

高光谱遥感林业信息提取技术研究进展

吴 见, 彭道黎*

北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083

摘要 高光谱遥感技术已成为林业遥感领域的前沿技术之一。回顾国内外高光谱遥感技术在林业信息提取中的研究进展, 总结归纳了森林树种高光谱分类与识别、森林生态物理参数高光谱反演与提取、林木养分元素高光谱监测与诊断、森林郁闭度信息高光谱提取、森林灾害高光谱监测五个主要研究方面。在此基础上, 文章指出了在林业遥感应用中高光谱技术尚待解决的关键问题, 并阐述了可能解决问题的途径。最后对林业高光谱遥感技术的应用前景作了展望。

关键词 高光谱; 林业遥感; 森林参数反演; 信息提取; 森林监测

中图分类号: TP79 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)09-2305-08

引言

自20世纪60年代开始, 计算机技术、空间分析技术等迅速发展, 加快了遥感技术前进的步伐。目前, 遥感技术已经在林业、地质、军事、海洋、气象等众多领域得到了广泛的应用和发展。特别是20世纪末出现的高光谱遥感技术给各领域的遥感定量研究带来了新的发展, 在林业遥感应用中成为了重要的领先技术之一。高光谱遥感是将光谱技术和成像技术相结合, 以纳米级的超高光谱分辨率对目标地物进行成像, 同时获取数十甚至上百个波段, 形成连续光谱图像的技术。高光谱遥感的光谱分辨率很高, 一般波段宽度小于10 nm, 在林业的定量监测与分析方面具有很大的潜力。

在林业遥感应用上, 高光谱遥感数据凭借大量的光谱信息在森林火灾监测、森林资源变化信息提取、森林病虫害评估、森林分类与调查等方面起到了举足轻重的作用, 为实时而科学的森林经营管理增添了一种新技术手段。

1 高光谱遥感技术在林业中的研究现状

林业高光谱技术正处于发展阶段, 已能够提供多种地面高光谱遥感数据。林业资源管理和林业调查监测有效结合是林业遥感的基本要求, 这就需要通过提高森林火灾监测、森林资源变化信息提取、森林病虫害评估、森林分类与调查等方面的精度, 高光谱技术的诞生为提高森林监测精度提供了强有

力的手段。

目前, 高光谱技术在林业遥感领域取得了丰硕的研究成果, 主要包括如下五个方面: (1) 森林树种高光谱分类与识别, (2) 森林生态物理参数高光谱反演与提取, (3) 林木养分元素高光谱监测与诊断, (4) 森林郁闭度信息高光谱提取, (5) 森林灾害高光谱监测。

1.1 森林树种高光谱分类与识别

基于高光谱遥感森林树种分类的关键是高光谱识别技术。与多光谱数据相比, 高光谱数据同时具有图谱合一、数据量大以及波段多等特点, 需要开发针对高光谱的有效识别算法才能更好地实现森林树种识别。近20年来, 学者们以传统算法为基础开发了许多用于高光谱遥感的识别算法, 主要分为基于光谱特征、基于光谱匹配和基于统计分析方法等。

1.1.1 基于光谱特征技术

植被光谱一般具有一些独特的吸收谱带, 不同树种的独特谱带的特征形态和波长位置往往比较稳定, 能反映出树种之间的差异, 是高光谱识别树种的理论基础。光谱微分技术可以得到光谱反射率最小、最大波长位置以及拐点等特征参数, 该技术不仅能削弱大气吸收、散射和辐射影响, 消除系统误差, 还能够提取深度、宽度、波长位置等吸收峰参数。光谱一、二阶微分的公式为

$$\text{FDR}_{\lambda_j} = \frac{dR}{d\lambda} = \frac{R\lambda_{j+1} - R\lambda_j}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

$$\text{SDR}_{\lambda_j} = \frac{d^2R}{d\lambda^2} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{dR}{d\lambda} \right] = \frac{R\lambda_{j+2} - 2R\lambda_{j+1} + R\lambda_j}{(\Delta\lambda)^2} \quad (2)$$

收稿日期: 2010-11-30, 修订日期: 2011-04-05

基金项目: 北京林业大学研究生科技创新专项计划项目(BLYJ201103)和国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD23B05)资助

作者简介: 吴 见, 1985年生, 北京林业大学博士研究生 e-mail: xiangfeidewujian@126.com

* 通讯联系人 e-mail: dlpeng@bjfu.edu.cn

其中, λ_j 是 j 波段; FDR_{λ_j} 是波段 j 和 $j+1$ 间的一阶微分; SDR_{λ_j} 是波段 j 和 $j+2$ 间的二阶微分; R_{λ_j} , $R_{\lambda_{j+1}}$, $R_{\lambda_{j+2}}$ 是波段 j , $j+1$, $j+2$ 的反射率; $\Delta\lambda$ 是波段 j 和 $j+1$ 间的差值。

基于光谱特征技术识别树种的研究已经比较成熟, 宫鹏等采用 CASI 高光谱影像, 通过微分技术成功识别了美国加州六种针叶树, 证实了高光谱遥感在树种识别研究中的巨大潜力。随后, 刘秀英等^[1]、王志辉等^[2]将光谱一、二阶微分技术成功地应用到国内的雪松、杉木、桂花树和小叶樟等树种的识别上。

1.1.2 基于光谱匹配技术

高光谱技术能够利用连续的窄波段描述树种的光谱曲线, 这样可以将整个光谱曲线用于不同树种的匹配识别, 与单波形相比, 改善了树种识别的变异、光谱漂移等不确定性的影响, 精度大大提高。

