

基于叶片光谱的森林叶绿素浓度反演研究

焦全军, 张霞, 张兵, 卫征, 郑兰芬

(中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 准确估测森林叶片叶绿素浓度有助于进一步理解和模拟森林生态系统。基于江西省千烟洲试验区主要树种光谱数据和相应叶绿素浓度等化学参量数据, 使用高光谱指数和偏最小二乘(PLS)回归方法进行森林叶绿素浓度的反演, 对具代表性的几种叶绿素相关的光谱指数进行反演能力评价, 构造出表征叶绿素吸收特征的叶绿素吸收面积指数(CAAI), 发现TCARI(改进型的叶绿素吸收比率指数)和CAAI能较好地估测试验区森林主要树种的叶绿素浓度。针对叶片生化参量之间强相关现象, 首先使用了叶片生化参量吸收特征分析方法, 选定特定波段。然后对叶绿素浓度进行PLS回归估测, 并从PLS获得估测模型的结果来评价和解释几种高光谱指数的叶绿素反演能力。

关键词: 叶绿素浓度; 光谱指数; 叶绿素吸收面积指数; 偏最小二乘回归

中图分类号: S 771.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2006)02-0026-05

0 引言

森林是地表能量、物质交换的重要承载者, 其中叶绿素又是植被光合作用的最重要参与者, 准确估测森林区的叶绿素状况, 有助于进一步理解和模拟森林生态系统。叶绿素的常规测定是使用分光光度计方法, 这种方法需要破坏植株, 在实验室运输过程中会有损失^[1]。如何快捷地获得大面积森林区域叶片的叶绿素状况, 需要借助遥感方法。传统的多光谱遥感对于提取植被的生化参数显得无能为力, 需要借助高光谱数据。

通过遥感方法获取叶绿素状况需要提取叶片光谱的叶绿素吸收特征, 并与叶绿素浓度进行回归分析, 从而能够建立回归模型。用于叶绿素反演的遥感数据主要有反射率数据、反射率数据的变形(如, 导数光谱^[2]、归一化吸收深度^[3]等)、波形特征参数(如, 红边位置^[4]等)、高光谱指数^[5-8]。光谱数据和叶片的生化参量往往在单一试验环境中获得, 波段间和生化参量间都存在强相关关系, 是否有效解决波段间和参量间的影响是反演成败关键。本文从分析叶绿素的吸收特征出发, 使用光谱指数和引入偏最小二乘回归方法建立叶绿素浓度估测模型。

1 数据获取

本文所使用的数据是2003年8月在千烟洲获

取的主要树种叶片光谱与生化组分数据。千烟洲试验区位于江西省中部, 东经115°04'13", 北纬26°44'48"。该森林区域主要树种有5种: 湿地松、马尾松、杉树、木荷和桔树, 其中前3种为针叶树种, 后2种为阔叶树种, 总共选择23个样本区域, 其中, 湿地松样区5个、马尾松样区6个、杉树样区3个、木荷样区6个、桔树样区3个。

测量数据中的生化组分主要包括蓝绿色叶绿素浓度(叶绿素a, Cha)、黄绿色叶绿素浓度(叶绿素b, Chb)、叶绿素总浓度(叶绿素ab, Chab)、胡萝卜素、全氮含量、全碳含量、木质素浓度、含水量。叶绿素浓度的实验室测量采用研磨、丙酮萃取和分光光度计的测量方法, 含水量的测量采用烘干法。叶片的反射率光谱则通过利用ASD光谱仪经过积分球获得, 叶片光谱的波长范围为350 nm~2 400 nm。

2 方法

2.1 叶绿素吸收特征分析

叶片中含有的主要生化组分有水分、叶绿素、蛋白质和纤维素等, 这些物质吸收效应的加和构成了大致的叶片光谱, 研究纯物质各自的吸收特征有助于掌握叶片光谱对应各种生化组分的特征波段。纯物质在各波段的吸收对于叶片光谱的形成起着决定作用。吸收能力强的波段在叶片光谱上形成吸收谷。

