

地形校正对叶面积指数遥感估算的影响

廖钰冰^①, 陈新芳^①, 陈喜^①, 张丹荣^①, 关保华^②, 周峰^③

(^① 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

^② 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;

^③ 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093)

摘要:利用经过 6S 模型大气校正的地面反射率图像、数字地面高程数据以及改进的 CIVCO 地形校正模型, 分别计算了褒河流域不同植被类型(阔叶林、针叶林和灌木林)的 3 类光谱植被指数(NDVI、SR 和 SAVI), 并建立了各个植被类型叶面积指数与同时相的各个植被指数的相关关系。结果表明, 地形校正能有效地消除大部分的地形影响, 显著地提高各植被指数与叶面积指数的相关关系; 对于阴坡和阳坡来讲, 阴坡较阳坡提高显著; 对于不同的植被类型, 针叶林和灌木较阔叶林提高较为显著; 对于同一植被指数如 SAVI, 灌木提高较针叶林和阔叶林显著, 说明地形校正对叶面积指数的遥感估算结果有很大的影响。因此在利用遥感数据定量估算叶面积指数时, 尤其对于山区, 不仅要进行地形校正, 而且要针对不同的植被类型选择合适的植被指数进行估算。

关键词:地形校正; 叶面积指数; 植被指数

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.05.008

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)117-0047-05

Effect of Topographic Correction on the Estimation of Leaf Area Index Based on Landsat TM

LIAO Yu-bing^①, CHEN Xin-fang^①, CHEN Xi^①, ZHANG Dan-rong^①, GUAN Bao-hua^②, ZHOU Feng^③

(^① State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098;

^② Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008;

^③ School of Geographic and Oceanographic Sciences of Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract: To analyze the effect of topographic correction on the relationship between vegetation indices (VI) and leaf area index (LAI), the atmosphere corrected reflectance image obtained through 6S model, the digital elevation model (DEM) and topographic correction model of CIVCO were used. The normalized difference vegetation index (NDVI), simple ratio (SR) and soil adjusted vegetation index (SAVI) of different land cover including broad-leaved forests, coniferous forests and shrubs in Baohe basin were estimated, and the relationships between the VI (without topographic correction and with topographic correction) and the ground-based measurement of LAI were calculated. The results showed that the topographic correction significantly increased the correlation coefficients between LAI and VI. Compared with sunny slope, the correlation coefficients between LAI and VI on shade slope were significantly increased. The correlation coefficients between LAI and VI of coniferous forests and shrubs were increased than that of broadleaved forests. To the same VI such as SAVI, the correlation coefficient between LAI and VI of shrubs was increased than those of broadleaved forests and coniferous forest. It was suggested that more attention should be paid to the topographic correction and choose appropriate VI when the remote sensing data were applied to the quantitative analyzing and information collecting in field, especially in the mountainous area.

Key words: topographic correction; leaf area index; vegetation indices

收稿日期: 2010-09-20 修订日期: 2010-11-22

基金项目: 教育部重大项目(308012); 国家自然科学基金重点项目(106950905111); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2006CB40050X)。

作者简介: 廖钰冰, 女, 硕士, 主要从事生态系统水循环模拟研究。

E-mail: yubingliao@163.com

1 引言

叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是单位地表面积上总叶片面积(双面或多面)的一半^[1]。LAI是植被冠层结构的一个十分重要的参数,它控制着植被的许多生物物理过程,例如光合、呼吸、蒸腾、碳水循环和降水截留等^[2]。LAI是许多生态、水文以及生态水文耦合模型(如 BEPS-Terrainlab 模型)的关键输入参数,而且随着空间精细化模型的发展和基于过程的分布式模拟技术的应用,对于关键植被参数 LAI 的准确估算越来越重要^[3]。

