

美国西部黄松叶面积指数与高光谱 分辨率 CASI 数据的相关分析*

浦瑞良

(南京林业大学)

官鹏

(加拿大卡尔加利大学)

约翰 R. 米勤

(加拿大约克大学)

1992年4月3日收稿

摘 要

本文介绍了美国俄罗冈州西部黄松的叶面积指数 (LAI) 与小型航空光谱制图成像仪 (CASI) 获取的高光谱分辨率数据进行的相关分析。在试验场地上使用 LAI-2000 植物冠层分析仪测得 8 个 LAI 值 (0.87—2.72)。对 CASI 数据进行一阶和二阶微分处理,以减少土壤背景光谱对森林光谱的影响。使用逐步回归分析方法探索 LAI 与 CASI 数据的关系。由回归分析产生多元线性方程和相应的拟合度 (GOF) 及估计 LAI 的标准误 (SE)。结果说明光谱微分技术能够提高 LAI 和 CASI 数据的相关性,因而可以改善 LAI 的估计精度。如,对于单通道 LAI 预测的最高 GOF 值是 0.681, SE 是 0.345, 而经一阶和二阶光谱微分处理后, GOF 被分别提高到 0.904 和 0.898, SE 被分别降低到 0.189 和 0.195。

关键词 叶面积指数 CASI 图像 光谱微分技术 相关分析

一、引 言

由遥感数据确定叶面积指数 (LAI——每单位地面面积的投影叶表面积, m^2/m^2) 使人们能够对一个较大尺度的地球生态系统的物质和能量的交换特性进行定性描述和定量分析^[1-7]。先前许多从遥感图像上估计 LAI 的研究往往只致力建立 LAI 和植被指数(由普通的多光谱图像计算)的简单关系^[5,8-14]。

成像光谱仪的出现已使从飞机到卫星平台获取高光谱分辨率图像(波段宽度只有数毫微米)成为可能。不象传统的多光谱传感器(如 MSS 和 TM, 它们至多有 7 个相对宽的光谱段),成像光谱仪已开创了获取高光谱成像的时代。它们记录丰富的光谱信息,以允许对地面目标物直接识别及微弱光谱差异的定量分析。例如,加拿大成像光谱仪——小型航空光谱制图成像仪 (CASI) 有 288 个通道,光谱覆盖范围约从 417nm 到 927nm,光谱分辨率为 1.76nm,即一个 MSS 或 TM 波段图像被细分成数十个较窄的高光谱波段图像。由传统的 TM 或 MSS 红光和近红外波段衍生的植被指数 (VI) 可相应地从高光谱图像提取数百个相似的 VI。因此从高光谱图像为估计 LAI 而寻找最佳 VI 并非

* 本研究对 Jim Freemantle, Yoshio Awaya, Mike Belanger 和 Mike Spanner 提供的有益帮助表示谢意。本研究的资助来自加拿大艾略省,空间与地球科学研究所及加拿大卡尔加利大学给 P. Gong 博士的启动基金。

是件易事。

本文的目的是: a) 探索 CASI 高光谱图像与美国俄罗冈西部稀疏黄松实测 LAI 的关系; b) 测试光谱微分技术在改善 CASI 图像和实测 LAI 相关性方面的有效性。本文的其它部分包括研究立地概述, LAI 和 CASI 数据的获取, 光谱微分分析方法, 多元回归过程的描述, 结果分析和讨论以及结论。

二、试验场地与实验数据

1. 试验场地和 LAI 的测定

研究区(北纬 $44^{\circ}23'$, 西经 $121^{\circ}40'$) 位于美国俄罗冈中西部的 Cascade 山脉的东坡上。面积约 6km^2 (坡度 $<2^{\circ}$, 海拔 915m)。郁闭度约 0.25—0.5 的美国西部黄松 (*Pinus ponderosa*) 占居整个面积。由于砍伐, 少林下植被, 主要为裸土。该研究区的详细地理位置和所处的植被带以及环境状况在 Peterson 等^[11]和 Spanner 等^[5]文中已有详细描述, 不再赘述。

选择此场地作为研究区的原因有二, 一是树种单一、纯林, 图像覆盖范围内主要是森林和裸土, 相对简单; 二是在此立地上前人已用传统的遥感数据做过许多研究^[5,9,11,12,15], 并且它被作为 NASA 横切俄罗冈州生态系统研究 (OTTER) 项目的 6 个研究立地之一。

在 1991 年 5 月 21 日, 使用一种叫做 LAI-2000 植物冠层分析仪 (LI-COR 公司^[16]) 在林分的不同位置测定 LAI 值。LAI 值变幅为 0.87—2.72。LAI-2000 使用“鱼眼”光学(视域 148°) 冠层的半球影像投射至有 5 个中心圆环的硅探测器上。在冠层上下测定的观测值被用来计算 LAI 和其它树冠结构属性值。对于针叶林, 由 LAI-2000 仪测得的 LAI 必须乘一比例系数才能估计 LAI 的实测值。本次试验将测得的 LAI 值乘以由 Gower 和 Norman^[17] 建议的 1.5 得 LAI 实测值。

2. CASI 数据的获取

小型航空光谱制图成像仪 (CASI) 是一种新发展的成像光谱仪, 便于安装在小型飞机上或实验室里使用。由于数据量记录的限制, CASI 有两种工作方式: 空间方式和光谱方式。对于空间方式, 被获取的空间图像的每行是满空间分辨率的, 包含 512 个像元, 每景图像由用户在 288 光谱段内选择高达 15 个波段; 对于光谱方式, 产生图像的每个像元有 288 个波段, 有一个完全的光谱覆盖(从 417nm 到 927nm), 每图像行仅有 39 个像元。

与测定 LAI 同日, 安装在小型飞机上的 CASI 传感器被用来收集空间和光谱两种方式的图像数据。本次研究我们只使用 CASI 光谱方式数据, 其航高为 1844m , 空间分辨率为 $2.23\text{m} \times 9.45\text{m}$ 。为了便于研究分析及与不同立地间 CASI 图像的比较, 转变辐射值 CASI 图像为反射值图像。具体转化时首先建立 CASI 像元辐射值与地面实测反射值的关系, 此地面实测值是使用 SPECTRON SE-590 辐射计测定的。然后利用这一

