

# 芦苇地叶面积指数的遥感反演

陈健<sup>1</sup>, 倪绍祥<sup>1</sup>, 李云梅<sup>1</sup>, 李静静<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097; 2. 山东科技大学信息工程学院, 泰安 271019)

**摘要:** 叶面积指数(LAI)是植被冠层结构的一个重要参数,它的改变标志着植被发生了生物物理变化。本文提出了一种利用混和模型从TM图像上获取叶面积指数的方法。首先,利用冠层反射率(FCR)模型计算并得到查找表;然后,利用从查找表得到的统计关系进行LAI制图。试验表明,该方法简单易行,并可较精确地用来反演芦苇地的叶面积指数。

**关键词:** 叶面积指数; 植被冠层; 遥感; 反演; 模型; 芦苇地

**中图分类号:** TP 79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2005)02-0020-04

## 0 引言

目前,利用遥感技术反演植被LAI主要有3种方法:统计模型法、物理模型法和综合模型法。其中,统计模型法是对现场实测的LAI数据作经验性统计描述或进行相关分析,建立光谱数据或其变换形式(植被指数等)与实测LAI的回归方程。该方法简便、适用性强,但缺乏对遥感机理的足够理解与认识,且对于不同地区、不同条件往往得出多种统计规律,缺乏普适性<sup>[1,2]</sup>;物理模型包括辐射传输模型和几何光学模型,如SAIL模型<sup>[3]</sup>、Li-S模型<sup>[4]</sup>和4-*Scale*<sup>[5]</sup>等,它的理论基础完善,模型参数具有明确的物理意义,并可对作用机理进行适当的数学描述。但此类模型一般是非线性的,输入参数多,方程复杂,适用性较差,且对非主要因素有过多的忽略或假定<sup>[1,5,6]</sup>。由于物理模型需要通过反演来估算LAI,而在反演过程中有些反函数是不收敛的,这样可能导致反演结果存在很大的不确定性,或者造成错误的反演结果;另外,由于目前计算能力的局限和模型本身的复杂性,模型反演非常耗时,对于大区域的遥感图像处理尤其不利<sup>[7]</sup>;综合模型方法将以上两者结合起来,可发挥各自的优势。例如,Qi等<sup>[8]</sup>在Arizona东南半干旱区,结合BRDF模型反演和植被指数统计分析,较好地估算了大尺度的LAI;Fang Hongliang等<sup>[9]</sup>利用神经网络方法进行了从TM图像上反演叶面积指数的研究。

鉴于统计模型和物理模型的优缺点,本文提出了一种混合模型方法,将上述两种模型结合起来,发挥各自的优势。该方法不必太依赖于实测数据,可以根据物理模型计算出查找表,这样就避免了反演过程中的时间消耗和不收敛问题,并且同时保留了经验统计模型简单易算的优点。

## 1 研究方法

### 1.1 FCR 模型介绍<sup>[10-12]</sup>

FCR模型于1994年由Andres Kuusk提出。该模型将N-K和SAIL模型结合起来,是一个快速、可反演的植被冠层二向反射率模型<sup>[12]</sup>。模型中,冠层全方位反射率由单次散射和多次散射(漫散射)形成,其中,单次散射用N-K模型计算,漫散射通量用SAIL模型逼近。冠层的方向反射率由式(1)计算,即

$$\rho = (S_{\lambda}/Q_{\lambda})\rho^1 + \rho_D \quad (1)$$

式中, $\rho^1$ 是二向反射率中的单次散射组分; $\rho_D$ 是漫射通量; $S_{\lambda}$ 和 $Q_{\lambda}$ 分别是冠层上方某一水平面上太阳直接辐射和总辐射能量。

$\rho^1$ 包括冠层和土壤的单次散射,由式(2)和式(3)计算,即

$$\rho^1 = \rho_c^1 + \rho_{soil}^1 \quad (2)$$

$$\rho_c^1 = \int_0^H \frac{\Gamma_L(r', r, z)}{u'u} u_L(z) Q(r', r, z) dz \quad (3)$$

式中, $\rho_c^1$ 是冠层单次散射; $\rho_{soil}^1$ 是土壤单次散射;