卫星遥感为大区域研究 LAI 提供了唯一的途径^[4]。目前通过遥感技术提取 LAI 的方法有很多,陈新芳^[5]等将叶面积指数的遥感提取方法归纳为 4 类,并分析了各类方法的优缺点;其中植被指数法是通过建立植被指数(Vegetation Indices, VIs)与 LAI 的相关关系来反演 LAI 的统计方法,应用较为广泛^[6~8]。但是,在这一方法中,有很多干扰因素如植被类型、大气校正方法和地形等,制约了反演的精度^[9~12]。陈新芳^[12]研究了不同大气校正方法对 LAI 定量估算的影响,但没有考虑地形对 LAI 定量估算的影响。在山区,由于地形影响造成地表接收到自然入射光的不均一性,使图像的亮度值在反映了地面反射率的同时还反映了地形的起伏变化。地形效应使得像元所接收的有效光照可能会有很大的差别,即使对于相同的地物,不同坡度坡向上将显示不同的亮度值。相反的,不同的地物由于坡度坡向的影响也有相似的亮度值。这种“同物异谱”或“同谱异物”的现象对 LAI 的提取精度会产生很大的影响,所以有必要对遥感影像进行地形校正,本研究是对 LAI 定量估算影响因素的进一步工作。

地形校正的一般思路是利用数字高程模型(DEM)建立地形校正模型,并结合卫星传感器所接收的实际辐射观测值反演地表反射率^[13]。目前为止,已经发展的许多模型主要有基于伯朗体假设的余弦模型^[14],基于非伯朗体假设的 C 模型^[14]、SCS 模型^[15]、SCS+C 模型^[16]、CIVCO 模型^[17]等,各种模型校正效果差别较大。余弦模型存在明显的过度校正现象,在太阳入射角越接近 90°时表现越为明显^[18];SCS 校正模型忽略了散射辐射的影响,也存在过度校正的问题;C 校正模型只是对特殊地表可能存在,对复杂的山区地表影像则很难成立。经过众多研究者的比较,发现 SCS+C 模型和 CIVCO 模型的校正效果较好^[19~20]。本文利用改进的 CIVCO

模型^[21]对遥感影像进行地形校正,对地形校正前后影像植被指数和叶面积指数进行相关性比较,分析地形校正对植被指数和叶面积指数相关性的影响。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究区域

褒河发源于秦岭太白山灵湫,在留坝县桑园流入汉中境内,经褒河水库流入汉中盆地,在勉县和汉台区交界处的孤山注入汉江,全长 175.5km,流域面积 3908km²。褒河流域地处汉江上游陕西省凤县、太白县、留坝县一带,秦岭西南坡,属于亚热带与暖温带过渡区域;海拔处于 734m~3767m 之间,地形起伏很大,有近 2000m 的落差。该区具有暖温带与亚热带过渡性山地气候特点,年平均降水量 782mm,年平均气温 7.6℃。植被种类丰富,覆盖度高,主要的森林植被类型有落叶阔叶林,如栎树类和油桐等;针阔混交林,如华山松、油松、栎树类和桦树类等;高山针叶林有冷杉等。

2.2 遥感数据预处理

本研究区遥感数据为 2003 年 6 月 5 日的 Landsat5 TM 卫星影像数据,其轨道号是 128/36 和 128/37,图像分辨率为 30m,获取时的太阳高度角为 64°,太阳方位角为 111°。首先,对影像进行几何精校正,使几何校正精度小于 0.5 个像元;其次,对遥感影像进行辐射定标。根据公式(1)进行辐射定标。

$$L = A \times DN + B \quad (1)$$

式中, L 为光谱亮度值, A 为增益系数, B 为偏移系数, A 、 B 从 TM 影像的头文件中获取,通过 ENVI 中的图像处理系统定标模块,将影像的 DN 值转变为卫星传感器高度的反射率值;最后,利用 6S(second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)大气辐射传输模型对该影像进行大气校正^[22]。

用 DEM 生成坡度、坡向图和地形阴影图。现有 DEM 数据分辨率为 30m,与 TM 影像的空间分辨率一致。利用 ENVI 中的 DEM 分析模块,将 DEM 生成坡度、坡向。依据获取影像时的太阳高度角和方位角,通过 DEM 生成地形阴影图,再对地形阴影图(0~1)进行线性拉伸(0~255)。

