

基于 *LAI* 的东亚飞蝗发生面积的预测模型

吴 彤,倪绍祥,李云梅

(南京师范大学地理科学学院,南京 210097)

摘要:20 世纪 80 年代以来东亚飞蝗在我国再度猖獗危害,及时、准确地监测东亚飞蝗的危害状况,对于东亚飞蝗的有效防治有重要意义。以河北省黄骅市为研究区,从光学模型的建立机理为着眼点,定量分析和对比了 4 种由植被冠层孔隙度反演 *LAI* 的算法。结果表明,*LAI* 与植被指数之间呈明显的正相关关系,即随着 *LAI* 的增大,植被指数也在增大;在 4 种估算方法中,*LAI*-2000 算法最适用于研究区植被 *LAI* 的估算。此外,还分析了 *LAI* 与飞蝗发生面积的关系,发现两者呈负相关。并在此基础上建立了飞蝗发生面积的预测模型,即: $ALO = -a \ln(LAI) + b$, 其中, a 、 b 为调节系数。

关键词:冠层孔隙度;叶面积指数;植被指数;东亚飞蝗;预测模型

文章编号:1000-0933(2006)03-0862-08 **中图分类号:**TP79 **文献标识码:**A

Research on the forecasting model about area of the outbreak from oriental migratory locust using of *LAI*

WU Tong, NI Shao-Xiang, LI Yun-Mei (College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 862 ~ 869.

Abstract: Since 1980s of the 20th century, outbreak of oriental migratory locust has rampantly emerged again in some regions of China. It is particularly important to monitor timely and accurately the intensity of damage from oriental migratory locust (*Locusta migratoria manilensis* Meyen) for realizing efficient control and prevention of this kind of insect pest. In this study, Huanghua city in Hebei province was taken as the study area. From the point of view of the mechanism of developing the optical models, four algorithms used for *LAI* retrieval based on the gap fraction of vegetation canopy were quantitatively analyzed and compared. These methods are the Bonhomme & Chartier algorithm, the *LAI*-2000 algorithm, the improved *LAI*-2000 algorithm and the Campbell's ellipsoid distribution algorithm, respectively. Three types of vegetation which are most popularly distributed in the study area, i. e. reeds, cottons and weeds, are selected as the targets and the original datum of vegetation get collected from 14 sampling sites and used in the study. A fish-eye digital camera manufactured by the Regent Instrument Company was utilized to obtain the spherical images of vegetation canopy, and WINSCANOPY2004a was made use of in processing of the datum of gap fraction of vegetation canopy.

In order to compare the accuracy of *LAI* retrieved by four kinds of algorithms and find out one which is mostly applicable to *LAI* retrieval in the study area, the relations between *LAI* retrieved by the different kinds of algorithms, their logarithmic averages of the retrieved *LAI* and the corresponding vegetation index are statistically analyzed, respectively. The results show that, firstly, a positive correlation exists between the retrieved *LAI* and vegetation index for all three kinds of vegetation in the study area. Secondly, the accuracy of *LAI* retrieval by the *LAI*-2000 algorithm and the Campbell's ellipsoid distribution algorithm is higher than that of the Bonhomme&Chartier algorithm and the improved *LAI*-2000 algorithm. Thirdly, with the Bonhomme&Chartier algorithm excluded, the fitting process between *LAI* retrieved by the other three kinds of algorithms and *RDVI* retrieved from TM

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40371081)

收稿日期:2005-07-01; **修订日期:**2006-02-01

作者简介:吴彤(1980~),女,江苏苏州人,硕士生,主要从事遥感与 GIS 应用研究. E-mail: wutongxuan2@163.com

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China(No.40371081)