S. Jacquemoud 等^[9]在实验室中测量到了叶绿素纯物质在各波段的吸收系数(图1)。

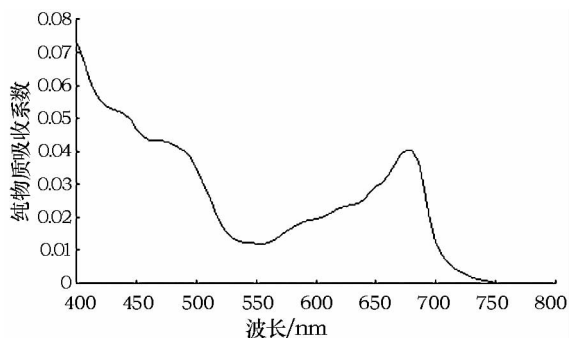


图1 叶绿素 a + b 纯物质吸收系数

Curran (1989)认为,叶片光谱有5个大的吸收特征,其中叶绿素吸收区域在 $0.4 \mu\text{m} \sim 0.7 \mu\text{m}$,其它叶片生化参量对应特征波段为 $0.97 \mu\text{m}$ 、 $1.20 \mu\text{m}$ 、 $1.40 \mu\text{m}$ 和 $1.94 \mu\text{m}$ ^[10]。在 $0.4 \mu\text{m} \sim 0.7 \mu\text{m}$ 部分,叶绿素纯物质吸收系数随着波长的不同而变化,叶绿素的纯物质吸收系数的几个特征点是:440 nm、460 nm、550 nm、630 nm、660 nm、670 nm、700 nm、750 nm。吸收系数的谷点是550 nm和750 nm;峰点是670 nm。700 nm处是吸收系数下降过程中斜率出现转折的点;630 nm是吸收系数增加过程中斜率出现变化的转折点,这2个波段叶绿素吸收能力适中。蓝光及紫外区域叶绿素吸收明显,但由于受到植株叶片白化层的严重干扰,叶片反射率对于叶绿素反演利用比较困难^[10]。一些研究人员认为,670 nm左右是吸收峰的最佳波段,但670 nm波段存在叶绿素吸收饱和的问题,并且由于其它因素干扰和噪音加入,670 nm波段表征叶绿素状况的能力会有所减弱^[11]。

本文比较了2种不同叶绿素状况的湿地松叶片的光谱曲线(图2)。

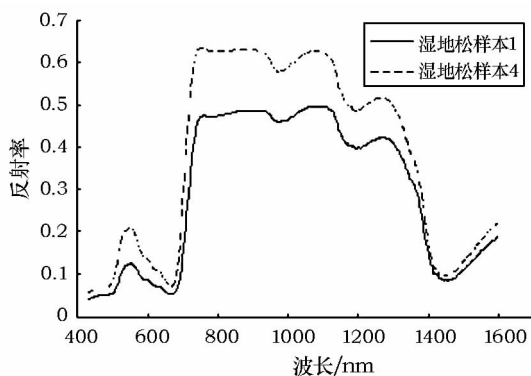


图2 不同叶绿素状况的两组叶片光谱比较

图2中,虚线为湿地松样本4,叶绿素浓度偏低,

为498 mg/kg;实线为湿地松样本1,叶绿素浓度偏高,为1284 mg/kg。从这两组不同叶绿素状况的反射率曲线看,随着叶绿素浓度的降低,反射率光谱在670 nm处的增加幅度较小,而叶绿素吸收系数适中的630 nm和550 nm的反射率变动较大,800 nm附近的近红外区域抬升幅度大,这个变化被认为和叶绿素浓度的变化没有直接的联系,而和叶片组织结构的发达程度有关。由于湿地松样本1的叶绿素浓度高,在670 nm处具有低的反射率,同时在630 nm处也具有低的反射率。630 nm处吸收没有670 nm处强烈,但减少的幅度比较大,受到噪音的干扰小,也可作为叶绿素浓度反演的特征波段。

