

植被叶面积指数遥感反演的尺度效应及空间变异性

陈 健¹, 倪绍祥^{1*}, 李静静², 吴 彤¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097; 2. 南京信息工程大学计算机科学与技术系, 南京 210044)

摘要: 遥感作为宏观生态研究中数据获取的一种便捷手段, 有助于把握较大尺度内生态学现象的特征。应用遥感数据反演 *LAI* 时, 由于像元的异质性, 不同尺度遥感数据之间的转换是遥感发展的一个重要问题。以河北省黄骅市为研究区, 在利用 TM 和 MODIS 遥感数据对芦苇 *LAI* 反演误差产生原因进行分析的基础上, 利用半变异函数对像元空间异质性进行了定量描述。发现 *NDVI* 算法的非线性带给 *LAI* 尺度转换的误差很小, 而 *LAI* 的空间异质性则是引起 *LAI* 尺度效应的根本原因。并且当像元内空间异质性很大时半变异函数的基台值比纯像元要大得多, 空间自相关的程度是引起 *LAI* 尺度转换误差的主要原因; 反之, 像元内空间异质性不大时, 随机误差是引起 *LAI* 尺度转换误差的主要原因。当像元为纯像元时, 由像元异质性引起的反演误差基本可以忽略。此外, 研究区芦苇的空间相关有效尺度约为 360m, 超过此距离空间相关性则不复存在。

关键词: 叶面积指数; 尺度效应; 半变异函数; 异质性

文章编号: 1000-0933(2006)05-1502-07 **中图分类号:** Q948, TP79 **文献标识码:** A

Scaling effect and spatial variability in retrieval of vegetation *LAI* from remotely sensed data

CHEN Jian¹, NI Shao-Xiang^{1*}, LI Jing-Jing², WU Tong¹ (1. College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 2. Department of Computer Science & Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1502 ~ 1508.

Abstract: As one kind of the means for data acquiring in macroscopic ecology, remote sensing has an ability to grasp features of the ecological phenomena on larger scale. In deriving Leaf Area Index (*LAI*) from remotely sensed data, the transformation of the remotely sensed data from one kind of resolution to another has become a significant problem because of the heterogeneity in pixel. In this paper, based on an analysis of the reasons for error appearing in *LAI* retrieval, the spatial heterogeneity in pixel was described by semivariogram. Taking the city of Huanghua in Hebei province as the study area and using TM and MODIS data, this paper explores the scaling effect in the retrieving reeds *LAI*. Firstly, the *LAI* image with 30m scale was retrieved from the TM image data based on the statistic model. Then, seven test plots were selected from the *LAI* image. Each plot is different in reeds coverage, and the smaller reeds coverage in pixel the larger heterogeneity within it. Following this step, the reeds *LAI* on the MODIS scale (990m by 990m) were obtained for the seven plots using the method of spatial transformation, and the reason for error appeared in the *LAI* retrieval was explored. Finally, the semivariogram model of reeds coverage was developed through the analysis on the semivariograms of these plots.

The following conclusions were obtained from this study: (1) The scaling problem appeared in deriving the parameters on ground surface stems from not only the non-linearity of algorithm for normalized difference vegetation index (*NDVI*), but also the spatial heterogeneity within pixel. The variation in *LAI* error depends mainly on the degree of heterogeneity of ground surface. It

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项目(1612005012)

收稿日期: 2005-09-25; **修订日期:** 2006-04-20

作者简介: 陈健(1978~), 男, 汉族, 山东济宁人, 博士生, 从事遥感与 GIS 应用研究. E-mail: chjnju@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sxni@njnu.edu.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40371081) and Innovation Research Program of Jiangsu Provincial Department of Education for Research Students (1612005012)

Received date: 2005-09-25; **Accepted date:** 2006-04-20

Biography: CHEN Jian, Ph.D. candidate, mainly engaged in application of remote sensing and GIS. E-mail: chjnju@163.com

was found that a small error (less than 0.08) is from the nonlinearity of the algorithm for *NDVI* and, however, the spatial heterogeneity of *LAI* is the fundamental factor for giving rise to the scaling effect in *LAI*. (2) In the study area, the spatial heterogeneity of reeds is caused by both the random element and the extent of spatial auto-correlation. These factors can be described by the parameters of semivariogram, i.e., nugget and sill. If the pixel is dominated by reeds in coverage the major reason causing the spatial heterogeneity is the extent of spatial auto-correlation; and if the pixel is a mixed one in cover, the spatial heterogeneity resulted from random factor increases as reeds coverage decreases. (3) In a pure pixel, little variation was found between the 30m and 60m scale, which means that the scaling problem for pure pixels may be ignored. However, while the degree of heterogeneity within a pixel increases the spatial heterogeneity in the pixel with larger scale may be somewhat hidden compared with the pixel with smaller scale. (4) Results also showed that valid spatial auto-correlation scale of reeds in the study area is within 360m.

