No. 2,2007 Jun. ,2007

基干 PROSPECT + SAIL 模型的 遥感叶面积指数反演

蔡博峰^{1,2},绍 霞²

(1. 中国科学院遥感应用研究所,北京 100101; 2. 北京市环境保护科学研究院,北京 100037)

摘要:以 PROSPECT + SAIL 模型为基础,从物理机理角度反演植被叶面积指数(LAI)。首先,通过 FLAASH 模型进 行大气校正,使得图像像元值表达植被冠层反射率;然后,根据 LOPEX 93 数据库和 JHU 光谱数据库选择植物生化 参数和光谱数据,以 PROSPECT 模型模拟出的植物叶片反射率和透射率作为 SAIL 模型的输入参数,得到植被冠层 反射率,将结果与遥戚影像的植被冠层反射率对应,回归出植被 LAI;最后,以地面实测数据对遥感反演数据进行 验证,并分析了误差的可能来源。

关键词: PROSPECT + SAIL 模型; LAI; 大气校正; 植物生化参数

中图分类号: TP 79: Q 94-3 文献标识码: A

文章编号: 1001-070X(2007)02-0039-04

0 引言

植被叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是植被 冠层结构的一个重要参数,控制着植被的许多生物 物理过程。通过遥感获取植被叶面积指数,不仅能 极大地节约人力、物力,还能提高数据精度和可获 取性。

从遥感影像中获取 LAI 通常有 4 种方法^[1]: 植 被指数法、混合像元分解法、几何光学模型法和辐射 传输模型法。植被指数法是国内通过遥感获取 LAI 的最主要、最常用的方法^[2-4],它与混合像元分解法 都是典型的经验统计模型;几何光学模型法和辐射 传输模型法都属于物理机理模型,前者侧重于森林 冠层二向反射特性,后者的理论基础是植被辐射传 输理论,二者反演 LAI 的最大优势在于它们是建立 在物理基础之上的,具有很强的普适性。

当前,国际上LAI的遥感反演方法已逐步由经 验统计模型向物理机理模型过渡^[5~7]。姚延娟等^[8] 利用行播作物 BRDF 二向反射模型,将多角度与多 光谱数据结合进行行播作物 LAI 反演实验。但是, 国内利用遥感机理模型反演植被 LAI 研究仍属少 有,原因可能是: ①遥感机理模型对定量遥感的要 求很高,需要通过遥感影像反演出地表反射率,从而 和地物的基本属性建立起物理联系。定量遥感的前 提是进行大气校正,而大气校正的困难已成为国内 遥感机理模型发展的障碍之一。②物理机理模型对

地表参数的要求较高,而国内此类数据库直接可供 研究者使用的极为匮乏。

本文基于辐射传输理论,以北京市四座楼自然 保护区为例,应用 PROSPECT + SAIL 模型,进行 LAI 反演,最后对反演结果进行了验证。

模型和方法 1

1.1 PROSPECT 模型

PROSPECT 模型是一个基于"平板模型"的辐射 传输模型^[9],它通过模拟叶片从 400 nm 到 2 500 nm 的上行和下行辐射通量而得到叶片的光学特性,即 叶片反射率r,和透射率r,。平板模型的假设是:① 叶片是一个紧密的平板,均匀地充满了吸收和散射 物质: ②平板表面是个朗伯表面。而 PROSPECT 模 型则假设每片叶片是由 N 层同性层堆叠而成, 由 N-1 层气体空间隔开, N 不一定是整数。它通过一 个折射指数和一个表征叶片叶肉结构的量来描述散 射过程,吸收则通过吸收系数描述。吸收系数可以 表达为叶组分含量和相应的特定吸收系数的线性组 合。PROSPECT 模型引入了立体角 Ω 。 Ω 由相对于 叶平面法线的最大入射角 α 来确定, 假定光线都是 从这个立体角里穿过叶片的。虽然 α 值取决于反射 面的几何结构,但研究者常取其最适值 $\alpha = 59^{\circ}$ 。 Jacquemoud 等^[9] 模拟得到折射指数 n, 叶肉界面物 质的折射指数接近于1.4,从400 nm 到2400 nm 呈 规则递减。

