

华南地区亚热带树木叶面积指数的高光谱反演研究

汪清泓^{1,2}, 刘振华^{1,2*}, 胡月明^{1,2,3,4}, 宋英强^{1,2}

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 国土资源部建设用地再开发重点实验室, 广州 510642; 3. 广东省土地信息工程技术研究中心, 广州 510642; 4. 广东省土地利用与整治重点实验室, 广州 510642)

摘要: 为构建树种叶面积指数的估算模型, 以 NDVI、RVI、FREP、 CI_{Green} 、 $CI_{Red-edge}$ 、 $MSAVI_2$ 为高光谱特征变量, 通过统计分析, 确定反演树种叶面积指数的最佳光谱特征变量, 构建华南农业大学校园内 50 种亚热带树木的叶片反射率和叶面积指数(LAI)模型。结果表明, 6 种高光谱特征变量与树种叶面积指数间都具有极显著相关性, 其中红边位置反射率(FREP)和比值植被指数(RVI)与 LAI 的拟合方程的 R^2 都大于 0.8, 决定系数分别为 0.820 和 0.811。经过精度验证, FREP 估算的均方根误差(RMSE)只有 0.13, 该回归模型为估测亚热带典型树种的叶片 LAI 最佳模型。从高光谱遥感的角度结合亚热带植被的群落结构特点来看, 建立的红边位置光谱反射率与叶面积指数的回归模型普遍具有较高的拟合度, 所以利用高光谱特征变量反演亚热带树木叶片的叶面积指数等植被参数的应用前景较好。

关键词: 叶面积指数; 高光谱模型; 亚热带典型树种; 植被指数; 回归模型

doi: 10.11926/jtsb.3840

Hyperspectral Inversion of Leaf Area Index of Subtropical Vegetation in South China

WANG Qing-hong^{1,2}, LIU Zhen-hua^{1,2*}, HU Yue-ming^{1,2,3,4}, SONG Ying-qiang^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Key Laboratory of Construction Land improvement, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510642, China; 3. Guangdong Province Engineering Research Center for Land Information Technology, Guangzhou 510642, China; 4. Guangdong Province Key Laboratory for Land use and consolidation, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to determine the optimal hyperspectral characteristic variables of subtropical tree species and construct the estimation model of leaf area index (LAI), the leaf reflectance and LAI of 50 tree species in the campus of South China Agricultural University (SCAU) were measured. At the same time, the relationship model of LAI with the six hyperspectral characteristic variables, including NDVI, RVI, FREP, CI_{Green} , $CI_{Red-edge}$ and $MSAVI_2$, were constructed through statistical analysis, respectively. The results showed that there were significant correlations between the six hyperspectral characteristic variables and LAI of tree species. The R^2 of fitting equations between LAI with red edge position reflectivity (FREP) and the ratio vegetation index RVI were more than 0.8 with correlation coefficients for 0.820 and 0.811, respectively. The root mean square error (RMSE) of FREP estimation is only 0.13, so the regression model is the best model for estimating the LAI of typical subtropical tree species. Combining subtropical vegetation community structure and hyperspectral remote sensing, the regression model between red edge position reflectivity and leaf area index generally has a high fitting degree.

收稿日期: 2017-10-19 接受日期: 2018-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671333); 广东省科技计划项目(2014A050503060, 2017B090907030); 广州市科技计划项目(201807010048, 201804020034)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41671333), the Project for Science and Technology in Guangdong Province (Grant No. 2014A050503060, 2017B090907030), and the Project for Science and Technology Planning in Guangzhou (Grant No. 201807010048, 201804020034).

作者简介: 汪清泓(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为定量遥感。E-mail: 460435411@qq.com

*通信作者 Corresponding author. E-mail: 378599393@qq.com

Therefore, using hyperspectral characteristic variables inverted subtropical leaves of the leaf area index and other vegetation parameters had better application prospects.

Key words: Leaf area index; Hyperspectral model; Subtropical typical tree species; Vegetation index; Regression model

植被生化和生理参数的精确定量化估算对于农业、生态、气象应用是很有用的,其时空分布作为重要的模型输入参数,常被用于量化陆地表面和大气之间的物质和能量变换^[1-2]。作为重要的群落结构特征参数之一的叶面积指数(leaf area index, LAI)是表征植被冠层结构最基本的参量之一,它控制着植被的许多生物、物理过程,如光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等^[3-4]。近年来,卫星遥感技术为大范围的动态无损估测叶片 LAI 提供了一种新的方法^[5]。

在利用遥感数据反演植被 LAI 方面,已利用多光谱与高光谱遥感数据建立植被指数开展大量的反演研究。利用多光谱遥感估测农作物以及植被的生理生化参数的技术多采用宽波段,建立多种宽波段植被指数遥感反演模型来估算农作物 LAI^[6-9]。但是多光谱波段设置较宽、波段不连续,对某些细微的技术问题难以解决,反演具有很大的不确定性。而高光谱技术弥补了这一不足,与多光谱影像相比,高光谱影像具有独特的优势:波段窄且连续、图谱合一,这种优势为高精度反演植被生理生化参数提供了可能。利用植被高光谱遥感信息可以较为细致地描述植被的红边特性,提取的红边光学参数与 LAI 建立相关分析,而宽波段遥感数据几乎不可能得到相关的红边光学参数^[10-12]。

目前反演植被 LAI 中主要用到的高光谱数据包括地基的 ASD、EPP 光谱仪测量的非成像高光谱数据,HyperSCAN、HeadWall 等成像高光谱数据^[13]。光谱仪测量光谱快速、精确、无损、无接触,是一款真正的便携式地物波谱仪,使用高灵敏度的探测器,高信噪比的光栅,内置快门,DriftLock™暗电流补偿技术,得到更高信噪比的光谱数据。在各种设置下都可快速、准确地获取反射率、辐射亮度和辐射照度。面板上带有可倾斜彩色液晶显示器,内置数据处理和存储功能,在野外无需额外的控制电脑。符合人体工学设计,重量轻,带有手柄,激光瞄准技术和彩色液晶显示器等特点使其在各种环境中都能更方便、随意的使用。LAISmart 是一种基于摄影成像技术,快速获取 LAI 的便携式测量设备,

该系统充分利用当前成熟的智能终端设备的成像与高性能计算功能,具备 LAI 实时计算功能。

利用这些高光谱数据获取 LAI 的方法主要分为三类:多元回归分析的方法;基于遥感物理模型的反演法;基于经验/半经验模型的统计方法^[2,14-15]。由于物理模型反演算法十分复杂,很多输入参数难以获得,反演精度从而也受到限制。相比之下,基于经验/半经验模型的统计方法(如:光谱指数反演方法)凭借其简单、快捷的特点常被用于植被生化参量的反演,通常通过大量的遥感数据对生化参量数据进行统计分析,然后建立反演生化参量数据的估测模型。在植被指数选择方面,红波段和近红外波段组合所构造的植被指数常被用于反演植被的相关参数。