Received date: 2005-07-01; **Accepted date:** 2006-02-01

Biography: WU Tong, Master, mainly engaged in application of remote sensing and GIS. E-mail: wutongxuan2@163.com

indicates that these algorithms all perform much well to reveal the growing conditions of vegetation in the study area, and, among them the LAI-2000 algorithm is the best one in terms of the accuracy of LAI retrieval. Finally, the fitting between the logarithmic average of the LAI retrieved by three kinds of algorithms and RDVI retrieved from TM also shows that the LAI-2000 algorithm is the greatest for the LAI retrieval of the vegetation in the study area. In addition, it is found that a negative correlation exists in the relation between LAI and the area where the locust outbreak appeared. In other words, with the decrease of LAI, the area in which the locust outbreak appears increased. Following this step, a forecasting model based on the datum of outbreak areas and LAI was developed to predict the area where the locust outbreak(ALO) would emerge, which is $ALO = - a \ln(LAI) + b$. In this fitting, a and b are both adjustable coefficients.

Key words: gap fraction; leaf area index (LAI); vegetation index; oriental migratory locust; forecasting model

飞蝗是一种危害性极大的农业害虫。全世界已知有 1 个种和 10 个亚种,我国有 3 个亚种,即东亚飞蝗、亚洲飞蝗和西藏飞蝗。其中,东亚飞蝗孳生区广,抗逆性和繁殖力强,食量大,并具成群聚集、远距离迁飞及发生和成灾有突发性等特点。20 世纪 80 年代以来,因全球异常气候及人类活动等影响,蝗害在我国各地频繁发生^[1],对农牧业造成了巨大损失^[2]。

从 20 世纪 70 年代起,国外就开始探索利用卫星遥感技术进行蝗虫的监测^[3~6]。近年来,我国也开始了这方面的研究。其中,主要是利用卫星遥感影像监测与蝗虫发生关系密切的生境因子,而植被的监测是其中的重要内容之一。但总体来说,考虑的植被因子较为单一,多选择图像植被指数与蝗灾发生数据建立关系,很少涉及到叶面积指数等与生物量密切相关的指标^[7,8]。即使涉及,也是间接地从遥感影像上提取植被指数(通常为 NDVI),再用公式转换成 LAI。

本文采用的冠层孔隙度反演 LAI 的方法在地面测定并获取数据,避免了大气的干扰作用,其已成功用于小灌木和树木冠层参数的估算^[9,10]。但是,对于这种光学模型法,尽管前人已提出和尝试过不同的算法,但其反演效果和可靠性不尽相同。因此,必须针对不同的研究区、不同的植被类型,遴选出更为准确、可靠的 LAI 反演方法。

本文以东亚飞蝗主要发生区之一的河北省黄骅市为研究区,对比分析了利用冠层孔隙度反演 LAI 的 4 种算法,以寻找最能反映研究区植被状况的算法,并用该算法的反演结果对飞蝗的危害程度进行划分。

1 资料与方法

1.1 研究区

研究区所在的黄骅市位于河北省东南部,地形为沼泽化滨海平原,海拔 3~7m,多坑塘、洼淀。气候为暖温带季风气候,四季分明。土壤以滨海盐渍化潮土和盐土占优势。农作物有小麦、玉米、高粱、大豆、棉花、麻类等。自然植被主要是耐盐碱的芦苇和杂草;芦苇分布在黄灶、滕南、杨官庄等地,杂草有黄须、马绊、羊角、蒿、碱蓬等,常以撂荒地的形式出现。这些芦苇地和杂草荒地为东亚飞蝗的孳生提供了良好的生存环境。

1.2 数据采集与处理

1.2.1 地面数据 由于 8 月中旬飞蝗的蝗蝻正处于三龄期,也是大量啃食植被的时期,因此选择 2004 年 8 月 9~11 日分别在黄灶、滕南大洼及中捷友谊农场 3 个样区进行采样(表 1)。

按系统采样法的空间统计要求^[11],确定了 14 个采样点,样点间距大于 30m(考虑 TM 的像元大小)。在每个样点,随机测 4~5 个点,并用差分 GPS 精确定位(误差控制在 1m 以内)。为提高精度,同一样点测 2~3 次,取其均值。样点布设见图 1。被采样的植被冠层在行内连续分布,行间则有较大的间隔。