(1) 光谱角度匹配

该技术通过计算参考光谱与观测光谱间的夹角以反映地物间的匹配程度, 从而达到分类的目的。两者之间的夹角越小, 匹配程度就越高, 分类与识别越可靠。假设有 n 波段的高光谱数据, 参考矢量是 $\mathbf{Y}[Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n]$, 测试矢量是 $\mathbf{X}[X_1, X_2, X_3, \dots, X_n]$, 两者间的夹角为

$$\cos\theta = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n X_i^2)(\sum_{i=1}^n Y_i^2)}} \quad (3)$$

光谱角度匹配对反照率、太阳辐射度以及地形等不敏感, 能较好地削弱这些影响因素, 在树种分类识别中光谱角度匹配得到了广泛的应用。于祥等^[3]比较了光谱角度匹配、空间距离法和相关系数法识别红树林内部种类的精确度, 认为光谱角度匹配精度较高达 80% 以上, 能够满足实际调查需求。

(2) 光谱相关匹配

由于光谱角度匹配无法区分正、负相关性, 奥斯马等结合了皮尔森相关系数对光谱角度匹配法的余弦做了类型表达, 计算公式

$$R = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

其中, Y 是参考光谱, X 是测试光谱。皮尔森相关系数把光谱进行标准化, 光谱相关匹配变化范围是 -1 和 $+1$ 之间, 而光谱角度匹配仅在 0 和 1 之间变化。通过实验研究, 光谱相关匹配法可以更好地压缩阴影, 识别精度更高。

(3) 交叉相关光谱匹配

该方法可以计算参考光谱和测试光谱不同波长处的交叉相关系数, 从而得到交叉相关曲线图。完美匹配后得到的交叉相关抛物线的峰值相关系数是 1 , 中心匹配数是 0 , 交叉相关系数公式为

$$r_m = \frac{n \sum R_r R_t - \sum R_r \sum R_t}{\sqrt{[n \sum R_r^2 - (\sum R_r)^2] [n \sum R_t^2 - (\sum R_t)^2]}} \quad (5)$$

其中, R_r 是参考光谱, R_t 是测试光谱, m 是匹配位置, n 是

重合波段数。

(4) 基于模型技术

广义夹角或者距离的计算需要独立性强的多维变量, 相关性强的变量计算距离毫无意义, 对树种的识别能力并不会随着维数的增多而增强。建立模型识别森林树种是高光谱技术发展的趋势所在, 如何建立模型来更好地区分相似性高的树种光谱曲线形状是研究的热点。相关拟合分析模型就是一种能够拟合相关光谱曲线形状来表达树种光谱差别和特征的方法, 进而实现树种识别。该模型的原理是通过分析参考光谱与测试光谱间的相关曲线, 分析比较两者相关曲线的截距以及斜率达到树种识别的目的。另外, 马心璐等^[4]分析了传统分类方法的缺陷后, 选择 OMIS-I 数据, 利用支持向量机模型提取了枣园地区植被信息, 并取得了理想的效果。通过模型提取不同树种信息能够发现不同树种间微小的信息差别, 有利于提高树种信息提取精度。

光谱匹配技术提取树种信息的准确率虽然有所提高, 但实际操作起来仍然存在一些问题, 如①缺乏通用、实用的光谱库; ②光谱数据的精校正难度较大。为解决这些问题, 学者们选择从影像上直接提取参考光谱, 主要有两种方法: 将选取训练样区的平均光谱当作参考光谱, 或者将组分光谱看成参考光谱。尽管这些方法简便易行, 但不能保证精度。基于此, Dennison 等探讨了最佳参考光谱选择的问题: 假设已获取某地物的 N 个样本, 将阴影光谱与样本 j 的光谱进行线性组合来拟合剩余 $N-1$ 个样本光谱, 同时计算拟合误差平均值, 把拟合误差平均值最小的样本光谱看成参考光谱。而该方法没有考虑其他类别的模拟误差, Wang 等创立了多目标优化法, 依次通过非支配排序遗传算法、层次分析法以及模糊综合评价法, 最大化同类样本参考光谱的代表性以及异类样本参考光谱的差异性、最小化训练误差, 最终获取了最优参考光谱。针对多种类别的情况, Wang 等为每个类对选择最佳的参考光谱, 这样参考光谱一方面增加了数量, 另一方面提高了质量, 使得分类精度有所提高。高光谱数据冗余大、波段多, 但是 Wang 等并没考虑降维, 直接使用全波段进行匹配, 王圆圆等^[5]对 Wang 等的方法进行了改进, 采用支持向量机提取分类函数, 分析敏感性后代代筛选次要波段, 以获得最优特征子集/权重, 最后执行获取参考光谱的算法, 经验证改进后的方法提取效果更好。

1.1.3 基于统计分析技术

高光谱数据具有波段相关性强、数据量大且高度冗余的特点, 因此有必要对高光谱数据进行特征提取。由于光谱维与图像维是有机融合的, 所以高光谱数据同时具有光谱和空间相关性。但一般高光谱数据的空间分辨率达几十米左右, 地物仅占有几个像元, 空间连续性差且相关性低, 因此对于高光谱数据, 光谱间相关性是研究的重点。

对光谱间相关性进行提取和特征压缩的技术主要包括最小噪音变换(minimum noise fraction, MNF)、典范变量分析以及主成分分析(principal component analysis, PCA)等。PCA 能够通过数学变换降低多个波段间的相关性, 适用于识别具有显著光谱差异的树种。MNF 不仅拥有 PCA 的压缩数据的能力, 而且可以通过降噪处理提高高光谱数据的质

量,使得树种识别效率进一步提高,该方法也是高光谱特征提取的重要手段;典范变量分析能够使用较少典型变量间的相关性,整体反映两个多元随机变量间的联系,通过计算已知树种和所有未知树种间的两两典范变量对,依据各自的紧密度来识别未知树种。