Key words: Leaf Area Index (*LAI*); scaling effect; semivariogram; heterogeneity

尺度是生态学中的一个基本概念,其存在根源于地球表层自然界的等级组织和复杂性^[1]。生态学的格局和过程在不同尺度上会表现出不同的特征,遥感作为宏观生态学研究中的数据获取的一种便捷手段,有助于把握较大尺度生态学现象的特征^[1]。探讨遥感反演中的尺度效应,对于生态学,特别是空间生态学方法论的发展非常重要。

尺度问题在生态学和水文学领域已经得到了比较广泛的研究^[1,2],而遥感监测中的尺度效应问题近年来才引起研究者的注意^[3]。例如,张仁华等在禹城站的研究指出,由于水肥供给条件的差异和人类活动的影响,*LAI* 的二维空间分布有很剧烈的非均匀性,这种非均匀性带来的误差最大可达 250%^[4]。Tian, Wang 等分别对 MODIS 的 *LAI* 产品进行了多尺度分析和验证,并进行了采样方案的设计,他们指出,随着尺度的增加,当一个植被类型中混合了大量其他植被类型时,会产生较大的反演误差^[5,6]。Rafly 提出了一种模型的空间化方法,来削减尺度变化给连接地面参量(如 *LAI*)与像元遥感测量值的模型带来的误差^[7]。Milne 与 Cohent 对 MODIS 反演的连续植被变量进行了分析^[8]。Silvestri 等对盐碱地的植被进行了尺度分析^[9]。张颖等应用直方变差图分解方法进行了地物空间分布规律的研究^[10]。这些研究均指出了像元异质性是引起尺度效应的重要原因,但对像元的异质性缺乏比较精确的描述。

本文以河北省黄骅市为研究区,以芦苇植被为研究对象,探讨了基于 TM 和 MODIS 两类遥感数据的芦苇 *LAI* 反演中的尺度效应,并尝试应用地统计学中的半变异函数对研究区芦苇 *LAI* 的空间异质性进行研究,主要目的在于进一步提高植被 *LAI* 信息遥感反演的精度。

1 数据与研究方法

1.1 研究区概述

研究区位于渤海湾沿岸的河北省黄骅市。该市地理坐标 38°9'15" ~ 38°38'40"N, 117°4'23" ~ 117°49'42"E, 面积约 2161 km²。地形为沼泽化滨海平原,海拔 3 ~ 7m,多坑塘、洼淀。属暖温带季风气候。滨海盐渍化潮土和盐土占优势。以耐盐碱植被为主,有大片芦苇(*Phragmites communis*)地,伴生盐地碱蓬(*Suaeda* spp.)、白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等植物。除农田外,还有较多生长杂草的撂荒地。本研究选择以芦苇占优势的南大港、黄灶、杨官庄、滕南大洼为试验区。

1.2 遥感数据及预处理

1.2.1 TM 数据 研究所采用的是 2004 年 5 月 28 日接收的 TM 图像。采用大气校正模型 6S (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum) 模型^[11]完成了大气校正。借助 ENVI4.0 软件,并利用野外实测的控制点对图像进行几何纠正,纠正精度控制在 0.5 个像元之内。

为了分析 *LAI* 的尺度效应,在 TM 图像上选取了 7 个研究子区(图 1)。每个子区包含 33 × 33 个 TM 像元,相当于地面 990m × 990m,以近似地与 MODIS 像元的大小相匹配。在 5 月 28 日,研究区的芦苇正值较旺盛生长期,盖度一般超过 70%,背景土壤和水体的影响不大。野外实测光谱表明,芦苇冠层的归一化植被指数