收稿日期: 2006-12-05;修订日期: 2007-04-17

基金项目.北京市政府和北京市环保局共同资助项目。 力万数据

PROSPECT 模型只需要 4 个参数: α (人射角)、 n(折射指数)、 τ (平板透射系数)和结构参数 N。其 中 $\tau \in K(组分吸收系数的线性组合)的函数,我们$ 假设叶的吸收是由水、叶绿素、蛋白质及木质素加纤 $维素引起的,因此,<math>\tau$ 就可以由叶片的生化参数决 定^[10]。这样,PROSPECT 最终只需要结构参数 N 和生 化组分含量 C 2 个参数。给定不同的结构参数和生化 含量,可以模拟叶片的反射率 r_{λ} 和透过率 τ_{λ} 。

1.2 SAIL 模型

SAIL(Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves)模型是一个冠层二向反射率模型。当给定冠层结构参数和环境参数时,可以计算任何太阳高度和观测方向的冠层反射率。它假设植物冠层是由方位随机分布的水平、均一及无限扩展的各向同性叶片组成的混合体,叶片均具有漫散射的发射和透射特性。 PROSPECT模型的输出,即叶片的反射率 r_{λ} 和透射率 τ_{λ} ,可以作为 SAIL 模型的输入参数,再结合土壤反射率、叶面积指数、叶倾角分布、太阳天顶角和方位角等相关参数,就可以得到植被冠层的反射率和透射率。

1.3 PROSPECT + SAIL 模型

将通过 PROSPECT 模型获取的植被叶片反射率 r_{λ} 和透射率 τ_{λ} 输入 SAIL 模型,最终得到植被冠层 反射率,这样就完成了从地表植被理化、几何参数和 光谱特性获得植被冠层反射率的过程。而遥感影像 通过大气校正,也可以得到地表植被冠层反射率,从 而将遥感影像与植被参数 LAI 通过物理过程联系起 来(图1),完成了模型模拟过程。



2 样地模拟结果

2.1 样地概况

以北京四座楼自然保护区作为实验样地。四座 楼自然保护区地处北京市平谷区东北部的山区,总 面积198.1 km²。保护区内有保存较完整的山地落 叶阔<u>叶次</u>东桥、多种人工林以及较为丰富的野生动 植物资源。保护区内核心区面积为 46.58 km²,缓冲 区 56.82 km²,试验区 94.70 km²。

2.2 遥感影像大气校正

采用 Landsat 5 TM 影像,轨道号为 123-32。影像 获取时间为 2005 年 07 月 09 日,格林尼治时间 2:40。 本文采用 TM 的 6 个波段,其中心波长分别为 480 nm、 560 nm、660 nm、830 nm、1 650 nm 和 2 215 nm。

首先,采用FLAASH(Fast Line - of - sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)模型对遥感影 像进行大气校正。FLAASH 模型是基于传输方程的 大气校正方法,其利用了当前流行的大气校正模型 MODTRAN 4 思路,并且考虑了交叉辐射项的影响 (又称为邻近像元效应,采用点扩散模型处理)。 FLAASH 模型对物理参数要求比较严格,输入参数 包括处理区域的中心位置、传感器类型、传感器高 度、地表平均海拔、像元大小、影像获取日期和时间 等。经过 FLAASH 模型校正后的影像像元值为对应 地表的反射率。选择自然保护区核心区部分检验 FLAASH 校正前后的植被波谱特征差异(图2)。



图 2 FLAASH 模型大气校正前后对比

大气校正前的像元值为亮度值(图2左轴),校 正后的像元值为反射率(图2右轴),参考 JHU 光谱 数据库中典型^[11]植被光谱曲线,经过大气校正,林 地在绿光波段的反射率明显高于蓝光和红光波段的 反射率,这种波谱特征与典型植被的波谱特征一 致。而校正前,由于大气在可见光范围内的影响明 显,使得其光谱曲线形状与植被光谱曲线差异很 大,证明了应用 FLAASH 模型进行大气校正的有效 性和科学性。