2.3 CIVCO 地形校正模型

地形阴影图模拟了研究区在卫星影像摄取时的坡地阴影分布情况,CIVCO 模型利用遥感影像和地形阴影图之间的相关性,对阴影区进行补偿,对向阳

坡进行恢复。原模型校正分两个步骤^[17]:①第一次校正利用经过 6S 模型大气校正的地面反射率图像和地形阴影图,根据公式(2)进行计算。

$$L_H = L_S + L_S \times (u_k - X) / u_k \quad (2)$$

其中: L_S 为校正前影像原辐射值, L_H 为校正后地物辐射值, u_k 表示将地形阴影图(0~1)拉伸到(0~255)后的均值, X 表示地形阴影图(0~1)拉伸到(0~255)后对应的每一个像元值。

②第二次校正是在第一次校正的基础上乘以校正系数 C_λ ,根据公式(3)进行计算。原模型 C_λ 的计算过程较为繁琐,要在未经地形校正和第一次校正后的影像上分别手工选取一定数量的阴坡和阳坡,最后分波段进行计算。

本文校正系数的计算采用 Law 等^[20]在 2004 年提出的简化方法,直接在未经地形校正影像上选取阴坡和阳坡,根据公式(4)进行计算。

$$L_H = L_S + L_S \times \frac{(u_k - X)}{u_k} \times C_\lambda \quad (3)$$

$$C_\lambda = \frac{(S_\lambda - N_\lambda)}{\left[\left(S_\lambda \times \frac{u_s - u_k}{u_k} \right) - \left(N_\lambda \times \frac{u_N - u_k}{u_k} \right) \right]} \quad (4)$$

其中: S_λ 、 N_λ 分别为未经地形校正影像上阳坡和阴坡的均值, u_s 、 u_N 分别为拉伸后地形阴影图上阳坡和阴坡的均值。

阳坡和阴坡的选取方法采用秦春等^[21]提出的方法,根据太阳方位角(φ),将太阳光线方向上 60° 角($\Phi \pm 30^\circ$)范围内的坡定义为向阳坡,将背对太阳光线方向上 60° 角($180 + \Phi \pm 30^\circ$)范围内的坡定义为阴坡。在坡向选定的基础上,将坡度分为 4 级,分别是小于 15° 、 $15^\circ \sim 35^\circ$ 、 $35^\circ \sim 55^\circ$ 和大于 55° 。利用 IDL 编程对影像按照坡向坡度分别进行统计,计算出各波段的校正系数。

2.4 LAI 野外实测数据的采集

森林叶面积指数的野外测量是利用加拿大多伦多大学陈镜明教授开发的跟踪辐射与冠层结构测量仪(Tracing Radiation and Architecture of Canopies, TRAC)测得^[23]。TRAC 是测定叶面积指数(LAI)和冠层吸收光合作用有效辐射分量(FPAR)的一种新型光学仪器。

野外 LAI 观测场布设严格按照 TRAC 仪器野外操作规范的要求进行,即观测场一般以相隔约 15m 的 3 根长 50m 左右的测线布设,取这 3 条线的平均 LAI 为该测点的实际 LAI^[12]。测点的选择尽量考虑到植被种类的不同及研究区内测点分布的均

匀性。野外实际有效观测样线 168 条,观测场 56 个,基本涵盖了研究区主要的植被类型。用手持式 Magellan GPS Field Pro V 进行样地定位,获取样区中心点的经纬度坐标。根据 GPS 的定位坐标(WGS84 坐标)在 TM 影像中选择距样地坐标最近的像元代表该样地,以该像元为中心,提取该像元相邻 3×3 像元的反射光谱信息,求其平均值,代表该样地的反射光谱信息。2003 年 7 月对该研究区进行了实地考察和野外观测,TM 影像成像时间和野外数据采集都在植被茂盛的盛夏时期,时相相关性高,满足研究要求。