1.2 森林生态物理参数高光谱反演与提取

森林生态物理参数是指森林含水量、色素含量、叶面积指数等表征林学信息的参数。目前,森林生态物理参数高光谱反演与提取的方法有很多种,本文选取了具有代表性的三种森林生态物理参数(森林含水量、色素含量、叶面积指数)进行论述。

1.2.1 森林含水量信息提取

植被含水量能间接反映所在区域土壤的水分信息,是干旱监测非常重要的指标。植被受到水分胁迫后,其光谱信息会发生改变,这是利用高光谱技术提取植被含水量信息的理论依据。研究表明,1 530~1 720 nm波段的植被光谱适合估算植被含水量。Ceccato等^[6]以1 600~820 nm波段的光谱比值反演单位叶面积的含水量,相关系数达到了0.9。目前森林水分含量信息提取方法有三种。

(1)基于物理参数与含水量的关联关系法

该方法主要是建立高光谱反演的生态物理参数与森林含水量的相关关系。通常叶片的含水量和叶绿素含量成正比,Gond等建立了温带森林水分状况和叶绿素积累量之间的关系。

(2)光谱指数法

目前有许多高光谱的指数用于计算森林含水量,这类指数一般都是基于可见光-近红外波段计算而来的。其中最普遍的是水分指数(water index, WI)和归一化差值水分指数(normalized difference water index, NDWI),部分研究采用水应力指数(moisture stress index, MSI)、归一化差值近红外指数(normalized difference infrared index, NDII)以及归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)计算了森林含水量。通常情况下,很多指数并不能准确地反映植被含水量的变化,如何在众多指数中选择合适的指数提取森林含水量信息是高光谱应用中常遇的难题。Serrano等基于AVIRIS数据对以上几种指数反演植被含水量的能力进行了分析,结果表明NDWI和WI最适合计算植被含水量。Sims等^[7]从光谱反射率的角度综合了WI等指数对浓密与稀疏冠层的探测能力差异,提出冠层结构指数(canopy structure index, CSI)反演植被含水量。Penuelas等的研究也证明了WI能够比较敏感地探测叶片的相对含水量等。

(3)基于物理模型的方法

采用观测的光谱进行叶片级别含水量提取的技术已经相对成熟了,而受土壤、生化参量、结构等因素的影响,生化参量的提取精度不高,冠层尺度的含水量提取依然具有挑战性。目前反演森林冠层含水量的方法主要有物理模型反演法。PROSPECT模型能计算叶片400~2 500 nm波段的透过率和半球反射率,被称为是基于“平板模型”的叶片辐射传输模型。该模型的主要参数包括含水量、干物质含量、叶绿素等。SAIL模型是经常使用的一个冠层二向性反射物理模型,

该模型包含了均匀水平植被冠层上行下行散射以及直射光通量的辐射传输过程。Kuusk改进了该模型,加入一个热点形状参数,称改进后的模型为SAILH。SAIL模型的参数主要有叶面积指数、土壤反射率、叶片透过率与反射率、几何参数等。赵祥等^[8]将PROSPECT模型与SAIL模型进行耦合,并简称为PROSAIL模型,以多种常用的指数反演叶面积指数和叶片含水量得到冠层含水量,在分析各指数计算含水量能力的基础上,提出了改进的植被含水量计算指数,使得计算精度得到提高。

PROSAIL模型的表达式为

$$\rho(\lambda) = f(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, LAI, Cab, Cw, Cdm, SKYL, Rs) \quad (6)$$

其中, $\rho(\lambda)$ 为 λ 波长处的反射率;Cab为叶绿素a+b的含量($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$);Cw为单位叶面积水重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$);Cdm为叶片干物质含量($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$);LAI为叶面积指数;Rs为土壤反射率; θ_s 太阳天顶角; θ_v 观测天顶角; ϕ_s 太阳方位角; ϕ_v 观测方位角;SKYL天空光比例。

1.2.2 林木色素高光谱反演

植被叶片反射光谱在可见光范围内主要受色素影响,而近红外范围受纤维素、内部结构、蛋白质等影响,这个特点是高光谱作为一种非破坏性手段监测林木色素含量的基础。大量研究证明:高光谱能实现定量色素,特别是叶绿素。叶绿素在640~660 nm的蓝光波段以及430~450 nm的蓝紫波段吸收最强,胡萝卜素仅吸收蓝紫部分波段,花青素在537 nm吸收光谱最强(图1)。

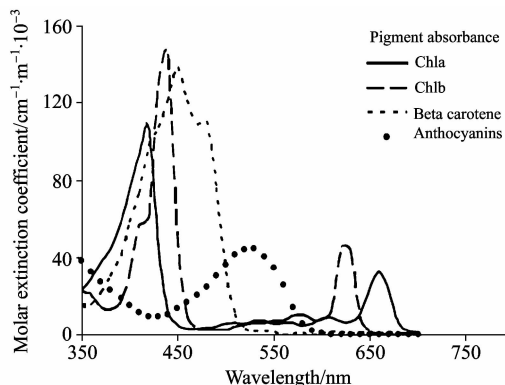


Fig. 1 The absorption spectra of main plant pigments (quotation from Blackburn)

林木叶绿素高光谱监测最初只是叶片级别,随后发展到冠层级别。利用高光谱数据反演林木色素含量的方法主要分为五种:

(1)基于单波段反演

实验表明550~700 nm波段附近的反射率与叶绿素有较好的相关性。刘璇等^[9]测定了杉木冠层光谱,采用统计学分析法分析了叶绿素a和高光谱反射率的相关性,结果表明530~690 nm处的光谱与叶绿素含量相关性最大。刘秀英等^[10]研究了樟树幼林光谱对叶绿素反应敏感的波段,认为其位于400, 556和621 nm波段处,以此建立叶绿素含量估算模型。大量研究数据证明,某一波段色素吸收率越低,其