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

表 1 采样区概况

Table 1 General status of the sample areas		
采样区	植被类型	植被盖度(%)
Sample areas	Types of vegetation	Canopy closure
黄灶 Huang Zao	芦苇 Reed	87
滕南大洼 Teng-Nan Billabong	棉花 Cotton	79
中捷友谊农场 Zhong-Jie Friendship Farm	玉米、棉花为主,还有碱蓬和黄须 Corn and cotton (chiefly), Suaeda spp. and Aremisia spp. (secondarily)	65

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 0.1m。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。

用 WinSCANOPY 2004a 处理植被冠层图像并获得冠层孔隙度数据,将其用于随后的四种不同算法的 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叶长、叶宽的同步测定。

1.2.2 遥感数据 因 2004 年 8 月 9 日 Landsat-5 过境时天空多云,故采用 2003 年 8 月 14 日 Landsat-5 TM 图像,轨道号为 122/33。在利用 6S 软件求算 TM 各波段的大气校正系数之后,利用 ENVI 的 BAND MATH 功能模块进行图像的大气校正;然后,采用一次多项式、最近邻重采样法进行 TM 图像的几何校正,总误差为 0.2694 个像元。

1.2.3 飞蝗数据 采用黄骅市植保站 2004 年 8 月 7~13 日调查的秋蝗资料。采样区主要在飞蝗多发的黄灶、滕南大洼等地。数据主要包括样点数、有蝗样点数及秋蝗密度、不同密度的面积、受灾总面积和秋蝗最高密度等。本文所用数据为不同密度的面积及受灾总面积。

1.3 LAI 反演模型概述

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^[12,13]和一维反演模型^[13]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^[14]。Jarvis 与 Leverenz 的研究表明^[12],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,并求出平均叶倾角。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^[15],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^[10,14]。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

下文以光学模型的建立机理为着眼点,从统计学的角度出发,由各算法得到的 LAI 与实测 LAI 的关系;不同算法反演的 LAI 的差异;各算法得到的 LAI 与植被盖度的关系,包括估算结果与植被盖度的关系、估算结果的对数平均与植被盖度的关系等方面入手,进一步分析、比较 4 种算法的反演精度,找出误差产生的根源,并寻求最适合于研究区的一种算法。

2.1 反演精度检验

为了验证由各种算法反演的 LAI 的精度,用野外测量的样点植被的叶长、叶宽粗略地计算了 LAI ,并将其与算法反演的 LAI 进行了拟合。本文采用面积(系数)法是对样本叶片,直接测量叶长、叶宽,用叶长和叶宽之积,乘以校正系数(k),以 cm^2 为单位,计算单位土地面积上的绿色叶面积的倍数,即叶面积指数(LAI)。方程

