

顾哲衍, 张金池, 林杰, 等. 大气校正模型对阔叶林叶面积指数遥感估算的影响[J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(3): 100-104.

# 大气校正模型对阔叶林叶面积指数遥感估算的影响

顾哲衍, 张金池, 林杰, 韩诚, 刘鑫  
(南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏南京 210037)

**摘要:**【目的】为利用遥感技术定量提取区域尺度的阔叶林叶面积指数前的大气校正模型选择提供科学依据.【方法】分别利用 6S 模型、FLAASH 模型和 ATCOR2 模型对 Landsat 8 OLI 影像进行了大气校正, 分析了 3 种模型下的阔叶林叶面积指数(LAI)与多种植被指数(VI)相关性, 建立了 LAI-VI 的线性和非线性的回归模型, 最后通过验证数据组 LAI 预测值(Y)与 LAI 实测值(X)的均方根误差(RMSE)及线性相关性大小对阔叶林 LAI 遥感估算结果进行了精度对比.【结果和结论】ATCOR2 模型不适于阔叶林 LAI-VI 的回归建模; 除比值植被指数(RVI)外, FLAASH 模型与 6S 模型下的阔叶林 LAI 与增强型植被指数(EVI)、修正土壤调节植被指数(MSAVI)有较好的相关性, 其中 FLAASH 模型下的阔叶林 LAI-MSAVI 幂函数模型拟合优度最佳; FLAASH 模型的阔叶林 LAI 估算精度优于 6S 模型; 借助遥感技术定量提取植被生理参数时, 应慎重选择适宜的大气校正模型.

**关键词:** 遥感; 叶面积指数; 大气校正

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2014)03-0100-05

## Effects of atmospheric correction on remote sensing estimation of LAI of broadleaved forest

GU Zheyang, ZHANG Jinchi, LIN Jie, HAN Cheng, LIU Xin

(College of Forest and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:**【Objective】This study aimed to provide a scientific basis for selecting the atmospheric correction model prior to the quantitative extraction of leaf area index of broadleaved forest at a regional scale using remote sensing.【Method】6S model, FLAASH model, and ATCOR2 model were used respectively on Landsat 8 OLI image for the atmospheric correction to analyze the correlation of these three kinds of leaf area index (LAI) of broadleaved forest and a variety of vegetation index (VI), establishing the linear and nonlinear regression model of LAI-VI. The root mean square error and correlation of validation data set of LAI predicted value (Y) and the LAI measured values (X) were calculated.【Result and conclusion】The ATCOR2 model was not suitable for building broadleaved forest LAI-VI regression model; in addition to the RVI, for FLAASH model and 6S model, LAI of broadleaved forest had a good correlation with EVI, MSAVI. Among them the power function model of LAI-MSAVI with FLAASH model yield the best goodness of fit. LAI estimation precision of FLAASH model was superior to the 6S model for broadleaved forest. With the aid of remote sensing technology to quantitatively extract vegetation physiological parameters, suitable atmospheric correction model should be selected prudently.

收稿日期: 2013-01-12 优先出版时间: 2014-03-31

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.7671/j.issn.1001-411X.2014.03.018.html>

作者简介: 顾哲衍(1990—), 男, 硕士研究生, E-mail: ah\_gzy@163.com; 通信作者: 张金池(1965—), 男, 教授, 博士, E-mail: nj\_zjc@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(31200534); 长三角水源区面源污染林业生态修复技术研究(201104055-1); 江苏省 2009 年度研究生科研创新计划项目; 南京林业大学高学历人才基金项目; 江苏省高等学校林学优势学科建设项目(164010641)

**Key words:** remote sensing; leaf area index; atmospheric correction

叶面积指数(Leaf area index, LAI)是定量分析地球生态系统能量交换特性的一个重要结构变量<sup>[1]</sup>,不仅是表征植物冠层结构和植物群落生产力的基本指标,亦与众多生态过程(蒸腾、光合、呼吸、元素循环等)密切相关,直接影响植物对光能的截获和利用,间接影响冠层阻抗,同时作为决定地表反射率的重要参数对地表和大气间的相互作用有着重要影响<sup>[2]</sup>.地面测量只能获得点状或线状的 LAI 数据,难以反映 LAI 的空间变异性,定量遥感技术作为反演陆面参数的一种重要方法,为实时获取大范围 LAI 提供了高效途径<sup>[3-4]</sup>.

