似，本文以运用 ASD 地物光谱仪进行室内光谱测量为例进行具体阐述。仪器的架设如图 3 所示，在测量前，仪器应预热 30 min，将处理好的样品放置到干净的培养皿内并铺设均匀，在暗室内用 50 W 的卤光灯作为光源照射，光线入射角度为 45°，光源距样品中心约 50 cm，光谱仪探头位于样品表面且垂直上方 15 cm。测试之前先用标准板校正，测试过程中每测 10 个样本校正一次，以保证测量稳定。每个样本采集多条光谱曲线，取平均值得到各样品的实际反射光谱数据。

### (2) 高光谱技术分析预处理

高光谱技术分析预处理主要是针对特定的样品体系对异常样品进行剔除，消除光谱噪声，筛选数据变量，优化光谱范围，以降低非目标因素对光谱的影响，为建立光谱校正模型和预测未知样品信息奠定基础<sup>[7]</sup>。预处理过程分为两方面：①样品预处理，包括异常样品的剔除和建模集样品的筛选。异常样品的剔除多是基于预测浓度残差、主成分得分聚类、马氏距离的计算以及杠杆值与学生 T 检验等标准。建模集样品的筛选多是基于常规的建模样

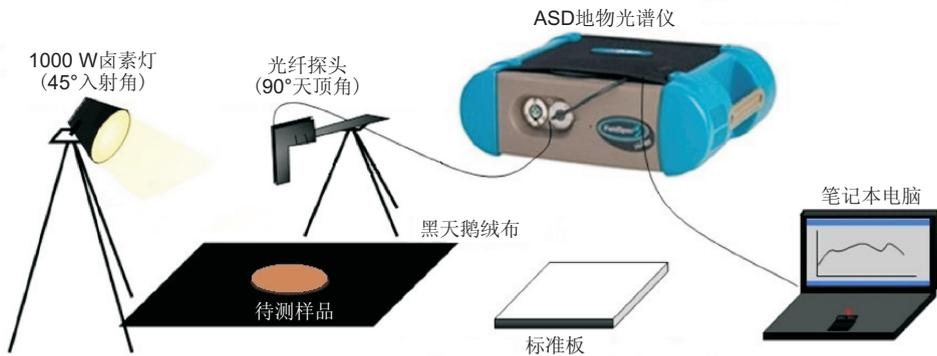


图3 室内非接触式光谱仪器平台位置示意图<sup>[6]</sup>  
 Fig. 3 Location sketch of the non-contact spectrum instrument platform<sup>[6]</sup>

品挑选法,如含量梯度法、Kennard-Stone法等。通过筛选,可以有效减低测量基础数据的样品数,降低建模成本;②光谱预处理,包括光谱噪声消除和光谱特征提取。采集的光谱除样品特定组分的信息外,还包含了其他无关的信息和噪声,如电噪声、样品背景和杂散光等。通过化学计量学方法建立校正模型时,消除光谱噪声十分必要。常用的方法有:光谱的平滑、求导、光散射校正、小波变换、正交信号校正等。另外,通过光谱范围的优化和特征波段的提取,可以有效剔除不相关的变量,提高运算效率和预测能力,从而建立稳健性更好的校正模型。常用的波长选择方法有相关系数法、逐步回归法、间隔偏最小二乘法、遗传算法等。

### (3) 高光谱估测模型的建立与评价

建立光谱预测模型的流程如图4所示,首先选取一定数量的样品,采用标准化学方法测量出它们的组分含量化学值,并选用光谱仪测量出它们的光谱信号;把这些样品分为建模集和预测集,通过建模集的光谱信号和化学值的关系,利用统计回归方法(如多元线性回归(MLR)、主成分回归(PCR)、偏最小二乘法(PLS)、人工神经网络(ANN)等)建立校正模型;进一步通过预测集的光谱信号和建立的校正模型预测出对应的组分含量化学值来检验校正模型。