2.2 与叶绿素相关的高光谱指数

一些高光谱指数已经被用来表征叶绿素吸收特征,本文使用几种具有代表性的植被指数用于叶绿素浓度的反演,并比较这些指数在反演叶绿素状况的能力。这些指数包括 $NDVI$ ^[12]、 $TCARI$ ^[8]和 TVI (三角形植被指数)^[6]等。

$NDVI$ 是常用的植被指数,最早作为宽波段植被指数使用,后来也被改造成为窄波段的植被指数;Kim(1994)发展了叶绿素吸收比率指数($CARI$),即使用670 nm处与550 nm处反射率的差值和670 nm处与700 nm处的反射率差值的比率来度量叶绿素状况^[7],后来,经过调整发展为改进型的叶绿素吸收比率指数($TCARI$)^[8],即

$$TCARI = 3[(R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550})(R_{700}/R_{670})] \quad (1)$$

三角形植被指数(TVI)是550 nm、670 nm和750 nm 3个波段的反射率组成的三角形面积,即

$$TVI = 0.5[120(R_{750} - R_{550}) - 200(R_{670} - R_{550})] \quad (2)$$

式(2)基于这样的事实:叶绿素吸收导致红光反射率下降,丰富的叶组织导致近红外反射率上升,最终三角形的面积增加^[6]。 TVI 增加主要因近红外的反射率增加引起的,近红外反射增加和叶片组织结构有关,和叶绿素吸收没有直接关系,因此,这个指数受到非叶绿素因素的影响大。这些指数已经用于一些叶绿素反演应用中, TVI 和 $TCARI$ 两个植被指数没有归一化,要求遥感数据必须是反射率,指数的推广困难。考虑以上指数遇到的问题,本文基于 TVI 提出了叶绿素吸收面积指数(Chlorophyll Absorption Area Index, $CAAI$),定义630 nm、670 nm和700 nm 3个波段反射率为顶点的三角形,其面积与630 nm~700 nm范围内反射率的累积面积之比为

$$CAAI = \frac{40(R_{700} - R_{670}) - 30(R_{670} - R_{630})}{70(R_{700} + R_{630})} \quad (3)$$

随着叶绿素浓度的增加,由于 630 nm 处的反射率急剧减少,所定义的三角形占有的面积比率随之减少,CAAI 和叶绿素浓度呈反比例趋势。

2.3 偏最小二乘法(PLS)

光谱波段间和不同叶片化学参量间都存在相关关系,解决变量间的自相关常用到的方法有主成分分析(PCA)、多元逐步回归等。PCA 往往应用于在自变量的数据集中,不能保证获得的主成分和因变量有着较强的联系;逐步回归使一些叶绿素吸收特征的波段可能被其它的叶绿素不相关波段组合所代替,同时对于多因变量的情况只能一一进行回归,没有利用因变量(如,水分含量和叶绿素浓度)之间的关联关系。而偏最小二乘法(PLS)考虑自变量集和因变量集整体的关联关系,基于寻找自变量集和因变量集的最大相关为目的抽取自变量和因变量各自的主要成分,从而能够在自变量和因变量间都存在严重多重相关性的条件下进行回归建模。

其建模方法是:自变量与因变量的数据集 X 和 Y ,分别在 X 与 Y 中提取出 t 和 u ,要求:① t 和 u 尽可能大地携带它们各自数据集中的变异信息;② t 和 u 的相关程度能够达到最大。在第一个成分被提取后,分别实施 X 对 t 的回归以及 Y 对 u 的回归。如果已经达到满意的精度,算法终止;否则将利用 X

以及 Y 的残余信息进行第二轮的成分提取。如此往复,直到满足要求为止。提取 t, u 成分的个数根据预测残差平方和(PRESS)来判断^[14]。

PLS 回归建模可解决特征波段的缺失问题,同时 PLS 建立的回归模型中自变量的回归系数将更容易解释各个变量的作用,模型中标准化后的自变量的系数越大,说明其对反演模型的贡献越多,因此,可以通过对 PLS 建模的结果进行分析,评价光谱指数构建的合理性。