光谱反射率对高浓度色素越敏感；反之，某一波段色素吸收率越高，其反射率对低浓度色素越敏感。

(2) 基于多波段组合的光谱色素指数反演

多数研究在单一森林类型冠层尺度上反演叶绿素含量，发现对叶绿素敏感的波段位于绿、红以及红外附近，利用这些波段可以建立光谱色素指数进行冠层层次叶绿素反演。大多数光谱色素指数将几个波段反射率进行比值处理，一般是可见光、可见-近红外或红边区域波段，这些波段对色素敏感但对其他因子相对不敏感。

目前，大部分指数是针对叶绿素而建立的，如特定色素简单植被指数、三角形植被指数、特定色素归一化差值指数、叶绿素吸收面积指数、叶绿素吸收比值指数以及改进的叶绿素吸收比值指数等。刘璇等建立了叶绿素 a 含量与植被指数的关系模型，选择最佳的高光谱模型计算了杉木叶绿素 a 的含量。刘殿伟等^[11]分析了行道树叶绿素含量及其高光谱植被指数的关系。李凤秀等^[12]实测了不同盖度和水深小叶章的冠层叶绿素 a 含量及高光谱反射率，采用 350~1 050 nm 波段反射率及其微分光谱构建植被指数，找出与叶绿素 a 相关性最大的植被指数，建立了反演小叶章叶绿素 a 含量的回归模型。

然而，光谱指数的构建常常是选择了几个最优的特征波段，但是这些最优特征波段的位置会因环境和地区而改变，因此，光谱指数经常缺乏一致性和稳定性。

(3) 光谱微分技术

光谱微分技术是指数学模拟反射光谱并求出各阶数的微分值或者差分值，找出光谱弯曲点及其极值波长所对应的位置。微分光谱具有减少土壤或残余物反射引起的变异等特点^[12]，因此比原始反射率光谱更具有优势。研究表明光谱红边位置与森林冠层叶绿素含量相关性较强^[13]。红边位置是指波长范围在 680~750 nm 内的反射率一阶导数峰值所对应的波长，也有研究发现在红边波长范围内一阶导数具有两个以上峰值，出现双峰分布的红边位置值。红边特征参量主要有红边斜率(Srg)以及红边面积(Arg)，其公式为

$$\text{Srg} = \max\left(\frac{dr(\lambda)}{d\lambda}\right) \Bigg|_{680}^{750} \quad (7)$$

$$\text{Arg} = \int_{680}^{750} R d\lambda \quad (8)$$

国外研究者很早就采用光谱红边位置等参数研究了叶绿素 a 和 b 的变化情况，Miller^[14]，Blackburn^[15]，Horler，Curran 等研究发现红边位置(700 nm 附近导数峰值处波长)及其形状能很好地反映冠层叶绿素状况，且 Miller 等建立了反高斯红边光学模型(IG 模型)计算了红边参数，进一步估算了叶绿素含量。国内这方面的研究起步较晚，但也取得了不少研究成果，主要应用在樟树幼林^[16]、梧桐^[17]、苹果^[18]、落叶松、丁香^[19]和樟树等树种上。研究发现红边位置随着物候以及叶绿素含量的变化在 680 和 750 nm 波段之间移动，与森林衰败、植物胁迫和叶片发育相联系，并且吸收成分浓度与高阶导数成正比。

目前大部分研究都是采用回归分析的方法反演林木叶绿素含量，姚付启等^[17]在分析无花果、白毛杨和法国梧桐叶绿

素与高光谱反射率及红边位置的回归关系的基础上，提出了以高光谱曲线偏度和峰度进行估算的新方法，并建立了基于 660~760 nm 波段一阶导数光谱偏度、峰度的叶绿素计算模型，反演结果优于回归分析法。韩阳等^[19]将高光谱、偏振和多角度遥感融合，测量了丁香叶片的多角度偏振高光谱信息并进行微分处理，建立了叶绿素含量反演的回归模型，提高了林木叶绿素含量高光谱监测技术的多样性。

(4) 小波分析

在实际研究中，观测到的信号往往是整个空间的总信息量，不但包括叶绿素光谱信息，也含有其他成分光谱信息。小波分析则能够把观测到的复杂的信号分解，得到不同频率或者尺度的小波信号。植被各理化成分的光谱反射和吸收特征有显著的局部性，与傅里叶分析不同的是，小波分析能体现信息的局部频谱特性，因此其局部信息分析功能在反演林木叶绿素研究中得到了有效利用。连续小波变换的离散化公式为

$$WT_x(a, k) = \frac{\Delta T}{a} \sum_n x(n) \phi\left[\frac{(n-k)}{a}\right] \quad (9)$$

其中 a 是尺度因子，代表了信息的频率特性； k 是位移因子，代表了信息的位置特性，等同于光谱在 k 附近的局部加权平均值。小波函数具有局部衰减特性，使得加权平均权重递减，因而小波系数能够代表光谱在 k 处的局部范围信息，与光谱指数相比稳定性更强。

国内外已有许多成功的例子，如郭洋洋等^[20]采用小波分析技术分解了叶片的反射光谱，以获得的小波系数作为自变量进行回归分析，反演了叶片的叶绿素含量。宋开山^[21]等、Blackburn 则以不同尺度的小波分析技术，结合逐步多元回归法计算叶片叶绿素含量，同样提高了反演精度。

(5) 辐射传输模型

光学辐射传输模型的物理学基础比较扎实并且适用性较强，目前应用在林木色素测量上的有反演和正向两类辐射传输模型，其中 LEAFMOD 与 PROSPECT 模型在叶片尺度上已经实现了较为精确地叶绿素反演。在冠层尺度上，冠层辐射传输模型和耦合叶片模型的反演效果较为理想，如 Zarco-Tejada 等^[22]采用了一种混合技术以色列光谱指数为评价函数，结合辐射传输模型反演了叶绿素含量，并且证明了在冠层辐射传输模型和耦合叶片模型中应用合适的比值指数为评价函数，可以实现航空高光谱遥感叶绿素含量的反演。董晶晶等利用辐射传输模型反演了不同植被种类的冠层叶绿素含量，同时构建了用于计算冠层水平叶绿素含量的高光谱指数模型。