$\Gamma_L(r', r, z)$  是冠层散射相函数, 入射方向和反射方向用极坐标系表示;  $r' = (\theta', 0)$  是指向太阳的单位矢量;  $r = (\theta, 0)$  是指向探测器的单位矢量;  $\theta'$  和  $\theta$  分别是  $r'$  和  $r$  在极坐标系中的极角;  $z$  是冠层深度(到冠层顶端的距离);  $Q(r', r, z)$  是双向联合间隙率, 由  $r', r$  和方向间隙率及热点函数描述。

在漫散射通量计算中, 引入了 SAIL 模型, 并考虑了多次散射和漫散射天空光。模型中需要输入的参数分为光学参数(叶片反射率、叶片透射率、叶面蜡状物折射指数、土壤和薄层水体反射率)、冠层结构参数(叶面积指数、叶倾角分布、叶的发丝状指数、叶的相对线性尺度)和几何光照参数(太阳天顶角、观测天顶角、太阳直接辐射和总辐射之比)3类。

### 1.2 查找表的生成

考虑到应用 FCR 模型对整个图像进行反演需要消耗大量的时间和占用太多的系统资源, 并且有的像元会反演出错误的结果, 因此, 我们采用查找表的方法。在研究区——河北省南大港水库地区, 由于植被类型较单一(以芦苇为主), 因此不再进行图像分类, 而直接对图像进行 LAI 反演。在 FCR 模型中, 除了 LAI, 各项参数在短时期内是稳定的, 因此, 规定除了 LAI 外, 其余的参数不变, 即只变动 LAI, 得到每个 LAI 所对应的反射率曲线。反演得到光谱曲线的光谱范围为 400 ~ 940 nm, 它覆盖了 TM 图像的前 4 个波段。因此, 将每条曲线按照 TM 波段范围选取前 4 个波段分别作为模拟的 TM 蓝、绿、红、近红外波段, 其波段范围分别为 450 ~ 520 nm, 520 ~ 600 nm, 630 ~ 690 nm 和 760 ~ 900 nm。

### 1.3 反演模型的建立及 LAI 制图

在查找表里, 每一个 LAI 都有其相对应的 TM 波段值, 对 TM 的 4 个波段值进行计算, 得到各种植被指数, 由此得到光谱波段反射率、植被指数与 LAI 的相关关系, 对 LUT 表进行分析, 得到最适合该区域的统计模型, 最后, 利用该模型进行 LAI 制图。

## 2 研究区与所用数据

### 2.1 研究区自然地理概况

南大港水库(117°18' ~ 117°38'E, 38°23' ~ 38°33'N)位于河北省沧州市东北部的南大港农场境内, 总面积约 4 700 hm<sup>2</sup>。该区属暖温带大陆季风气候, 年均气温为 12.1℃, 年均降水量为 650 mm, 其中 80% 降雨集中在 6 ~ 8 月份, 年均蒸发量 2 000 mm。土壤主要为粘质草甸土和中壤质盐化沼泽土。地势

低洼, 除低洼地有季节性的短期积水外, 水库内常年无水, 植被以芦苇为主。

### 2.2 遥感与实测数据

#### 2.2.1 遥感图像数据

研究采用 2004 年 5 月 28 日 TM 图像。首先, 用黑像元法和 6S 模型进行大气校正; 然后, 使用 ENVI (4.0) 软件, 并利用在研究区实测的地面控制点, 对 TM 图像进行几何精纠正, 纠正精度控制在 0.5 个像元之内。

#### 2.2.2 野外实测数据

利用 WinSCANOPY 植物冠层分析仪获取野外实测图像, 并通过室内分析获取植被盖度、叶面积指数及叶倾角分布数据。在野外用直尺直接量取芦苇的株高(地面距最高叶面的距离)、叶长和叶宽。

野外光谱测量采用美国 ASD 公司生产的 Field-Spec 光谱仪, 其波长范围为 300 ~ 1 100 nm, 光谱分辨率为 3.5 nm。每次测量 5 条光谱曲线, 取其平均值。在样区内匀速慢慢走动, 从植被上方垂直向下测量植被冠层反射率, 获得 5 条光谱曲线, 取平均得到冠层反射率。摘取典型芦苇叶片, 在叶片下方垫一黑布, 垂直向下测量得到叶片光谱。在测量冠层光谱的同时, 测量冠层下方土壤的光谱。此外, 在每一样区, 分别测量总入射辐射和散射辐射。每次测量光谱之前, 都进行了白板校准。实测光谱数据在室内用软件 ASD ViewSpecPro 进行处理。

