

# 由冠层孔隙度反演植被叶面积指数的算法比较

吴彤,倪绍祥,李云梅,陈健

(南京师范大学地理科学学院,江苏 南京 210097)

**[摘要]** 植被的叶面积指数(LAI)是植被最重要的生态参数之一,也是估算多种植被冠层功能过程的关键参数。迄今已提出的 LAI 的获取方法可归纳为直接测定和间接估算两大类。本文以河北省黄骅市为研究区,从遥感光学模型建立机理及数量分析的角度,对由植被冠层孔隙度反演植被 LAI 的 4 种间接估算方法进行了试验和比较。研究结果表明, LAI 与植被盖度之间呈明显的正相关关系,即随着 LAI 的增大,植被盖度也在增大。在这 4 种估算方法中, LAI - 2000 算法最适用于研究区植被 LAI 的估算。

**[关键词]** 遥感,叶面积指数,算法,植被冠层,孔隙度

**[中图分类号]** TP79 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2006)01-0111-05

## A Comparison on the Algorithms for Retrieval of LAI Based on Gap Fraction of Vegetation Canopy

Wu Tong, Ni Shaoxiang, Li Yunmei, Chen Jian

(School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract:** The leaf area index (LAI) of vegetation is one of the most important structure parameters used in the ecological system studies and one of the key parameters used in estimating the varied function process of vegetation canopy. At present, there are basically two kinds of method in obtaining LAI, i. e. the direct measurement and indirect estimation. In this paper, from the point of view of the mechanism of developing the optical models and through quantitative analysis, four indirect methods used for LAI retrieval based on the gap fraction of vegetation canopy are analyzed and compared. Through this way, it was found that among these algorithms the LAI - 2000 algorithm is most suitable for estimating LAI in the study area. In addition, a nonlinear positive correlation exists in the relation between LAI and vegetation coverage. In other words, with the increase of LAI, vegetation coverage of the research area appears to nonlinearly go up.

**Key words:** remote sensing, LAI (leaf-area-index), algorithm, vegetation canopy, gap fraction

## 0 引言

植被叶面积指数(leaf-area-index, 简称 LAI)是植被的一项重要生态学参数,等于水平地表单位面积上植被总的叶面积的一半。LAI 常用于分析在不同生长期和不同环境条件下植被冠层发育和冠层结构的差异以及植被冠层的动力扰动机理<sup>[1-2]</sup>。研究表明, LAI 与植被生态系统的生产力之间存在很高的相关性<sup>[3-4]</sup>。此外,通过遥感手段准确获取 LAI 数据对全球变化研究也有重要意义。

然而,尽管在 LAI 数据的遥感获取上已做过许多探讨,但是如何更为准确、有效地获取 LAI 数据仍是一个有待进一步深入研究的问题。目前,获取 LAI 的方法可归纳为直接测量和间接估算两类。本文所采用的冠层孔隙度反演法属于间接估算法,它已成功地应用于小灌木和树木冠层参数的估算<sup>[4-5]</sup>。可是,关于冠层孔隙度反演法尽管前人已提出和尝试过不同算法,但其反演效果和可靠性不尽相同。因此,从实用角

收稿日期: 2005-09-28。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40371081),江苏省研究生创新计划基金资助项目(1612005012)。

作者简介: 吴彤,女,1980—,硕士研究生,主要从事遥感与 GIS 应用的学习与研究。E-mail: wutongxuan2@163.com

通讯联系人: 倪绍祥,1939—,教授,博士生导师,主要从事遥感与 GIS 应用的教学与研究。E-mail: sxni@njnu.edu.cn

度来说很有必要对这些方法进行研究,以便遴选出相对来说更为可靠的 LAI 反演方法.

本文以河北省黄骅市为研究区,从 LAI 光学模型的建立机理及统计学角度出发,对利用冠层孔隙度反演法估算植被 LAI 的 4 种算法进行了试验和比较,并试图从中寻找最准确和有效反演研究区植被 LAI 的算法.

## 1 数据采集与研究方法

### 1.1 数据采集

黄骅市位于河北省沧州市以东的渤海湾沿岸,地形为海拔 3~7 m 的滨海平原,多坑塘、洼淀.气候为暖温带季风气候.土壤以滨海盐渍化潮土和盐土占优势.植被除农作物外,主要是芦苇地和伴生有碱蓬等耐盐植物的禾本科杂草地,此外还有果园.