在我国由于仪器和地域等因素，该模型在林业上的应用研究很少，但神经网络模型的应用已有了初步的进展。姚付启等^[23]研究了毛白杨及法国梧桐的叶绿素与常见植被指数的关系，采用 BP 神经网络模型反演了叶绿素含量，并取得了理想的效果。以往大部分研究都将统计模型或过程模型单独使用，将二者结合的研究没有受到足够的重视，杨曦光等^[24]在结合过程模型与统计模型的基础上，利用分布反演法提取了森林的叶绿素含量，为今后的研究打下了研究基础。相比于光谱色素指数以及经验校正等方法，辐射传输模

型定量色素的技术更加具有普适性,但研究中也发现在冠层尺度上的反演精度会因树种及反演方法的变化而产生较大的浮动。

1.2.3 叶面积指数高光谱反演

国内外已有很多学者对森林叶面积指数(leaf area index, LAI)的高光谱反演做了研究,从不同的植被类型和尺度提出了植被指数、物理建模及小波分析等方法反演叶面积指数。

(1) 植被指数法

其基本思路是建立植被指数与实测 LAI 的回归关系来计算更大范围的 LAI,主要包括单变量统计以及多变量统计法,这种方法经验性很强,需要获取足够的研究区资料。常用的植被指数主要包括:易受土壤背景影响的比值植被指数(ratio vegetation index, RVI)、环境植被指数(environment vegetation index, EVI)、差值植被指数(difference vegetation index, DVI)和 NDVI;抵抗背景影响的改进的非线性植被指数、垂直植被指数、土壤调节植被指数、转换型土壤调整植被指数、减少的简单比率等;抗大气影响的大气阻抗植被指数等;与生物物理参关系密切的非线性植被指数、改进的归一化差值植被指数、修正的简单比率等。

浦瑞良等采用多元回归法研究了 CASI 数据各植被指数与美国西部黄松 LAI 的关系,发现 NDVI 与 LAI 存在较强的双曲线关系,同时证明了植被指数法估算森林 LAI 是可行的。Kenneth 对于旱地区稀疏植被的研究表明,采用单一数据源得到 NDVI 的 r^2 最大为 0.63,而高光谱和多光谱数据组合的线性混合模型得到的 NDVI 的 R^2 为 0.74,精度明显提高,为精确监测森林 LAI 提供了基础。Peng 等发现高光谱 SWIR 和 NIR 区 820, 1 040, 1 200, 1 250, 1 650, 2 100 和 2 260 nm 波长附近计算的植被指数在监测森林 LAI 方面的潜力很大,其能力并不比红和近红外波段计算的植被指数差。Martin 等^[25]则认为与含水量显著的高光谱波段构建的植被指数与 LAI 的相关性更强,并在随后的研究中证实了这一点,同时发现垂直植被指数比 RVI 监测森林 LAI 的精度更高。

尽管利用高光谱植被指数与森林 LAI 建立的统计模型能满足一定的需求,但许多研究发现其反演精度受到限制。由于受土壤、大气、叶冠结构及植被密度等影响,森林 LAI 与光谱反射率基本呈非线性关系,统计模型缺乏可移植性和鲁棒性,不能确定 LAI 与植被指数的关系,不易推广使用。

(2) 物理建模法

该模型的理论基础是模拟高光谱信息在空间中的传输过程,包括辐射传输模型和几何光学模型。其中几何光学模型法以像元分解理论为依据,涵盖了林冠的多重散射问题,以 Li-Strahler 模型为代表;随后部分学者从树叶分布及树枝等不同的角度测量树冠,提出了反演北方针叶林 LAI 的 4-Scale 和 5-Scale 模型。辐射传输模型是以植被辐射传输理论为基础,可以解释冠层内部的交互作用以及辐射传输,能够表示冠层光谱与 LAI 的联系,以 SAIL 模型为代表,通常在反演时采用二向性反射分布 BRDF 模型进行优化调整参数。Sandmeier 利用室内 GEO-3700 观测的高光谱数据分析了 BRDF 的影响因子,发现二向性反射模型结合实测的高光谱

数据反演森林 LAI 精度较高。国内也有不少基于物理模型反演森林 LAI 的研究,如汤旭光等^[26]采用神经网络模型反演了东北主要绿化树种 LAI。

物理模型法虽然反演过程复杂,但不受森林类型影响,也可将多种模型结合使用以提高 LAI 的计算精度。常用的有 Kuusk-Nilson 模型,是一种多波段、方向性的混合模型,同时具有几何光学和辐射传输模型的特性。

(3) 小波变换法

小波变换法具有很强的信号分析与处理功能,在特征提取、数据压缩等研究方面已经应用比较成熟,而在森林 LAI 等参数反演上的应用还不多,但也有了一些先驱性的研究。Ruiliang 等^[27]利用 EO-1 高光谱数据对比研究了小波变换、主成分分析及波段选择三种方法反演森林 LAI 的效果,结果发现利用小波变换法反演的精度较高。

1.3 林木养分元素高光谱监测与诊断

林木养分主要有氮、磷、钾元素等,缺乏将引起光合效率降低,生长不良。氮、磷、钾含量是林木长势评价的重要指标,以高光谱技术提取林木养分参数的理论依据是:由于叶片内碳、氢、氧、氮分子有机键的弯曲和振动,其短波红外波段的反射波谱将显示典型的吸收特征,以及可见光波段的电子跃迁所产生的吸收特征。林木养分高光谱监测方法主要有多元统计回归和基于波谱特征参数的方法。