植被指数按发展阶段可分为三类:第一类植被指数基于波段的线性组合(差或和)或原始波段的比值,由经验方法发展的,如 RVI 等;第二类植被指数大都基于物理知识,将电磁波辐射、大气、植被覆盖和土壤背景的相互作用结合在一起考虑,并通过数学和物理及逻辑经验以及通过模拟将原植被指数不断改进而发展的(如 MSAVI₂、NDVI 等);第三类植被指数是针对高光谱遥感及热红外遥感而发展的植被指数(如 FREP、CI_{Red-edge}、CI_{Green} 等)。这些植被指数是近几年来基于遥感技术的发展和应用的深入而产生的新的表现形式。在植被遥感中,NDVI 的应用最为广泛,其次是 RVI,但是当 LAI 超出 3.0 敏感性会显著降低;定量遥感分析中常采用红边参数估计作物的 LAI,包括的红边位置反射率——FREP 和红边位置叶绿素指数 CI_{Red-edge},还有窄波段植被指数的绿峰位置叶绿素指数 CI_{Green};另一类是不依赖于土壤线的植被指数 MSAVI₂,即修改型二次土壤调节植被指数,这几种植被指数在叶面积指数的反演方面的应用非常广泛^[16-17]。

目前,利用光谱植被指数方法对农作物高光谱和 LAI 之间的关系进行了大量深入的研究,虽然对于森林树种的相关研究在国外开展较早也较成熟^[18-19],但是国内针对森林树种的相关研究仍处于

起步阶段^[20],且多是针对单一森林树种,极少对某一类型的树种展开研究^[21]。本文根据实测的树木光谱反射率和叶片 LAI 的数据,利用经验模型的植被指数方法进行回归分析,构建高光谱数据获取 LAI 的最佳反演模型,反演华南地区常绿阔叶林的 LAI,为南亚热带森林的经营管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省广州市天河区华南农业大学树木园和主校区范围内,中心位于 23°9'18" N、113°21'36" E。研究区为南亚热带典型的季风性海洋气候,年均气温 20.2°C,年降雨量约 1700 mm,具有得天独厚的水热地理条件。校内植物资源丰富,有热带、亚热带各种园林绿化植被。图 1 为研究区样点的分布情况。同时,本文选取了河源市古竹镇奎溪村东江林场的亚热带树种作为验证样区,位于广东省东北部、东江中上游,地理坐标为 114°14'~115°36' E、23°10'~24°27' N,属亚热带季风气候,地形主要以山地和丘陵为主,其中山地占 53%,丘陵

占 36%,谷地和平原占 11%,主要分布有桉树(*Eucalyptus robusta*)、灰木莲(*Manglietia glance*)、湿地松(*Pinus elliottii*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等树种,实地采集了 8 种树木的叶面积指数、GPS 坐标等信息,样点分布如图 2 所示。选择该区域作为试验区是因为中国亚热带植被长期受到人类活动的干扰,近 20 年来,由于退耕还林和天然林保护工程,退化的植被开始得到恢复。选择在恢复演替中具有代表性的亚热带常绿阔叶林树木的叶面积指数具有重要的理论价值和实践意义。

1.2 数据和预处理

利用美国 ASD 公司生产的手持式野外光谱辐射仪 FieldSpec HandHeld 2 对树木进行野外光谱测量。光谱范围为 325~1 075 nm,测定时间选择在中午 10:00~14:00 (太阳高度角大于 45°),天气晴朗无风、无云。每次样本测试前都以标准白板校正,然后测试样本的叶片光谱反射率,每样本 10 次重复,使用 VieSpecpro 软件进行预处理,取平均值作为该样本的反射光谱测量值。测量时间为 2016 年 5~6 月,由于研究区位于华南农业大学树木园以及主校