野外数据采集时间为 2004 年 6 月 11~14 日,采样地点分别在黄骅市的岭庄果园、李官庄水库枣园、黄灶、中捷友谊农场及杨官庄等地.选择了果树、芦苇和杂草 3 类样区,其中:岭庄果园和李官庄水库枣园为果树,株高约 2.5 m,平均盖度约 46%;黄灶为芦苇,株高为 1~1.4 m,平均盖度约 78%;中捷友谊农场和杨官庄为禾本科杂草地,株高约 0.5 m,平均盖度 39%.在采样期间,植被均处于旺盛生长期.

在上述 3 类样区,按系统采样法的空间统计要求<sup>[6]</sup>选定了 25 个采样点,并用 GPS 进行精确定位.在每个采样点,先建立面积为 30 m×30 m 的大样方,然后在其内部再进一步设置面积为 7.5 m×7.5 m 的小样方(见图 1).被采样的植被冠层在行内连续分布,行间则有较大间隔.

利用美国 Regent Instrument 公司生产的鱼眼数码相机在实地获取植被冠层的球形图像.具体做法是,将配有支架的相机放在冠层较为均一的植被下方,使相机保持水平状态,离地面约 0.1 m.在确保相机的视场内无人的情况下用遥控器控制相机,自下向上获取植被冠层图像,并将数据存储于记忆卡中.图 2 为相机拍摄的芦苇冠层图像.

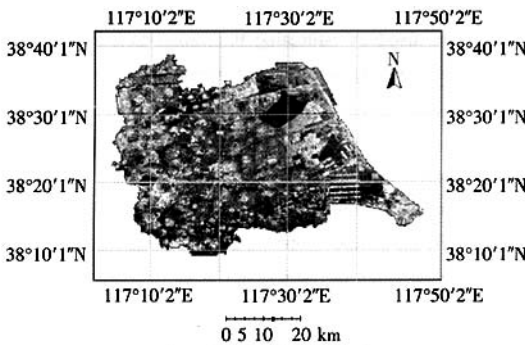


图 1 研究区采样点分布图

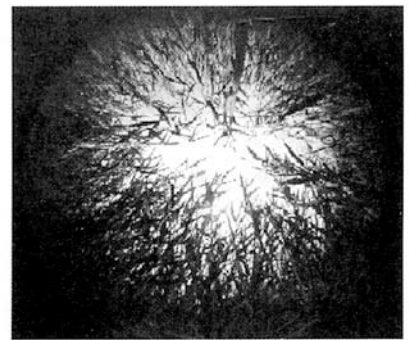


图 2 用数码相机获得的芦苇冠层图像

用 WinSCANOPY 2004a 处理植被冠层图像并获得冠层孔隙度数据,将其用于随后的 4 种不同算法的 LAI 的反演.为了验证 4 种反演算法的 LAI 反演精度,在野外还进行了各样方的植被盖度的同步测定.

### 1.2 分析方法

目前已提出的 LAI 反演方法都基于植被冠层孔隙度进行反演,这些方法主要由 Beer-Lambert 模型<sup>[7-8]</sup>和一维反演模型<sup>[9]</sup>发展而来.这两种模型均假设植被冠层孔隙度在空间呈随机分布;但因天顶角不同,不同高度植被冠层的孔隙度呈现不同的消光状况.

Beer-Lambert 模型比较简单,它用消光系数  $k$  (代表冠层叶片的光谱特性和叶角分布) 来代表光线通过冠层时的消光指数.冠层下的光强度为  $Q_i$ ,冠层顶部的光强度为  $Q_0$ ,LAI 可表示为:

$$Q_i = Q_0 e^{-kLAI}, \quad (1)$$

求解方程(1)得

$$LAI = -\ln(Q_i/Q_0)/k, \quad (2)$$

式中, $Q_i/Q_0$  为冠层孔隙度,  $k$  为消光系数.叶倾角呈球形分布的冠层,  $k$  约为 0.50;叶呈线性、垂直分布的

冠层,  $k$  小于 0.3; 叶呈水平分布的冠层,  $k$  大于 1.0. 在通常情况下, 植被冠层的消光系数介于 0.1 ~ 1.0 之间<sup>[9]</sup>. Jarvis 与 Leverenz 的研究表明<sup>[7]</sup>, 13 种针叶林和阔叶林的消光系数都介于 0.28 ~ 0.65 之间, 均值为 0.47.