电磁波在太阳-目标物-卫星之间的传输过程极其复杂,不仅与光照条件、传感器的探测光谱响应、地表起伏等有关,更受到吸收、散射等大气作用的影响,必然导致辐射传输失真,严重降低 LAI 的反演精度.因而在定量反演 LAI 前,必须进行大气校正.大气校正模型可分为3类:基于辐射传输机理的校正模型(如6S模型、ATCOR2模型)、基于影像特征的校正模型(如表观反射率模型、Gilbert模型等)和基于地面定标参数的校正模型<sup>[5]</sup>.其中,基于辐射传输机理的校正模型物理意义最明确、精度最高,应为大气校正未来的发展趋势<sup>[6-7]</sup>.不同的大气校正模型获得的植被反射光谱信号不同,故选择适宜的大气校正模型对 LAI 的遥感反演具有重要意义<sup>[8]</sup>.目前,对于大气校正模型的研究或集中于模型自身算法<sup>[9-11]</sup>,或集中于模型算法间的横向比较<sup>[12-13]</sup>,而对于不同大气校正模型在具体某一陆面参数反演中的适用性研究却鲜有报道.

鉴于此,本文选取基于辐射传输机理的校正模型中具有代表性的6S模型、FLAASH模型和ATCOR2模型分别对OLI(Operational land imager)影像进行大气校正,建立LAI与阔叶林植被指数(Vegetation Index, VI)的统计回归模型,探究3种大气校正模型对阔叶林 LAI 遥感反演精度的影响,旨在为大面积反演阔叶林 LAI 前的大气校正模型选择提供借鉴和参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地区概况

江宁区位于江苏省南京市南部,介于东经118°31′~119°04′,北纬30°38′~32°13′之间,总面积

1 500 多 km<sup>2</sup>. 常态地貌有低山、丘陵、岗地、平原和盆地,海拔1~371 m,境内河道主要有长江和秦淮河两大水系.气候属北亚热带季风湿润气候区,年平均气温15.5℃,年均无霜期224 d,年均降水量1 012 mm,年均日照2 148.3 h.全区有木本及药用植物1 000余种,较珍贵的有银杏 *Ginkgo biloba*、雪松 *Cedrus deodara*、明党参 *Changium smyrnioides*、夏枯草 *Prunella vulgaris* 等.

### 1.2 数据来源及预处理

研究数据由 Landsat 8 OLI 多光谱影像数据和阔叶林 LAI 野外实测数据组成. OLI 数据由美国地质勘探局(USGS)提供,轨道号 Path 120/Row 38,成像日期2013年8月13日,探测波普长度为0.433~1.390 μm,已经过系统级的辐射和几何纠正. OLI 涵盖 Landsat 7 ETM+ 的所有波段,为了避免大气吸收特征,OLI 对波段进行了重新调整,比较大的调整是 OLI Band 5(0.845~0.885 μm),排除了0.825 μm 处水汽吸收特征;OLI 全色波段 Band 8 波段宽度较窄,有利于更好地区分地表有植被和无植被特征.以江宁区1:5万地形图为标准底图,采用二次多项式拟合法,对 OLI 影像进行了几何精纠正,误差控制在0.5个像元内.阔叶林 LAI 野外实测数据由美国 LICOR 公司的 LAI-2200 冠层分析仪测得,时间为2013年8月下旬至9月初,样点数48个,其中8月下旬34个,9月初14个,主要分布在铜山、将军山、方山等地.研究区内分布广面积大的为毛竹 *Phyllostachys heterocycla* 纯林、麻栎 *Quercus acutissima* 纯林和阔叶混交林,为采样重点林分,样点数较多,分别为19、7和11个,其他林分如黄果朴 *Celiis labilis* 纯林、香樟 *Cinnamomum camphora* 纯林、构树 *Broussonetia papyrifera* 纯林以及广玉兰 *Magnolia grandiflora* 和三角枫 *Acer buergerianum* 等面积相对较小, LAI 梯度明显,各林分设置1~4个典型样点,为表述简洁,本文将此类纯林统称为其他林分.考虑到 OLI 影像30 m的空间分辨率,采样间距均大于30 m,每个样点均由 GARMIN 手持 GPS 接收机定位,坐标系为 WGS-84.各样点重复测量2次,取均值作为结果.