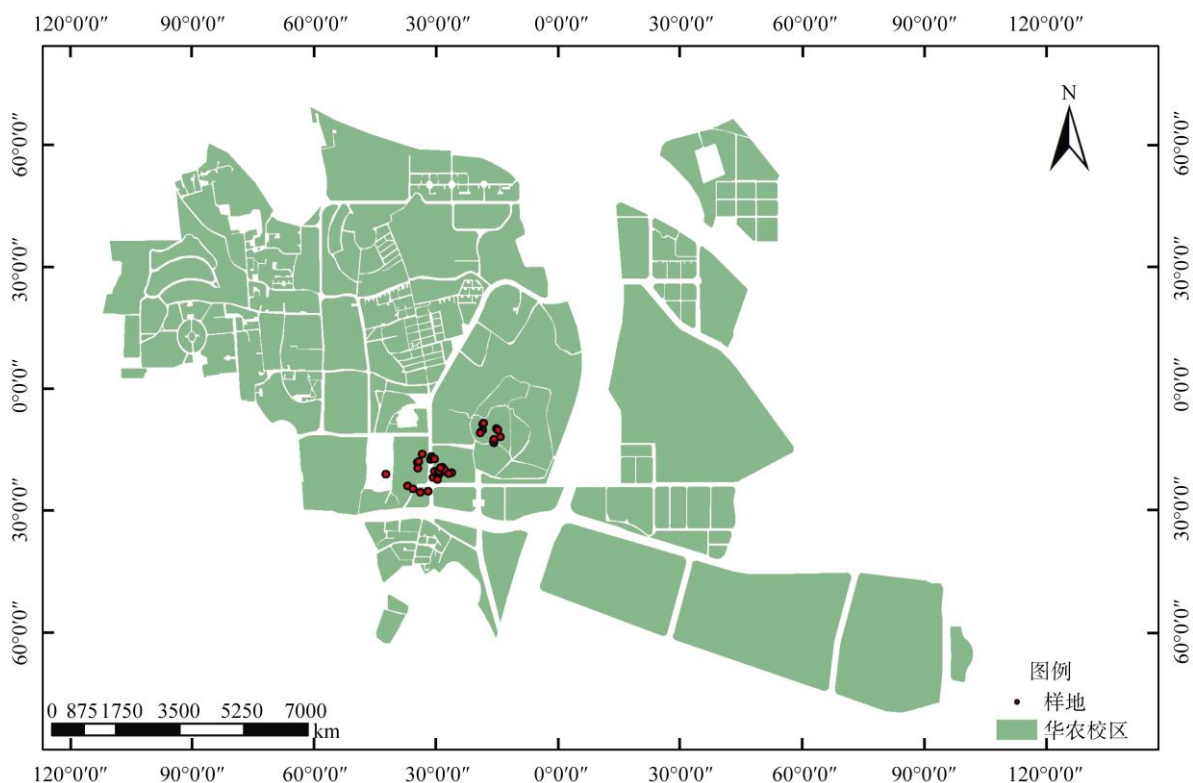


图 1 华南农业大学校区树木样点分布图

Fig. 1 Distribution of sites in South China Agricultural University

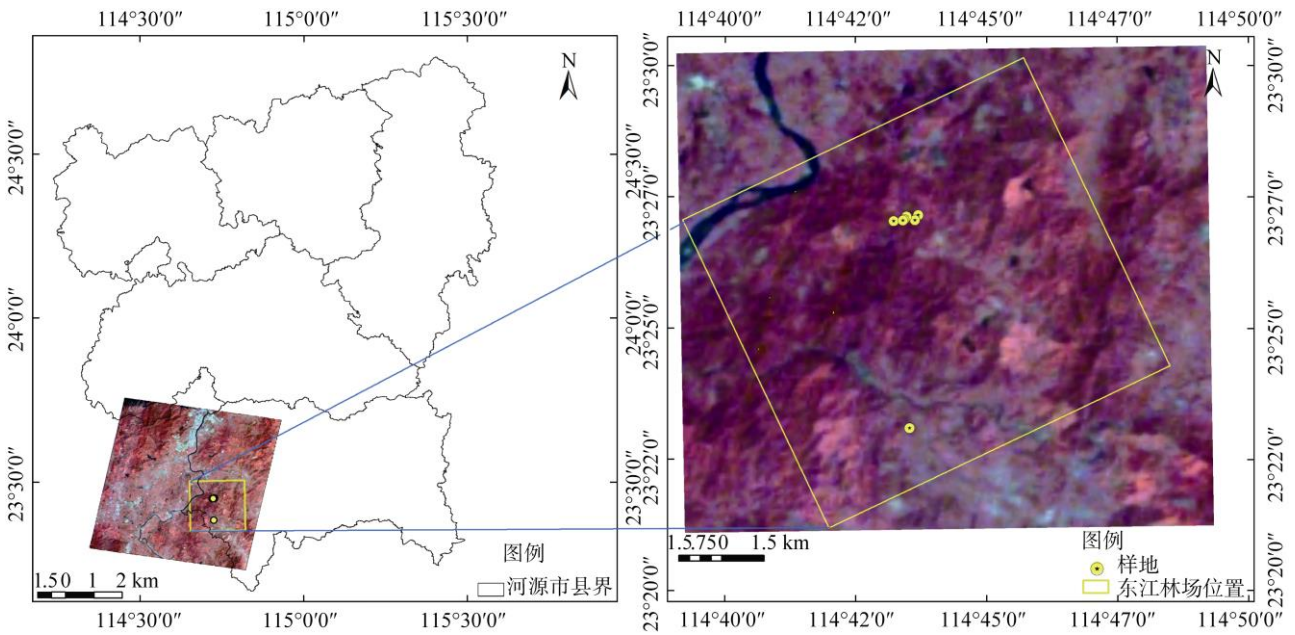


图 2 东江林场验证样点分布图

Fig. 2 Distribution of verification sites in Dongjiang Forest Farm

区范围内,参照“华南农业大学校园木本植物图鉴”这本书中介绍的校园亚热带树种分布范围进行了样点的采样设计,选取研究区域 50 种树木进行测量,如图 1 所示的研究区概况样点分布情况。同时利用全自动植被冠层成像分析仪(LAISmart)同步获取各树木叶片的叶面积指数,由于研究区的植被大多都是较高的常绿阔叶树种, LAI 的测量采用向上拍摄的方式,在分类中,为了区分植物与天空光,选用名为“蓝色波段”的算法。每种树选取不同方位测量 5 次左右,对有效值取平均值。

1.3 方法

以实测的高光谱数据和叶面积指数数据为基础,对 NDVI、RVI、FREP、CI_{Green}、CI_{Red-edge}、MSAVI₂

共 6 种高光谱特征变量与 LAI 进行相关性分析,构建线性、对数、幂和指数函数的回归模型,通过决定系数 R^2 和相关性显著水平 P 判断不同植被指数中回归模型对反演亚热带典型树种叶片 LAI 的拟合精度,选取最优的高光谱植被指数对应的反演模型。根据已有研究^[22-24],用 6 种植被指数(表 1)构建叶面积指数高光谱反演模型。

本研究涉及近红外波段(760~1 075 nm)、红光波段(620~759 nm)和绿光波段(500~517 nm),以 NDVI 为例进行说明。运用 VBA 批处理功能,计算了 760~1 075 nm 间 316 个高光谱带与 620~759 nm 间 140 个高光谱带所有 316×140=44240 种组合,然后系统地 对 50 种树的 LAI 和所有 44 240 种组合得到的窄波段 NDVI 进行相关性分析,找出相关性最高的组

表 1 6 种高光谱植被指数

Table 1 Six types of hyperspectral vegetation indices

植被指数 VI	公式 Equation
比值植被指数 Ratio vegetation index (RVI)	ρ_{NIR} / ρ_R
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)	$(\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$
红边位置反射率 Reflectance red edge position (FREP)	680~750 nm 区间一阶微分最大值所对应波长的反射率
绿峰位置叶绿素指数 Green chlorophyll index (CI _{Green})	$(\rho_{NIR} / \rho_{Green}) - 1$
红边位置叶绿素指数 Red-edge Chlorophyll Index (CI _{Red-edge})	$(\rho_{NIR} / \rho_{Red-edge}) - 1$
修改型二次土壤调节植被指数 Soil-adjusted vegetation index (MSAVI ₂)	$[2(\rho_{NIR} + 1) - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_R)}] / 2$

ρ_{NIR} : 红外波段的叶片反射率; ρ_R : 红波段的叶片反射率。

ρ_{NIR} : Leaf reflectivity of infrared band; ρ_R : Leaf reflectivity of red band.

合来建立适应于研究区的 NDVI(R773,R687), 从而建立最佳的高光谱植被指数与叶面积指数的反演模型。

采用通用的均方根误差(RMSE)和误差系数 2 个指标对模型模拟值和实测值间的符合度进行检验, 均方根误差的公式是:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2 / n} \quad (1)$$

$$\text{误差系数} = SIM_i / OBS_i \times 100\% \quad (2)$$

式中, OBS_i , SIM_i 分别为实测值与模拟值, n 为样本容量。均方根误差(RMSE)值越接近 0, 拟合度就越高。

2 结果和分析

2.1 原始光谱和叶面积指数的相关性分析

本文对 50 种亚热带树木样本进行光谱测试, 只选取了其中 9 组树种的光谱曲线来说明光谱曲线的变化趋势(图 3)。可见, 不同树种的叶片光谱反射率总的变化趋势一致, 叶片光谱在 550 nm 左右出现反射峰并且在 680 nm 左右出现反射低谷。从 680 到 760 nm 光谱反射率随波长的增加急剧升高。从 760 nm 开始, 光谱反射率缓慢增加, 几乎呈水平状态, 形成较高的稳定反射平台。