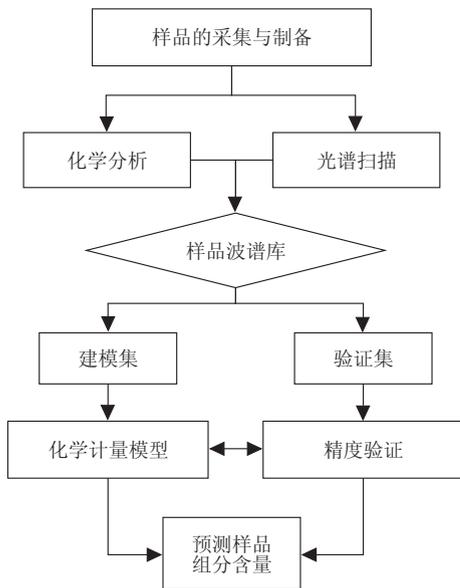


图4 高光谱技术分析流程

Fig. 4 Analysis flow chart of the hyperspectral technique

模型稳定性和预测精度的评价指标采用决定系数(determination coefficient,  $R^2$ )、均方根误差(root mean square error, RMSE)和相对分析误差(relative percent deviation, RPD)。建模集交叉验证  $R^2$  值越大,说明模型越稳定、精度越好;验证集  $R^2$  值及 RPD 越大、RMSE 越小,说明预测效果越好。

## 3 高光谱技术的生态学应用

### 3.1 高光谱技术在土壤属性监测中的应用

土壤是地球陆地表面具有肥力并能生长绿色植物的疏松层,为植物生长提供营养和立地条件。作为陆地生态系统最大的碳库,土壤碳库的微小变化对全球碳循环有重要的影响,因此土壤资源是影响生态系统功能的主要因素,有必要对其属性进行实时监控和制图。然而,受土壤空间异质性、数据缺乏以及采样成本等的限制,现有土壤数据精度和适用程度受到很大制约,不利于区域性碳库管理和可持续经营。高光谱技术的发展使快速、实时获取土壤属性成为可能<sup>[7]</sup>。早在20世纪70年代,国外学者就对土壤的属性及其光谱特征做了初步研究,建立起二者的关系模型,并指出土壤中的有机质、有机化合物的几种官能团以及矿物元素在近红外区具有清晰的光谱纹迹<sup>[8,9]</sup>;近年来,高光谱技术被用来预测土壤的物理结构,如颗粒组成和团聚体平均粒径等<sup>[10]</sup>。在我国,学者们主要将高光谱技术运用在对土壤养分的检测中,如陈红艳<sup>[11]</sup>对土壤氮、磷及钾含量进行光谱分析,预测值均达到了与实验室化学分析值相近的水平(其  $R^2$  值分别为0.95、0.93和0.91)。史舟<sup>[2]</sup>在总结国内外相关研究成果后指出,土壤有机质的平均预测的  $R^2$  值为0.808,有机质的预测结果评价  $R^2$  值为0.823。此外,高光谱技术还可以检测土壤的许多其他性质,例如用高光谱技术测定土壤粘粒含量、阳离子交换量(CEC)、基本饱和度、基础呼吸量、pH值、粉砂量等的实验结果都是比较可靠的<sup>[12]</sup>。综上所述,利用高光谱技术快速获取土壤属性及生化参量,可以为数字土壤制图和土壤动态监测提供大量的有效数据。