(*NDVI*)一般大于 0.6,而杂草和裸地 *NDVI* 一般小于 0.6。据此,可将这 7 个子区内的像元划分为具有较高 *NDVI* 值的芦苇地以及较低 *NDVI* 值的杂草地两种类型。7 个子区内芦苇像元所占的面积比例详见图 2。

1.2.2 MODIS 数据 因研究区 2004 年 5 月 28 日的 MODIS 数据质量不好,且考虑到要将其与 TM 数据的算法进行比较,故研究中未直接应用 MODIS 的 *LAI* 产品,而采用了 NASA 提供的同一时间段 16d 合成的 1km 分辨率 MOD13A2 数据。借助 MODIS 数据产品投影变换软件 MRT 进行投影变换,采用经纬度投影、最近邻方法重采样并转换为带经纬度信息的 GEOTIFF 格式文件。

MOD13A2 数据应用了新的合成算法,以减小随观测角度不同及太阳-目标-传感器几何学因素引起的变化。此外,在生成植被指数格点资料时,应用了分子散射、臭氧吸收、气溶胶订正算法,用 BRDF 模式将观测量订正到天顶角,最终得到 1km 分辨率的 *NDVI* 数据。

1.3 野外实测数据

1.3.1 *LAI* 数据 *LAI* 采用两种方法进行测量:(1) WinScanopy 植物冠层仪测量^[12]。首先用 WinScanopy 冠层仪获取半球图像,然后对半球图像进行室内处理得到实测的 *LAI*。采样方案是在每一个面积为 30m × 30m 的样区内,均匀测量 5 个点,取其平均值得到该样点的 *LAI* 数据;(2)直接测量。在均匀样方内,直接调查样方内的芦苇株数,每株的平均叶片数目,并用直尺量测叶长和叶宽,然后根据叶形状计算 *LAI*。

通过测量,本文共获取 23 了个芦苇样点的 *LAI* 数据。图 3 为两种方法获取的 23 个样点的折线图。从两条曲线的变化情况看,二者变化趋势大致上是一致的,呈现正相关的关系,相关系数为 0.936;二者之间的最大误差为 47%;最小误差为 0;平均误差为 18%。实测数据表明,WinScanopy 测量法可基本保证较高的 *LAI* 测量精度,且测量方便快捷,故后续研究决定采用 WinScanopy 测量法获取 *LAI* 数据。

1.3.2 光谱实测数据 光谱测量采用的是美国 ASD 公司的 FieldSpec 光谱仪,波长范围为 300 ~ 1100nm,光谱分辨率为 3.5nm。测量时在样区内均速、缓慢走动,从上方垂直向下测量芦苇冠层的反射率。每次获得 5 条光谱曲线,取其平均值得到芦苇冠层反射率。实测光谱数据在室内用软件 ASD ViewSpecPro 进行处理。

2 *LAI* 算法与尺度效应分析

本研究采用 *NDVI* 与 *LAI* 的关系统计模型进行分析^[13]。根据实测的 *LAI* 和光谱数据,得到两者之间较高的相关关系:

$$LAI = 0.1753 \times E^{5.5863 \times NDVI}$$

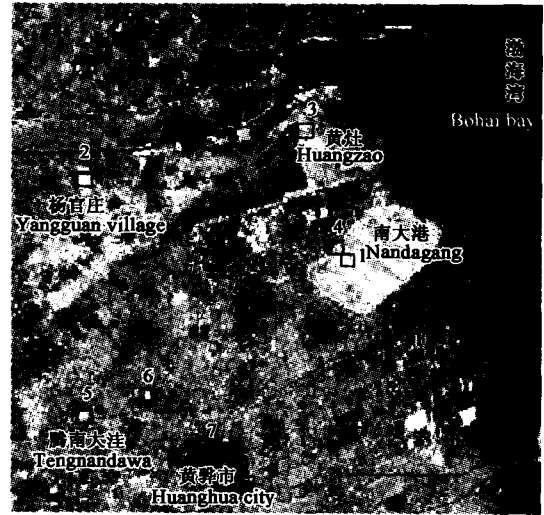


图 1 研究子区分布示意图

Fig.1 Sketch map of the sampling plots in the study area
渤海湾 Bohai bay; 黄灶 Huangzao; 南大港 Nandagang; 杨官庄 Yangguan village; 腾南大洼 Tengnandawa; 黄骅市 Huanghua city