2.5 植被指数的提取

目前已经定义了的植被指数有 40 多种,广泛地应用于各个研究领域^[22]。本文采用较常用的 2 波段植被指数 NDVI(归一化插值植被指数)、SR(比值植被指数)和 SAVI(土壤调整植被指数)与野外实测 LAI 数据作相关性分析,找出较适合于研究区的 LAI 统计模型。NDVI 增强了对植被的响应能力,是目前应用最广的植被指数;SR 是基于波段简单线性组合的植被指数,计算简便;SAVI 可减少土壤和植被冠层背景的干扰,消除土壤影响^[24]。利用精校正 TM 影像的 3(红波)、4(近红外)波段提取各种植被指数如下:

归一化植被指数:

$$NDVI = (R_n - R_r) / (R_n + R_r) \quad (5)$$

比值植被指数:

$$SR = R_n / R_r \quad (6)$$

土壤调整植被指数:

$$SAVI = \frac{(R_n - R_r)(1 + L)}{(R_n + R_r + L)} \quad (7)$$

式中, R_n 、 R_r 分别是近红外、红外波段的发射率。SAVI 可以抑制土壤噪声影响, L 为土壤调整因子,SAVI 中给定常数 0.5。

TRACWin 软件处理后有效森林样地面积指数数据为 56 个,将其按阴阳坡和植被类型分类作为建模数据。对经过预处理 TM 影像依据经纬度坐标提取 56 个野外实测值对应的 NDVI、SR 和 SAVI 值,各种植被指数均采用地面对应点相邻 3×3 像元均值。

3 结果与分析

3.1 地形校正效果目视分析

图 1 为假彩色合成的地形校正前后的遥感影像,校正前原始影像有明显的阴阳坡之分,通过比较

发现校正后地形效应已基本被去除。在一些山脊或山谷的地方会有欠校正或过校正的像元,这可能是由于 DEM 的空间分辨率较低,导致计算山谷和山脊位置的坡度、坡向时,产生了较大的误差;遥感影像和 DEM 配准时存在的偏差也会影响校正的精度。原图的阴影区,所包含的图像细节在校正后的图像中变得较为明显,阳坡亮度值降低,阴坡亮度值提高,阴阳坡的亮度差异已经明显消除。

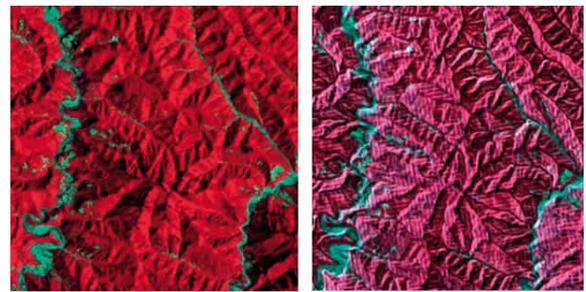


图1 地形校正前(左)后(右)影像效果对比

表1 地形校正前后阴、阳坡 VIs 的最佳拟合回归方程及相关性(R²)比较

植被指数	未经过地形校正		CIVCO 模型校正后	
	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡
NDVI	LAI=1.376e ^{1.938NDVI} R ² =0.398	LAI=1.608e ^{1.305NDVI} R ² =0.400	LAI=1.515e ^{1.811NDVI} R ² =0.408	LAI=1.711e ^{1.163NDVI} R ² =0.452
SR	LAI=1.435e ^{0.281SR} R ² =0.328	LAI=0.560SR+1.237 R ² =0.380	LAI=1.446e ^{0.294SR} R ² =0.331	LAI=0.523SR+1.427 R ² =0.404
SAVI	LAI=1.377e ^{1.304SAVI} R ² =0.397	LAI=1.677e ^{0.784SAVI} R ² =0.355	LAI=1.516e ^{1.219SAVI} R ² =0.406	LAI=1.738e ^{0.766SAVI} R ² =0.441