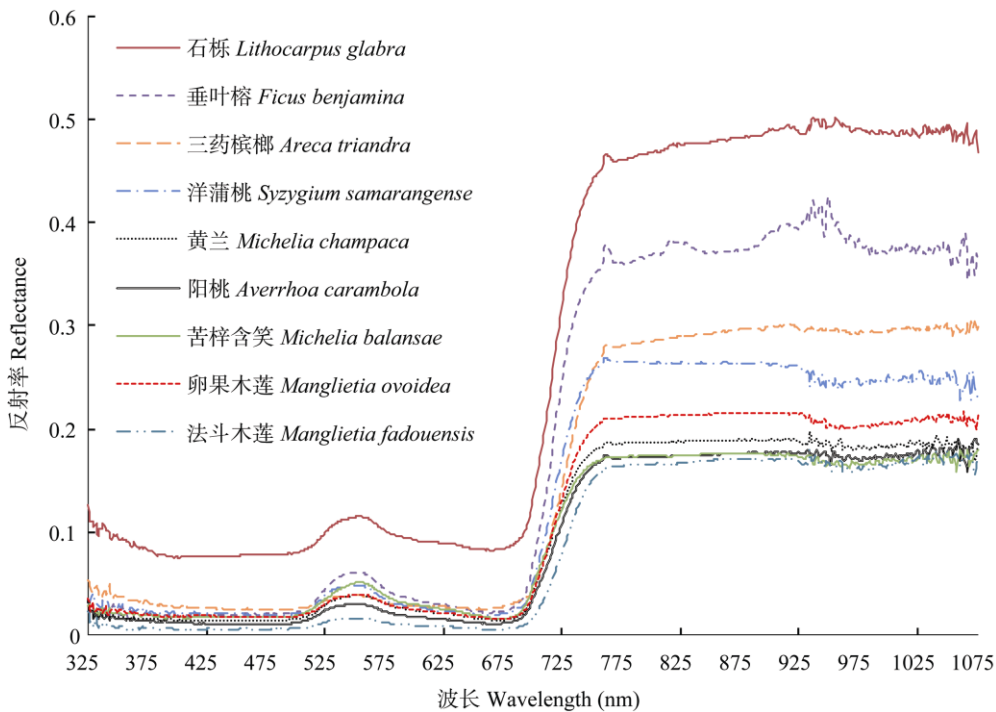


图3 测量树种原始光谱曲线

Fig. 3 Original spectral curve of tree species measured

由于仪器本身测量稳定性的限制, 本试验只对 400~900 nm 波长范围内的光谱反射率与叶面积指数的相关性进行分析(图 4)。叶面积指数与原始光谱反射率的最大相关系数为 0.81, 位于 718 nm 处, 呈负相关; 从 400 nm 开始相关系数增大, 而 524 nm 之后随波长的增加相关系数波动较大, 直至 718 nm 处达到最小值, 在近红外区趋于稳定。总体来看, 叶面积指数与高光谱反射率间的相关系数呈显著负相关关系, 说明采用反射率原始光谱特别是相关性较大的波段对叶面积指数进行预测具有可行性。

2.2 植被高光谱参数与叶面积指数的相关性分析

2.2.1 双变量类型植被指数与 LAI 之间的关系

双变量类型植被指数有 NDVI、RVI、 CI_{Green} 和 $MSAVI_2$, 用近红外波段分别与红光、绿峰区间波段进行排列组合, 即用各近红外(760~1 075 nm)波段依次与红光(620~760 nm)、绿峰区间(500~600 nm)的第 1 波段进行处理, 然后再与红光、绿峰区间的第 2 波段进行处理, 依此类推。

图 5 表明, 所有 44 240 个组合的 NDVI 中, 在近红外区间(760~1 075 nm)和红光区间(620~703 nm)的 NDVI 与 LAI 具有较好的相关性, 相关系数变化

比较平稳, 相关性在 0.7 左右, 最大的正相关系数发生在近红外波长 773 nm 和红光波长 687 nm 的组合, 达 0.846, 可用 $NDVI(R_{773}, R_{687}) = (r_{773} - r_{687}) / (r_{773} + r_{687})$ 来表达, 其后的相关系数波动比较大, 从最大正相关逐步过渡到负相关, 最大负相关为 0.33, 且最大正相关系数的绝对值大于最大负相关系数的

绝对值。

所有 44 240 个组合的 RVI 中, 在近红外区间 (770~1 050 nm) 和红光区间 (630~700 nm) 的 RVI 与 LAI 具有较好的相关性, 相关系数变化比较平稳, 相关性在 0.8 左右, 最大的正相关系数发生在近红外波长 773 nm 和红光波长 687 nm 的组合, 达 0.901,

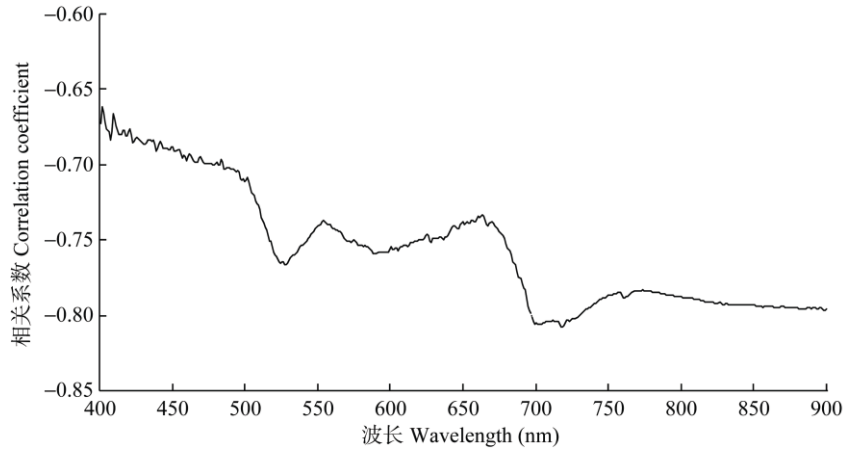


图 4 叶面积指数与原始高光谱反射率的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient between LAI and original hyperspectral reflectivity

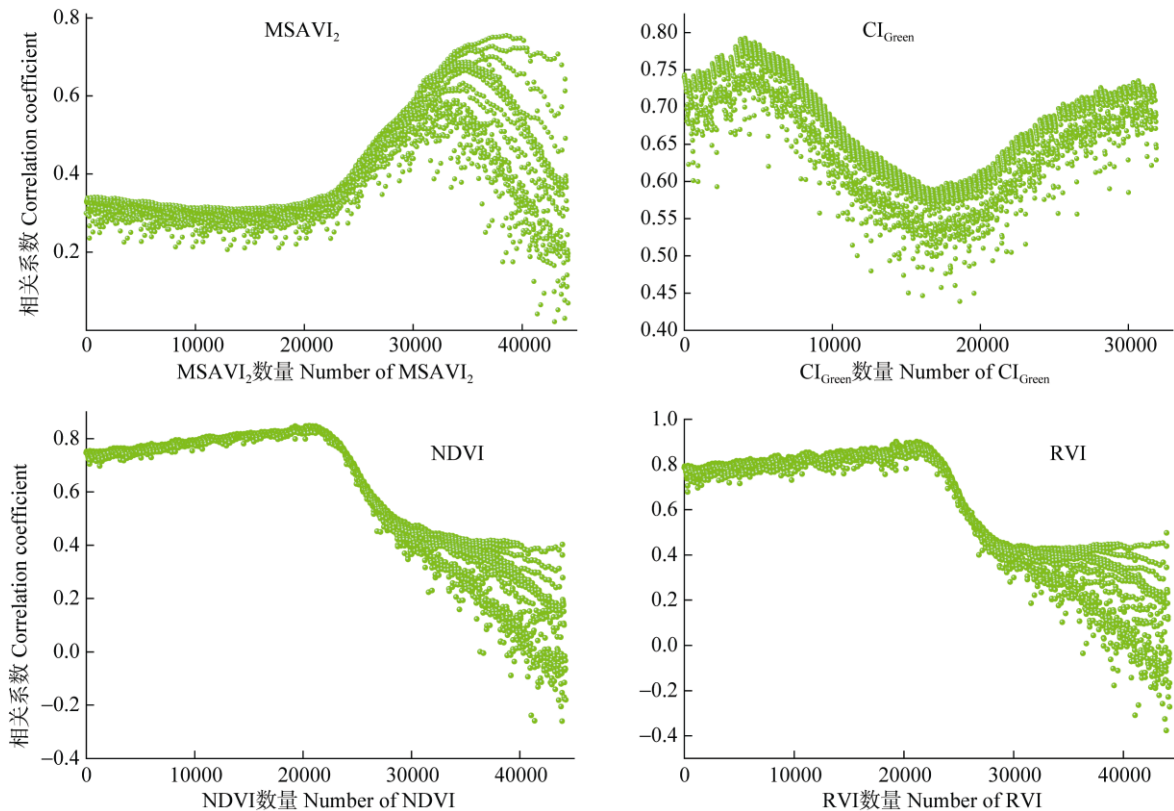


图 5 双变量高光谱参数和 LAI 的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficient between bivariate VIs and LAI