(1) 多元统计回归法

该方法的前提为叶片光谱是各养分加权吸收特性总和。大量已有研究表明林木叶片反射光谱和氮含量有很强的相关性,尤其是 550~675 nm 波段,因此逐步回归法适用于叶片氮素含量分析。袁金国等^[28]利用 Hyperion 数据建立了不同森林类型氮含量与光谱一阶导数的多元逐步线性回归关系,证明该方法监测大尺度林木生化组分是可行的。朱西存等将苹果花氮素含量及其敏感的特征光谱参数进行回归分析,分别建立对数、线性、指数、乘幂、二次多项式五种模型,为快速监测苹果花氮素含量及营养诊断提供了技术指导。高光谱数据冗余现象严重,易受非特征波段影响,针对这一特性董晶晶等^[29]利用偏最小二乘法对橘树光谱数据与氮素含量进行回归分析,结果表明基于偏最小二乘法估算叶片全氮含量效果较好,精度达 85% 以上。

(2) 基于特定波谱特征参数法

植被波谱特征参数是指波谱吸收峰的斜率、宽度、深度以及波长位置等。通过红边特征参数与叶片全氮含量的关系分析研究,表明近红外平台和红边振幅与叶片全氮含量具有线性正相关现象。通过实测数据和高光谱遥感数据建立的回归模型反映出特定波段比值,如(R_{750}/R_{710}),与全氮含量的相关系数超过了 0.7,可见光谱的特征比值能敏感地探测养分元素的变化。

综上所述,高光谱技术能够对林木磷、氮等生化组分进行准确的监测与诊断,为大范围诊断与监测林木长势及养分提供了依据,对实现适量适时施肥等精细管理具有重大意义。

1.4 森林郁闭度信息高光谱提取

在遥感影像上获取郁闭度参数是相对比较简单的,但由

于混合像元现象,一般空间分辨率 $>20\text{ m}$ 时,采用多光谱获取的森林郁闭度精度较低,因为多光谱数据波段少且太宽,无法描述代表郁闭度光谱的变化情况。而高光谱通常具有几十至几百个连续波段,光谱分辨率在 10 nm 左右,因此筛选出对郁闭度敏感的窄波段成为可能,提高了郁闭度提取精度。目前利用高光谱技术提取森林郁闭度的方法主要包括回归分析法和混合像元分解法。

(1) 回归分析法

该方法最为常用,在森林郁闭度高光谱遥感估算中占据主导地位,主要是根据样点建立地表实测郁闭度值与遥感信息之间的估算回归模型,然后将该模型推广到整个研究区域。Pu 等将 Hyperion 影像进行小波变换,选取了对森林郁闭度敏感的变量进行逐步回归分析,估测精度达 85% ,表明利用高光谱影像提取森林郁闭度信息能够满足生产需求。谭炳香等^[30]同样采用了 Hyperion 数据,研究比较了基于光谱特征提取和光谱特征选择的两种回归分析方法的效果,结果表明无论哪种方法精度都在 85% 以上,且基于光谱特征提取的回归分析法优于特征选择法。尽管回归分析法在森林郁闭度信息提取中尤为重要,也取得了一定的研究成果,但该方法依赖特定区域的实测值,适合小区域研究,区域较大时会造成精度降低,难以推广使用。

(2) 混合像元分解法

混合像元分解法是根据像元的特点、亚像元的结构和分布特征,建立不同的植被覆盖度模型。因为单个像元含有多种地物信息,所以可将遥感信息分解,建立像元分解模型。按原理不同,可将混合像元分解模型分为线性模型、几何光学模型、模糊分析模型、随机几何模型和概率模型。其中线性模型最为常用,如浦瑞良等在 CASI 高光谱影像中提取“纯”的端元光谱对 AVIRIS 影像进行光谱混合像元分解,得到了郁闭度分量图,与红外航片判读结果相比,该方法的提取值高 $2\%\sim 3\%$,并且具有更合理的郁闭度分布,证明了采用光谱混合像元分解法提取高光谱影像中的郁闭度信息是可行的。

1.5 森林灾害高光谱监测

目前,遥感林业灾害监测已在森林病虫害监测、森林火灾监测等方面得到了广泛的应用。高光谱遥感的大范围周期性观测、光谱分辨率高等特性为森林火灾的及时监测预警提供了有利条件。

1.5.1 森林病虫害监测

迄今为止,高光谱技术在森林病虫害监测方面的研究主要包括如下三个部分:①森林失叶量监测。森林病虫害引起的失叶现象是生态系统重要的影响因子,因此森林失叶监测是森林病虫害监测的一个重要指标,主要的技术是植被指数法。Franklin 等、Haara 等结合地面调查和遥感数据研究了云杉色卷蛾侵害云杉林后产生的失叶量,结果表明,云杉林遭到虫害侵袭后红外反射率降低,可见光反射率增加,且色度指数以及 NDVI 值下降明显。②森林病虫害受害分级。加拿大、美国等许多地区的研究涉及到森林病虫害受害的分级分类问题,受到研究者青睐的技术主要有比值植被指数和监督分类法,其中两波段的比值法应用最为广泛。Vogelmann