### 1.3 基于辐射传输机理的大气校正模型

1.3.1 6S(Second simulation of satellite signal in the solar spectrum)模型 6S模型将气体分子(水汽、CO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>等)的吸收、散射与气溶胶的散射一并予以

考虑,采用最新近似(State of the art)和连续散射 SOS (Successive orders of scattering)算法来求解辐射传输方程,提高了对瑞利散射和气溶胶散射的计算精度.在处理不均一目标时,考虑了一定半径之内的地物反射及该范围之外的背景干扰.同时,解决了地表双向反射分布函数(BDRF)与大气环境相互耦合的问题<sup>[14-15]</sup>.其基本计算公式为:

$$\rho = \frac{\rho_T(\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v) - T_g(\theta_s, \theta_v)\rho_{R+a}}{T_g(\theta_s, \theta_v)T(\theta_s)T(\theta_v) + S[\rho_T(\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v) - T_g(\theta_s, \theta_v)\rho_{R+a}]}, \quad (1)$$

式(1)中: $\rho$ 为地表反射率, $\rho_T(\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v)$ 为大气上界反射率, $T_g(\theta_s, \theta_v)$ 为太阳-目标物大气路径透过率, $\rho_{R+a}$ 为气体分子散射和气溶胶散射所构成的路径辐射反射率, $T(\theta_s)$ 为大气透过率, $T(\theta_v)$ 为传感器-目标物大气路径透过率, $\theta_s$ 为太阳天顶角, $\theta_v$ 为传感器天顶角, $\phi_s$ 为太阳方位角, $\phi_v$ 为传感器方位角, $S$ 为大气半球反射率.

1.3.2 FLAASH(Fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes)模型 FLAASH 实际是 MODTRAN4 + 辐射传输模型的一种改进型,适用于可见光、近红外到短波红外范围内的光谱,为反演高光谱影像反射率的首选模型,能有效消除大部分大气和光照等因素对地物反射的影响,获得较为准确的地物反射率、地表温度等真实物理参数<sup>[16]</sup>,对太阳光谱范围的限制和近似标准的朗伯体平面的假设是该算法的核心部分<sup>[17]</sup>.其基本计算公式为:

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S_f}\right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S_f}\right) + L_a, \quad (2)$$

式(2)中: $L$ 为传感器处单个像元的总辐射, $\rho$ 为像元地表反射率, $\rho_e$ 为该像元和其周边区域的平均地表反射率, $S_f$ 为大气向下的反照率, $L_a$ 为大气程辐射, $A, B$ 是基于大气透过率和几何条件的系数.

1.3.3 ATCOR2(A spatially adaptive fast atmosphere correction-2)模型 ATCOR2 是一种针对太阳光谱和热光谱范围的快速大气纠正模型,对于大气均匀分布的雾霾和其他气体都具有独特的效果.大气状况通过一个查证表来描述.其算法可分为3步,①忽略邻近效应计算地表反射率;②计算每个像元邻近范围内的平均反射率,邻近效应的去除由一个 $N \times N$ 的低通滤波器来实现, $N$ 值大小取决于大气参数、光谱波段等;③在计算背景反射率( $\rho_r$ )为0.15时,包含球形反射率对全球通量(碳通量,热通量等)的影响,模型的最后一步通过平均反射率( $\bar{\rho}$ )与 $\rho_r$ 的差值对其进行了校正<sup>[18]</sup>.其第①和②步的计算公式为:

$$\rho^{(1)} = \frac{\pi[d^2(c_0 + c_1 D_N) - L_\alpha]}{\tau_v E_g(\rho_r)}, \quad (3)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j=1}^N \rho_{i,j}^{(1)}, \quad (4)$$