可用 $RVI(R_{773}, R_{687}) = r_{687} / r_{773}$ 来表达, 其后的相关系数波动比较大, 从最大正相关逐步过渡到负相关, 最大负相关为 0.397, 且最大正相关系数的绝对值大于最大负相关系数的绝对值。

所有 31 916 个组合的 CI_{Green} 都与 LAI 具有较好的相关性, 整体的相关系数波动不大, 相关系数呈抛物线对称趋势, 最大的正相关系数发生在近红外波长 773 nm 和绿光波长 512 nm 的组合, 达 0.792, 可用 $CI_{green}(R_{773}, R_{512}) = (r_{773} / r_{512}) - 1$ 来表达, 最小的正相关系数为 0.431。

所有 44 240 个组合的 $MSAVI_2$ 中, 一开始 $MSAVI_2$ 与 LAI 的相关性比较平稳, 都在 0.3 上下浮动; 在近红外区间(760~1 075 nm)和红光区间(716~760 nm)的 $MSAVI_2$ 与 LAI 的相关性波动较大, 相关系数随着波长的增加先迅速上升到最大正相关, 最大的正相关系数发生在近红外波长 773 nm 与红光波长 747 nm 的组合处, 达 0.753, 可用

$$MSAVI_2(R_{773}, R_{747}) = \left[2(\rho_{773} + 1) - \sqrt{(2\rho_{773} + 1)^2 - 8(\rho_{773} - \rho_{747})} \right] / 2$$

来表达, 其后迅速下降到最小负相关, 为 -0.02, 且最大正相关系数的绝对值大于最大负相关系数的绝对值。

2.2.2 单变量类型植被指数与 LAI 之间的关系

红边作为绿色植物叶片光谱曲线在 680~750 nm 间变化率最快的点, 是植物光谱的最明显标志, 也是一阶导数光谱在该区间内的拐点^[27]。定量遥感分析中常采用红边参数估计作物的叶面积指数, 由于红边的范围较宽, 通常用红-近红外区域的反射率的突变点——红边位置这样一个单一的值来量化“红边”。本文采用最常用的算法之一“最大一阶导数法”来确定红边位置, 计算公式:

$$FDR(\lambda_i) = [R_{\lambda(j+1)} - R_{\lambda(j)}] / \Delta\lambda \quad (3)$$

其中, FDR 为波长 i 处的一阶差分反射率, $R_{\lambda(j)}$ 为 j 波段的反射率, $R_{\lambda(j+1)}$ 为 $j+1$ 波段的反射率, $\Delta\lambda$ 为 j 和 $j+1$ 波段之间的波长差。

从图 6 可以看出, 本研究树种的红边位置主要分布在 717~735 nm 的区间范围内, 与理论区间基本吻合, 说明利用微分光谱的红边位置参数来推算植被叶片的叶面积指数等生理生化特性是可行的。

为了进一步探究红边位置其他相关参数与植被 LAI 间的关系, 用窄波段植被指数之一的 $CI_{Red-edge}$, 即红边的叶绿素指数来构建模型。从图 7

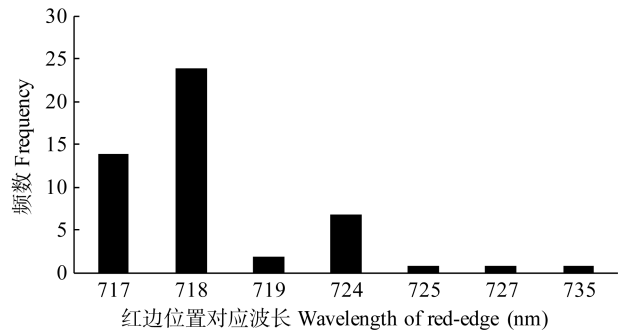


图 6 各树种红边位置的统计

Fig. 6 Statistics of red edge position of studied tree species

可以看出, 所有 316 个组合的 $CI_{Red-edge}$ 中, $CI_{Red-edge}$ 与 LAI 的相关性比较平稳, 最大的正相关系数发生在近红外波长 773 nm 与红边位置的组合处, 达 0.816, 可用 $CI_{Red-edge} = \rho_{773} / \rho_{Red-edge} - 1$ 来表达。之后 $CI_{Red-edge}$ 与 LAI 的相关性波动较大, 最小的正相关系数发生在近红外波长 1 075 nm 与红边位置的组合处, 为 0.480。

6 种不同植被高光谱参数与 LAI 用不同函数进行拟合, 结果表明(表 2), NDVI、FREP 与 LAI 的指数函数模型拟合精度比其他 3 种函数模型较高, RVI、 $CI_{Red-edge}$ 、 CI_{Green} 与 LAI 的线性函数模型拟合精度相对其他 3 种函数模型较高, $MSAVI_2$ 对数函数模型与线性函数模型的拟合精度基本一致, 但是考虑到线性函数模型的离散程度偏大, 所以选择对数函数模型作为最后的拟合结果。

图 8 为 6 种植被高光谱参数与 LAI 拟合精度最佳的拟合曲线。

2.3 最佳模型的选取及验证

最适应于研究区的植被指数分别为:

比值植被指数(ratio vegetation index):

$$RVI = r_{773} / r_{687} \quad (4)$$

归一化植被指数(normalized difference vegetation index): $NDVI = (r_{773} - r_{687}) / (r_{773} + r_{687})$ (5)

绿峰位置叶绿素指数(green chlorophyll index):

$$CI_{green} = (r_{773} / r_{512}) - 1 \quad (6)$$

红边位置叶绿素指数(red-edge chlorophyll index):

$$CI_{Red-edge} = (r_{773} / r_{Red-edge}) \quad (7)$$

修改型二次土壤调节植被指数(soil-adjusted vegetation index)

$$MSAVI_2 = \frac{[2(\rho_{773} + 1) - \sqrt{(2\rho_{773} + 1)^2 - 8(\rho_{773} - \rho_{747})}]}{2} \quad (8)$$