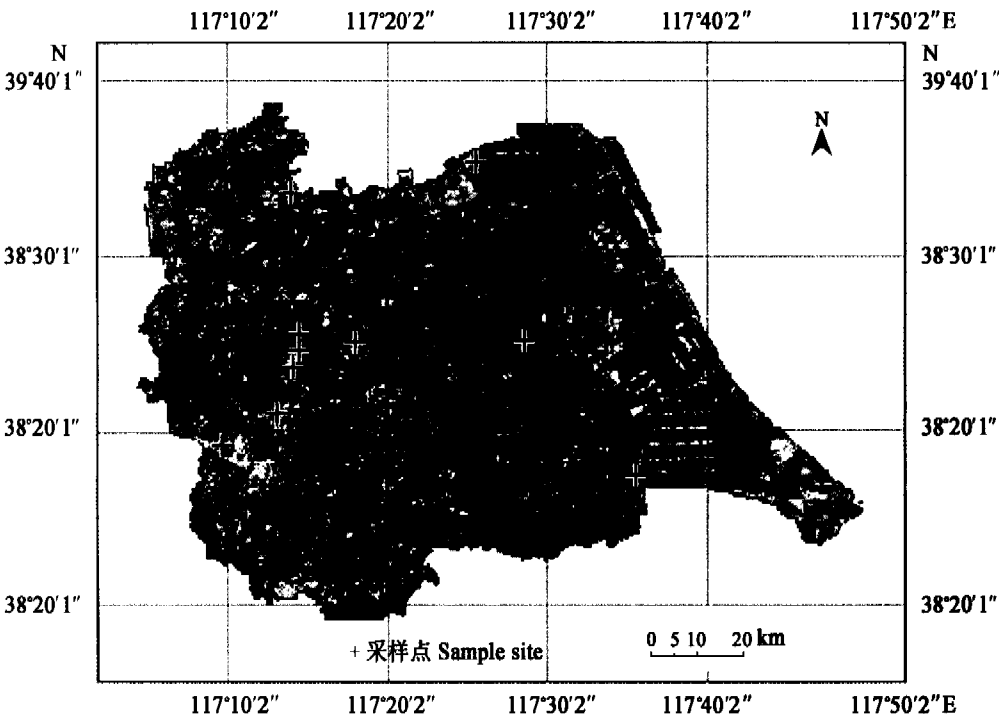


图 1 研究区采样点分布图
Fig. 1 The distribution of sample sites in the study area

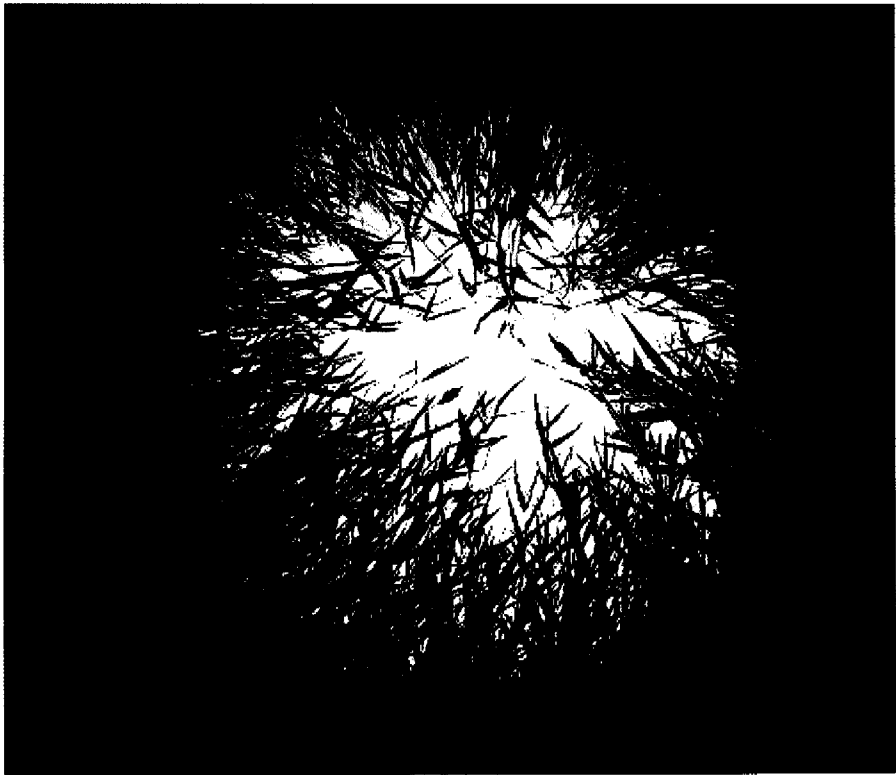


图 2 用数码相机获得的芦苇冠层图像
Fig. 2 The canopy image of reeds taken by the digital camera

如下:

$$LAI = 0.83 \times L \times W$$

(3)