关系将实验区的所有 CASI 像元换算为反射值。

三、方 法

1. 使用光谱微分技术减弱背景噪音

当高光谱分辨率遥感图像有效时,人们已使用光谱微分技术在许多遥感研究中,这是因为微分光谱能够去除背景噪音或不理想的信号对目标信号的影响,因而能提高目标信号的估计精度^[18]。Kosmas 等^[19]应用二阶微分于可见光数据,以分析铁氧化物含量。他们建议土壤遥感调查时,微分光谱很有用。Horler 等^[20], Rock 等^[21], 和 Miller 等^[22,23]使用叶子反射光谱的一阶微分确定“红边”位置。他们发现树叶光谱一阶微分峰值的波长变化与叶子叶绿素含量相关密切。Wessman 等^[24,25]使用森林光谱的一阶、二阶微分于树冠化学成分研究中,并借助逐步回归技术确定树冠化学成分和生物量以及与微分光谱数据相关最密切的波段组合。Demetriades-Shah 等^[18]应用光谱微分技术监测植物的失绿病获得成功。他们证明微分光谱要优于常规宽波段光谱指数(如近红外与红光间的比值 RVI)。Hall 等^[26]发现窄波段光谱的二阶微分,或位于可见光区中心在 $0.69\mu\text{m}$ 或近红外光区中心在 $0.74\mu\text{m}$, 能被用来估计光合活动吸收辐射分量。Dick 等^[27]说明微分技术在确定那些对水体成分变化敏感的光谱区域是特别有用的。

在本次研究中,裸露的背景土壤被认为是噪音,微分技术被用来减少土壤背景的影响,这由图 1 各条曲线来说明。图 1a 中 4 条曲线,其中植被曲线为从 CASI 图像上提取的反射率曲线,它的提取点位相应于野外测定的 2.72LAI 的位置;裸露土壤曲线为使用

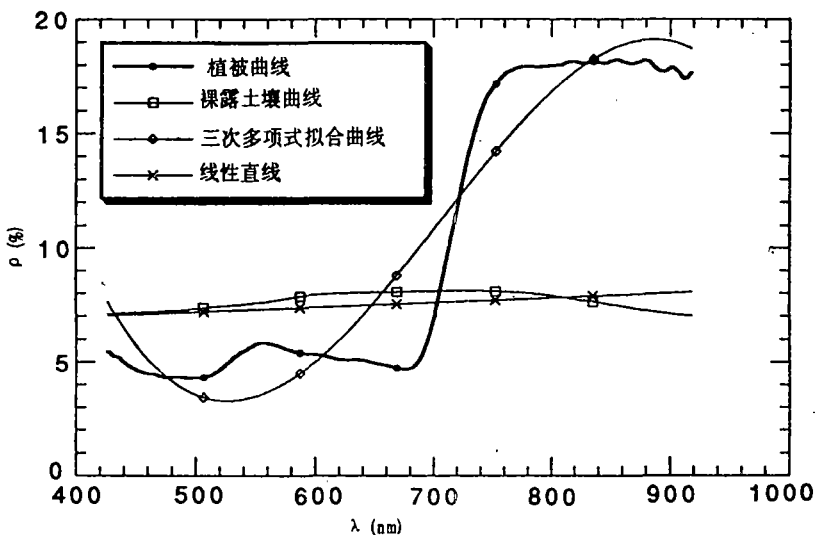


图 1a 植被和裸土反射率曲线及其拟合曲线

Fig. 1a The reflectance curve and the linear curves were simulations for the vegetation and bare soil