式(3)中: $\rho^{(1)}$ 为地表反射率; $d$ 为日地距离; $c_0$ 为传感器辐射响应度; $c_1$ 为传感器偏移值; $L_\alpha$ 为大气程辐射; $D_N$ 为影像灰度值; $\tau_v$ 为地表到传感器的总透过率; $E_g$ 为地面辐照度.式(4)中: $\bar{\rho}$ 为像元邻近范围平均反射率; $N$ 为低通滤波器大小; $\rho_{i,j}^{(1)}$ 为像元( $i, j$ )的地表反射率; $n$ 为影像像元总数.

#### 1.4 基于统计模型的 LAI 遥感反演

基于统计模型的 LAI 遥感反演法具有参数少、计算效率高、容易实现等优点,常被用于提取中小区域尺度的 LAI,而植被指数与 LAI 之间的密切关系则是这一方法的理论基础<sup>[19]</sup>.植被指数种类较多,本文在参考前人工作的基础上<sup>[3,15,19]</sup>,考虑土壤、大气背景对 LAI 反演的影响,选取比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)和修正土壤调节植被指数(MSAVI)与实测 LAI 建立统计回归模型.4类植被指数提取公式如下<sup>[15]</sup>:

$$RVI = \frac{\rho_{nir}}{\rho_{red}}, \quad (5)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}, \quad (6)$$

$$EVI = 2.5 \left( \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 6\rho_{red} - 7.5\rho_{blue} + 1} \right), \quad (7)$$

$$MSAVI = \frac{2\rho_{nir} + 1 - \sqrt{(2\rho_{nir} + 1)^2 - 8(\rho_{nir} - \rho_{red})}}{2}, \quad (8)$$

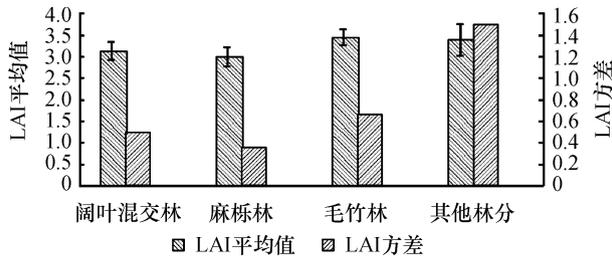
公式(5)~(8)中, $\rho_{nir}$ 、 $\rho_{red}$ 和 $\rho_{blue}$ 分别为大气校正后的近红外、红光和蓝光地表反射率.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林分类型的 LAI 统计特征分析

LAI 定量描述了植物群体空间水平上叶子生长状况(数量、密度等)的变化,不同阔叶林类型的 LAI 有一定差异.由图1可以看出,毛竹林的 LAI 平均值最大,其方差亦高于麻栎林和阔叶混交林.毛竹生长快,成材早,是典型的速生树种,林分易形成水平和垂直郁闭, LAI 均值偏大,研究区内的毛竹均为人工林,间伐抚育等人为干扰作用强烈, LAI 波动较强,因而其方差亦较大.阔叶混交林多为天然林,麻栎林主要分布在山顶,二者受外界干扰作用较少, LAI 梯度变化不明显.其他林分数据组包含的树种多, LAI 梯