其中,叶长为 L ,叶宽为 W ,单位为 cm , k 取 0.83。由于校正系数随不同的作物、品种、生育阶段、环境条件,叶形变化均可不同,需要进行部分校正。表 2 列出了 4 种算法所反演的 LAI 与野外测量估算值的一元线性回归模型以及相关系数。

由表 2 可知,各算法的反演结果与野外实测值之间有较好的相关关系,并且均通过了显著性水平检验。也就是说,光学模型的 LAI 的反演结果与真实值较为接近,能较好地反映研究区的植被生长状况,可以用于研究区植被的监测。

2.2 不同算法提取 LAI 的比较

用 WinSCANOPY 2004a 处理球形图像,再用从图像中获得的冠层孔隙度反演 LAI 。表 3 列出了用 4 种算法对 3 个样点的 3 种典型植被(棉花、芦苇和杂草)的 LAI 的反演结果。

从表 3 可见:(1)棉花和杂草的 LAI 较小,而芦苇的 LAI 明显高于棉花和杂草,最大值达 4.390。此反演结果与实地观测的样区的植被盖度状况有密切关系:黄灶样区以芦苇为主,盖度接近 87%,其 LAI 均超过 2,在 2.105~4.390 之间;滕南大洼样区和中捷友谊农场样区的植被盖度分别为 79% 和 65%,它们的 LAI 较小,最大值仅为 2.428。由此可见,反演的 LAI 与植被盖度大致为正相关关系,即随着 LAI 的增大植被盖度也增大。换句话说,反演的 LAI 与地的植被状况较为符合。

表 3 用不同模型和算法获得的 LAI 的比较

Table 3 Comparison of LAI derived by the different models and algorithms

植被种类 Types of vegetation	Beer-Lambert 模型 Beer-Lambert Models				一维反演模型 One-dimensional retrieval models	
	Bonhomme&Chartier 算法 Bonhomme&Chartier algorithm	LAI-200 算法 LAI-200 algorithm	LAI-2000 改进型算法 Improved LAI-2000 algorithm	Campbell 椭球分布算法 Campbell's ellipsoid distribution algorithm		
芦苇 Reed	4.390	2.600	2.105	2.290		
棉花 Cotton	2.023	1.463	1.155	1.150		
杂草 Weed	2.428	1.340	0.918	1.092		

(2)Beer-Lambert 模型所反演的 LAI 高于一维反演模型的反演结果,其原因与不同算法自身要求的条件有关。 LAI -2000 算法、 LAI -2000 改进型算法及 Campbell 椭球分布算法都需有散射光(阴天或日落后),而 Bonhomme&Chartier 算法需要直射光(晴朗无云)。在样地采集球形图像时以多云天气为主,天空直射光不强,而散射光较强烈。在这样的情况下, Bonhomme&Chartier 算法将大量的散射 PAR 作为直射 PAR 参与计算,造成 LAI 的反演结果偏大。此外,反演结果与算法建立的假设条件也有关。Bonhomme&Chartier 算法将消光系数定为 0.9,即假定叶片呈水平分布;而水平分布的叶片投影系数较大,孔隙度较小,使 LAI 的反演值偏大。研究区的植被叶片实际上并非呈水平分布,故其 LAI 反演结果必然大于真实值。由于 Bonhomme&Chartier 算法的反演结果偏差较大,故在下文的分析中不再考虑该算法。

(3) LAI -2000 算法的反演结果与 Campbell 椭球分布算法相近,它们普遍大于 LAI -2000 改进型算法。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° ,可满足空间取样的要求,但受冠层内多次散射影响,即天顶角越小多次散射影响越小,反之亦然。因此,当 LAI -2000 改进型算法将视场角扩大到任意范围时,受多次散射的影响很大,导致 LAI 反演结果偏小。