### 3.2 高光谱技术在植被生理生态中的应用

植物的色素含量、水分含量、营养状况等指标

是衡量植被生长和生理状况的重要指标<sup>[13]</sup>。在植被生理生态的研究中,传统的方法是运用化学分析方法测定植被的各种生化参量,结果虽然真实可信,但是往往基于破坏性取样,并且无法对同一植被样品进行长期动态监测。近年来已实现了从植物叶片和冠层水平上,利用高光谱技术对植被生理变化的快速、无损地动态监测。大量研究证明,植物叶绿素、类胡萝卜素和花青素等的含量均有其特有的光谱吸收特征,其特征波段分别为 640 ~ 660 nm、430 ~ 450 nm 和 537 nm<sup>[14]</sup>。通过高光谱技术实现植物色素的定量反演,进而反演植株衰老、病虫害及环境胁迫(水分、温度)等条件下的生理特性,其结果与采用传统方法获得的实验结果呈极显著相关<sup>[15]</sup>。植被在水分胁迫的情况下,其光谱信息会发生改变,利用高光谱技术可以快速提取植被含水量的信息。有研究表明,1530 nm 和 1720 nm 波段的植被光谱适合估算植被含水量<sup>[14]</sup>。Ceccato 等<sup>[16]</sup>以 1600 ~ 1820 nm 波段的光谱比值反演单位叶面积的含水量,相关系数达 0.9。此外,高光谱技术还可对植物的营养状况进行实时监测,王人潮等<sup>[17]</sup>提出水稻氮素缺乏会导致叶片颜色、形态的变化,因而可以利用 760 ~ 900 nm、630 ~ 660 nm 和 530 ~ 560 nm 间的光谱信息进行反演。利用高光谱技术分析植被的生理生态状况和特征,可以为大范围内监测诊断植被的成长、健康状况提供依据,对适时调整灌溉、施肥等管理措施具有重大意义。

### 3.3 高光谱技术在农产品品质检测中的应用

近年来,随着新型光谱仪器的出现,高光谱技术在我国农产品品质检测领域得到了广泛的成功应用,分析对象涉及谷物、经济作物(烟草、茶叶和油料作物等)、果蔬等<sup>[18]</sup>。其中,在谷物分析方面,高光谱技术主要利用植株叶片或冠层尺度的光谱来估算作物的生长状态,从而预测其产量和质量。如唐延林等<sup>[19]</sup>指出高光谱差值植被指数 R990 ~ R440 和 R1200 ~ R440 的估产效果最佳,最高精度达 95%;魏良明等<sup>[20]</sup>采用偏小二乘回归法,建立了测定玉米混合籽粒样品蛋白质、淀粉含量的校正模型,其模型的  $R^2$  值均大于 0.97,外部验证和交叉验证的  $R^2$  值介于 0.92 和

0.95 之间。在经济作物方面,高光谱技术不仅可用于烟草、茶叶中的总糖、蛋白质、尼古丁、氨基酸、茶多酚等组分含量的测定<sup>[21,22]</sup>,还可应用于油料作物(如大豆、花生、油菜籽和棉籽等),对其水分、蛋白质、脂肪、芥酸等进行分析<sup>[23,24]</sup>。在水果蔬菜方面,测量对象有黄瓜、大白菜、西红柿、鲜辣椒、南瓜、水蜜桃、苹果和柑橘等,分析指标包括胡萝卜素、糖分、维生素 C、糖度、酸度和内部褐变<sup>[25,26]</sup>。在果蔬食用安全方面,高光谱技术可用于果蔬硝酸盐含量和有机磷农药残留的鉴别<sup>[27,28]</sup>。可见,高光谱技术在农产品检测方面发挥了巨大的作用,其研究前景可观。