## 3 模型的应用

### 3.1 FCR 模型的参数

对 WinSCANOPY 冠层仪所获取的图像进行分析, 得到芦苇叶片的叶倾角分布。利用实测的参数, 通过优化函数法获得椭圆分布的参数为: 偏心率为 0.973 1, 模型倾角 81°; 叶片光谱曲线、土壤及薄层水体光谱曲线, 取野外实测的典型曲线; 根据前人经验<sup>[12]</sup>, 取叶面蜡状物折射指数为 1.2; 叶形状参数取实测值, 叶的相对线性尺度 = 平均叶长/冠层高度; 太阳天顶角为观测时的实际值, 观测天顶角为 0°; 太阳直接辐射与总辐射之比为 1 - 散射辐射/总辐射。

### 3.2 生成 LUT 表

固定该模型的其它参数, 而将 LAI 进行变化, 得到该条件下芦苇的 LAI 与冠层反射率的 LUT 表。每一个对应的 LAI 预测得到一条高光谱反射率曲线, 从 400 ~ 940 nm, 光谱分辨率为 5 nm。对此曲线进行

提取,得到 TM 前 4 个波段所对应的反射率值,在本文中分别用 *BD1*、*BD2*、*BD3*、*BD4* 表示。根据该表格

计算出各种植被指数,与叶面积指数的相关系数见表 1。

表 1 *LAI* 与光谱数据和植被指数的相关系数

变量	<i>BD1</i>	<i>BD2</i>	<i>BD3</i>	<i>BD4</i>	<i>LAI</i>	<i>RVI</i>	<i>NDVI</i>	<i>DVI</i>	<i>SAVI1</i>	<i>SAVI2</i>	<i>PVI</i>	<i>MASVI</i>	<i>TVI</i>
<i>BD1</i>	1.000												
<i>BD2</i>	0.998	1.000											
<i>BD3</i>	1.000	0.999	1.000										
<i>BD4</i>	0.881	0.862	0.876	1.000									
<i>LAI</i>	0.724	0.690	0.715	0.946	1.000								
<i>RVI</i>	0.253	0.260	0.254	0.211	0.111	1.000							
<i>NDVI</i>	0.967	0.959	0.964	0.968	0.846	0.250	1.000						
<i>DVI</i>	0.877	0.857	0.871	1.000	0.948	0.209	0.966	1.000					
<i>SAVI1</i>	0.757	0.746	0.753	0.903	0.845	0.196	0.859	0.904	1.000				
<i>SAVI2</i>	0.966	0.956	0.963	0.972	0.857	0.246	1.000	0.970	0.863	1.000			
<i>PVI</i>	0.879	0.860	0.874	1.000	0.947	0.210	0.967	1.000	0.903	0.971	1.000		
<i>MSAVI</i>	0.904	0.889	0.900	0.997	0.919	0.229	0.982	0.996	0.903	0.984	0.997	1.000	
<i>TVI</i>	0.969	0.961	0.966	0.967	0.843	0.251	1.000	0.964	0.856	0.999	0.966	0.981	1.000

如图 1 所示, *LAI* 分别与 *BD4* 及植被指数 *DVI*、*PVI* 有很高的相关性,相关系数分别为 0.946、0.948 和 0.947,与 *NDVI* 的相关系数也高达 0.846。当 *LAI*