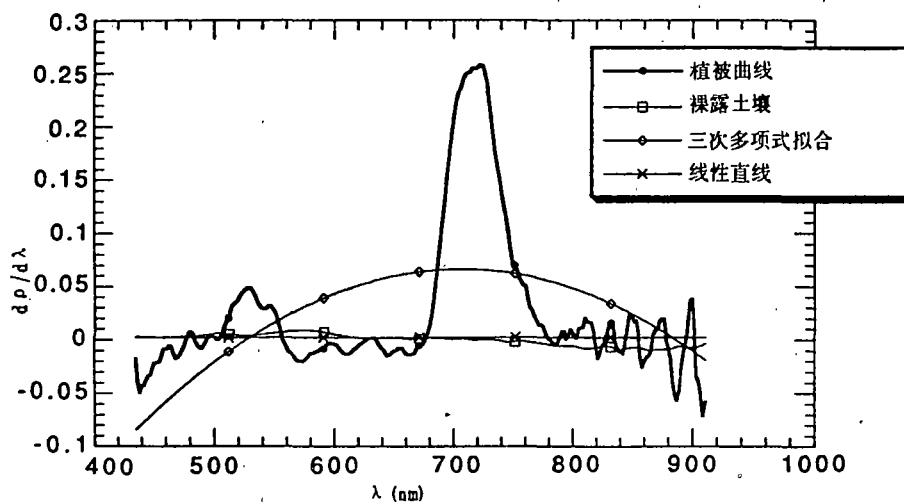


图 1b 由图 1a 反射率曲线的一阶微分获得的光谱曲线

Fig. 1b First-order derivative spectra of the reflectance curves in fig. 1a

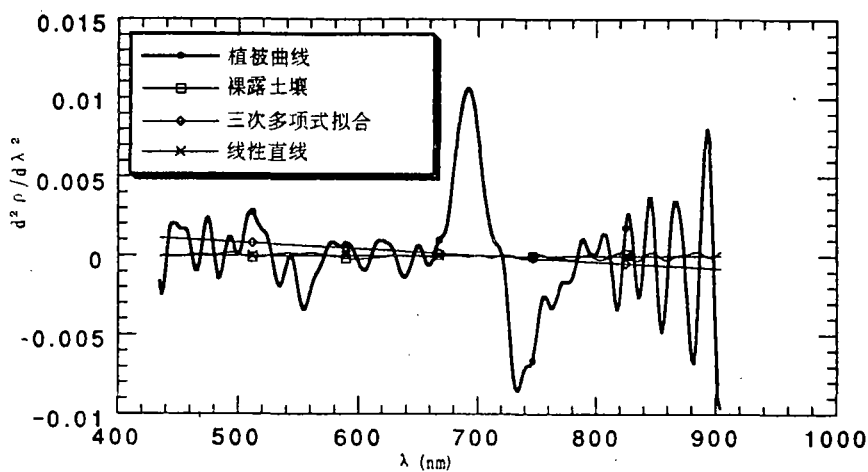


图 1c 由图 1a 反射率曲线的二阶微分获得的光谱曲线

Fig. 1c Second-order derivative spectra of reflectances in fig. 1a

SPECTRON SE-590 辐射计野外测定的裸土光谱曲线;三次多项式拟合曲线为对植被曲线拟合的三次多项式曲线;线性直线为对裸土反射光谱曲线拟合的线性直线。拟合曲线的一般表达式如下:

$$\rho_s = a_s + b_s \lambda \quad (1)$$

和

$$\rho_v = a_v + b_v \lambda + c_v \lambda^2 + d_v \lambda^3 \quad (2)$$

式中, ρ_s , ρ_v 分别为裸土和植被的波长 λ 函数的拟合反射率; a_s , b_s 和 a_v , b_v , c_v 及

d_v 是系数。这四条曲线的一阶与二阶微分分别示于图 1b 和 1c 中。对于两条拟合曲线,它们的微分由式 (1) 和 (2) 得出。一阶微分为:

$$\rho'_i = b_s \quad (3)$$

$$\rho''_v = b_v + 2c_v\lambda + 3d_v\lambda^2 \quad (4)$$

它们的二阶微分为:

$$\rho''_i = 0 \quad (5)$$

$$\rho''_v = 2c_v + 6d_v\lambda \quad (6)$$

很明显,取一阶微分后,拟合的裸土光谱已变为常数。这表明,假如一个植被像元混有线性变化的裸土光谱,则经一阶微分后,影响植被光谱的土壤光谱变成只是加在植被信号上的一个常数。取二阶微分后,拟合土壤光谱的影响已被完全去除。就一般而言,倘若目标光谱由不同成分的贡献构成,则使用微分技术能部分消除低频光谱成分的贡献^[18,20]。本次研究中由于裸土光谱接近线性,而植被光谱则近似三次曲线(图 1a),因此,使用微分技术能减少土壤光谱对美国西部黄松反射值的影响。

由于遥感记录的光谱反射率用离散形式表示,因此相对差值被用作微分。对 CASI 数据的一阶和二阶微分的计算分别采用 (7) 式和 (8) 式:

$$\rho'(\lambda_i) = \{\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})\} / \Delta\lambda \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \rho''(\lambda_i) &= \{\rho'(\lambda_{i+1}) - \rho'(\lambda_{i-1})\} / \Delta\lambda \\ &= \{\rho(\lambda_{i+1}) - 2\rho(\lambda_i) + \rho(\lambda_{i-1})\} / \Delta\lambda^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\rho'(\lambda_i)$, $\rho''(\lambda_i)$ 分别为一阶和二阶微分; $\Delta\lambda$ 是波段宽度的二倍(对 CASI 数据而言约 3.5nm)。

2. 逐步回归分析

一个前向型逐步多元回归过程被用来确定最佳通道组合,以与测定的 LAI 值密切相关,并产生拟合度 (GOF) 和估计 LAI 的标准误 (SE)。输入逐步回归过程的数据由野外测定的 LAI 值,三种光谱类型(原始反射率,一阶微分和二阶微分光谱数据)之一数据组成。输出是一系列相互不同的由不同通道数组成的多元线性方程,每个方程附有不同的 GOF 和 SE 值。执行逐步回归程序后,最后的回归方程能用下式表示:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (9)$$

式中 x_i 是预测变量,它可以是通道反射率,反射率的一阶和二阶微分; y 是预测的 LAI; 而 b_i 是一系列经逐步回归后能使 GOF 最高的回归系数。

使用 GOF(R^2) 和估计 LAI 的标准误 (SE) 评价对由逐步回归分析预测的 LAI 的最后估计精度。它们可由下式计算得到:

$$R^2 = \text{取由回归分析确定的复相关系数的平方} \quad (10)$$

和

$$SE = \sqrt{\sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - k - 1)} \quad (11)$$

式中 y_i , \hat{y}_i 分别为实测和预测 LAI 值, n 为 LAI 样本数, k 是预测的变量数,即包含

在回归方程中的通道数。对于由逐步回归过程产生的 R^2 值的显著性检验, 使用可信度由 0.95 的 R^2 值的调节逼近法。对于观测值数小于预测变量数的情况, 使用此调节逼近法, 检验 R^2 值的显著性是特别有效的^[24,29]。

四、结果与分析

1. 微分光谱

在 CASI 光谱图像上, 从 8 个要测定 LAI 值的位置上提取光谱反射值, 图例旁注的数字值为 LAI 野外测定值)。用 SPECTRON SE-590 仪在野外测定裸土光谱值(与图 1a 中的裸土曲线相同)与树木光谱(图 2a)对照。每个 LAI 值指示其树木光谱。由图 2a 可见土壤曲线非常平展, 而 CASI 图像上的树木光谱曲线噪音严重。这在蓝光区域(约 420—450nm)和近红外区域(760—927nm)特别明显。这种噪音主要由大气的散射与吸收和 CASI 校正等因素引起。基于由 Demetriades-Shah 等^[18]建议的合理信噪比, 使用 11 通道的线性权重滤波器对原始数据进行平滑处理。结果显示在图 2b 上。对照图 2a, 不同 LAI 值曲线间的可分离度得到了提高。