### 3.4 高光谱技术在凋落物分解监测中的应用

凋落物是一个重要的有机物和养分储存库,它的分解是联系植被-土壤-大气的关键通道,在陆地生态系统的地球化学循环中起着关键作用,在维持森林生态系统生产力、土壤有机质的形成以及群落演替等方面具有不可替代的地位<sup>[29-32]</sup>。凋落物质量与其组分的结构复杂性有关<sup>[33]</sup>,如分子的大小和多样化的化学键。而凋落物在 400 ~ 2500 nm 的光谱则包含这些化学组成的全部信息,由全光谱和主要的-OH, -CH, -NH 基团结合键的伸展和弯曲振动提供<sup>[34]</sup>。研究表明,高光谱技术能够相对准确地预测凋落物的化学成分<sup>[35,36]</sup>。例如, Gillon 等<sup>[37]</sup>建立了凋落物初始光谱特征与凋落物可分解性的相关性,可以用近红外光谱测定凋落物分解过程中质量的变化。Martin 等<sup>[38]</sup>应用高光谱技术成功预测了 17 种落叶和常绿植被叶片中的木质素、纤维素以及总氮含量,其预测模型的  $R^2$  值分别为 0.83、0.69 和 0.90。Mancinelli 等<sup>[39]</sup>利用高光谱技术成功预测了凋落叶中麦角固醇的含量( $R^2 = 0.836$ )。Gillon 等<sup>[37]</sup>研究了 34 种不同植被凋落物的分解状态并指出,与凋落物组分(碳、氮、半纤维素、纤维素和木质素)含量相比,其最初的光谱数据在预测凋落物的分解能力方面更具优势。此方法快速便捷,虽有待完善,却可带来凋落物分解研究方法的重要变革<sup>[40]</sup>。

### 3.5 高光谱技术的其他应用

高光谱技术利用的可见光-近红外波段主要反映的是 C-H、O-H、N-H、S-H 等化学键的信息,

因此其分析范围几乎可覆盖所有的有机化合物和混合物。近年来, 高光谱技术在生态学领域得到了广泛应用。如 Paz-Kagan 等<sup>[41]</sup>提出了土壤光谱质量指数(SSQI), 并成功运用它对土壤质量进行评价, 提出可利用该指数对热点区域的土地利用变化和土壤侵蚀状况进行评估。Zangerlé 等<sup>[42]</sup>利用高光谱技术成功推测蚯蚓排泄物的熟化年龄, 并能进一步判断其来源于哪种蚯蚓。Ertlen 等<sup>[43]</sup>利用高光谱技术成功识别土壤有机质的古生物来源, 进而推演古代植被类型的历史演替规律。随着生态学的快速发展, 高光谱技术以其简洁、快速、无损等诸多优势, 将会在生态领域研究中发挥更广泛的作用。

此外, 随着计算机技术和成像技术的快速发展, 将光谱技术和成像技术相结合并发展出高光谱遥感技术。该技术在对地物进行成像的同时, 可获取每个像元内目标地物的高光谱信息, 形成连续的光谱图像。与传统的遥感技术不同, 高光谱遥感具有超高的光谱分辨率, 在大面积的地物特征识别和定量分析方面具有很大的潜力。近年来, 已经研制成的高光谱传感器(如美国的 AVIRIS、Hyperion 及我国的 OMIS 等)在地质、植被调查、农业、环境等领域得到广泛的应用。例如, 王润生等<sup>[44]</sup>对新疆东天山地区和西藏驱龙地区开展矿物填图, 矿物识别率和识别正确率均达到 85%以上。在植被调查和农业遥感上, 高光谱遥感可以利用植物的“红边”效应, 很好地描述植物的健康及色素状态, 实现大面积森林、草原的分类调查并进行火灾监测、病虫害评估和作物估产等<sup>[1,45]</sup>。在湖泊、海洋遥感中, 高光谱遥感可以很好地区分水草及水华, 如李俊生等<sup>[46]</sup>利用高光谱遥感技术建立了太湖水域中水草、水华和水体的判别公式, 获得较高的识别精度。此外, 高光谱遥感技术在生物入侵制图的研究中发挥着重要的作用。Pengra 等<sup>[47]</sup>基于 Hyperion 高光谱遥感数据, 绘制了 *Phragmites australis* 在美国西海岸湿地中的入侵形态, 其研究总体精度达 81.4%。高光谱遥感将传统的遥感成像技术与高光谱技术结合, 在获取地物生化参量, 特别是大尺度的地物信息的定量反演方面具有一定的优势, 在生态系统过程研究中具有更为广阔的前景。

## 4 高光谱技术应用中面临的问题

高光谱技术依托其极高的光谱分辨率, 在生态学领域有着巨大的研究潜力, 但在实际应用中仍存在一些有待解决和完善的问题:

### (1) 高光谱反演精度及其适用范围有限

与传统的化学分析方法相比, 高光谱技术在地物属性的反演中能够获得较好的预测精度, 具有快速、无损、低成本和可重复的优点。但是, 在对精度要求较高的研究中, 其预测结果往往无法支持最初的科学假设, 甚至造成相反的研究结果。如高光谱技术在土壤检测中, 对土壤有机质和水分含量的预测结果较好, 但是对其中的微量元素(如硼、锌、铜等元素)的预测能力有限。此外, 受可见光-近红外光谱穿透能力的限制, 高光谱技术仅仅能反演地物的表观参数(如表层土、上林冠层等), 而缺乏对地物内部组分参数的反演预测能力, 这限制了高光谱技术的适用范围。因此, 在今后的研究中, 应深入挖掘光谱技术的潜力, 在探索新的建模方法提高预测精度的同时, 需综合考虑地物与光谱的作用机理, 更好地利用高光谱技术准确获取地物的表观参数信息。

### (2) 高光谱建模中易受外部因素干扰

由于生态学的研究对象往往是不同物质的组合或混合, 其光谱信息中除自身信息外, 还受其他无关的信息和噪声的干扰, 如背景、杂散光及仪器噪声等, 消除这些外部因素的干扰十分必要。目前, 常用的方法有数据平滑、导数变换、光散射校正等。近年来, 正交信号校正、小波变换、外部因素正交等新方法被发展和应用到对外部因素干扰的消除中, 模型的预测能力得到不同程度的提高。因此, 如何更好地使用化学计量新方法消除混合光谱中外部因素的干扰, 是未来高光谱技术研究中一项非常重要的内容。

### (3) 高光谱反演模型缺乏普适性

当前, 运用高光谱技术建立的地物属性反演模型已有很多, 但是对同种地物仍没有一种普遍适用的模型方法。各模型建立所需的光谱信息受温度、光照条件、仪器架设等的影响显著; 并且对于同种地物(如植被)来说, 在不同的生长时期表现出不同的光谱特

征; 各个国家和组织间没有统一的光谱信息采集标准和模式, 已建立的大多数模型需要因地制宜地进行修正和验证, 限制了模型的传递和应用的普适性。因此, 学者们正努力尝试建立起统一的光谱采集标准和建模策略, 发展地区、国家级地物光谱库, 以便更好地实现大样本数据的光谱定量监控。

## 5 结语

高光谱技术已成为生态领域数据获取的前沿技术之一, 该技术依托地物光谱的响应机理, 能够精确监测生态系统的演变过程信息, 为实现生态学的快速发展提供了基础。目前, 高光谱技术在土壤、植物生理、农产品品质检测及生态系统碳循环领域已取得了大量研究成果, 但仍处于起步和发展阶段, 成熟的高光谱技术还需要不断地探索与研究。随着遥感技术的发展, 高光谱遥感的应用将光谱分析技术扩展至空间领域, 为在大尺度上对地物光谱信息数据挖掘和生态建模提供了更广阔的应用前景, 有望成为未来生态学发展数据获取的一种新模式。