大于 5 时,反射率变化已经比较平缓。这表明,随着 *LAI* 的增大,反射率受叶面积的影响逐渐减小,*LAI* 与反射率的关系呈指数关系。

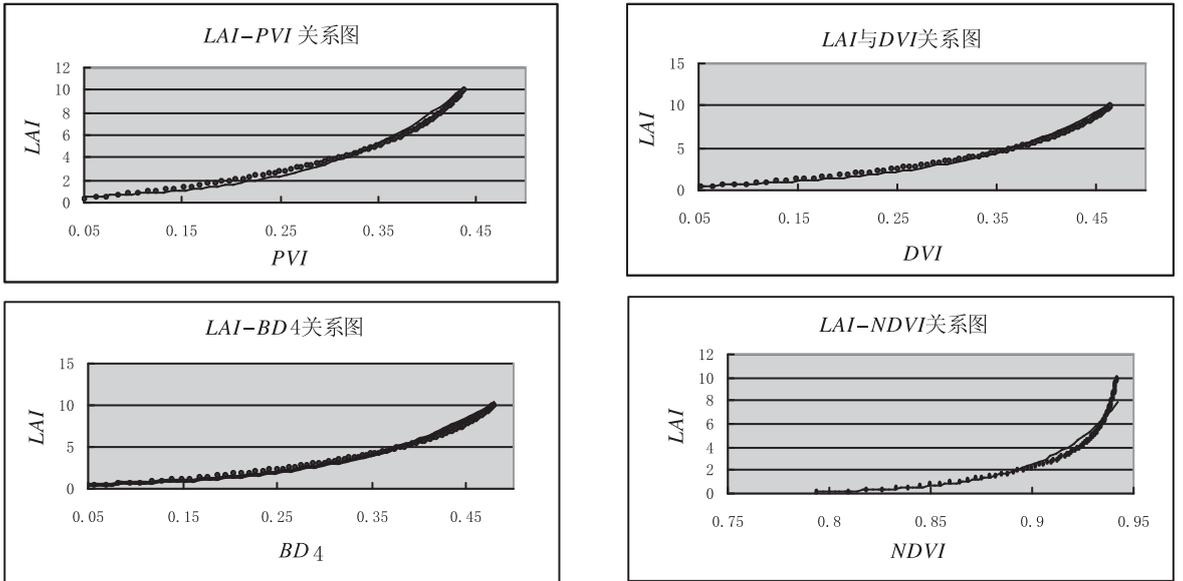


图 1 *LAI* 与几种植被指数的关系趋势图

表 2 *LAI* 与光谱值、植被指数的关系

反演方式	<i>LAI</i> - <i>BD4</i>	<i>LAI</i> - <i>NDVI</i>	<i>LAI</i> - <i>DVI</i>	<i>LAI</i> - <i>PVI</i>
方程	$0.3378 \times e^{7.1248x}$	$7E-11 \times e^{27.063x}$	$0.3571 \times e^{7.2337x}$	$0.3456 \times e^{7.7681x}$
$R^2$	0.9575	0.9779	0.954	0.9561

由表 2 看出, *LAI* 与 *NDVI* 之间的  $R^2$  最高,但是它们之间的相关系数只有 0.846,且 *NDVI* 在植被盖度高于 80% 时灵敏度下降。因此,选择近红外波段进行 *LAI* 制图,结果如图 2 所示。

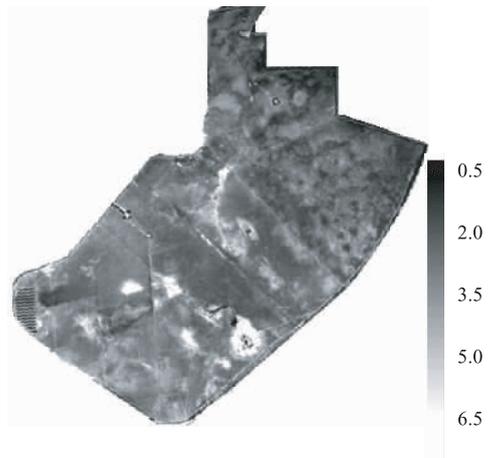


图 2 南大港芦苇地 *LAI*

## 4 结果验证

$LAI$  取 2004 年 6 月 12 日的野外实测数据, 计算公式为:  $LAI = 0.83 \times \text{每样方株数} \times \text{每株叶片数} \times \text{叶长} \times \text{叶宽}$ 。将参数输入 FCR 模型, 通过计算得到模拟的冠层反射率, 以此与实测的冠层反射率数据进行比较, 结果如图 3 所示。