图 3 和图 4 是一阶和二阶微分光谱。在做二阶微分处理之前, 先对一阶微分光谱施行 7 通道线性平滑处理, 以进一步压缩噪音。树木的一阶微分光谱已独立于土壤一阶微分(图 3)。由树木一阶微分光谱曲线(图例中的数字值为 LAI 实测值)可见, 曲线的最大变化率发生在“红边”光谱区域, 而二阶微分的最大变化率则位于“绿峰”^[30]和 850—920nm 的近红外区域。当土壤对树木光谱的影响在二阶微分光谱中进一步减少时, 在蓝光和近红外区域的噪音水平则稍微有点增强(图 4)。但由图 3 和图 4 可见, 微分光谱的变化是

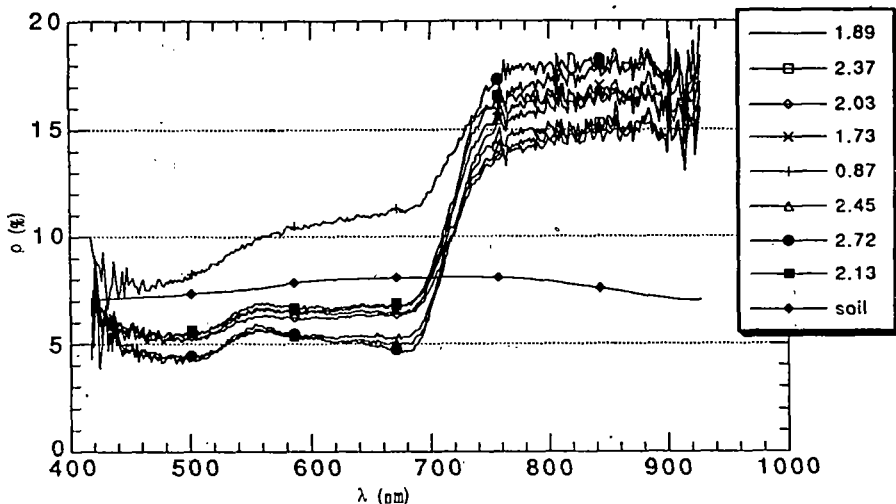


图 2a 从 CASI 光谱方式图像上提取的光谱反射率曲线

Fig. 2a Original reflectance curves from the CASI spectral-mode data

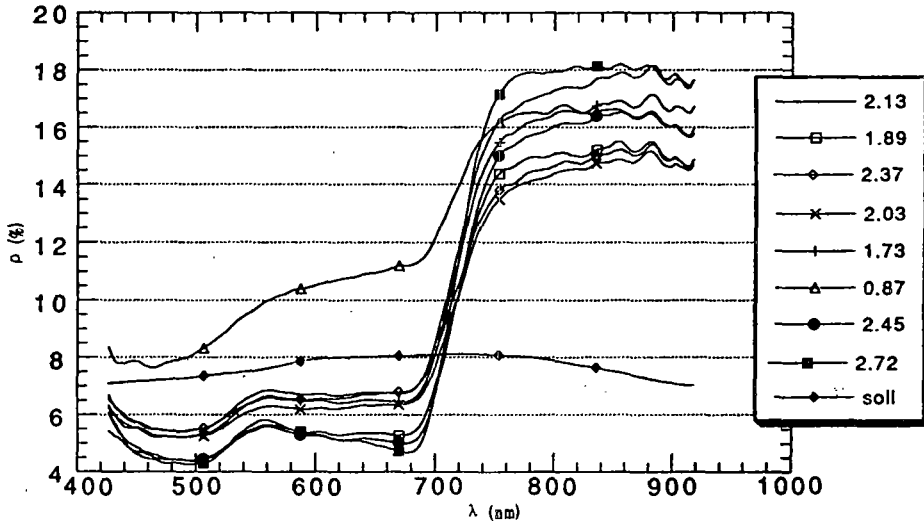


图 2b 11 个通道线性加权平滑后的反射率曲线

Fig. 2b Reflectance curves after an eleven-channel low-pass filtering

与 LAI 测定值的变化非常一致。

2. 单相关分析

计算每个光谱通道上的原始光谱反射率与 LAI 测定值,一阶微分光谱与 LAI 测定值,以及二阶微分光谱与 LAI 测定值间的拟合度 (GOF, 相关系数的平方)。(图 5 为原始光谱和 LAI, 一阶微分和 LAI 及二阶微分和 LAI 三种相关分析的拟合度), 由图可见,当波长短于 715nm 时原始光谱的 GOF 是相当高的。大于此波长点,由于近红外区