## 参考文献:

- [ 1 ] 岳跃民, 王克林, 张兵, 陈正超. 高光谱遥感在生态系统研究中的应用进展[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(4): 471-478.
- [ 2 ] 史舟等编著. 土壤地面高光谱遥感原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 2-3.
- [ 3 ] 张兵, 高连如. 高光谱图像分类与目标探测[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 2-5.
- [ 4 ] Boochs F, Kupfer G, Docter K, Kühbauch W. Shape of the red edge as vitality indicator for plants[J]. *Int J Remote Sens*, 1990, 11(10): 1741-1753.
- [ 5 ] 张小超, 吴静珠, 徐云. 近红外光谱分析技术及其在现代农业中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 35-37.
- [ 6 ] 陈奕云. 基于可见-近红外光谱的土壤部分重金属含量提取[D]. 武汉: 武汉大学, 2011: 1-151.
- [ 7 ] 彭玉魁, 张建新, 何绪生, 卢恩双. 土壤水分、有机质和总氮含量的近红外光谱分析研究[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 553-559.
- [ 8 ] Bowers SA, Hanks RJ. Reflection of radiant energy from soils[J]. *Soil Sci*, 1965, 100(2): 130-138.
- [ 9 ] Hunt GR. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared[J]. *Geophysics*, 1977, 42(3): 501-513.
- [ 10 ] Gholizadeh A, Amin MSM, Borůvka L, Saberioon MM. Models for estimating the physical properties of paddy soil using visible and near infrared reflectance spectroscopy[J]. *J Appl Spectrosc*, 2014, 81(3): 534-540.
- [ 11 ] 陈红艳. 土壤主要养分含量的高光谱估测研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012: 1-121.
- [ 12 ] 聂志东, 韩建国, 张录达, 李军会. 近红外光谱技术(NIRS)在草地生态学中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(4): 691-696.
- [ 13 ] 罗海婧, 张永清, 石艳华, 李鑫, 张耀文. 不同红小豆品种幼苗对干旱胁迫的生理响应[J]. 植物科学学报, 2014, 32(5): 493-501.
- [ 14 ] 薛忠财, 高辉远, 彭涛, 姚广. 光谱分析在植物生理生态研究中的应用[J]. 植物生理学报, 2011, 47(4): 313-320.
- [ 15 ] 彭涛, 李鹏民, 贾裕娇, 高辉远. 介绍两种无损测定植物活体叶片色素含量的方法[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(1): 83-86.
- [ 16 ] Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, Jacquemoud S, Gregoire JM. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain[J]. *Remote Sens Environ*, 2001, 77(1): 22-33.
- [ 17 ] 王人潮, 陈铭臻, 蒋亨显. 水稻遥感估产的农学机理研究Ⅱ. 农学参数与光谱变量的相关分析[J]. 浙江农业大学学报, 1993, 19(Sup.): 17-24.
- [ 18 ] 褚小立, 袁洪福, 陆婉珍. 近年来我国近红外光谱分析技术的研究与应用进展[J]. 分析仪器, 2006(2): 1-10.
- [ 19 ] 唐延林, 王纪华, 黄敬峰, 王人潮. 利用水稻成熟期冠层高光谱数据进行估产研究[J]. 作物学报, 2004, 30(8): 780-785.
- [ 20 ] 魏良明, 严衍禄, 戴景瑞. 近红外反射光谱测定玉米完整籽粒蛋白质和淀粉含量的研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(5): 630-633.
- [ 21 ] 张建平, 谢雯燕, 束茹欣, 严衍禄. 烟草化学成分的近红外快速定量分析研究[J]. 烟草科技, 1999(3): 37-38.
- [ 22 ] 马强, 张忠锋, 董小卫, 李晓, 周显升, 肖协忠. 近红外技术在烟草分析领域的研究进展[J]. 现代农业科技, 2008(12): 185-188.
- [ 23 ] 李钧, 王宁惠, 余青兰, 杜德志, 付忠. 傅立叶变换近红外光谱技术分析完整油菜籽含油量数学模型