3.2 阴、阳坡 VIs 与 LAI 相关分析

地形起伏使得遥感图像中每个像元所接收到的有效光照产生很大的区别,阴坡上的像元接收到较弱的照度而具有较低的亮度值,而阳坡上的像元却接收到较强的照度而具有较高的亮度值,即使是同类地物在原始影像中的阴坡和阳坡也存在明显的差异,严重影响遥感图像上的信息提取精度。因此需对研究区阴、阳坡进行研究,建立阴、阳坡 VIs 与实测 LAI 的相关关系,验证地形校正的效果。表 1 列出了地形校正前后阴、阳坡 VIs 与 LAI 的最佳拟合方程及相关性(R²)。

由表 1 可知,地形校正后阴、阳坡的相关性皆有了不同程度的提高,其中阴坡增加幅度较大,说明地形校正有效地消除了大部分的地形影响,减少了地物光谱信息失真,更好地表现了阴坡下地物的真实情况,恢复了地表真实反射率,增加了遥感数据信息的有效性。

3.3 植被类型 VIs 与 LAI 相关分析

全研究区植被类型复杂,而各植被类型存在反射光谱特征上的差异,因此不能用相同的模型来估算不同类型森林的叶面积指数,应将研究区进行分类研究。按照植被类型把样区分为阔叶林、针叶林和灌木 3 类,其中阔叶林的统计样本为 21,针叶林的统计样本为 15,灌木的统计样本为 20。分别探测实测 LAI 与地形校正前后 Landsat TM 影像提取的

各植被指数的相关关系。对 VIs 与实测 LAI 分别进行线性、指数、对数回归拟合分析,选出最佳拟合回归方程。

通过线性、指数等回归分析发现,阔叶林、针叶林 VIs 与 LAI 间基本线性相关,而灌木为指数相关。为准确描述各种植被类型 VIs 与 LAI 间的相关关系,很难采用统一的线性或指数回归分析方式。

表 2 列出了地形校正前后各植被指数的最佳拟合回归方程和相关性(R²)。由表 2 可知,经过改进的 CIVCO 模型地形校正后,去除了地形的影响,与校正前的影像相比较,计算出的各个植被指数与实测的 LAI 之间的相关性有了显著提高。说明随着地形影响的去除,计算出的各个植被指数能更真实地体现地面植被的覆盖情况。

从植被类型来看,阔叶林的各种植被指数地形校正后相关性提高幅度较小,针叶林和灌木的提高幅度较大,这是由于不同植被样区受地形影响的大小程度不同。

在本研究区,对于阔叶林,各植被指数校正前后相关系数的提高幅度相差不大,SR 植被指数的相关系数较其他植被指数较高,因此校正后 SR 最适于估算 LAI;对于针叶林,各植被指数校正前后相关系数提高幅度较大,SR 植被指数的提高幅度最大,校正后达到了较高的的相关系数,因此校正后仍是 SR 最适于估算 LAI;对于灌木,各植被指数校正前

后相关系数的提高幅度有所差别,从大至小依次是 SAVI、SR、NDVI,原因在于灌木区植被覆盖稀疏,受土壤背景的影响较大,而土壤调整植被指数(SA-VI)能有效地消除土壤的影响。灌木区校正后 SAVI 与实测 LAI 的相关系数达到最优,因此 SAVI 最

适于估算灌木区的 LAI。

阔叶林采用 SR 反演的叶面积指数: $LAI = 1.076 + 0.248SR$; 针叶林采用 SR 反演的叶面积指数: $LAI = 4.023SR - 6.204$; 灌木采用 SAVI 反演的叶面积指数: $LAI = 1.471 \times e^{1.071SAVI}$ 。