度变化明显,方差大,且树种多为高大乔木,如黄果朴、香樟等,复层枝叶比重大,叶片总量多,LAI平均值亦大。



图中其他林分包括:黄果朴、香樟、构树、广玉兰、三角枫。

图1 不同林分类型的 LAI 平均值和方差

Fig.1 Mean value and variance of vegetation indices by forest types

### 2.2 LAI-VI 统计回归模型的建立与相关性分析

LAI 与 VI 之间的相关性分析是确定能否应用遥感技术进行大区域叶面积指数反演的前提. 本文选取与 OLI 影像成像日期较为接近的 8 月下旬实测的 34 个样本点作为 LAI-VI 建模数据组,以 9 月初实测的 14 个样本点作为模型验证数据组,并分别与 LAI 进行 Pearson 相关性分析(表 1). 显然,2 种统计方式下的 6S 与 FLAASH 模型的 LAI-VI 相关性远高于 ATCOR2 模型. ATCOR2 是二维的大气校正模型,计算简单,通常要求大气均匀分布,在去除大气影响时,做了较多的影像增强处理,导致影像的真实性减弱,只适合在小尺度局部区域应用. 混合像元和邻近像元等因素会严重影响其校正精度,其算法中的一般近邻效应的有效范围约 500 ~ 1 000 m,但若相邻区反射率有很大差异时,近邻效应的影响范围可扩大至 2 000 m 以上<sup>[20]</sup>. 2 种统计方式下的 FLAASH 模型和 6S 模型的 LAI-VI 相关性普遍通过 0.05 置信水

平检验. 建模数据组中, LAI-RVI 相关性最低, LAI-EVI 与 LAI-MSAVI 的相关性均通过 0.01 置信水平检验,达到了极显著水平,都可作为建模首选植被指数. LAI-NDVI 相关性高于 LAI-RVI,但尚未达到极显著水平. 同时注意到,虽然 FLAASH 模型的 LAI-VI 相关性略优于 6S 模型,但已非常接近,因而仍需对这 2 种大气校正模型下的 LAI 反演结果进行进一步的精度验证. 鉴于上述,本文仅对 FLAASH 模型与 6S 模型下的 LAI-EVI/LAI-MSAVI 进行建模与验证.

表 1 3 种模型在 2 种统计方式下所得 Pearson 相关系数比较<sup>1)</sup>  
Tab.1 Pearson correlation coefficients comparison using two statistical methods under three models

植被指数	建模数据组			验证数据组		
	6S	FLAASH	ATCOR2	6S	FLAASH	ATCOR2
EVI	0.550 **	0.570 **	0.298	0.541 *	0.629 **	0.090
MSAVI	0.610 **	0.633 **	0.317	0.487 *	0.705 **	0.136
NDVI	0.411 *	0.412 *	0.296	0.561 *	0.768 **	0.110
RVI	0.375 *	0.337	0.237	0.566 *	0.737 **	-0.039

1) “\*\*”表示 0.01 水平显著相关,“\*”表示 0.05 水平显著相关。

### 2.3 LAI-VI 统计回归模型的建立及精度验证

2.3.1 LAI-VI 统计回归模型的建立 利用建模数据组数据建立基于像元尺度的 LAI-VI 回归模型,如:线性回归模型、指数模型、二次多项式模型等,找出最合理的回归模型,回归模型见表 2. 2 种大气校正模型下, LAI-VI 回归方程的显著性水平(P)均小于 0.05,即具有统计学意义,回归方程均是成立的。

由表 2 可知:①从植被指数角度看,2 种大气校正模型下的 LAI-MSAVI 回归模型的拟合优度 R<sup>2</sup> 值总体高于 LAI-EVI. 研究区植被分布不均,种类繁多,