- 的建立[J]. 青海大学学报:自然科学版, 2006, 24(6): 28-30.
- [24] 陆宇振, 杜昌文, 余常兵, 周健民. 红外光谱在油菜籽快速无损检测中的应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1257-1263.
- [25] 金同铭, 崔洪昌. 苹果中蔗糖、葡萄糖、果糖、苹果酸的非破坏检测[J]. 华北农学报, 1997, 12(1): 92-97.
- [26] 张德双, 金同铭, 徐家炳, 赵岫云. 几种主要营养成分在大白菜不同叶片及部位中的分布规律[J]. 华北农学报, 2000, 15(1): 108-111.
- [27] 王多加, 林纯忠, 钟娇娥. 近红外光谱法非破坏快速检测生菜中硝酸盐含量[J]. 食品科学, 2004, 25(10): 239-241.
- [28] 姚炜, 夏彩云. 红外光谱技术在食品安全检测中的应用[J]. 中国卫生检验杂志, 2009, 19(6): 1451-1452.
- [29] Jacob M, Weland N, Platner C, Schaefer M, Leuschner C, Thomas FM. Nutrient release from decomposing leaf litter of temperate deciduous forest trees along a gradient of increasing tree species diversity[J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41(10): 2122-2130.
- [30] Bansal S, Sheley RL, Blank B, Vasquez EA. Plant litter effects on soil nutrient availability and vegetation dynamics: Changes that occur when annual grasses invade shrub-steppe communities [J]. *Plant Ecol*, 2014, 215(3): 367-378.
- [31] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2889-2895.
- [32] 刘昕, 江明喜, 邓红兵. 三峡地区香溪河流域叶片凋落物分解过程中 N、P 含量动态研究[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(6): 613-619.
- [33] Wickings K, Grandy AS, Reed SC, Cleveland CC. The origin of litter chemical complexity during decomposition[J]. *Ecol Lett*, 2012, 15(10): 1180-1188.
- [34] 刘强, 彭少麟. 植被凋落物生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 30.
- [35] Parsons SA, Lawler IR, Congdon RA, Williams SE. Rainforest litter quality and chemical controls on leaf decomposition with near-infrared spectrometry[J]. *J Plant Nutr Soil Sc*, 2011, 174(5): 710-720.
- [36] Ono K, Miki K, Amari M, Hirai K. Near-infrared reflectance spectroscopy for the determination of lignin-derived compounds in the decomposed and humified litters of coniferous and deciduous temperate forests in Northern Kanto District, Central Japan [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2008, 54(2): 188-196.
- [37] Gillon D, Joffre R, Ibrahima A. Can litter decomposability be predicted by near infrared reflectance spectroscopy? [J]. *Ecology*, 1999, 80(1): 175-186.
- [38] Martin M, Aber J. Analyses of forest foliage III: Determining nitrogen, lignin and cellulose in fresh leaves using near infrared reflectance data [J]. *J Near Infrared Spec*, 1994, 2(1): 25.
- [39] Mancinelli G, Costantini ML, Rossi L. Predicting ergosterol in leaf litter by near-infrared spectroradiometry: A preliminary assessment [J]. *Eur J Soil Biol*, 2014, 63(4): 49-54.
- [40] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [41] Paz-Kagan T, Shachak M, Zaady E, Karnieli A. A spectral soil quality index (SSQI) for characterizing soil function in areas of changed land use [J]. *Geoderma*, 2014, 230-231: 171-184.
- [42] Zangerlé A, Hissler C, Blouin M, Lavelle P. Near infrared spectroscopy (NIRS) to estimate earthworm cast age [J]. *Soil Biol Biochem*, 2014, 70: 47-53.
- [43] Ertlen D, Schwartz D, Brunet D, Trendel J-M, Adam P, Schaeffer P. Qualitative near infrared spectroscopy, a new tool to recognize past vegetation signature in soil organic matter [J]. *Soil Biol Biochem*, 2015, 82: 127-134.
- [44] 王润生, 甘甫平, 闫柏琨, 杨苏明, 王青华. 高光谱矿物填图技术与应用研究 [J]. 国土资源遥感, 2010, 83(1): 1-13.
- [45] 袁迎辉, 林子瑜. 高光谱遥感技术综述 [J]. 中国水运: 学术版, 2007, 7(8): 155-157.
- [46] 李俊生, 吴迪, 吴远峰, 刘海霞, 申茜, 张浩. 基于实测光谱数据的太湖水华和水生高等植物识别 [J]. 湖泊科学, 2009, 21(2): 215-222.
- [47] Pengra BW, Johnston CA, Loveland TR. Mapping an invasive plant, *Phragmites australis*, in coastal wetlands using the EO-1 hyperion hyperspectral sensor [J]. *Remote Sens Environ*, 2007, 108(1): 74-81.