3 结果和讨论

3.1 指数建模结果分析

利用本次试验获取的森林叶片光谱数据和叶绿素浓度、水分含量等生化参量数据,使用目前有代表性的植被指数(NDVI、TVI、TCARI)及本文构建的高光谱指数 CAAI 进行叶绿素浓度的反演,并进行反演精度的比较评价。

从叶绿素浓度的反演结果发现,NDVI 与叶绿素浓度相关性差(图 3a),在估算叶绿素浓度方面效果不理想。但 NDVI 能够比较好地反映植被叶面积指数(LAI)的特性,主要是利用了近红外波段,而近红外波段不是叶绿素的特征吸收波段,将 NDVI 用于叶绿素的反演不合适。

TVI 和叶绿素浓度的决定系数为 0.3396(图 3b),

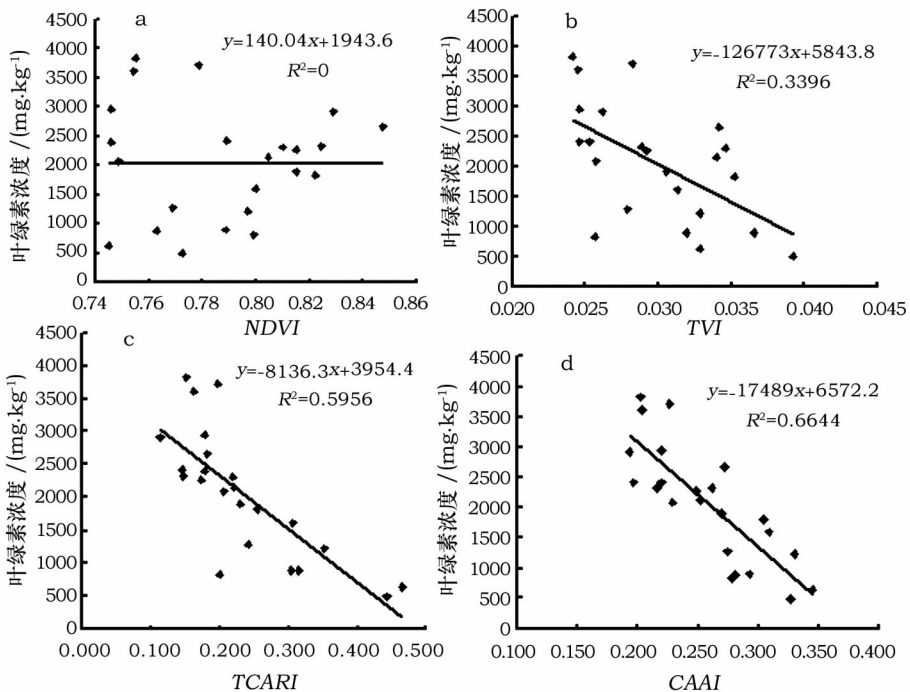


图 3 几种高光谱指数和叶绿素浓度的回归分析

比 *NDVI* 高,但仍处于比较低的水平。分析其原因,*TVI* 定义的三角形右端点为 750nm 波段,该波段同时受到非叶绿素的生化参量的影响,叶绿素在该波段几乎没有吸收,导致 *TVI* 用于叶绿素浓度的反演精度不高。

TCARI 与叶绿素浓度的决定系数高达 0.59(图 3c),*TCARI* 已经在其它一些研究中被用来反演农作物叶片叶绿素状况^[8],已经多次试验和验证,*TCARI* 的叶绿素浓度的反演结果比较好,但是,*TCARI* 是以反射率光谱作为数据源的。

CAAI 对应于几种树种叶片的叶绿素浓度的分布直线形式,决定系数高达 0.664(图 3d),比 *TCARI* 更准确。另外,*CAAI* 作为归一化的高光谱指数,对没有转换为反射率的遥感数据(如,*DN* 值、辐亮度等)仍可以使用,更容易推广,并且从试验的结果看森林绿色叶片光谱提取的 *CAAI* 数值的分布从 0.18 ~ 0.35,而理论数值范围为 0 ~ 1,绿色叶片的 *CAAI* 分布的范围相对比较广,所建立的回归模型也更具有鲁棒性。