表 2 2 种大气校正模型下的叶面积估算模型

Tab.2 LAI estimation model under two atmospheric correction models

植被指数	6S 模型			FLAASH 模型		
	回归模型 <sup>1)</sup>	R <sup>2</sup>	P	回归模型 <sup>1)</sup>	R <sup>2</sup>	P
EVI	$Y = 9.18X - 1.3$	0.302	0.001	$Y = 7.637X - 0.411$	0.324	0.000
	$Y = 4.841\ln X + 6.658$	0.306	0.001	$Y = 3.943\ln X + 6.164$	0.330	0.000
	$Y = -16.13X^2 + 26.23X - 5.769$	0.305	0.004	$Y = -8.471X^2 + 16.44X - 2.673$	0.327	0.002
	$Y = 9.2X^{1.527}$	0.328	0.000	$Y = 7.905X^{1.25}$	0.357	0.000
	$Y = 0.756e^{2.873X}$	0.318	0.001	$Y = 0.997e^{2.392X}$	0.343	0.000
MSAVI	$Y = 13.37X - 1.933$	0.372	0.000	$Y = 9.648X - 1.021$	0.400	0.000
	$Y = 5.459\ln X + 8.44$	0.384	0.000	$Y = 4.484\ln X + 6.928$	0.411	0.000
	$Y = -115.6X^2 + 106.9X - 20.7$	0.416	0.000	$Y = -31.24X^2 + 38.69X - 7.68$	0.417	0.000
	$Y = 16.76X^{1.765}$	0.432	0.000	$Y = 10.3X^{1.453}$	0.465	0.000
	$Y = 0.589e^{4.308X}$	0.415	0.000	$Y = 0.793e^{3.1X}$	0.445	0.000

1) X 代表植被指数, Y 代表叶面积指数模拟值。

在 OLI 影像 30 m 的分辨率下,必然产生大量植被 - 土壤混合像元. MSAVI 是土壤调节植被指数(SAVI)的改进型,建立了简单的植被 - 土壤系统模型,相比 SAVI 而言,更加充分地考虑了土壤因素的变动. ②从大气校正模型角度看,FLAASH 模型下的 LAI-VI 的  $R^2$  值整体高于 6S 模型. FLAASH 模型通过计算影像上的黑暗像元来反演气溶胶厚度,6S 模型则是对各像元逐一求算,范文义等<sup>[7]</sup>认为对于 ETM + 传感器而言,FLAASH 模型在还原植被真实波普信息时有所欠缺,但 6S 模型对于 OLI 影像光谱范围内的滤光函数难以界定,采用光谱上下限近似求解,在很大程度上影响了 6S 模型对 OLI 影像的校正精度. 注意到,2 种模型下,拟合优度最高的均是 LAI-MSAVI 幂函数方程(6S 模型  $R^2 = 0.432$ , FLAASH 模型  $R^2 = 0.465$ ). 6S 模型与 FLAASH 模型都遵循辐射传输机理,辐射传输方程定量考虑了地形、地球曲率、大气密度、气压等对光辐射的影响,模型参变量具有部分共性,且研究区大气模式相对固定,因而 2 种模型下 LAI-VI 总体呈相似趋势.

2.3.2 精度验证 鉴于回归模型的拟合优度  $R^2$  值为参与建模数据内部的拟合优度检验值,为了能够更客观地评价各模型下的 LAI 反演精度,本文利用未参与建模的验证数据组带入 2 种大气校正模型下最理想的 LAI-MSAVI 幂函数模型,并计算 LAI 实测值和预测值的均方根误差(RMSE)及线性相关性大小( $R^2$ ),以内外结合的方式来交叉检验反演精度. RMSE 计算公式如式(9)所示,其值大小仅表示预测值接近真实值的程度,值愈小则表示预测效果愈好.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{n}}, \quad (9)$$

式中: $Y_i$  为 LAI 实测值; $\bar{Y}_i$  为 LAI 模拟值, $n$  为验证数据组样本自由度.

由表 3 可知,2 种大气模型下的 LAI 实测值与 LAI 预测值的线性相关性  $R^2$  值均较高, RMSE 相近,说明二者皆可用于 LAI 反演. FLAASH 模型下的  $R^2$  值大于 6S 模型, RMSE 小于 6S 模型,基于 OLI 影像的 FLAASH 模型反演 LAI 精度略高于 FLAASH 模型.