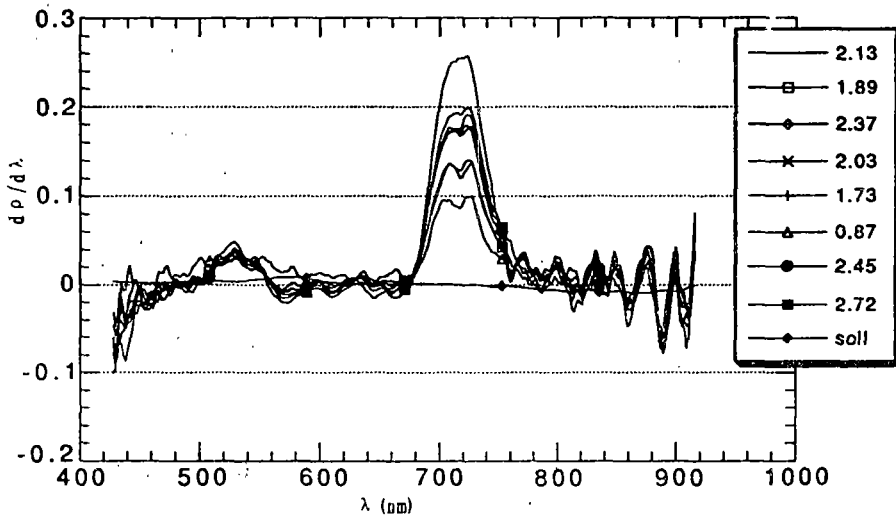


图 3 相应于图 2b 的一阶微分光谱

Fig.3 The first-order derivative spectra corresponding to Figure 2b

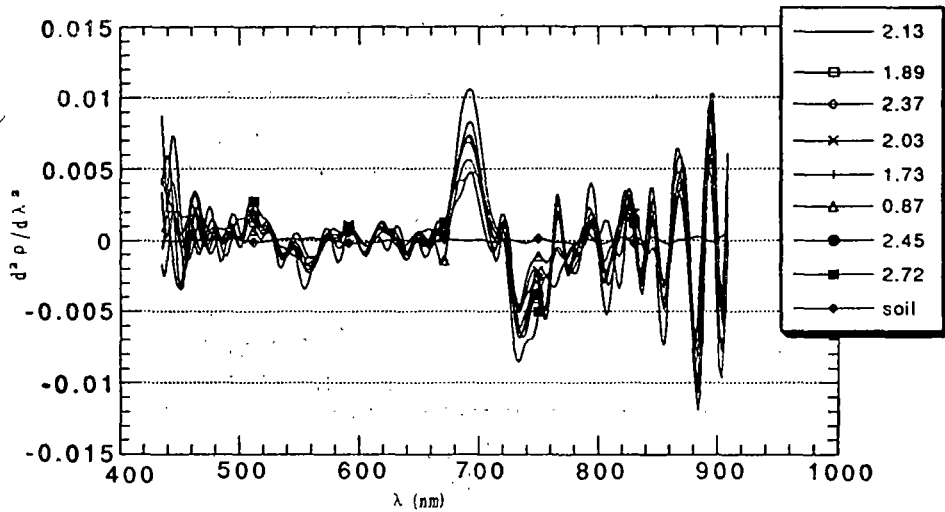


图 4 对一阶微分光谱施行七通道线性加权平滑后的相应于图 2b 的二阶微分光谱

Fig. 4 The second-order derivative spectra corresponding to Figure 2b after a seven-channel low-pass smoothing applied to the first-order derivative spectra

噪音影响而使 GOF 陡然下降。随着波长的变化, LAI 测定值分别与两种微分的 GOF 出现急剧的变化。这是因为 a) 在微分光谱曲线间, 相似形状原始光谱曲线将导致相似值或零交叉点, 这将反过来导致与 LAI 测定值的低相关; b) 微分光谱对高频噪音是敏感的, 因此这同样会降低微分光谱和 LAI 测定值的相关程度。

然而, 在某些波长(区)处微分的 GOF 超过非微分的 GOF。事实上一阶微分光谱和

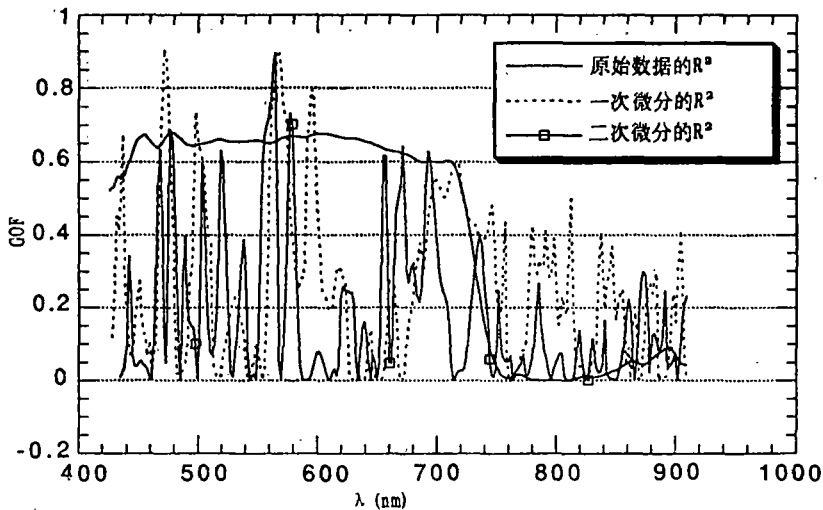


图 5 由三种关系衍生的拟合度的比较

Fig. 5 A comparison of goodness-of-fit values derived from relationships between reflectance and LAI, between first-order derivative and LAI, and between second-order derivative and LAI

LAI 测定值间计算的 GOF 值在三个波长处(约 470nm, 567nm, 和 598nm) 高于 0.8, 而二阶微分和 LAI 值间的 GOF 在约 563nm 波长处超过 0.8 (图 5)。这意味着微分光