2.3 PROPSECT 模型模拟结果

PROPSECT 模型需要生化组分含量和结构参数 N 两类参数。生化组分含量参数可由叶绿素、水分 和干物质表达。这里利用 LOPEX 93 (Leaf Optical Properties Experiment)数据库^[12]作为 PROPSECT 模 型输入参数的选择基础。LOPEX 93 植物生化参数 数据库是由欧盟委员会联合研究中心(Joint Research Centre of the European Commission)的空间应 用研究所(Space Applications Institute)实测获取的, 包括 70 个叶片样本,代表了 50 种木本和草本植物。 数据体现了叶片内部结构、色素含量、水分含量和其 它组分含量的多样性。

四座楼自然保护区的主要植被类型是栓皮栎 林、蒙古栎林、核桃楸林、山杨林、侧柏林、人工油松 林和板栗林●^[13]。由于欧洲植物和北京植物有一定 差别,因此尽可能洗择同种植物,如果数据库中没 有,则选择与自然保护区主要植物对应的同属植物, 最后选定栗属、松属、栎属、胡桃属及杨属。以其生 化参数的平均值作为 PROPSECT 模型生化参数输入 值。对于叶片生化组分数据,由于 PROSPECT 模型 要求各组分含量需以单位面积的质量为单位,因此 将叶绿素、水分和干物质的单位分别处理为所需单 位。即各生化参数为: 叶绿素(叶绿素 a + 叶绿素 b)48.82 µg/cm²、水分7.195×10⁻³g/cm² 及干物质 (主要为木质素和纤维素)3.5×10⁻³g/cm²。结构参 数 N 是模型的一个假设参数,目前还没有实测的方 法,因此它的值取自研究者(S. Jacquemoud)根据实 测数据拟合的均值(1.3)。选择与TM中心波长一 致的6个波段,运行 PROSPECT 模型,得到输出结 果,见表1和图3。

_					
波长/nm	反射率	透射率	波长/nm	反射率	透射率
480	0.0514	0.026 8	830	0.4 325	0.533 9
560	0.141 5	0.1771	1 650	0.3263	0.4844
660	0.050 9	0.036 9	2 215	0.198	0.371 7
1 概 0.5 - 1 1 2			透射为		0.5 戦

表 1 PROSPECT 模型模拟的叶片反射率和透射率

图 3 PROSPECT 模型模拟叶片反射率和透射率

波长/mm

2.4 SAIL 模型模拟结果

SAIL 模型要求的太阳天顶角和方位角、观测天顶 角和方位角等基本参数,可以在 TM 影像的头文件里 读到。叶倾角分布(LAD)是 SAIL 模型中的一个重要 参数,我们选择常用的球形分布(Spherical),见表2。 万方数据

表 2 叶倾角分布

角度/(°)	5.00	15.00	25.00	35.00	45.00	55.00	65.00	75.00	85.00
百分比/%	1.52	4.51	7.37	10.00	12.33	14.28	15.80	16.84	17.35

由于自然保护区主要是褐土壤土,因此我们选择 JHU 光谱数据库^[11]中的 Grayish brown loam 光谱数据作为背景反射率。中国北方森林植被的叶面积指数一般不会超过 7^[14,15],尤其是北京地区的植被受人为干扰严重,天然次生林很少,*LAI* 会相对低些。所以 *LAI* <7。最终运行结果见表 3。

表3 LAI 与冠层反射率对应情况

LAI -	波长/nm							
	480	560	660	830	1 650	2 215		
0.01	0.080	0.126	0.178	0.291	0.453	0.406		
0.10	0.072	0.117	0.156	0.277	0.409	0.360		
0.25	0.061	0.105	0.125	0.258	0.349	0.298		
0.50	0.047	0.090	0.089	0.236	0.278	0.225		
0.75	0.039	0.080	0.066	0.221	0.232	0.177		
1.00	0.033	0.074	0.051	0.211	0.202	0.146		
1.50	0.027	0.068	0.034	0.201	0.169	0.113		
2.00	0.024	0.065	0.027	0.197	0.155	0.099		
3.00	0.023	0.063	0.023	0.194	0.147	0.090		
7.00	0.023	0.063	0.022	0.194	0.145	0.088		

参照表 3,对遥感影像的反射率依次归类赋值, 每个波段的反射率都反演出 LAI,最后以 6 个波段的 平均值作为自然保护区 LAI 的最终结果(图 4)。



图 4 LAI 空间分布

秦大唐,汤大友,蔡博峰.北京市四座楼自然保护区科学考 察集[R].北京市环境保护局,2005.