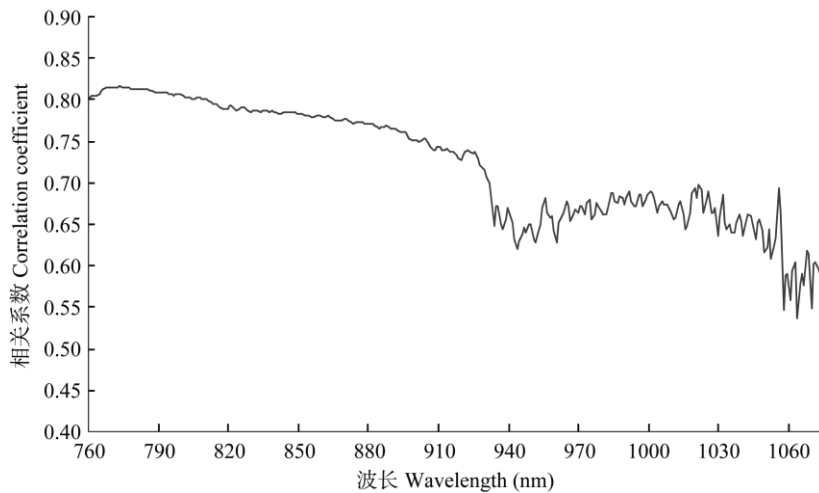


图 7 树种的 $CI_{Red-edge}$ 与 LAI 相关系数

Fig. 7 Correlation coefficient between $CI_{Red-edge}$ and LAI

表 2 6 种植被指数与 LAI 用不同函数的拟合模型

Table 2 Fitting model between VIs and LAI using different functions

特征变量 Characteristic variable	函数类型 Function type	模型 Model	R^2
NDVI(R_{773}, R_{687})	线性 Linear	$y = 5.114x + 0.412$	0.717**
	对数 Logarithm	$y = 4.003\ln x + 5.410$	0.712**
	指数 Exponential function	$y = 1.798e^{1.444x}$	0.739**
	幂 Power	$y = 5.5x^{0.897}$	0.737**
RVI(R_{773}, R_{687})	线性 Linear	$y = 0.115x + 3.289$	0.811**
	对数 Logarithm	$y = 1.192\ln x + 1.758$	0.801**
	指数 Exponential function	$y = 3.427e^{0.025x}$	0.786**
	幂 Power	$y = 2.427x^{0.266}$	0.794**
FREP	线性 Linear	$y = 10.775x + 5.841$	0.802**
	对数 Logarithm	$y = -1.267\ln x + 1.79$	0.749**
	指数 Exponential function	$y = 6.108e^{-2.503x}$	0.820**
	幂 Power	$y = 2.412x^{-0.29}$	0.742**
$CI_{Red-edge}$	线性 Linear	$y = 1.741x + 2.930$	0.667**
	对数 Logarithm	$y = 1.739\ln x + 4.717$	0.626**
	指数 Exponential function	$y = 3.246e^{0.358x}$	0.645**
	幂 Power	$y = 4.689x^{0.362}$	0.619**
CI_{Green}	线性 Linear	$y = 0.113x + 3.481$	0.627**
	对数 Logarithm	$y = 1.008\ln x + 2.346$	0.607**
	指数 Exponential function	$y = 3.582e^{0.025x}$	0.608**
	幂 Power	$y = 2.780x^{0.223}$	0.601**
MSAVI ₂	线性 Linear	$y = 55.285x - 24.204$	0.568**
	对数 Logarithm	$y = 29.025\ln x + 23.526$	0.566**
	指数 Exponential function	$y = 0.013e^{11.188x}$	0.538**
	幂 Power	$y = 211.412x^{5.878}$	0.537**

Y: LAI; x: 高光谱特征变量; **: $P < 0.01$ 。

Y: LAI; x: Characteristic variable; **: $P < 0.01$.

式中, ρ 为具体某个波段波长对应的反射率。

亚热带树种的叶面积指数和 6 种高光谱植被指数等特征变量均表现出显著的相关性, 回归模型以 FREP 与 LAI 的指数模型相关性最高, 达到了 0.820, 其次是 RVI 与 LAI 的线性回归模型, 说明植被指数

与 LAI 间并不是简单的线性回归关系。

为了验证 FREP 的指数回归模型 $y = 6.108e^{-2.503x}$ 反演亚热带树种叶片 LAI 的精度, 采用误差系数和均方根误差(RMSE)对模型进行评定(表 3), 估算值与实测值的误差系数为 -13.082% ~ 13.367%,

其中最小值为中华锥 (*Castanopsis chinensis*, 0.884); 均方根误差为 0.00~0.44, 同时误差系数最小的树种对应的均方根误差也是最小, 均为 0.00, 而且总体 RMSE 只有 0.13, 对比 RVI 线型回归模

型 $y=0.115x+3.289$ 的精度, 总体 RMSE 为 0.46, 这进一步验证了利用高光谱特征变量 FREP 的指数回归模型估测亚热带典型树种的叶片 LAI 是合理的。