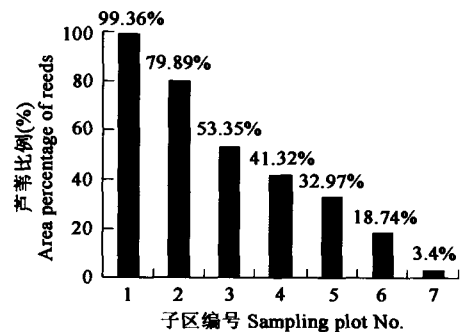


图 2 各子区内芦苇所占面积比例

Fig.2 Area percentage of reed in all sampling plots

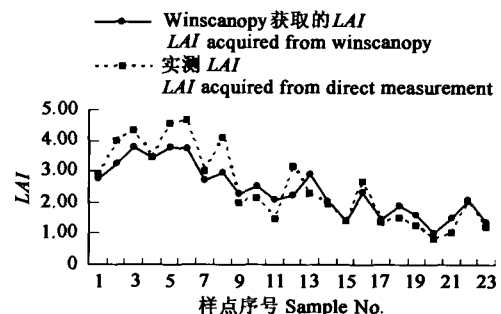


图 3 WinScanopy 获取的 *LAI* 和实测 *LAI* 的相关性曲线

Fig.3 Correlation curves between *LAI* acquired from WinScanopy and from direct measurement

根据 $NDVI$ 的算法,在一个像元内,

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_r}{\rho_{nir} + \rho_r} \quad (2)$$

式中, ρ_{nir} 为近红外波段的反射率, ρ_r 为红波段的反射率。当计算一个子区的 $NDVI$ 时^[14], 上式变为:

$$NDVI = \frac{\sum_{i=1}^n \rho(i)_{nir} - \rho(i)_r}{\sum_{i=1}^n \rho(i)_{nir} + \rho(i)_r} \quad (3)$$

式中, n 为该子区像元的个数, $\rho(i)_{nir}$ 、 $\rho(i)_r$ 分别为第 i 个像元的近红外波段和红波段的反射率。由于子区内像元的相似性程度很高, 为了研究的方便, 将一些相似的像元合并为 m 类, 故上式可改写为:

$$NDVI = \frac{\sum_{i=1}^m w_i (\rho(i)_{nir} - \rho(i)_r)}{\sum_{i=1}^m w_i (\rho(i)_{nir} + \rho(i)_r)} \quad (4)$$

式中, w_i 为第 i 组类型的权重, 此处为第 i 组所占面积比例。

根据式 2, 可计算出面积为 $990\text{m} \times 990\text{m}$ 子区的 $NDVI$, 并据其计算出子区的 LAI , 再与实地测量的 LAI 对比, 便可查明因像元尺度效应带来的误差。

将 MODIS 像元视为包含有若干个小像元(TM 像元)的子区, 并以每个小像元的 LAI 为基础, 用以下公式计算出 1km^2 分辨率的 LAI :

$$LAI_{coarse} = \left(\sum_{i=1}^n LAI_i \right) / (n \times A_{fine}) = \sum_{i=1}^n (LAI_i / A_{fine} / n) = \sum_{i=1}^n (LAI_{fine}) / n \quad (5)$$

LAI 反演的误差可用式 6 来表示:

$$error = |LAI_{实测} - LAI_{反演}| / LAI_{实测} \quad (6)$$

根据前面的分析, 将研究子区简化为两部分覆盖类型, 一部分为所研究的芦苇, 另一部分为杂草。根据野外实测芦苇和杂草的冠层光谱数据, 取芦苇的近红外波段反射率为 0.35, 红波段反射率为 0.03; 取杂草的近红外波段反射率为 0.2, 红色波段反射率为 0.05。代入式 1 和式 4, 变动芦苇在子区内所占的比例 w , 便可得到不同芦苇比例下的 LAI 的误差(图 4)。

总体来说由 $NDVI$ 算法引起的 LAI 反演误差较小; 芦苇面积约占 30% 时 LAI 反演误差最大, 但也只有 0.08 左右。因此可以认为, 在 LAI 反演过程中因 $NDVI$ 算法本身的非线性所引起的误差可忽略不计。