一维反演模型需要利用两个或两个以上的天顶角来估算植被冠层孔隙度, 并计算出平均叶倾角. 由于鱼眼照相机和冠层分析仪可同步获取天顶角数据, 所以一维反演模型对这两种仪器较为适用.

本研究利用从球形图像中获取的植被冠层孔隙度数据反演 LAI. WinSCANOPY 2004a 有 4 种算法: 一是基于 Beer-Lambert 模型的 Bonhomme & Chartier 算法<sup>[10]</sup>, 该算法将消光系数定为 0.91; 其余 3 种算法由一维反演模型演化而来, 分别为 LAI-2000 算法、LAI-2000 改进型算法及 Campbell 椭球分布算法<sup>[5,9]</sup>. 这 4 种算法的假设条件是: 1) 叶片的方位角呈随机分布; 2) 相对于视场角而言, 叶片足够地小; 3) 叶在空间上呈随机非聚集分布; 4) 叶片 100% 不透光. 经实地观测, 研究区的植被基本符合这 4 个假设条件.

2 结果与讨论

以下以 LAI 光学模型的建立机理为着眼点, 使用统计学方法, 分析由不同算法得到的 LAI 与植被盖度的关系, 其中包括 LAI 估算结果与植被盖度的关系以及 LAI 估算结果的对数平均值与植被盖度的关系. 其主要目的, 是分析和比较 4 种算法的 LAI 反演精度, 并通过分析误差产生的根源来寻求最适合研究区植被 LAI 反演的算法.

2.1 不同算法提取 LAI 的比较

用 4 种算法对研究区 3 种典型植被 (果树、芦苇和杂草) 的 LAI 的反演结果见表 1.

表 1 不同算法获得的 LAI

植被 种类	Beer-Lambert 模型		一维反演模型	
	Bonhomme & Chartier 算法	LAI-2000 算法	LAI-2000 改进型算法	Campbell 椭 球分布算法
果树	0.998	0.480	0.217	0.467
	0.280	0.135	0.060	0.165
	0.620	0.275	0.115	0.240
	3.564	2.194	1.866	1.834
芦苇	3.750	2.217	1.627	1.910
	4.235	3.070	3.620	3.040
	0.130	0.052	0.028	0.100
杂草	0.576	0.455	0.243	0.348
	0.692	0.418	0.388	0.428

从表 1 中可以看出, 3 种典型植被的 LAI 存在较大差异. 果树和杂草的 LAI 值较为接近且均小于 1; 芦苇的 LAI 值明显高于果树和杂草, 最大值为 4.235. 这样的 LAI 值分布情况与子样区的植被盖度有着密切的联系. 黄灶的植被盖度较大 (接近 78%), 作为优势种的芦苇, 其叶面积均超过了 1, 值域为 1.627 ~ 4.235. 而岭庄果园和中捷友谊农场这两个子样区的植被盖度较小 (分别为 46% 和 39%), 对应的优势种的 LAI 都较小, 最大值仅为 0.998. 由此可见, 植被盖度与 LAI 之间存在正相关关系, 即随着 LAI 的增大, 植被盖度增大.

同时, 还可以发现用 Beer-Lambert 模型所得到的 LAI 值要高于一维反演模型的反演结果, 约高出 39.3% ~ 366.7%, 这与算法本身的要求密切相关. 由于在野外采集球形图像时, 天气以多云为主, 即使晴朗也是在日落前后. 该情况下天空散射光强烈, 而直射光不强. 根据算法的采样要求, LAI-2000、LAI-2000 改进型及 Campbell 椭球分布算法需要散射光 (阴天或日落后), 而 Bonhomme & Chartier 算法需要直射光 (晴朗无云). 在这样的采样条件下, Bonhomme & Chartier 算法将大量的散射 PAR 作为直射 PAR 参与计算, 使得反算结果偏大.

再从算法建立的假设条件来看, Bonhomme & Chartier 算法将消光系数定为 0.9, 即假定叶片呈水平分布. 水平分布的叶片投影系数较大, 孔隙度较小, 计算出的 LAI 值较大. 由于研究区的植被叶片并非水平分布, 其反演结果必然大于真实值. 综上所述, Bonhomme & Chartier 算法的偏差较大, 不能满足本研究的需要, 在下文的分析中将不再考虑该算法.