表 2 地形校正前后各植被覆盖类型 VIs 的最佳拟合回归方程及相关性比较

植被指数	未经过地形校正			CIVCO 模型校正后		
	阔叶林	针叶林	灌木	阔叶林	针叶林	灌木
NDVI	$LAI = 6.676NDVI + 0.343$ $R^2 = 0.460$	$LAI = 16.275NDVI - 3.271$ $R^2 = 0.319$	$LAI = 1.343e^{1.546NDVI}$ $R^2 = 0.689$	$LAI = 7.365NDVI + 0.0495$ $R^2 = 0.504$	$LAI = 21.643NDVI - 5.157$ $R^2 = 0.498$	$LAI = 1.482e^{1.414NDVI}$ $R^2 = 0.716$
SR	$LAI = 0.953SR + 0.575$ $R^2 = 0.530$	$LAI = 2.521SR - 2.795$ $R^2 = 0.317$	$LAI = 1.081e^{0.347SR}$ $R^2 = 0.583$	$LAI = 1.076SR + 0.248$ $R^2 = 0.588$	$LAI = 4.023SR - 6.204$ $R^2 = 0.543$	$LAI = 1.075e^{0.380SR}$ $R^2 = 0.659$
SAVI	$LAI = 4.501SAVI + 0.3387$ $R^2 = 0.462$	$LAI = 10.943SAVI - 3.256$ $R^2 = 0.320$	$LAI = 1.323e^{1.096SAVI}$ $R^2 = 0.608$	$LAI = 4.964SAVI + 0.043$ $R^2 = 0.501$	$LAI = 14.624SAVI - 5.165$ $R^2 = 0.498$	$LAI = 1.471e^{1.071SAVI}$ $R^2 = 0.775$

4 结束语

经过地形校正后,各个植被指数与 LAI 之间的相关性都有了不同程度的提高,说明经过地形校正后的植被指数能更真实地体现地面植被的覆盖状况。地形因素是影响 LAI 提取精度的因素之一,所以有必要对遥感影像进行地形校正后再估算 LAI,可减小 LAI 的估算误差。

地形起伏影响了地表像元接收到的有效光照,阴坡的像元亮度值较低,阳坡的像元亮度值较高,这种地物光谱信息的扭曲严重影响 VIs 的提取。本文使用改进的 CIVCO 模型进行地形校正,根据阴、阳

坡 VIs 与实测 LAI 相关性的比较,证实了地形校正能有效地去除大部分的地形阴影,较好地恢复了地物的真实反射率信息。

对于不同的植被类型,VIs 与 LAI 的关系和相关性表现出一定的差异,因此将植被进行分类来估算 LAI 是有必要的。对于相同的植被类型,各种 VIs 与 LAI 的关系和相关性也表现出一定的差异,所以对于相同的植被类型,分析各种 VIs 与 LAI 的关系,选取相关性最优的方程对 LAI 的遥感估算也是有必要的。另外消除实测样区在图像上的定位误差、观测仪器的误差以及提高遥感几何纠正精度等,对进一步提高 LAI 估算的精度具有重要的意义。

参考文献

- [1] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. Plant Cell and Environment, 1992(15): 421-429.
- [2] Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images[J]. Remote Sensing of Environment, 1996(55): 153-162.
- [3] 孙鹏森, 刘世荣, 刘京涛, 等. 利用不同分辨率卫星影像的 NDVI 数据估算叶面积指数(LAI)—以岷江上游为例[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3826-3834.
- [4] Running S W, Nenani R R. Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulate photosynthesis and transpiration of forests in different climates[J]. Remote Sensing of Environment, 1988(24): 347-367.
- [5] 陈新芳, 安树青, 陈镜明, 等. 森林生态系统生物物理参数遥感反演研究进展[J]. 生态学报, 2005, 24(9): 1074-1079.
- [6] 彭九虎, 张树文. 基于 NDVI 与 LAI 的水稻生长状况研究[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(1): 12-16.
- [7] 徐全芝, 张万昌, 刘三超, 等. 黑河流域叶面积指数的遥感反演[J]. 干旱区研究, 2003, 20(4): 281-285.
- [8] 惠凤鸣, 田庆久, 金震宇, 等. 植被指数与叶面积指数关系研究及量化分析[J]. 遥感信息, 2003(2): 10-12.
- [9] 王军邦, 牛铮, 胡秉民, 等. 定量遥感在生态学研究中的基础应用[J]. 生态学报, 2004, 23(2): 152-157.
- [10] 夏学齐, 田庆久, 杜凤兰. 遥感提取叶面积指数的地形影响分析[J]. 遥感信息, 2004(2): 16-19. (下转第 64 页)