一般来说, 在研究中很难获得 MODIS 的地面 LAI 标准值数据。由于 LAI 的地面点测量的代表尺度为不到 1m^2 , 而冠层仪分析的有效范围约为 10m^2 ^[15]。因此, 如果以野外实测 LAI 数据为基准来检验尺度为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 的像元, 不可避免地会出现误差。这是因为, 随着遥感图像数据空间分辨率的降低, 像元内部的异质成分越来越多; 这类异质成分所占比例不同, 会引起 MODIS 反演中的不同误差。以地面实测数据为地面基准值时, 芦苇所占比例不同所引起的 LAI 反演误差随着子区内芦苇比例的增加而减小(图 5)。

通过对 TM 图像反演得到 LAI , 再向上转换到 1km 分辨率的 LAI 。同时, 对 MODIS 图像进行反演, 也得到 LAI 。图 6 为两种方法获取的 LAI 的散点图。

从图 6 可见, 两者的相关系数为 0.849, 表明 MODIS 的反演结果比较可靠。然而, 由于像元的异质性增大

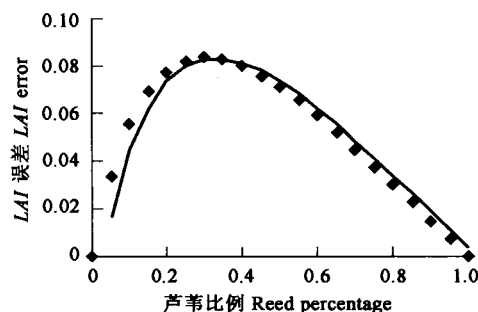


图 4 $NDVI$ 算法引起的 LAI 反演误差

Fig. 4 LAI retrieval errors caused by $NDVI$ algorithm

了,个别像元的 LAI 出现了较大的误差,这主要是由于有些像元中不但含有杂草和土壤成分,并且可能含有水体成分,这使 $MODIS$ 反演的 LAI 比正常值要低一些。同时,由 $MODIS$ 反演的 LAI 的平均值为 1.41,略高于 TM 的反演的 LAI 的平均值 1.37。可能的原因是, $MODIS$ 反演获得的 $NDVI$ 是采用 16 天最大值合成法计算的,而在此期间研究区的植被正处于较旺盛生长期,故其 LAI 反演结果偏高。

3 LAI 的异质性分析

采用地统计学中的半变异函数,分析了芦苇占不同比例子区内 LAI 的空间异质性。半变异函数是度量空间依赖性和空间异质性的一个综合性指标。通过比较由特定滞后距离分隔的同一随机变量的不同值,可在多种尺度上对区域化随机变量的变异性进行量度^[4]。半变异函数的形式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) + Z(x_{i+h})]^2 \quad (7)$$

式中, $N(h)$ 为滞后距离等于 h 时的点对数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_{i+h})$ 分别为区域化随机变量 x 在位置 x_i 和 x_{i+h} 时的取值。通过式(7)可获得半变异函数的估计值,然后对估计值进行参数拟合,即可得到半变异函数的理论模型。变异函数理论模型的拟合过程,主要包括确定曲线类型、参数最优估计和回归模型的统计检验。

半变异函数具有 3 个重要参数,即块金值 C_0 、基台值 $C_0 + C$ 及变程 A_0 。当间隔距离 $h = 0$ 时, $\gamma(h) = C_0$,该值被称为块金值。当 h 增大到 A_0 时, $\gamma(h)$ 从非零值达到一个相对稳定的常数,该常数被称为基台值 $C_0 + C$, A_0 为变程。块金值 C_0 表示随机因素引起的空间异质性,较大的块金值就预示着小尺度的某种过程不可忽视, C 表示空间自相关部分引起的空间异质性;基台值 $C_0 + C$ 则表示最大变异程度,基台值越大表示总的空间差异性程度越高;块金值与基台值之比 $C_0/(C_0 + C)$,则反映随机因素引起的异质性占总空间异质性的比重^[16]。

在本研究中,将基于 TM 数据所反演出的 7 个研究子区的 LAI 作为离散变量,分别进行半变异函数分析,获得各子区的半变异函数曲线图(图 7)。

为便于分析,取芦苇所占比例分别为 99.36%、53.35%、3.40% 的三个差别较大的子区进行理论模拟。图 8 为计算获得的 30m(图 8a)和 60m(图 8b)两种尺度下的半变异函数曲线图。