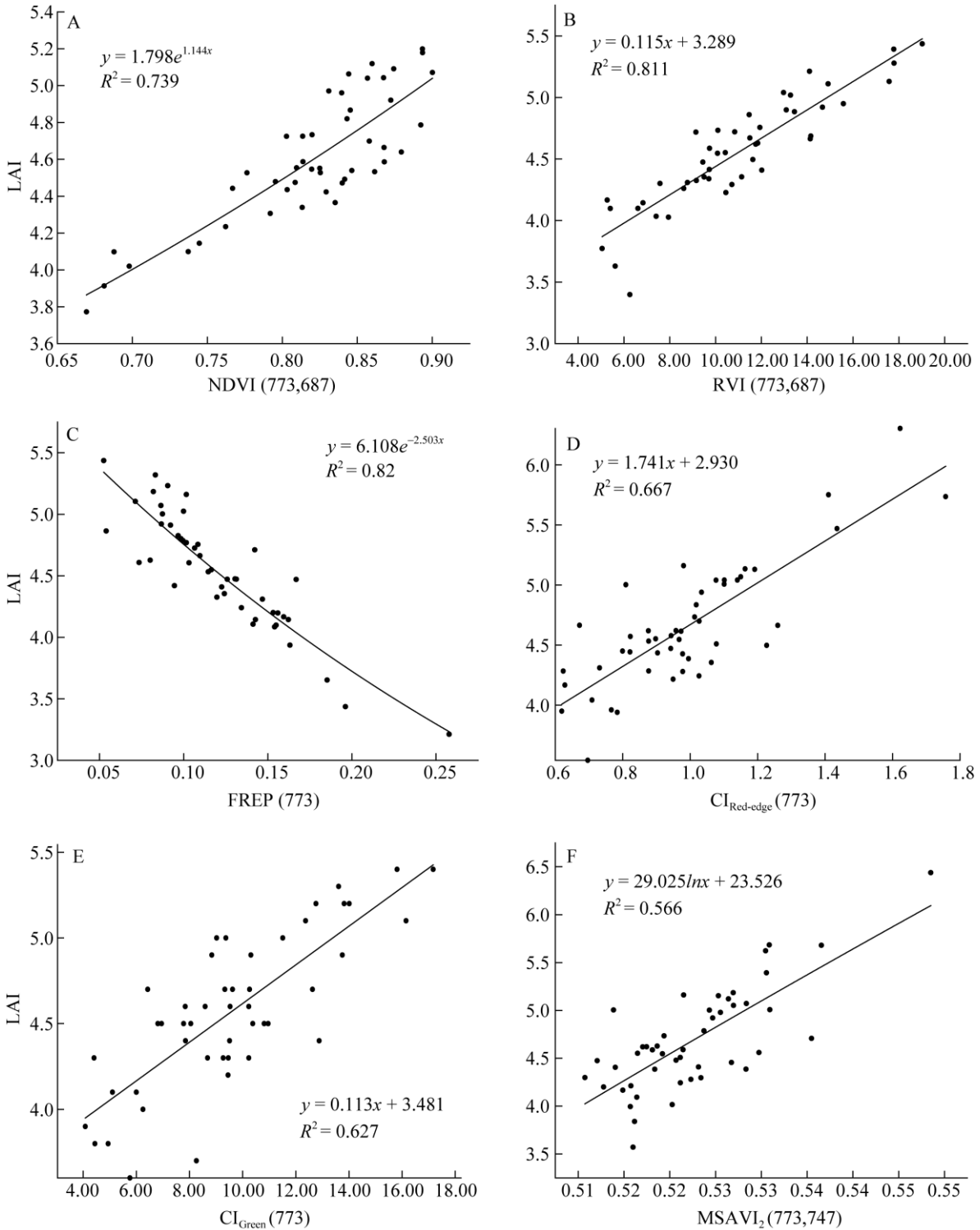


图 8 植被指数与 LAI 的回归模型

Fig. 8 Regression models between VIs and LAI of studied tree species

表 3 验证树种的回归模型检验

Table 3 Regression model test of verification tree species

验证树种 Verification tree species	实测值 Measured value	FREP 估算值 Predictive FREP value	RVI 估算值 Predictive RVI value	误差系数 1 Error coefficient 1 (%)	误差系数 2 Error coefficient 2 (%)	RMSE ₁	RMSE ₂
杉树 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	3.3	3.4	3.1	2.946	7.543	0.01	0.06
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	5.1	4.4	3.9	-13.082	24.146	0.44	1.52
荷木 <i>Schima</i> spp.	4.1	4.3	4.3	5.705	5.705	0.05	0.05
中华锥 <i>Castanopsis chinensis</i>	4.2	4.2	4.6	0.000	10.367	0.00	0.19
红椎 <i>C. hystrix</i>	3.2	3.6	3.8	13.367	19.670	0.18	0.40
红花油茶 <i>Camellia reticulata</i>	4.7	4.2	4.2	-10.871	-10.871	0.26	0.26
藜树 <i>Chenopodiaceae album</i>	4.5	4.7	4.7	4.401	4.401	0.04	0.04
灰木莲 <i>Manglietia glanca</i>	5.9	5.6	4.8	-5.084	18.646	0.09	1.21
总和 Total						0.13	0.46

3 结论和讨论

简单地用波长反射率和对应的生化成分做相关分析和预测是不够的,需要对原始波长反射率数据进行变换并建立植被指数。植被指数是由不同光谱数据特别是植物敏感波段经加减乘除等数学运算构成的对植被有一定指示意义的各种处理,可定量地表明植被特征,比用单波段信息更加丰富,探测植被更具有灵敏性^[25]。大量研究表明植被的生物物理、化学参数与光谱反射率之间的关系基本上是非线性的。因此本文探讨利用指数函数、幂函数、对数函数等非线性问题的拟合,对比线性模型,来提高植被生理参数反演的精度。

在植被遥感中,NDVI的应用最为广泛,它被定义为近红外波段与可见光红波段数值之差与这两个波段数值之和的比值,经过比值处理,可以部分消除太阳高度角、云/阴影和大气衰减等的影响,增强了对植被的响应能力。其次RVI能增强植被与土壤背景之间的辐射差异,是植被长势、丰度的灵敏的指示参数,它与叶面积指数相关性高。 CI_{Green} 也是一个很重要的高光谱植被参数,在500~600 nm 区间原始光谱会出现峰值,将在此范围内光谱反射率的峰值对应的波长作为绿峰位置,它也是描述植被色素状态和健康状况的重要指示波段。 $MSAVI_2$ 是一类削弱土壤背景对植被指数影响的植被指数,不依赖于土壤线,算法很简单,因此在叶面积指数的反演等方面的应用非常广泛^[26]。

从整体上来看,参与建模的6种高光谱特征变量与树种的叶面积指数间都具有极显著相关性,最佳的高光谱特征变量为FREP,决定系数 R^2 最大,为

0.820,对应的估算模型为 $y=6.108e^{-2.503x}$ 。6种高光谱特征变量与叶面积指数间的 R^2 依次为:FREP>RVI(R_{773},R_{687})>NDVI(R_{773},R_{687})> $CI_{Red-edge}$ ($R_{773},Red-edge$)> CI_{Green} (R_{773},R_{512})> $MSAVI_2$ (R_{773},R_{747}),说明采用这些光谱特征变量对植被LAI进行估算具有较高的可行性。

用 R^2 最高的FREP构建的函数模型拟合程度也很高,经验证均方根误差也很小。当LAI大于3.0后,NDVI对LAI估算的敏感性会降低,针对植被覆盖度高的华南地区来说,红边位置可以消除冠层结构、土壤背景等干扰因素的影响,而且REP与植被的叶面积指数密切相关,所以利用高光谱特征变量可以提高反演亚热带树木叶片的叶面积指数等植被参数的精度。

从模型的离散程度来说,除了 $MSAVI_2$ 离散程度偏高之外,其他高光谱特征变量的拟合程度还是挺不错的,虽然 $MSAVI_2$ 在一定程度上修正了NDVI对土壤背景的敏感性,但是由于土壤和植被之间的相互作用是错综复杂的,并且土壤调节系数都是通过测量和经验值确定的,所以导致该植被指数在本文研究区的反演精度并不是很理想。

本文只是选取了广东省的典型亚热带树种代表华南地区进行研究分析,之后可考虑补充更多类型的采样区进一步完善;同时,本文只是应用实测高光谱数据对叶片的叶面积指数的反演进行了分析,虽然结合了高光谱影像进行精度验证,但是无法从宏观范围上体现亚热带区域树种冠层的叶面积指数特征,在下一步研究中应考虑利用ACRM模型模拟树种的冠层叶面积指数,同时结合高光谱影像,达到图谱合一,充分发挥高光谱技术的特点和优势。