再者,由表 1 可见,LAI-2000 算法的反演结果普遍大于 LAI-2000 改进型算法的结果,而与 Campbell 椭球分布算法的结果相近.这主要与 LAI-2000 改进型算法视场角的变化有关.尽管 LAI-2000 改进型算法在 LAI-2000 算法的基础上将视场角扩大到 360°,可以满足空间取样的要求,但受冠层内多次散射的影响,天顶角越小多次散射的影响越小,天顶角越多次散射的影响越大.所以,当 LAI-2000 改进型算法将角度扩大到任意范围时,多次散射的影响很大,使得反演结果偏小.

鉴于以上分析,笔者认为相对于 Bonhomme & Chartier 算法和 LAI-2000 改进型算法而言,LAI-2000 算法和 Campbell 椭球分布算法的反演精度较高.

2.2 不同算法获得的 LAI 与植被盖度的拟合

从上文的分析可知,LAI 与植被盖度呈明显的正相关,即随着 LAI 的增大,植被盖度增大.为了检验由光学模型建立机理角度分析所得结论的可靠性,在野外采集数据时,同步测定了各样点的植被盖度,用实测的植被盖度与由 3 种算法反演的 LAI 建立相关关系,通过拟和二者的关系,找出反演精度较高的算法.表 2 中列出了 3 种算法所反演的 LAI 与实测植被盖度相关性最高的一元三次多项式回归模型、相关系数( $R^2$ )及显著性水平(Sig.),其中, $x$  为 LAI, $y$  为植被盖度.

表 2 不同算法获得的 LAI 与实测植被盖度的相关分析

LAI 算法	一元三次多项式回归模型	$R^2$	Sig.
LAI-2000 算法	$y = 5.3195x^3 - 35.892x^2 + 85.329x + 11.424$	0.944 1	0.05
LAI-2000 改进型算法	$y = 10.083x^3 - 63.21x^2 + 117.32x + 15.312$	0.900 9	0.05
Campbell 椭球分布算法	$y = 9.9544x^3 - 59.545x^2 + 116.71x + 5.5937$	0.943 0	0.05

注: $x$  为 LAI, $y$  为实测植被盖度, $R^2$  为相关系数,Sig. 为显著性水平.

由表 2 可见,3 种算法所反演的 LAI 与实测植被盖度之间都有很高相关性,且随 LAI 的增大植被盖度呈非线性增长.这说明,虽然因算法本身的要求使得 LAI 的反演结果产生了部分偏差,但总的来说 3 种算法所反演的 LAI 都能较好反映研究区的植被状况,其中以 LAI-2000 算法的反演精度更高.

前文已分析了 LAI-2000 改进型算法的反演结果产生偏差的原因,这里不再重复.下面从鱼眼照相机本身的缺陷来分析 Campbell 椭球分布算法反演精度略偏低的原因<sup>[11]</sup>.WinSCANOPY 2004a 在对球形图像的像元进行分类时用图像的亮度值来区分天空和植被,由此产生一个二进制图像.目前,球形分析系统还不能去除植被冠层内的光传播和光反射的影响,这对 Campbell 椭球分布算法的影响较大.而且,WinSCANOPY 2004a 中设置有一个像元分类器,用户可根据自己的经验调整分类结果,这也会使 Campbell 椭球分布算法的估算值产生部分偏差.此外,鱼眼照相机从 8 个方位获取 20 个天顶角数据,并根据这些数据反推植被冠层的孔隙度;而 Campbell 椭球分布算法却对天顶角变化非常敏感,故引起 LAI 的反演误差.综合以上因素可以认为,Campbell 椭球分布算法的误差累积效应相对较大,故其 LAI 的反演精度相对较低.

2.3 LAI 估算值的对数平均与植被盖度的关系

对于 LAI-2000、LAI-2000 改进型及 Campbell 椭球分布算法而言,研究者迄今尚未找到消除叶片聚集分布影响的最佳方法,所以不连续、非同质冠层的 LAI 往往会被低估<sup>[11-12]</sup>.在研究区,芦苇的生长状况较为均一,而果树和杂草都不很均一.同时,由于研究区植被的冠层要素呈聚集分布而非随机分布,聚集分布的叶片冠层透光率比随机分布的高,这也是造成 LAI 被低估的原因之一.Gardingen 等曾提出用对数平均(“Log 平均”)来弥补非随机、不连续冠层聚集效应的影响<sup>[13]</sup>,WinSCANOPY 2004a 中就有此处理方法.