由图 8 可见, LAI 具有明显的空间自相关性。进一步比较图 8a 与图 8b,可以发现,小尺度的半变异函数检测出了更细微的变异。其敏感程度,30m 水平明显高于 60m 水平。对上述曲线进行拟合得到它们的半变异函数,其理论拟合模型为球状模型,参数见表 1。

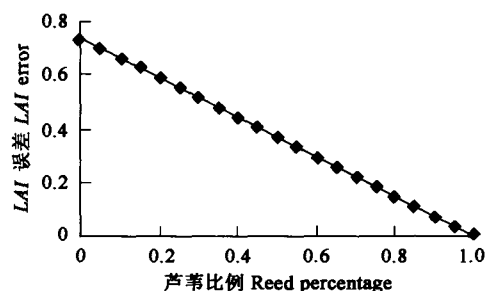


图 5 空间异质性引起的 LAI 反演误差

Fig. 5 LAI retrieval errors caused by the spatial heterogeneity in sampling plot

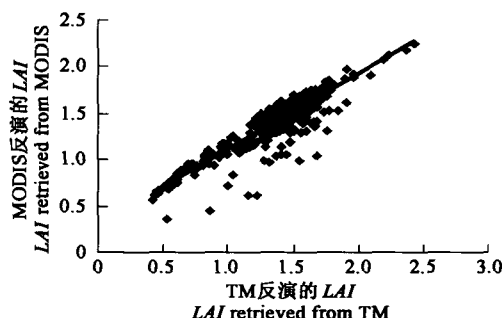


图 6 TM 反演与 $MODIS$ 反演的 LAI 的散点图

Fig. 6 Discrete point figure between LAI retrieved from TM and retrieved from $MODIS$

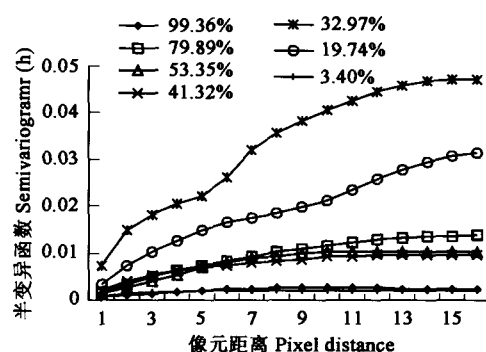


图 7 30m 尺度下 7 个子区的半变异函数曲线

Fig. 7 Semivariogram curves of seven sampling plots at the scale of 30m

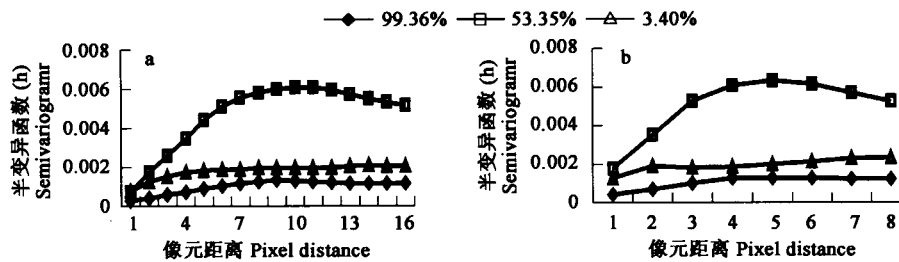


图 8 30m 与 60m 尺度下芦苇所占不同比例子区的半变异函数曲线

Fig. 8 Semivariogram curves of the sampling plots with different percentage of reed cover at the scales of 30m and 60m

表 1 30m 与 60m 尺度下芦苇所占不同比例子区的半变异函数的参数

Table 1 The parameters of semivariogram of the sampling plots with different percentage of reed cover at the scales of 30m and 60m

尺度 Scale (m)	芦苇比例 Reed percentage (%)	变程 A Range	块金值 C_0 Nugget	基台值 $C_0 + C$ Sill	$C_0 / C_0 + C$	r^2	检验参数 Test parameter
30m	99.36	11.54	1.67×10^{-4}	1.31×10^{-3}	0.128	0.947	115.8511
	52.35	11.34	3.26×10^{-4}	6.33×10^{-3}	0.0514	0.966	183.276
	3.4	12.24	9.82×10^{-4}	2.11×10^{-3}	0.465	0.823	30.3
60m	99.36	6.09	1.50×10^{-4}	1.34×10^{-3}	0.112	0.961	61.717
	52.35	5.72	4.66×10^{-4}	6.54×10^{-3}	0.0713	0.959	58.526
	3.4	10.12	1.32×10^{-3}	2.37×10^{-3}	0.556	0.824	11.73