2.5 模拟结果验证

以已有自然保护区考察数据作为验证数据(表 4),共有 20 个样方数据(每4 个为一组)。实测数据 计算公式为 LAI = 0.83 ×每样方株数 ×每株叶片数 ×叶长 × 叶宽/样方面积。验证的结果表明,实测 LAI 要高于模拟 LAI,但二者的变化趋势基本一致,均 方根误差为 0.851。

表4 地面实测数据和模拟 LAI

地点	群落名称	调查样方 数/10×10 m ²	生物量/ (t・ha ⁻¹)	实测 LAI	模拟 LAI	年龄/a
飞龙谷	山杨林	4	108.32	4.5	3	38
四座楼	蒙古栎林	4	198.3	4	3	40
罗家沟	栓皮栎林	4	53.64	1	1.5	26
肖家岭	油松林	4	42.46	0.5	0.25	28
石林峡	核桃楸林	4	39.04	0.5	0.25	14

3 结论

利用物理机理模型反演 LAI 是定量遥感的发展 趋势和生态学的必然需求。地面科学数据的积累和 共享是推动遥感机理模型发展的重要力量。本文以 PROSPECT + SAIL 模型为基础,从物理机理角度反 演植被 LAI,取得了较好的效果。模拟数据和实测数 据存在一定偏差的原因是:

(1)尺度效应造成的误差^[16]。地面实测数据样 方较小(10 m×10 m),而 TM 像元大小为 30 m×30 m。 由于 LAI 是比值性生态参数,因此随着尺度的增加, 单一样方内非植被成分逐渐增多,使得 LAI 值逐渐 降低,所以实测小样方的 LAI 往往偏大。

(2) PROSPECT + SAIL 模型参数问题。PROS-PECT + SAIL 模型中所用的植被叶片理化参数均来 自国外数据库,和北京本地实际植被类型有一定差 别。因此,通过改进实验参数和采用地面数据标定 迭代的方法, PROSPECT + SAIL 模型必然会在 LAI 定量反演中发挥巨大作用。

参考文献

 [1] 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].生态学杂志,2005,24 (9):1074-1079.

- [2] 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,(3):58-62.
- [3] 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.
- [4] 骆知萌,田庆久,惠凤鸣.用遥感技术计算森林叶面积指数——以江西省兴国县为例[J].南京大学学报(自然科学), 2005,41(3):253-258.
- [5] Jacquemoud S, Baret F, Andrieu B, et al. Extraction of Vegetation Biophysical Parameters by Inversion of the PROSPECT + SAIL Models on Sugar Beet Canopy Reflectance Data, Application to TM and AVIRIS[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 52 (3): 163 - 172.
- [6] Meroni M, Colombo R, Panigada C. Inversion of a RadiativeTransfer Model with Hyperspectral Observations for LAI Mapping in Poplar Plantations[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(2): 195-206.
- [7] Kamel Soudani, Christophe Francois, Guerric le Maire, et al. Comparative Analysis of IKONOS, SPOT, and ETM⁺ Data for Leaf Area Index Estimation in Temperate Coniferous and Deciduous Forest Stands[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(2):161 – 175.
- [8] 姚延娟,阁广建,王锦地.多光谱多角度遥感数据综合反演叶 面积指数方法研究[J].遥感学报,2005,9(2):117-122.
- [9] Jacquemoud S Baret. PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34:75-91.
- [10] 颜春燕. 遥感提取植被生化组分信息方法与模型研究[D]. 北 京:中国科学院遥感应用研究所,2003.
- [11] Jack Salisbury. Johns Hopkins University Spectral Library [EB/ OL]. http://asterweb.jpl. nasa.gov/speclib/,2006.
- [12] Hosgood, Jacquemoud, et al. The JRC Leaf Optical Properties Experiment (LOPEX93) Report EUR - 16096 - EN[R]. European Commission Joint Research Centre, Italy: Institute for Remote Sensing Application, 1995.
- [13] 陈宏伟,于顺利,蔡博峰,等.北京四座楼自然保护区植物区系 及植被分析[J].植物资源与环境学报,2006,15(1):62-69.
- [14] 王希群,马履一,贾忠奎,等. 叶面积指数的研究和应用进展 [J].生态学杂志,2005,24 (5):537-541.
- [15] 陈 健, 倪绍祥, 李静静, 等. 植被叶面积指数遥感反演的尺度效 应及空间变异性[J]. 生态学报, 2006, 26(5):1052-1058.