3.2 PLS 建模结果分析

PLS 建模数据选用与叶绿素吸收相关的 550 nm、630 nm、660 nm、670 nm、700 nm 和 750 nm 波段,并加入红外部分的 800 nm 和水分吸收的 940 nm 波段。由于 PLS 回归中提取成分的数目过多容易造成模型的过渡拟和,故选择的最多主成分个数设定为 4 个。4 个主成分能表达各波段 99.5% 的反射率信息。

经过 PLS 建立的模型具有较好的估测能力,决定系数达到 0.649,预测值和实测值呈正相关的趋势,并围绕在 $y=x$ 的直线周围,残差分布均一,证明估测的结果是比较成功的(图 4)。

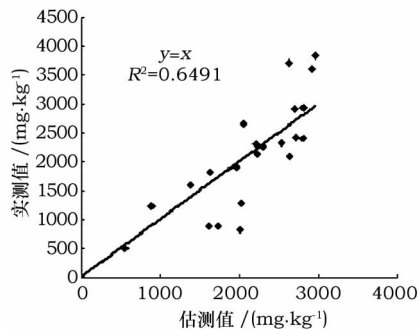


图 4 叶绿素浓度估测值和实测值相关分析

PLS 方法首先将自变量即反射率光谱数据标准化,标准化后的数据相对原始数据便于评价各波段对叶绿素浓度的贡献。从标准化的 8 个波段数据的 PLS 回归模型系数(表 1)中发现,670 nm、630 nm、550 nm 和 700 nm 波段对于模型的贡献最大,660 nm、750 nm、800 nm 和 940 nm 波段的贡献比较小。通过 PLS 获得的回归模型结果比简单相关方法获得的模型更能合理地解释各波段在叶绿素估测中的地位。在叶绿素浓度和反射率的直接相关分析中,670 nm 波段和叶绿素浓度的相关性是比较低的,而在 PLS 回归模型中,670 nm 波段的作用最大,验证了 670 nm 被认为是叶绿素吸收的特征波段。PLS 回归方法获得的模型中贡献最大的前 4 个波段有 3 个为 *CAAI* 所利用的波段(630 nm、670 nm、700 nm)。*TVI* 的定义三角形的右边顶点为 750 nm 处的反射率,这个波段受到其它因素(叶片组织结构、水分)的影响大,是 *TVI* 在叶绿素反演中不稳定的因素,*TCARI* 和 *CAAI* 能够比较好地反演叶绿素浓度,与其利用了这几个特征波段是分不开的。

表 1 使用 PLS 获得估测模型的各波段系数

模型系数	常数项	550 nm	630 nm	660 nm	670 nm	700 nm	750 nm	800 nm	940 nm
标准化后	0.000	-0.397	-0.471	0.048	0.575	-0.360	0.058	0.002	-0.118
原始值	2 593.7	-10 969.9	-23 666.4	4 434.0	71 212.2	-8 075.3	885.2	30.3	-1 821.1

4 结论

利用高光谱数据反演森林叶片叶绿素浓度需要解决特征提取和数据冗余的问题。670 nm 波段是叶片叶绿素的主要吸收波段,630 nm 波段也具有一定的潜力。本次试验证明,*TCARI* 和 *CAAI* 两个高光谱指数具有较强的森林叶绿素浓度的反演能力。使用 PLS 回归分析的结果显示,PLS 方法充分利用了叶片化学参量之间的关系,建立的模型具有高的估测精

度。通过各波段在反演模型中的系数决定贡献大小,能够发现特征波段,从波段选择角度解释了几种高光谱指数的叶绿素反演能力。本文集中研究了叶片层次的叶绿素浓度反演,认为 *CAAI* 是一种叶绿素强相关的归一化高光谱指数,但对于 *CAAI* 在冠层水平的叶绿素浓度反演精度方面还需要进一步的检验。

致谢: 本研究中千烟洲森林主要树种的光谱和叶片生化组分测量试验得到中国科学院遥感应用研究所陈良富研究员的大力帮助,谨致谢意。

参考文献

[1] Madeira A C, Mendonca A, Ferreira ME, et al. Relationship between Spectroradiometric and Chlorophyll Measurements in Green Beans[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000,31: 631 - 643.