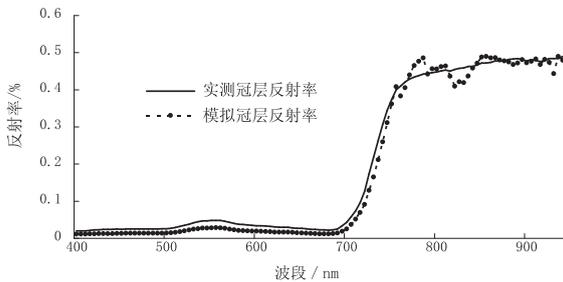


图 3 实测冠层反射率与模拟冠层反射率的比较

实测与模拟冠层反射率相关系数为 0.997,  $RMSE$  为 0.018。由此可见, 利用 FCR 模型反演芦苇的  $LAI$  是可行的。

## 5 结论

基于统计模型和物理模型, 本研究提出了混和模型方法。具体做法是, 首先, 利用 FCR 模型进行计算, 得出芦苇在当时条件下的查找表; 然后, 对查找表进行分析计算, 并得出统计规律; 最后, 根据该统计规律进行芦苇地  $LAI$  制图。研究表明, 该方法的计算简单易行, 且精度较高, 可较精确地用来反演芦苇地的  $LAI$ 。

## REMOTE SENSING LAI RETRIEVAL OF REED MARSH

CHEN Jian<sup>1</sup>, NI Shao-xiang<sup>1</sup>, LI Yun-mei<sup>1</sup>, LI Jing-jing<sup>2</sup>

(1. College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 2. College of Information Sci. & Eng., SUST, Taian 271019, China)

**Abstract:** Leaf area index ( $LAI$ ) is a crucial parameter of vegetation canopy structure and controls a number of biophysical processes of vegetation. In this paper, a mixed model which combines the statistics model with the optical model is presented to estimate  $LAI$  from Landsat-5 TM image data. Firstly, the model calculates and outputs a lookup table (LUT) by using of FCR model. and then,  $LAI$  mapping is conducted based on the empirical relations resulting from the LUT. The results indicate that, being simple and easy to operate, the method can be used to estimate accurately the  $LAI$  of reed marsh.

**Key words:** Leaf area index ( $LAI$ ); Vegetation canopy; Remote sensing; Retrieval; Model; Reed marsh

第一作者简介: 陈 健(1978-), 男, 山东济宁人, 地图学与 GIS 专业博士研究生, 主要从事遥感与 GIS 应用研究。

(责任编辑: 刁淑娟)

## 参考文献

- [1] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] Bacour C, Jacquemoud S, et al. Design and Analysis of Numerical Experiments to Compare Four Canopy Reflectance Models [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79: 72-83.
- [3] Verhoef W. Light scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling, the SAIL Model [J]. Remote sensing and Environment, 1984, 16: 125-141.
- [4] Li X, Strahler A H. Geometric Optical Modeling of a Conifer Forest Canopy [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23(5): 705-720.
- [5] Chen J M, Leblanc S. A 4-Scale Bidirectional Reflection Model Based on Canopy Architecture [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35: 1316-1337.
- [6] Jacquemoud S, Bacour C, et al. Comparison of Four Radiative Transfer Models to Simulate Plant Canopies Reflectance: Direct and Inverse Mode [J]. Remote Sensing and Environment, 2000, 74: 471-481.
- [7] 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.
- [8] Qi J, Kerr Y H, et al. Leaf Area Index Estimates Using Remotely Sensed Data and BRDF Models in a Semiarid Region [J]. Remote Sensing and Environment, 2000, 73: 18-30.
- [9] Fang H L, Liang S L. Retrieving Leaf Area Index With a Neural Network Method: Simulation and Validation [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 9: 2052-2062.
- [10] Kuusk A. Determination of Vegetation Canopy Parameters from Optical Measurements [J]. Remote Sensing and Environment, 1991, 37: 207-218.
- [11] Kuusk A. A Fast, Invertible Canopy Reflectance Model [J]. Remote Sensing and Environment, 1995, 51: 342-350.
- [12] 李云梅. 水稻 BRDF 模型集成与应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2001.
- [13] Meroni M, Colombo R, et al. Inversion of a Radiative Transfer Model with Hyperspectral Observations for  $LAI$  Mapping in Poplar Plantations [J]. Remote Sensing and Environment, 2004, 92: 195-206.
- [14] Gong P, et al. Inverting a Canopy Reflectance Model Using a Neural Network [J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(1): 111-122.