鉴于以上分析可以认为, LAI -2000 算法和 Campbell 椭球分布算法的 LAI 反演精度要高于

Bonhomme&Chartier 算法和 LAI-2000 改进型算法。

2.3 各算法得到的 LAI 与的 RDVI 拟合

遥感 VI 是反映植被生长状况的重要参数,其已较为成功地用于害虫监测的研究。同时,VI 也是表征 LAI 的一项重要指标。为了找出最适合反映研究区植被生长状况的 LAI 算法,下文拟合了从 TM 影像中选取的 VI 与 3 种算法反演的 LAI 之间的关系。通过分析研究区的植被盖度数据,选取再归一化植被指数(RDVI)进行拟合。表 4 为 3 种算法所反演的 LAI 与 RDVI 相关性最高的一元三次多项式回归模型。其中, x 为 LAI, y 为 VI。

表 4 不同算法获得的 LAI 与 VI 的相关分析

Table 4 Correlation analysis between LAI derived by the different algorithms and VI

LAI 算法 LAI algorithms	一元三次多项式回归模型 The cubic equation regression models	R^2	Sig.
LAI-2000 算法 LAI-2000 algorithm	$y = 0.0744x^3 - 0.4095x^2 + 0.7224x - 0.0894$	0.774	0.05
LAI-2000 改进型算法 Improved LAI-2000 algorithm	$y = 0.0451x^3 - 0.2372x^2 + 0.3832x + 0.1143$	0.656	0.05
Campbell 椭球分布算法 Campbell's ellipsoid distribution algorithm	$y = 0.0794x^3 - 0.3855x^2 + 0.6107x + 0.0046$	0.705	0.05

由表 4 可见,3 种算法所反演的 LAI 与 RDVI 之间都有很高相关性,且随 LAI 的增大植被指数呈非线性增长。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^[16]。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。

2.4 LAI 估算值的对数平均与 RDVI 的关系

植被冠层要素(如叶簇)的聚集分布是目前 LAI 研究的热点问题。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^[17,18]。在研究区,芦苇的生长状况较为均一,而棉花和杂草都不很均一。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,这也是造成 LAI 被低估的原因之一。Cardingen 等曾提出用对数平均来弥补非随机、不连续冠层聚集效应的影响^[19],本研究中引用了该方法。

分析了 3 种算法估算结果的“Log 平均”与植被指数之间的关系,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”后,与植被指数之间仍有很高相关性。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。

2.5 建立飞蝗发生面积的预测模型

植被是东亚飞蝗发生、成灾的重要指示因子之一,透彻分析其与飞蝗发生的关系,对于飞蝗的监测至关重要。为了分析植被与飞蝗发生的关系,本文建立了 LAI(LAI-2000 算法的反演结果)与飞蝗发生面积的关系模型。其中, x 为 LAI, y 为飞蝗发生面积。

(1)飞蝗密度 0.2 ~ 0.4 头/m² 时:

$$y = 0.2478\ln(x) + 0.9057 \quad R^2 = 0.656$$

飞蝗密度 0.5 ~ 1.0 头/m² 时:

$$y = 0.4998\ln(x) + 1.0777 \quad R^2 = 0.733$$

(2) 飞蝗密度 1.1 ~ 3.0 头/m² 时:

$$y = -0.1489\ln(x) + 0.6332 \quad R^2 = 0.725$$

飞蝗密度 3.1 ~ 6.0 头/m² 时:

$$y = -0.1159\ln(x) + 0.3796 \quad R^2 = 0.851$$

从上可见,飞蝗发生面积与 LAI 间呈较好的非线性关系。对不同飞蝗密度的发生面积与 LAI 的关系的比较表明,当飞蝗密度小于 1 头/m² 时,飞蝗发生面积与 LAI 间呈正相关。即:随着 LAI 的增大,飞蝗的发生面积增大;而当飞蝗密度介于 1 ~ 6.0 头/m² 间时,飞蝗发生面积与 LAI 间呈负相关。即:随着 LAI 的减小,飞蝗的发生面积增大。