参考文献

- [1] XING Z R, FENG Y G, LI W M, et al. The research status of inversion of leaf area index with hyperspectral remote sensing [J]. *Sci Surv Map*, 2010, 35(S1): 162–164. doi: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2010.s1.088.
邢著荣, 冯幼贵, 李万明, 等. 高光谱遥感叶面积指数(LAI)反演研究现状 [J]. *测绘科学*, 2010, 35(S1): 162–164, 62. doi: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2010.s1.088.
- [2] DARVISHZADEH R, SKIDMORE A, SCHLERF M, et al. LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements [J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2008, 63(4): 409–426. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2008.01.001.
- [3] FANG X Q, ZHANG W C. The application of remotely sensed data to the estimation of the leaf area index [J]. *Remote Sens Land Resour*, 2003, 15(3): 58–62. doi: 10.6046/gtzyyg.2003.03.14.
方秀琴, 张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述 [J]. *国土资源遥感*, 2003, 15(3): 58–62. doi: 10.6046/gtzyyg.2003.03.14.
- [4] YANG F, SUN J L, FANG H L, et al. Comparison of different methods for corn LAI estimation over northeastern China [J]. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 2012, 18: 462–471. doi: 10.1016/j.jag.2011.09.004.
- [5] DONG J J, NIU Z. Inversion of leaf chlorophyll content and total nitrogen content using hyper-spectral reflectance [J]. *Remote Sens Inf*, 2008(5): 25–27. doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2008.05.006.
董晶晶, 牛铮. 高光谱反演叶片叶绿素及全氮含量 [J]. *遥感信息*, 2008(5): 25–27. doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2008.05.006.
- [6] PISEK J, CHEN J M. Comparison and validation of MODIS and VEGETATION global LAI products over four BigFoot sites in North America [J]. *Remote Sens Environ*, 2007, 109(1): 81–94. doi: 10.1016/j.rse.2006.12.004.
- [7] SOUDANI K, FRANÇOIS C, LE MAIRE G, et al. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands [J]. *Remote Sens Environ*, 2006, 102(1/2): 161–175. doi: 10.1016/j.rse.2006.02.004.
- [8] DASH J, CURRAN P J. MTCI: the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI) [J]. *Adv Space Res*, 2007, 39(1): 100–104. doi: 10.1016/j.asr.2006.02.034.
- [9] WANG X Z, HUANG J F, LI Y M, et al. The study on multi-spectral remote sensing estimation models about LAI of rice [J]. *Remote Sens Technol Appl*, 2003, 18(2): 57–65. doi: 10.3969/j.issn.1004-0323.2003.02.001.
王秀珍, 黄敬峰, 李云梅, 等. 水稻叶面积指数的多光谱遥感估算模型研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(2): 57–65. doi: 10.3969/j.issn.1004-0323.2003.02.001.
- [10] WU C Y, NIU Z, TANG Q, et al. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation [J]. *Agric For Meteorol*, 2008, 148(8/9): 1230–1241. doi: 10.1016/j.agrformet.2008.03.005.
- [11] LIU Y Q, SHA J M, YU T, et al. Comparing the performance of broad-band and narrow-band vegetation indices for estimation of grass LAI [J]. *Remote Sens Technol Appl*, 2014, 29(4): 587–593. doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2014.4.0587.
刘玉琴, 沙晋明, 余涛, 等. 基于宽波段和窄波段植被指数的草地 LAI 反演对比研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(4): 587–593. doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2014.4.0587.
- [12] CHEN Y Z, LIN Q H, HUA Y G, et al. The analysis of hyperspectral characteristics of rubber leaves [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2010, 18(3): 293–297. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.03.014.
陈贻钊, 林清火, 华元刚, 等. 橡胶树叶片高光谱特征分析 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2010, 18(3): 293–297. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.03.014.
- [13] LE Y. Estimation of key vegetation parameters base on hyperspectral remote sensing data [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014: 13
乐源. 基于光谱数据的植被重点参数反演方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014: 13.
- [14] FERET J, FRANÇOIS C, ASNER G P, et al. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments [J]. *Remote Sens Environ*, 2008, 112(6): 3030–3043. doi: 10.1016/j.rse.2008.02.012.
- [15] ZHANG Y. Hyperspectral quantitative remote sensing inversion model and regime of multiple pigments at leaf scale based on PROSPECT-PLUS model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
张垚. 基于 PROSPECT-PLUS 模型植物叶片多种色素高光谱定量遥感反演模型与机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [16] THENKABAIL P S, SMITH R B, de PAUW E. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics [J]. *Remote Sens Environ*, 2000, 71(2): 158–182. doi: 10.1016/S0034-4257(99)00067-X.
- [17] ZHANG X H, CHANG Q R, ZHANG M, et al. Hyperspectral vegetation index monitoring of chlorophyll content of different corn growth stage in northwest China [J]. *J China Agric Univ*, 2015, 20(4): 75–81. doi: 10.11841/j.issn.1007-4333.2015.04.10.
张晓华, 常庆瑞, 章曼, 等. 基于高光谱植被指数的西北玉米不同时期叶绿素含量估测 [J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(4): 75–81. doi: 10.11841/j.issn.1007-4333.2015.04.10.
- [18] HORLER D N H, DOCKRAY M, BARBER J, et al. Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content [J]. *Adv Space*

- Res, 1983, 3(2): 273–277. doi: 10.1016/0273-1177(83)90130-8.
- [19] SAMPSON P H, ZARCO-TEJADA P J, MOHAMMED G H, et al. Hyperspectral remote sensing of forest condition: Estimation of chlorophyll content in tolerant hardwoods [J]. For Sci, 2003, 49(3): 381–391.
- [20] DU H Q, GE H L, FAN W Y, et al. Study on relationships between total chlorophyll with hyperspectral features for leaves of *Pinus massoniana* forest [J]. Spectrosc Spect Anal, 2009, 29(11): 3033–3037. doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)11-3033-05.
- 杜华强, 葛宏立, 范文义, 等. 马尾松针叶光谱特征与其叶绿素含量间关系研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(11): 3033–3037. doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)11-3033-05.
- [21] SONG X D, JIANG H, YU S Q, et al. Relationship between chlorophyll concentrations and spectral reflectance feature of the typical evergreen hardwood species in subtropical region of China [J]. Acta Ecol Sin, 2008, 28(5): 1959–1963. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.05.009.
- 宋晓东, 江洪, 余树全, 等. 亚热带典型常绿阔叶树种叶片叶绿素含量与其高光谱特征间的关系 [J]. 生态学报, 2008, 28(5): 1959–1963. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.05.009.
- [22] GITELSON A A, VIÑA A, CIGANDA V, et al. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops [J]. Geophys Res Lett, 2005, 32(8): L08403. doi: 10.1029/2005GL022688.
- [23] ZHAO J W, WANG K L, OUYANG Q, et al. Measurement of chlorophyll content and distribution in tea plant's leaf using hyperspectral imaging technique [J]. Spectrosc Spect Anal, 2011, 31(2): 512–515. doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)02-0512-04.
- 赵杰文, 王开亮, 欧阳琴, 等. 高光谱技术分析茶树叶片中叶绿素含量及分布 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(2): 512–515. doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)02-0512-04.
- [24] XIE Q Y, HUANG W J, LIANG D, et al. Leaf area index estimation using vegetation indices derived from airborne hyperspectral images in winter wheat [J]. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens, 2014, 7(8): 3586–3594. doi: 10.1109/JSTARS.2014.2342291.
- [25] LI F X, ZHANG B, SONG K S, et al. Research and analysis of the correlation between hyperspectral vegetation index and leaf area index [J]. Remote Sens Technol Appl, 2007, 22(5): 586–592. doi: 10.3969/j.issn.1004-0323.2007.05.002.
- 李凤秀, 张柏, 宋开山, 等. 玉米叶面积指数与高光谱植被指数关系研究 [J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(5): 586–592. doi: 10.3969/j.issn.1004-0323.2007.05.002.
- [26] HUANG C Y, LIU S L, WANG D W, et al. Models for estimating soybean leaf area index using hyperspectral data [J]. Soy Sci, 2008, 27(2): 228–232. doi: 10.11861/j.issn.1000-9841.2008.02.0228.
- 黄春燕, 刘胜利, 王登伟, 等. 大豆叶面积指数的高光谱估算模型研究 [J]. 大豆科学, 2008, 27(2): 228–232. doi: 10.11861/j.issn.1000-9841.2008.02.0228.
- [27] ZOU H Y, DING L X. Determination of the position of the red edge in accordance with the SPAD value [J]. Remote Sens Inf, 2013, 28(4): 3–7. doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2013.04.001.
- 邹红玉, 丁丽霞. 基于 SPAD 值的植被“红边位置”确定方法探讨 [J]. 遥感信息, 2013, 28(4): 3–7. doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2013.04.001.