LEAF AREA INDEX PETRIEVAL BASED ON REMOTELY SENSED DATA AND PROSPECT + SAIL MODEL

CAI Bo - feng^{1,2}, SHAO Xia²

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Beijing Municipal Rerearcher Academy of Environmental Protection, Beijing 100037, China) Abstract: Based on simulations using the SAIL bidirectional canopy reflectance model coupled with the PROSPECT leaf optical properties model, the authors have obtained the vegetation LAI. The FLAASH model is used to ensure the accuracy of atmospheric correction. The LOPEX93 database and the JHU spectral library are employed to identify the input value of the model. The canopy reflectance is the key node to relate the PROSPECT + SAIL model and the remote sensing data, and hence the LAI can be retrieved from leaf biochemical properties, LAD and remote sensing data. In situ measurements of LAI are used to test the simulation results, and the error sources are analyzed.

Key words: PROSPECT + SAIL model; LAI; Atmospheric correction; Leaf biochemical properties **第一作者简介**: 蔡博峰(1977 -), 男, 博士研究生, 主要从事生态遥感研究。

(责任编辑: 刁淑娟)

(上接第22页)

象形成的错误地形信息分离,然后用正立体阴影图 替换错误的地形信息,从而有效地纠正了图像上的 反立体现象。这种方法操作简单,易于推广,在有效 纠正反立体现象的同时,能够较好地保持原图像的 色彩。同时,该方法还能在一定程度上增强图像的 立体感,有利于图像的判读和应用。

参考文献

- Rudnicki W. The New Aapproach to the Relief Shading Applied in Satellite Image Maps[J]. Proceedings of High Mountain Cartography. 2000.18:105 - 106.
- [2] 张守林,付水兴,王润生,等.正地貌遥感影像图制作方法
 [P].中国专利:200410037631.7,2005-11-02.

- [3] Saraf A K, Das J D, Agarwal B, et al. False Topography Perception Phenomena and Its Correction[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17:3725 - 3733.
- [4] 李军,周月琴,李德仁.小波变换用于高分辨率影像与多光谱 影像的融合研究[J].遥感学报,1999,3(2):116-121.
- [5] 叶宝进,徐士进,吴俊奇,等. 基于 IHS 变换和小波变换相结合的 IKONOS 影像融合技术[J]. 江西科学,2005,23(4):154-158.
- [6] 吴连喜. 一种保持光谱特征的图像融合方法——高通滤波融 合法[J]. 国土资源遥感,2003,(4):26-29.
- [7] 杨存建,魏一鸣,王思远,等. 基于 DEM 的 SAR 图像洪水水体 的提取[J]. 自然灾害学报, 2002,11(3):121-125.
- [8] 党安荣,王晓栋,陈晓峰,等. Erdas Imagine 遥感图像处理方法
 [M].北京:清华大学出版社,2003.

A STUDY OF THE METHOD TO RECTIFY THE FALSE TOPOGRAPHIC PHENOMENON

ZHOU Ai - xia¹, GAO Lian - feng²

(1. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Academy of Command Automation, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: The false topographic phenomenon is a common phenomenon existing in the remote – sensing images obtained by sun – synchronous satellites, which brings great trouble to image users. In order to remove the false topographic phenomenon of the remote – sensing images, this paper put forward a method based on DEM data and IHS transformation and made a case study of the image of Guanyuan City in Sichuan Province. By low – pass filtering of the intensity image obtained by IHS transformation, the reflectivity information (*IR*) was extracted from the intensity image. By adding *IR* to shade relief image (*SR*), which was produced by DEM, a new intensity image (I_{new}) was obtained. A back IHS transformation was done to acquire corrected RGB image after replacing the old intensity image by the new intensity image (I_{new}). The experimental results indicate that the method can remove the false topography effectively and preserve the primary color.

Key words: False topographic phenomenon; Remote sensing image; DEM; IHS transformation

第一作者简介:周爱霞(1978 –), 女, 河海大学在读博士生, 主要从事遥感、地理信息系统及其在水文水资源等方面的应用 研究。