从 LAI 的定义可以看出, LAI 表示单位水平土壤面积上植被总的叶面积的一半。换句话说,在正常状态下,随着植被的不断生长, LAI 应该不断增大。当飞蝗密度小于 1 头/m² 时,飞蝗对植被的总体影响较小,基本可以忽略。但是,当飞蝗危害较为严重时,植被的叶片由于受飞蝗的大量啃食,使得植被的总的叶面积减小,从而也引起 LAI 的减小,并进而指示飞蝗发生面积的增大。基于以上分析,笔者构建了飞蝗发生面积的预测模型,用 LOA 表示飞蝗发生面积, LOA 可以表示为:

$$LOA = -a \times \ln(LAI) + b$$

式中, a 、 b 为调节系数,且均为大于 0 的实数; LAI 表示植被叶面积指数。由此可见,由冠层孔隙度反演的 LAI 可作为监测飞蝗发生面积及危害程度的特征参数。

3 结论

(1) 本文较为透彻地分析了由冠层孔隙度反演 LAI 的 4 种间接算法建立的机理差异,阐明了各算法产生误差的原因;进而,从定量角度结合研究区植被状况,对比分析了较适合研究区的算法。

(2) 通过比较光学模型不同算法反演的 LAI 的差异,建立各算法反演的 LAI、反演结果的“Log 平均”与植被指数的统计模型,发现 LAI 与植被指数之间存在非线性正相关关系。同时,还发现 LAI-2000 算法是最适合反演研究区植被 LAI 的算法。

(3) 通过分析 LAI 与秋蝗发生面积之间的关系,发现当飞蝗密度介于 1 ~ 6.0 头/m² 间时,飞蝗发生面积与 LAI 间呈负相关关系,即随着 LAI 减小,飞蝗的发生面积增大。在此基础上,用植被 LAI 构建了飞蝗发生面积的预测模型,进而为飞蝗的发生、成灾监测服务。

(4) 由于光学模型算法要求的差异性,需要根据不同算法,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。

References:

- [1] Chen Y L. Characteristics, causes of formation and ecological management of locust plagues. *Bulletin of Ecology*, 2000, 35 (7): 1 ~ 5.
- [2] Huang H, Zhu E L. Occurrence and control of locusts and grasshoppers in China. *China Nature*, 2001, (5): 29 ~ 30.
- [3] Pedgley D E. Testing feasibility of detecting locust breeding sites by satellite. Final report to NASA on ERTS-1, Experiment. COPR London, 1973.
- [4] McCulloch L, Hinder D M. Identification and monitoring of Australian plague locust habitats from Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 1983, 13(1): 95 ~ 102.