我们分析了 3 种算法估算结果的“Log 平均”与植被盖度之间的关系,试图通过此方法检验在弥补了非随机、不连续冠层聚集效应影响之后,LAI-2000 算法是否依然是反演精度最高的算法.由图 3 可见,在对各算法反演的 LAI 进行“Log 平均”平均后,它们与植被盖度之间仍有很高相关性.也就是说,虽然“Log 平均”的相关性不如线性算法的高,但仍能较好反映 LAI 与植被盖度的正相关关系.这与前面提到的结论一致,即 LAI-2000 算法是能最有效反映研究区植被状况的算法.

3 结论

通过上述研究,得到以下几点结论:

(1) 通过比较不同算法所反演的植被 LAI 的差异,分别建立了各算法所反演的 LAI 与植被盖度以及

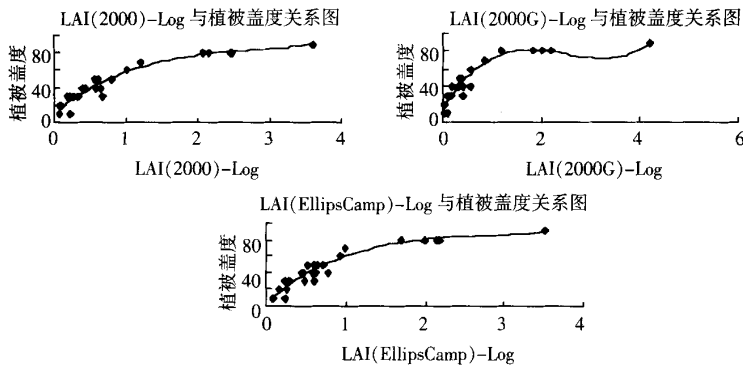


图3 LAI的“Log 平均”与植被盖度的相关分析

反演的 LAI 的“Log 平均”与植被盖度之间关系的统计模型,发现 LAI 与植被盖度之间存在非线性正相关关系,而且 LAI-2000 算法是最适合研究区植被 LAI 反演的算法。

(2) 植被 LAI 反演数据误差的主要来源:一、鱼眼照相机。是球形图像不能准确地估算 LAI,人为设置光阈值是其产生误差的主要原因,其次是由于各种算法对天顶角的要求不同,球形图像从天顶角获取瞬时冠层信息,因而鱼眼照相机对不同算法非常敏感。二、采样的时间和空间选择。根据不同反演算法的要求,应选取合适的采样时间和空间,如果采样时间和空间选择不当都会对 LAI 的反演产生很大影响。

(3) 植被 LAI 的反演受植被冠层类型、特征和分析方法的影响很大,而各算法的原理和所用参数又不同,因此寻求更为可靠和稳定的植被 LAI 反演算法有待做进一步深入研究。

#### [参考文献]

- [1] Clark D B. The role of disturbance in the regeneration of neotropical moist forest reproductive[M]. Park Ridge: Parthenon, 1990: 291—315.
- [2] Lawton R O. Canopy gaps and light penetration in wind-exposed tropical lower montane rain forest[J]. Can J For Res, 1990, 20: 659—667.
- [3] Waring R H. Estimates of forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area[J]. Adv Ecol Res, 1983, 13: 327—354.
- [4] Webb W L, Lauenroth W K, Szarek S R, et al. Primary production and abiotic controls in forests, grasslands, and desert ecosystems in the United States[J]. Ecology, 1983, 64: 134—151.
- [5] Campbell G S, Norman J M. The Description and Measurement of Plant Canopy Structure. Plant Canopies: Their Growth, Form, and Function[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989: 1—19.
- [6] 周国法,徐汝梅. 生物地理统计学[M]. 北京:科学出版社,1998: 146—150.
- [7] Jarvis P G, Leverenz J W. Encyclopedia of Plant Physiology[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1983: 233—280.
- [8] Marshall J D, Waring R H. Comparison of methods of estimating leaf-area index in old-growth Douglas-fir[J]. Ecology, 1986, 67: 975—979.
- [9] Campbell G S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986, 36(4): 317—321.
- [10] Bonhomme R, Chartier P. The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency[J]. Israel J Agric Res, 1972, 22: 53—61.
- [11] Dufrene E, Bréda N. Estimation of deciduous forest leaf-area index using direct and indirect methods[J]. Oecology, 1995, 104: 156—162.
- [12] Chason J W, Baldocchi D D, Huston M A. Comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf-area[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 57(1/3): 107—128.
- [13] van Gardingen P R, Jackson G E, Hernandez-Daumas S, et al. Leaf area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 94(3/4): 243—257.

[责任编辑:陆炳新]