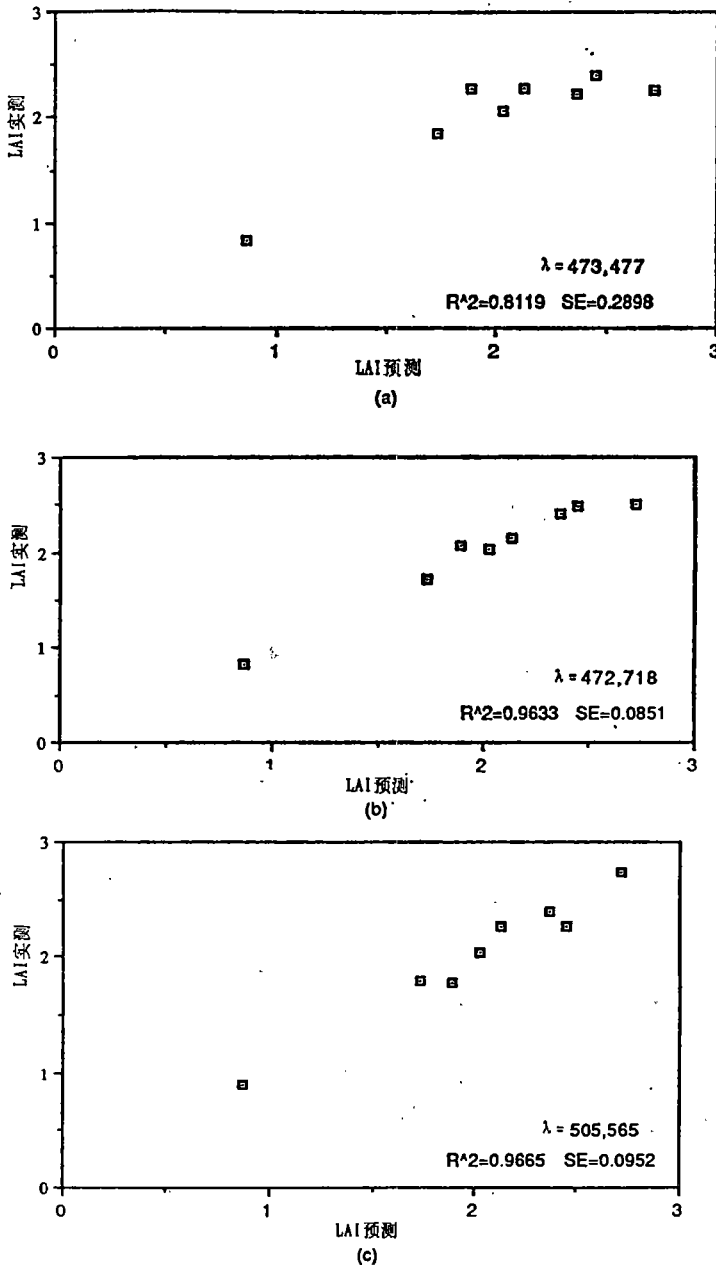


图 6 实测 LAI 与逐步回归分析过程产生的二通道回归方程预测的 LAIS 比较,
a) 原始数据, b) 一阶微分, c) 二阶微分

Fig. 6 A comparison of measured LAI, with predicted LAI, using the two-channel regression equations derived from the piece-wise multiple regression technique
a) predicted by original data, b) predicted by first-order derivative,
c) predicted by second-order derivative

表 1 多元回归分析结果
Table 1 Results from the multiple regression analysis

	通道波长 (nm)	拟合度	LAI 标准误
原始光谱反射值	477	0.680 65\$	0.344 75
	473 477	0.811 92	0.289 82
	473 477 482	0.933 55	0.192 61
	456 473 477 482	0.978 54	0.126 39
	456 473 477 482 621	0.995 65	0.069 71
	456 473 477 482 621 668	0.999 75	0.023 48
	一阶微分光谱	472	0.903 83\$
472 718		0.962 64*	0.129 17
470 472 473		0.990 85*	0.071 49
470 472 473 591		0.996 98*	0.047 39
470 472 473 591 716		0.999 95*	0.007 74
435 470 472 473 591 716		0.999 99*	0.004 17
二阶微分光谱		565	0.898 16\$
	501 565	0.966 54*	0.122 23
	505 565 671	0.983 76*	0.095 23
	505 565 657 671	0.988 55	0.092 3
	505 565 577 657 671	0.997 97*	0.047 61
	477 505 565 577 657 671	0.999 92*	0.013 27

*通过0.95可信度水平的显著性检验。\$单变量检验无效。

谱在那些特殊的波长处在估计 LAI 时,具有高的单变量(通道)预测力。反之,原始光谱和 LAI 测定值的 GOF 没有一个是高于 0.7 的,这说明它在估计 LAI 时其单变量预测力是较差的。

3. 使用多元回归方法估计 LAI

使用逐步回归分析方法研究原始光谱数据、一阶微分光谱和二阶微分光谱的多变量(即通道)预测潜力,结果导致三套 LAI 预测方程和它们相应的 GOF 和 SE 值。每套 LAI 预测方程有六个多元线性方程,它们所包含的变量从一个到六个不等。三套预测方程使用了不同类型的预测变量。第一套方程使用了原始光谱数据,而第二和第三套方程则分别用了一阶和二阶微分光谱。

从三套方程的每一套中,选用二变量方程预测 LAI,并将预测与实测 LAI 值的关系表示在图 6 上。由图 6 可见,使用微分光谱获得的 LAI 预测值与实测值间的一致程度(图 6b 和 6c)要高于由原始光谱预测的 LAI 值与实测值间的一致程度(图 6a)。图中的波

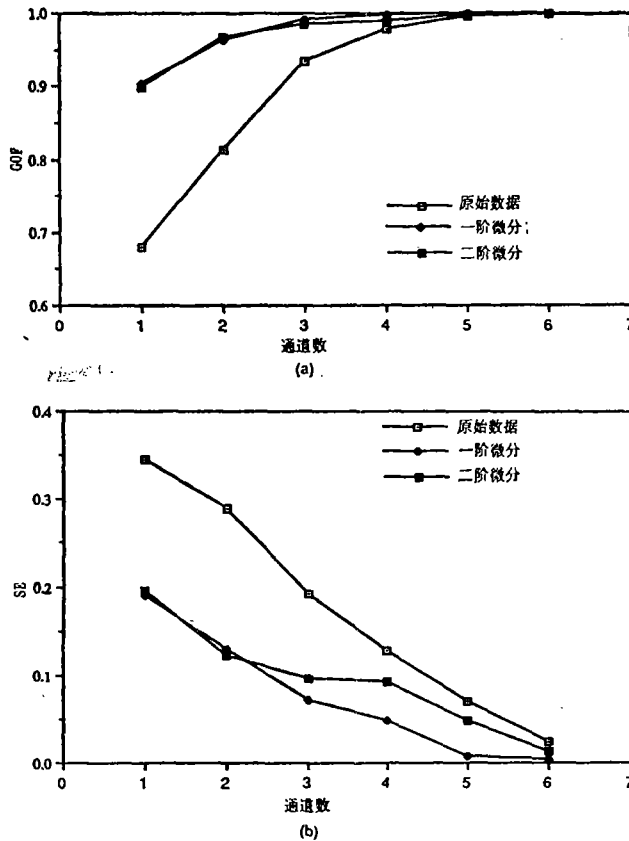


图 7 使用三种预测变量的 LAI 预测精度
(a) 拟合度比较, (b) 叶面积指数估计值标准误差的比较

Fig. 7 LAI prediction accuracies using three types of predicting variables
(a) A comparison of goodness of fit values, (b) A comparison of standard errors of LAI estimation