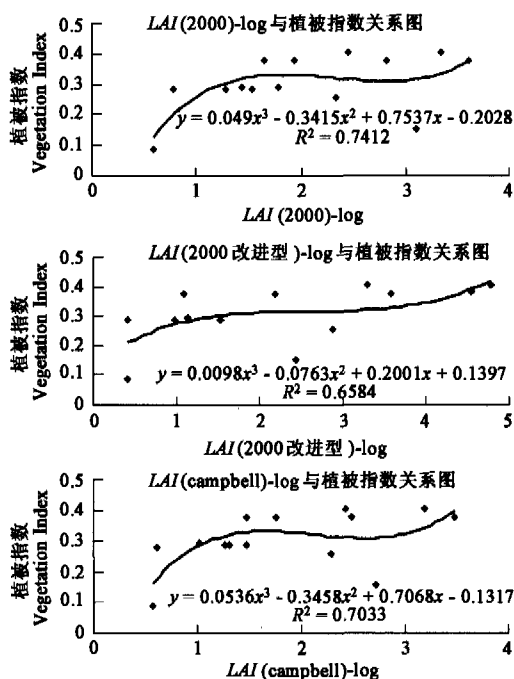


图3 LAI的“Log 平均”与植被指数的相关分析

Fig.3 Correlation analysis between the logarithm average of LAI and VI

- [5] Magor J I, Pender J. Desert locust forecasters' GIS: a researchers' view. In: Krall, S., Peveling R. and Diallo, Ba D. eds. New strategies in Locust Control. Birkhauser, Berlin, 1997. 21 ~ 26.
- [6] Jiang J J, Ni S X, Wei Y C. Knowledge based grasshoppers habit classification approach supported by GIS in Qinghai Lake region. J. Remote Sensing, 2002, 6 (5): 387 ~ 392.
- [7] Ji R, Zhang X, Xie B Y. Use of MODIS data to detect the Oriental migratory locust plague: A case study in Nandagang, Hebei Province. Acta Entomologica Sinica, 2003, 46(6): 713 ~ 719.
- [8] Ma J W, Han X Z, Hasibagan. The experimental remote sensing monitoring of the oriental migratory locust plague. Remote sensing for land and resources, 2003, (1): 51 ~ 55.
- [9] Webb W L, Lauenroth W K, Szarek, et al. Primary production and biotic controls in forests, grasslands, and desert ecosystems in the United States. Ecology, 1983, 64: 134 ~ 151.
- [10] Campbell G S and Norman J M. The description and measurement of plant canopy structure, Plant Canopies: Their Growth, Form, and Function. Society for Experimental Biology: 31. Cambridge University Press, Cambridge, 1989. 1 ~ 19.
- [11] Zhou G F, Xu R M. Ecology & Geography Statistics. Beijing: Science Press, 1998. 146 ~ 150.
- [12] Jarvis P G and Leverenz J W. Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. Encyclopedia of Plant Physiology, New Series, Vol. 12D, Physiological Plant Ecology, IV. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 233 ~ 280.
- [13] Marshall J D and Waring R H. Comparison of methods of estimating leaf-area index in old-growth Douglas-fir. Ecology, 1986, 67: 975 ~ 979.
- [14] Campbell G S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. Agricultural and Forest Meteorology, 1986, 36(4): 317 ~ 321.
- [15] Bonhomme R and Chartier P. The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency. Isr. J. Agric. Res., 1972, 22: 53 ~ 61.
- [16] Welles J M and Norman J M. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. Agron. J., 1991, 83 (5), 818 ~ 825.
- [17] Chason J W, Baldocchi D D and Huston M A. Comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf ~ area. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 57(1 ~ 3): 107 ~ 128.
- [18] Dufrene E and Bréda N. Estimation of deciduous forest leaf ~ area index using direct and indirect methods. Oecology, 1995, 104: 156 ~ 162.
- [19] van Gardingen P R, Jackson G E, Hernandez-Daumas S, Russell G and Sharp L. Leaf area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 94(3 ~ 4): 243 ~ 257.

参考文献:

- [1] 陈永林. 蝗虫灾害的特点、成因和生态学治理. 生物学通报, 2000, 35(7): 1 ~ 5.
- [2] 黄辉, 朱恩林. 我国蝗虫发生防治动态. 大自然, 2001, (5): 29 ~ 30.
- [6] 蒋建军, 倪绍祥, 韦玉春. GIS 辅助下的环青海湖地区草地蝗虫生境分类研究. 遥感学报, 2000, 6(5): 387 ~ 392.
- [7] 季荣, 张霞, 谢宝瑜, 等. 用 MODIS 遥感数据监测东亚飞蝗灾害. 昆虫学报, 2003, 46(6): 713 ~ 719.
- [8] 马建文, 韩秀珍, 哈斯巴干, 等. 东亚飞蝗灾害的遥感监测实验. 国土资源遥感, 2003, (1): 51 ~ 55.
- [11] 周国法, 徐汝梅. 生物地理统计学. 北京: 科学出版社, 1998. 146 ~ 150.