[2] 吴长山,项月琴,郑兰芬,等. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究[J]. 遥感学报,2000,4(3):228 - 232.

[3] Kokaly Raymond F, Roger N Clark. Spectroscopic. Determination of Leaf Biochemistry Using Band - Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression [J]. Remote Sens. Environ. , 1999 ,67 :267 - 287.

[4] Jago R A, Cutler MEJ, Curran PJ. Estimating Canopy Chlorophyll Concentration from Field and Airborne Spectra[J]. Remote Sens. Environ. , 1999 , 68 :206 - 216.

[5] Andrea Maccioni, Giovanni Agati, Piero Mazzinghi. New Vegetation Indices for Remote Measurement of Chlorophylls Based on Leaf directional Reflectance Spectra[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2001, 61(1 - 2) :52 - 61.

[6] Broge N H , Leblanc E. Comparing Prediction Power and Stability of Broadband and Hyperspectral Vegetation Indices for Estimation of Green Leaf Area Index and Canopy Chlorophyll Density[J]. Remote Sens. Environ. ,2001,76:156 - 172.

[7] Kim M S, Daughtry C S T, Chappllelle E W, et al. The Use of High Spectral Resolution Bands for Estimating Absorbed Photosynthetically Active Radiation [A]. 6th Symp. On Phys. Meas. and Signatures in Rem. Sens. Jan. 17 - 21, 1994 [C]. Val D' Isere, France:299 - 306.

[8] Driss Haboudane, John R Miller, Nicolas Tremblay, et al. Integrated Narrow - band Vegetation Indices for Prediction of Crop Chlorophyll Content for Application to Precision Agriculture [J]. Remote Sens. Environ. , 2002,81(2 - 3) : 416 - 426.

[9] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra [J]. Remote Sens. Environ. , 1990, 34: 75 - 91.

[10] Curran P J. Remote Sensing of Foliar Chemistry [J]. Remote Sens. Environ. , 1989,30:271 - 278.

[11] Daniel A, Sims, John A, et al. Relationships between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages [J]. Remote Sens. Environ. , 2002,81(2 - 3) :337 - 354.

[12] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS [A]. Third ERTS Sympo sium, 1973 [C]. NASA SP - 351 I: 309 - 317.

[13] Geneviève Rondeaux, Michael Steven, Frédéric Baret. Optimization of Soil - adjusted Vegetation Indices [J]. Remote Sens. Environ. , 1996, 55 (2) : 95 - 107.

[14] 杨燕明,刘贞文,陈本清,等. 偏最小二乘法反演二类水体的水色要素 [J]. 遥感学报,2005,9 (2) : 123 - 130.

THE RETRIEVAL OF FOREST CHLOROPHYLL CONCENTRATION BASED ON FOLIAR SPECTRA

JIAO Quan - jun, ZHANG Xia, ZHANG Bing, WEI Zheng, ZHENG Lan - fen

(State Key Lab of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The accurate estimation of foliar chlorophyll concentration contributes to our need for further understanding of forest ecosystem. Two approaches, namely, indices and partial least squares regression, were used to retrieve foliar chlorophyll concentration, both of which are based on the spectra and chemical variables of main tree species in Qianyanzhou forest. Common hyperspectral indices were used to set up the regression model, and a new index, Chlorophyll Absorption Area Index (CAAI), was created. The results show that the indices TCARI and CAAI have stronger ability for predicting chlorophyll concentration, and the predicted model constructed by the PLS method can be used to explain the capability of these indices.

Key words: Chlorophyll concentration; Spectral index; CAAI; Partial least squares regression

第一作者简介: 焦全军(1981 -),男,2003年毕业于北京大学,获地图学与地理信息系统专业学士学位。现于中国科学院遥感应用研究所攻读博士学位,研究方向:植被高光谱遥感以及遥感图像模拟。

(责任编辑:肖继春)