长是包含在预测方程内的二通道的中心波长。

与原始光谱比较,使用微分光谱能够改善 LAI 预测力的其它指标,即 GOF 值和 SE 值(表 1)。表 1 清楚地说明,使用原始光谱获得的 GOF 值没有一个在 0.95 可信度水平上是有意义的。相反地,所有使用一阶微分光谱获得的 GOF 和所有(除一个 GOF 值)使用二阶微分光谱得到的 GOF 值在 0.95 可信度水平上是有意义的。统计检验结果表明 LAI 预测精度的改善是明显的。图 7a 和 7b 为原始光谱反射率,一阶微分光谱和二阶微分光谱三种预测变量的 LAI 预测精度,清楚地说明了精度的改善。由图 7 可见,对于具有相同通道数(作为预测变量)的 LAI 预测方程,基于微分光谱的方程具有较高的 GOF 值而它们的预测误差是低的。这种规律在方程含有较少变量时更加明显。然而在使用一阶微分光谱与二阶微分光谱的 LAI 预测方程间存在着细微的执行差异。事实上当预测变量数高于 2 时,二阶微分光谱比起一阶微分光谱来产生了稍微差一点的结果。这说明并不需要用高阶微分光谱来研究森林环境类型,因该背景相对单一,它的光谱反射率

接近线性。这里要说明的,通道数表示包含在相应回归方程中的变量数目。

研究表明光谱微分技术的使用能够提高 CASI 高光谱数据与稀疏美国西部黄松 LAI 测定值间的相关性。因此微分光谱的使用比原始光谱能够提高 LAI 的估计精度。另外,使用微分光谱单通道得到的高 GOF 值亦说明使用单通道高光谱图像预测 LAI 是可能的。但同时还应随着森林树种的变化或森林环境,同树种密度的变化,进一步验证这种单通道预测 LAI 的稳定性。

利用微分光谱能够减少背景噪音的影响,同时亦能在某种程度上影响到目标信号,特别是当目标光谱曲线与背景物光谱曲线相似时。图 5 显示的曲线说明了这一点。另外,二阶微分对噪音是非常敏感的(即图 4 中的近红外区域)。这要求更为准确的校正成像辐射仪^[26]。

五、结论与认识

本文对美国俄罗冈州中西部的黄松 LAI 的测定值与小型航空光谱制图成像仪(CASI)收集的高光谱数据的关系进行了研究。除了对 LAI 与原始 CASI 数据间关系进行探索外,还对一阶和二阶微分光谱与 LAI 的关系进行了研究。逐步回归分析过程已被用来分析拟合度和估计 LAI 的标准误差。

研究发现对高光谱分辨率的 CASI 数据使用光谱微分技术,能大大地改善对未郁闭的美国西部黄松 LAI 的估计精度。这种精度的改善是由于微分技术具有减少由土壤背景引起的低频噪音的能力。由于用一阶微分光谱的效果要优于二阶微分,因此没有必要对类似于美国西部稀疏黄松森林环境的 LAI 估计施行二阶微分处理。虽然利用遥感数据研究 LAI 大部分是应用由波段相对较宽的红光和近红外光谱通道提取的植被指数,但从本文分析利用高光谱的微分图像的单通道来估计 LAI 亦能获得满意的精度。在我们的实验中,只有 8 个 LAI 实测值被使用,并且只有一种土壤作为未郁闭森林的背景是相当简单的。因此进一步的研究应包括更多的 LAI 实测值,涉及更为复杂的森林环境,以研究高光谱分辨率遥感技术在估计 LAI 中的潜力。

参 考 文 献

- [1] Curran, P. J., Dungan, J. L., and Gholz, H. L., In press, Seasonal LAI in Slash Pine Estimated with Landsat TM, *Remote Sens. Environ.*
- [2] Gutman, G. G., Vegetation Indices from AVHRR: An Update and Future Prospects, *Remote Sens. Environ.*, 35: 121—136, 1991.
- [3] Lathrop, R. G. Jr. and Pierce, L. L., Ground-Based Canopy Transmittance and Satellite Remotely Sensed Measurements for Estimation of Coniferous Forest Canopy Structure, *Remote Sens. Environ.*, 36: 179—188, 1991.
- [4] Herwitz, S. R., Peterson, D. L., and Eastman, J. R., Thematic Mapper Detection of Changes in the Leaf Area of Closed Canopy pine Plantations in Central Massachusetts, *Remote Sens. Environ.*, 29: 129—140, 1990.
- [5] Spanner, M. A., Pierce, L. L., Peterson, D. L., and Running, S. W., Remote Sensing of Temperate Coniferous Forest Leaf Area Index, The Influence of Canopy Closure, Understory Vegetation and Background Reflectance, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 11, No. 1, 95—111, 1990b.
- [6] Nemani, R. R., and Running, S. W., Testing a Theoretical Climate-Soil-Leaf Area Hydrologic Equilibrium