表 3 不同大气校正模型下的 RMSE 和  $R^2$  值比较

Tab. 3 Comparison of RMSE and  $R^2$  under two atmospheric correction models

校正模型	RMSE	$R^2$
FLAASH	1.35	0.83
6S	1.38	0.71

### 3 讨论与结论

本文利用 LAI 与植被指数之间的相关关系,分析比较了基于辐射传输机理的 3 种大气校正模型(6S、FLAASH 和 ATCOR2)对阔叶林 LAI 反演精度的影响. ATCOR2 模型对大气状况具有理想化的假设,要求大气均匀分布,校正运算时,对影像进行多次的增强和拉伸,校正后的影像存在较严重的辐射失真现象,导致 LAI 与植被指数的相关性过低,难以用于 LAI 遥感定量估算. 王建等<sup>[20]</sup>详细解析了 ATCOR2 模型算法,认为其着重于改善影像目视质量,适合在小尺度局部区域的遥感影像中应用,而在较为精确的定量遥感应用中,则需考虑应用数字地形模型(Digital terrain model, DEM)对图像进行预处理,以消除地形对地表反射特性的影响,这与本文的分析结果是一致的. FLAASH 模型与 6S 模型下,除 RVI 外, LAI-VI 回归模型相关性整体良好. 虽然 6S 模型较 FLAASH 模型而言,在计算气溶胶效应时更为准确,但对于 OLI 影像的光谱滤光函数没有精确的界定,校正后的影像植被指数与 LAI 相关性不如 FLAASH 模型.

本研究区域属城乡结合地区,建设用地和耕地居多,林地覆盖度不高,地表红光反射作用较强, RVI 对 LAI 的敏感性降低. MSAVI 综合考虑了植被 - 大气和土壤 - 大气的交互作用,因而 2 种大气校正模型下的 LAI-MSAVI 幂函数拟合优度最佳,适于研究区的 LAI 反演.

经过对 FLAASH 模型和 6S 模型的 LAI-MSAVI 幂函数模型的反演结果的 RMSE 和线性相关性的比较, FLAASH 模型更适于大面积的 LAI 遥感估算. 由于研究区域地形不复杂,因此在运用 FLAASH 模型与 6S 模型时,本文视地表为均一的朗伯面,未考虑地表双向反射效应,这在某种程度上影响了 LAI 遥感估算精度. 今后工作中,应运用地表双向反射效应对大气校正结果进行订正,从而提高 LAI 的估算精度.

#### 参考文献:

- [1] 李开丽,蒋建军,茅荣正,等. 植被叶面积指数遥感监测模型[J]. 生态学报,2005,25(6):1491-1496.
- [2] 邵璞,曾晓东. CLM3.0-DGVM 中植物叶面积指数与气候因子的时空关系[J]. 生态学报,2011,31(16):4725-4731.
- [3] 林文鹏,赵敏,张翼飞,等. 基于 SPOT 5 遥感影像的城市森林叶面积指数反演[J]. 测绘科学,2008,33(2):57-59.

(下转第 110 页)

## 参考文献:

- [1] ODOURI M F, GUPTA C P. Design of the revolving knife: Type sugarcane basecutter[J]. ASABE, 1992, 35(6):1747-1752.
- [2] KROES S, HARRIS H D. A kinematic model of dual basecutter of a sugar cane harvester[J]. J Agr Eng Res, 1995(62):163-172.
- [3] 肖辉齐. 甘蔗收割机切割器主要参数的确定[J]. 农机情报资料, 1979(8):25-28.
- [4] 刘庆庭. 甘蔗切割机理[D]. 广州:华南农业大学, 2004:6.
- [5] 周仕城, 杨望, 杨坚, 等. 一刀切断甘蔗动力学仿真试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1):68-73.
- [6] 张正中, 梁式, 吕焕培, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的甘蔗切割动力学仿真分析[J]. 农机化研究, 2010, 32(1):64-67.
- [7] SUNDERMEYER J N, WEAVER R L. On crack identification and characterization in a beam by non-linear vibration analysis[J]. J Sound Vib, 1995, 183(5):857-871.
- [8] 陈真勇. 转子系统故障辨识理论、方法和实验研究[D]. 北京:清华大学, 2003.
- [9] 朱厚军. 裂纹轴刚度模型及裂纹转子动力特性的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2002.
- [10] DIMAROGONAS A D. Vibration of cracked structures: A state of the art review[J]. Eng Fract Mech, 1996, 55(5):831-875.
- [11] DARPE A K. Coupled vibrations of a rotor with slant crack[J]. J Sound Vib, 2007, 305:172-193.
- [12] 林言丽. 斜裂纹转子系统的动力学特性[D]. 北京:清华大学, 2009.
- [13] 张文著. 转子动力学理论基础[M]. 北京:科学出版社, 1990:12.
- [14] 褚武扬. 断裂力学基础[M]. 北京:科学出版社, 1979:10.
- [15] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2004:1.
- [16] 林言丽, 褚福磊, 郝如江. 开斜裂纹转子的动力特性[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1):25-29.
- [17] 张正松, 傅尚新, 冯冠平, 等. 旋转机械振动监测及故障诊断[M]. 北京:机械工业出版社, 1991:351-352.