等曾采用两波段的比值技术监测了云杉林的受害情况,认为该技术完全能够满足虫害的定量分级。Franklin 应用监督分类技术对铁杉黑头蚜虫和尺蠖落叶病进行分级,精度分别达 82% 和 90.6% ,满足了监测需求。③森林病虫害与光谱特征之间的关系。当森林遭到病虫害后,叶绿素大量减少,使得叶绿素吸收光谱能力减弱,森林反射可见光的能力增强而红外波段的反射率下降,因此森林各波段的光谱发生了较大变化,尤其近红外波段,这些变化为高光谱监测病虫害提供了依据。大量研究表明高光谱数据能够细致地反映森林近红外波段的强发射特征,森林受病虫害侵袭叶绿素减少时,林冠的强反射波段偏移至短波方向,而森林缺水叶片枯萎时,林冠的强反射波段偏移至长波方向。高光谱具有判断临界窄波段光谱区域的能力,Bowers 经过影像的空间和光谱分析,采用光谱特征法证实了高光谱区别冷杉林冠层灾害以及结构变化的能力。

1.5.2 森林火灾监测

研究表明植物燃烧时大约有 767 nm 的微小光谱信号脉冲,是 K 元素燃烧产生的,这种波长极短的脉冲目前只有高光谱技术能捕获。火灾边界数据及时准确的获取是森林火灾监测首先要解决的技术问题。目前最常用的监测方法主要是基于 MODIS 数据的火情监测算法模型,该模型改进了 NOAA/AVHRR 和 GOES/VAS 算法,使得森林火灾监测精度有所提高,同时提供了闷烧、明火、火情等级划分以及辐射能量等监测内容。但火情监测算法模型是以光谱亮度温度为基础,把 1B 光谱数据集变成亮温数据集等待时间太久,并且该模型要建立数学运算非常复杂的火点背景窗口,耗时很长。赵文化等^[31]基于 MODIS 红外辐射数据对热点异常的辐射特性进行了分析,提出了火点指数(normalized difference thermal index, NDTI)监测森林火灾,由于运算时采用了很少的数据集,NDTI 模型比火情监测算法模型快了至少两倍。该模型是由 $11\text{ }\mu\text{m}$ 背景分量通道和 $4\text{ }\mu\text{m}$ 火点辐射通道结合而成,能够消除大气影响和减少仪器噪声,使火点的信息突出。若 NDTI 门限选取适当,该指数可以准确识别火点,精度达 90% 以上。

2 高光谱遥感林业信息提取尚待解决的关键问题及解决途径

2.1 尚待解决的关键问题

(1) 高光谱林业模型的普适性

高光谱林业信息提取模型已经建立了很多,但几乎没有一种具有普适性的方法,各模型均需要一定的适宜条件,况且大多数模型都处在试验阶段,本身就要求大量实测数据去修正。模型间的适用条件区别较大,需要因地制宜地选择信息提取技术。目前所建立的模型几乎都以假设的理想条件为基础,而实际问题中存在很多的复杂多样性,尚待解决的问题还有很多。

(2) 光谱混合分解模型及其端元提取

森林中不同的组分如土壤、树种等形成的混合光谱机制复杂多样,尤其是地形细碎的地区,其多种组分的光谱混合

分解模型研究有待深入。建模后端元光谱的确定是模型成功与否的关键,如何确定混合光谱和不同森林组分间的联系,深入研究基于知识的混合光谱端元提取技术,对高光谱林业信息提取的实用化以及定量化有重大价值。

2.2 解决途径

(1) 建立完善的林业光谱数据库

在实际应用过程中,由于土壤和树种等成分的组成与结构会发生变化,同时受到环境及组分间效应的干扰,土壤和树种等的光谱特征往往存在变异现象。因此,深入研究不同环境中标准地物的光谱变异规律,建立和完善林业标准地物光谱数据库,是增强林业遥感模型普适性以及提高精度的基础,同时更是建立精准林业的前提。

(2) 3S 集成应用

GPS 能实现精准定位, GIS 拥有强大的空间分析、数据管理及处理等功能, 高光谱遥感则是林业信息的载体, 3S 集成应用能够高效分析森林病虫害、火灾、养分变化等信息, 同时结合空间分析等辅助信息能有效解决单一光谱信息无法满足的问题, 如地形复杂区域的“异物同谱”及“同物异谱”现象等, 提高林学信息模型的适用范围。

(3) 深入挖掘高光谱林学信息

林学参数变化情况很容易在多维高光谱特征空间中体现, 但现有的大多数光谱混合分解模型只利用了少数几个波段, 使得模型的规律性及可移植性很弱, 经验性强。借用目前发展较快的数据挖掘技术结合光谱特征空间中的变化知识, 深入挖掘多维光谱特征空间中的林学信息, 将能够很好地解决光谱混合分解模型存在的问题, 是今后研究的重点。

3 结语

高光谱遥感技术已成为林业遥感领域的前沿技术之一, 结合了图谱合一等特性能够精确监测林业多方面的信息, 为实现精准林业提供了基础。目前林业高光谱遥感技术已取得了大量的研究成果, 但仍处于起步和发展阶段, 成熟的林业高光谱遥感技术还需要漫长的努力。随着高光谱遥感技术的发展, 其空间和光谱分辨率逐渐提高, 林业高光谱遥感的应用将会从理论研究转向业务操作, 尤其具有普适性的林业高光谱模型将会得到开发与推广。因此, 光谱数据挖掘和林业模型同化等方面的探索越来越重要, 3S 技术的进一步结合将为林业管理新模式带来新的前景。