- of Forests Using Satellite Data and Ecosystem Simulation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 44: 245—260, 1989.
- [7] Running S. W., Nemani, R. R., Peterson, D. L., Band, L. E., Potts, D. F., Pierce, L. L., and Spanner, M. A., Mapping Regional Forest Evapotranspiration and Photosynthesis by Coupling Satellite Data with Ecosystem Simulation, *Ecology*, 70(4), pp. 1090—1101, 1989.
- [8] Major, D. J., Baret, F., and Guyot, G., A Ratio Vegetation Index Adjusted for Soil Brightness, *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 11, No. 5, 727—740, 1990.
- [9] Spanner, M. A., Pierce, L. L., Running, S. W., and Peterson, D. L., The Seasonality of AVHRR Data of Temperate Coniferous Forests: Relationship with Leaf Area Index, *Remote Sens. Environ.* 33: 97—112, 1990a.
- [10] Curran, P. J., and Williamson, GLAI Estimation Using Measurements of Red, Near Infrared, and Middle Infrared Radiance, *P. E. & R. S.* 53(2): 181—186, 1987.
- [11] Peterson, D. L., Spanner, M. A., Running, S. W., and Teuber, K. B., Relationship of Thematic Mapper Simulator Data to Leaf Area Index of Temperate Coniferous Forests, *Remote Sens. Environ.*, 22: 323—341, 1987.
- [12] Running, S. W., Peterson, D. L., Spanner, M. A., and Teuber, K. B., Remote Sensing of Coniferous Forest Leaf Area, *Ecology*, 67(1), pp. 273—276, 1986.
- [13] Huete, A. R., Jackson, R. D., and Post, D. F., Spectral Response of a Plant Canopy with Different Soil Backgrounds, *Remote Sens. Environ.*, 17: 37—53, 1985.
- [14] Curran, P. J., Multispectral Remote Sensing for the Estimation of Green Leaf Area Index, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 309: 257—270, 1983.
- [15] Peterson, D. L., Aber, J. D., Matson, D. A., Card, D. I., Swanberg, N., Wessman, C., and Spanner, M., Remote Sensing of Forest Canopy and Leaf Biochemical Contents, *Remote Sens. Environ.*, 24: 85—108, 1988.
- [16] LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, *Instruction and Manual*, LI-COR Inc, 1990.
- [17] Gower, S. T., and Norman, J. M., In press, Rapid Estimation of Leaf Area Index in Conifer and Broad-Leaf Plantations Using Li-Cor-2000, *Ecology*
- [18] Demetriades-Shah, T. H., Steven, M. D., and Clark, J. A., High Resolution Derivative Spectra in Remote Sensing, *Remote Sens. Environ.*, 33: 55—64, 1990.
- [19] Kosmas, C. S., Curi, N., Bryant, R. B., and Franzmeier, D. P., Characterization of Iron Oxide Minerals by Second-Derivative Visible Spectroscopy, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 401—405, 1984.
- [20] Horler, D. N. H., Dockray, M., and Barber, J., The Red Edge of Plant Leaf Reflectance, *Int. J. Remote Sens.*, 4: 273—288, 1983.
- [21] Rock, B. N., Hoshizaki, T., and Miller, J. R., Comparison of the in situ and Airborne Spectral Measurements of the Blue Shift Associated with Forest Decline. *Remote Sens. Environ.*, 24: 109—127, 1988.
- [22] Miller, J. R., Wu, J. Boyer, M. G., Belanger, M., and Hare, E. W., In press, Season Patterns in Leaf Reflectance Red Edge Characteristics, *Int. J. Remote Sens.*
- [23] Miller, J. R. Hare, E. W., and Wu, J., Quantitative Characterization of the Vegetation Red Edge Reflectance. I. An Inverted-Gaussian Reflectance Model, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 11, No. 10, 1775—1795, 1990.
- [24] Wessman, C. A., Aber, J. D., and Peterson, D. L., An Evaluation of Imaging Spectrometry for Estimating Forest Canopy Chemistry, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 10, No. 8, 1293—1316, 1989.
- [25] Wessman, C. A., Aber, J. D., Peterson, D. L., and Melillo, J. M., Remote Sensing of Canopy Chemistry and Nitrogen Cycling in Temperate Forest Ecosystems, *Nature*, Vol. 335, No. 6186, pp. 154—156, 1988.
- [26] Hall, F. G., Huemmrich, K. F., and Goward, S. N., Use of Narrow-Band Spectral to Estimate the Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation, *Remote Sens. Environ.*, 32: 47—54, 1990
- [27] Dick, K. and Miller, J. R., Derivative Analysis Applied to High Resolution Optical Spectra of Freshwater Lakes. *Proceedings of the 14th Canadian Symposium on Remote Sensing*. Held in Calgary, Alberta, 6-10 May 1991, pp. 400—403, 1991.
- [28] Savitzky, A. and Golay, M. J. E., Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.*, Vol. 36, No. 8, pp. 1627—1639, 1964.
- [29] Rencher, A. C. and Pun, F. C., Inflation of R^2 in Best Subset Regression, *Technometrics*. Vol. 22, No. 1, pp. 49—53. 1980.
- [30] Feng, Y. and Miller, J. R., Vegetation Green Reflectance at High Spectral Resolution As a Measure of Leaf Chlorophyll Content, *Proceedings of the 14th Canadian Symposium on Remote Sensing*, Held in Calgary, Alberta, 6-10 May 1991, pp. 351—355, 1991.

Correlating Leaf Area Index of Ponderosa Pine with Hyperspectral CASI Data

Pu Ruiliang

(Nanjing Forestry University)

Gong Peng

(The University of Calgary, Canada)

John R. Miller

(York University, Canada)

Abstract

Leaf area index (LAI) measurements collected from a Ponderosa pine stand in Oregon have been correlated with the hyperspectral data acquired using a Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI). Eight LAI values ranging from 0.87 to 2.72 have been measured using an LAI-2000 Plant Canopy Analyzer at the study site. First-order and second-order spectral derivatives have been taken to the CASI data to suppress the effects of the soil background on the forest spectral reflectances. A piece-wise multiple regression procedure has been used to explore the relationships between the LAIs and the CASI data. This procedure produces multivariate linear equations and their associated goodness-of-fit (GOF) values and standard errors (SE) for LAI estimation.

Results show that the spectral derivative technique can increase the correlations between the LAIs and the CASI data and thus lead to improved accuracies of LAI estimation. For instance, the highest GOF obtained for single-channel LAI prediction is 0.681 with a SE of 0.345. These have been considerably improved to 0.904 and 0.189, and 0.898 and 0.195 after taking the first-order and the second-order derivatives, respectively.

Key words Leaf area index (LAI) CASI imagery Spectral derivative technique Correlation analysis