4 讨论

由于成像过程中以及解译过程中的不确定性因素, LAI 反演的误差也受到多种因素的影响。对比由 $NDVI$ 反演算法引起的误差和由像元的异质性引起的误差发现, $NDVI$ 算法本身带来的误差非常小, 不超过 0.08, 而空间异质性才是引起反演误差的根本原因。如果不通过特别的测量, 很难获取像元中各种成分的比例, 因此这两种方法只能计算 LAI 的误差, 而不能用来进行不同遥感数据源 LAI 反演的尺度纠正。

不同遥感数据反演 LAI 的误差主要来自尺度效应, 而空间异质性是引起尺度效应的一个重要原因, 因此就需要对空间异质性进行准确的描述。半变异函数的参数可以有效地用来描述 TM 像元的空间异质性。块金值增大即块金效应逐渐增强, 意味着随机因素造成的空间异质性也随之增大。基台值的大小表明空间自相关引起的空间异质性。

由表 1 可见, 在 30m 尺度上, 芦苇所占比例不同时, 半变异函数的块金值存在明显差异。总的趋势是, 随着子区内芦苇所占比例的减小, 块金值逐渐增大即块金效应逐渐增强, 随机因素造成的空间异质性也随之增大。同理, 第二个子区的基台值比另外两个子区高出 3~4 倍, 说明当某一子区属于混合像元类子区时, 空间自相关性较差, 即空间异质性较高。所以从遥感反演角度来说, 像元的异质性主要取决于混合像元内部的空间异质性程度, 而随机因素造成的误差只占很小比例。换句话说, 当像元内以芦苇占优势时, 造成空间异质性的主要原因是空间自相关的程度; 而只有在芦苇占很小比例时, 随机误差才达到约 50%。

30m 尺度时的变程值变化不大, 都在 12 左右, 说明 LAI 的空间依赖范围大约为 360m, 超过此距离, 空间自相关便不复存在。在 60m 尺度, 当芦苇为主要像元组分时, 空间依赖范围也大约为 360m; 而当芦苇占很小比例时, 空间依赖范围增至 600m 左右, 说明随机因素对其影响较大。从 30m 尺度到 60m 尺度, 当芦苇所占比例很大时, 随机因素引起的异质性在两个尺度上差异不大; 而当芦苇所占比例降低时, 随着尺度的增大, 块金值增加, 即块金效应逐渐增强。这表明, 对于非纯像元来说, 随机因素造成的空间异质性不断增加, 较大尺度掩盖了内部较小尺度上的空间变异特征。

5 结论

(1) 统计模型中 $NDVI$ 算法的非线性带给 LAI 尺度转换的误差很小, 而 LAI 的空间异质性是引起尺度效应的根本原因。随着尺度的增加, 空间异质性增加, 从而引起 LAI 反演误差的增大。

(2) 本研究区的芦苇地的空间异质性主要由随机因素和空间自相关引起的,利用半变异函数的参数块金值和基台值可以有效地描述这两个因素。当像元内以芦苇占优势时,造成空间异质性的主要原因是空间自相关的程度;当子区内芦苇所占比例减小时,随机因素造成的空间异质性也随之增大。

(3) 当像元为纯像元时,也就是芦苇所占比例很大时,空间异质性在 30m 和 60m 两个尺度上差异不大,由像元异质性引起的反演误差基本可以忽略。而当芦苇所占比例降低时,随着尺度的增大,空间异质性不断增加,较大尺度掩盖了内部较小尺度上的空间变异特征。

(4) 准确的描述 *LAI* 的空间异质性,可以为不同尺度的遥感数据反演 *LAI* 和进行不同尺度的遥感数据的相互转换提供理论基础。而应用半变异函数进行空间异质性的定量描述,可以为 *LAI* 的反演精度的提高提供一种新的思路和方法,对提高空间生态学中的遥感数据有效性也具有一定的意义。

References:

- [1] Lu Y H, Fu B J. Ecological scale and scaling. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2096 ~ 2105.
- [2] Fu G B, Li L J, Liu C H M. Scale issues on the applications of remote sensing to hydrology. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(6): 755 ~ 760.
- [3] Su L H, Li X W, Huang Y X. An review on scale in remote sensing. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(4): 544 ~ 548.
- [4] Zhang R H, Sun X M, Su H B, *et al.* Remote sensing and scale transferring of levity parameters on earth surface. *Remote Sensing for Land and Resources*. 1999, 41(3): 51 ~ 59.
- [5] Tian Y H, Woodcock C E, Wang Y J, *et al.* Multiscale analysis and validation of the MODIS *LAI* product I. Uncertainty assessment. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 414 ~ 430.
- [6] Wang Y J, Woodcock C E, Buermann W, *et al.* Evaluation of the MODIS *LAI* algorithm at a coniferous forest site in Finland. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91: 114 ~ 127.
- [7] Raffy M. Heterogeneity and change of scale in models of remote sensing. Spatialization of multi-spectral models. *Int J Remote Sensing*, 1994, 15(2): 2359 ~ 2380.
- [8] Milne B T, Cohent W B. Multiscale assessment of binary and continuous landcover variables for MODIS validation, mapping, and modeling applications. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70: 82 ~ 98.
- [9] Silvestri S, Marania M, Settleb J, *et al.* Salt marsh vegetation radiometry data analysis and scaling. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80: 473 ~ 482.
- [10] Zhang H, Jiao Z D, Yang H. Histogram scaling effect research. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(2): 307 ~ 316.
- [11] GHULAM A, QIN Q M, ZHU L J. 6S model based atmospheric correction of visible and near-infrared data and sensitivity analysis. *Journal of Universitatis Pekinensis (Acta Scientiarum Naturalium)*, 2004, 40(4): 611 ~ 618.
- [12] Wu T, Ni S X, Li Y M, *et al.* A comparison on the algorithms for retrieval of *LAI* based on gap fraction of vegetation canopy, *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*. 2006, 29(1): 111 ~ 115.
- [13] Li K L, Jiang J J, Mao R Z, *et al.* The modeling of vegetation through leaf area index by means of remote sensing. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1491 ~ 1496.
- [14] Chen J M. Spatial scaling of a remotely sensed surface parameter by contexture. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69: 30 ~ 42.
- [15] Zhang R H, SUN X M, Zhu Z L. Scale transformation and realistic quantitative remote sensing in IMGRASS. *Climatic and Environmental Research*, 1999, 2(3): 310 ~ 315.
- [16] Xu J H, Yue W Z, Tan W Q. A statistical study on spatial scaling effects of urban landscape pattern: A case study of the central area of the External Circle Highway in Shanghai. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 1058 ~ 1067.

参考文献:

- [1] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. *生态学报*, 2001, 21(12): 2096 ~ 2105.
- [2] 傅国斌, 李丽娟, 刘昌明. 遥感水文应用中的尺度问题. *地球科学进展*, 2001, 16(6): 755 ~ 760.
- [3] 苏理宏, 李小文, 黄裕霞. 遥感尺度问题研究进展. *地球科学进展*, 2001, 16(4): 544 ~ 548.
- [4] 张仁华, 孙晓敏, 苏红波, 等. 遥感及其地球表面时空多要素的区域尺度转换. *国土资源遥感*, 1999, 41(3): 51 ~ 59.
- [10] 张颢, 焦子锦, 杨华, 等. 直方图尺度效应研究. *中国科学(D 辑)*, 2002, 32(2): 307 ~ 316.
- [11] 阿布都瓦提·吾拉木, 秦其明, 朱黎江. 基于 6S 模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正. *北京大学学报(自然科学版)*, 2004, 40(4): 611 ~ 618.
- [12] 吴彤, 倪绍祥, 李云梅, 等. 由冠层孔隙度反演植被叶面积指数的算法比较. *南京师大学报(自然科学版)*, 2006, 29(1): 111 ~ 115.
- [13] 李开丽, 蒋建军, 茅荣正, 等. 植被叶面积指数遥感监测模型. *生态学报*, 2005, 25(6): 1491 ~ 1496.
- [15] 张仁华, 孙晓敏, 朱治林. IMGRASS 中的尺度转换和现实中的定量遥感. *气候与环境研究*, 1999, 2(3): 310 ~ 315.
- [16] 徐建华, 岳文泽, 谈文琦. 城市景观格局尺度效应的空间统计规律——以上海中心城区为例. *地理学报*, 2004, 59(6): 1058 ~ 1067.