【责任编辑 霍欢】

(上接第104页)

- [4] CHEN J M, PAVLIC G, BROWN L, et al. Derivation and validation of Canada wide coarse resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements[J]. Remote Sens Environ, 2001(80):11-20.
- [5] 陈新芳, 陈镜明, 安树青, 等. 不同大气校正方法对森林叶面积指数遥感估算影响的比较[J]. 生态学杂志, 2006, 25(7):769-773.
- [6] 王钊. 6S 辐射模型算法解析及在 MODIS 大气校正中的应用[J]. 陕西气象, 2006(5):34-37.
- [7] 范文义, 孙晓芳, 王岩, 等. 基于两种辐射传输模型的遥感数据大气校正及结果对比分析[J]. 东北林业大学学报, 2009, 34(7):121-124.
- [8] 宋巍巍, 管东生. 五种 TM 影像大气校正模型在植被遥感中的应用[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4):769-774.
- [9] 郑伟, 曾志远. 遥感图像大气校正的黑暗像元法[J]. 国土资源遥感, 2005(1):8-11.
- [10] CHEN Jun, QUAN Wenting, ZHANG Minwei, et al. A simple atmospheric correction algorithm for modis in shallow turbid waters: A case study in Taihu Lake[J]. Sel Top Appl Earth Observ Remote Sens, 2013, 6(4):1825-1833.
- [11] REMMEL T K, MITCHELL S W. The importance of accurate visibility parameterization during atmospheric correction: impact on boreal forest classification[J]. Int J Remote Sens, 2013, 34(14):5213-5227.
- [12] 张婷婷, 林文鹏, 陈家治, 等. 基于 FLAASH 和 6S 模型
- 的 Spot 5 大气校正比较研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(11):1471-1473.
- [13] 杨杭, 张霞, 帅通, 等. OMIS-II 图像大气校正之 FLAASH 法与经验线性法的比较[J]. 测绘通报, 2010(8):4-6.
- [14] 买买提依明·买买提, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提沙吾提, 等. 基于 6S 模型的遥感数据大气校正应用研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3):15-18.
- [15] 林杰. 基于植被结构特征的土壤侵蚀遥感定量反演[D]. 南京:南京林业大学, 2011.
- [16] 赵国祥, 苗放. 高光谱影像 FLAASH 大气校正模型参数影响与评价——以西藏山南为例[J]. 科技资讯, 2012(34):6-7.
- [17] 郭云开, 曾繁. 基于 FLAASH 与 QUAC 模型的 SPOT 5 影像大气校正比较[J]. 测绘通报, 2012(11):21-23, 41.
- [18] 程亮, 马友华, 黄艳艳, 等. ENVI FLAASH 和 ERDAS ATCOR2 的大气校正对比研究[J]. 农业网络信息, 2011(12):17-20.
- [19] 朱高龙, 居为民, 范文义, 等. 帽儿山地区森林冠层叶面积指数的地面观测与遥感反演[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8):2117-2124.
- [20] 王建, 潘竟虎, 王丽红. 基于遥感卫星图像的 ATCOR2 快速大气校正模型及应用[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(4):193-197.

【责任编辑 李晓卉】