References

- [1] LIU Xiu-ying, LIN Hui, XIONG Jian-li, et al(刘秀英, 林 辉, 熊建利, 等). Remote Sensing Information(遥感信息), 2005, 80: 41.
- [2] WANG Zhi-hui, DING Li-xia(王志辉, 丁丽霞). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(7): 1825.
- [3] YU Xiang, ZHAO Dong-zhi, ZHANG Feng-shou, et al(于 祥, 赵冬至, 张丰收, 等). Journal of Binzhou University(滨州学院学报), 2006, 22(6): 53.
- [4] MA Xin-lu, REN Zhi-yuan, WANG Yong-li(马心璐, 任志远, 王永丽). System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture(农业系统科学与综合研究), 2009, 25(2): 204.
- [5] WANG Yuan-yuan, CHEN Yun-hao, LI Jing(王圆圆, 陈云浩, 李 京). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2009, 29(3): 735.
- [6] Ceccato P, Flasse S, Tarantola, et al. Remote Sensing of Environment, 2001, 77: 22.
- [7] Sims D A, Gamon J A. Remote Sensing of Environment, 2003, 84: 526.
- [8] ZHAO Xiang, WANG Jin-di, LIU Su-hong(赵 祥, 王锦地, 刘素红). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2010, 29(3): 185.
- [9] LIU Xuan, LIN Hui, ZANG Zhuo, et al(刘 璇, 林 辉, 臧 卓, 等). Journal of Central South University of Forestry & Technology(中南林业科技大学学报), 2010, 30(5): 72.
- [10] LIU Xiu-ying, LIN Hui, WAN Ling-feng, et al(刘秀英, 林 辉, 万玲凤, 等). Journal of Central South University of Forestry & Technology(中南林业科技大学学报), 2007, 27(4): 49.
- [11] LIU Dian-wei, SONG Kai-shan, ZHANG Bai(刘殿伟, 宋开山, 张 柏). Chinese Journal of Ecology(生态学杂志), 2006, 25(3): 238.
- [12] LI Feng-xiu, ZHANG Bai, LIU Dian-wei, et al(李凤秀, 张 柏, 刘殿伟, 等). Chinese Journal of Ecology(生态学杂志), 2008, 27(7): 1077.
- [13] Zhang Yongqin, Chen Jing M, John R Miller, et al. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(7): 3234.
- [14] Miller J R. International J. of Remote Sensing, 1991, 12(7): 1509.
- [15] Blackburn G A, Ferwerda J G. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1614.
- [16] LIN Hui, LIU Xiu-ying(林 辉, 刘秀英). Journal of Mianyang Normal University(绵阳师范学院学报), 2008, 27(8): 1.
- [17] YAO Fu-qi, ZHANG Zhen-hua, YANG Run-ya, et al(姚付启, 张振华, 杨润亚, 等). Science of Surveying and Mapping(测绘科学), 2009, 34(5): 32.
- [18] LI Min-xia, ZHANG Lin-sen, LI Bing-zhi, et al(李敏夏, 张林森, 李丙智, 等). Journal of Northwest Forestry University(西北林业学院学报), 2010, 25(2): 35.
- [19] HAN Yang, ZHAO Yun-sheng, ZHANG Li-li, et al(韩 阳, 赵云升, 张莉莉, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2009, 29(6): 1595.

- [20] GUO Yang-yang, ZHANG Lian-peng, WANG De-gao, et al(郭洋洋, 张连蓬, 王德高, 等). Bulletin of Surveying and Mapping(测绘通报), 2010, (8): 31.
- [21] SONG Kai-shan, ZHANG Bai, WANG Zong-ming, et al(宋开山, 张 柏, 王宗明, 等). Journal of Plant Ecology(植物生态学报), 2008, 32(1): 62.
- [22] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Morales A, et al. Remote Sensing of Environment. 2004(90): 463.
- [23] YAO Fu-qi, ZHANG Zhen-hua, YANG Run-ya, et al(姚付启, 张振华, 杨润亚, 等). Science of Surveying and Mapping(测绘科学), 2010, 35(1): 109.
- [24] YANG Xi-guang, FAN Wen-yi, YU Ying(杨曦光, 范文义, 于 颖). Journal of Northeast Forestry University(东北林业大学学报), 2010, 38(6): 123.
- [25] Martin Schlerf, Clement Atzberger, Michael Vohland. EARSeL Proceeding, 2004, 3(3): 405.
- [26] TANG Xu-guang, LIU Dian-wei, SONG Kai-shan, et al(汤旭光, 刘殿伟, 宋开山, 等). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2010, 25(3): 334.
- [27] Ruiliang Pu, Peng Gong. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(2): 212.
- [28] YUAN Jin-guo, NIU Zheng(袁金国, 牛 铮). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2007, 23(4): 172.
- [29] DONG Jing-jing, NIU Zheng(董晶晶, 牛 铮). Remote Sensing Information(遥感信息), 2008, (5): 25.
- [30] TAN Bing-xiang, LI Zeng-yuan, CHEN Er-xue, et al(谭炳香, 李增元, 陈尔学, 等). Journal of Beijing Forestry University(北京林业大学学报), 2006, 28(3): 95.
- [31] ZHAO Wen-hua, SHAN Hai-bin, ZHONG Ru-xiang(赵文化, 单海滨, 钟儒祥). Journal of Natural Disasters(自然灾害学报), 2008, 17(3): 152.

Advances in Researches on Hyperspectral Remote Sensing Forestry Information-Extracting Technology

WU Jian, PENG Dao-li*

The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of the Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract The hyperspectral remote sensing technology has become one of the leading technologies in forestry remote sensing domain. In the present review paper, the advances in researches on hyperspectral remote sensing technology in forestry information extraction both at home and abroad were reviewed, and the five main research aspects including the hyperspectral classification and recognition of forest tree species, the hyperspectral inversion and extraction of forest ecological physical parameters, the hyperspectral monitoring and diagnosis of forest nutrient element, the forest crown density information extraction and the hyperspectral monitoring of forest disasters were summarized. The unresolved problems of hyperspectral technology in the forestry remote sensing applications were pointed out and the possible ways to solve these problems were expounded. Finally, the application prospect of hyperspectral remote sensing technology in forestry was analyzed.

Keywords Hyperspectral; Forestry remote sensing; Forest parameter inversion; Information extraction; Forest monitoring

(Received Nov. 30, 2010; accepted Apr. 5, 2011)

* Corresponding author