

利用不同分辨率卫星影像的 NDVI 数据 估算叶面积指数(LAI) ——以岷江上游为例

孙鹏森¹, 刘世荣¹, 刘京涛¹, 李崇巍¹, 林 勇², 江 洪³

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境研究所, 北京 100091; 2. 北京师范大学生命科学学院, 北京 100875;

3. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

摘要:短周期的低分辨率遥感数据为大面积估算 LAI 及季节动态和物候趋势提供了有利工具,但基于高分辨率 LAI 的遥感估算模型在低分辨率遥感数据上应用有很大的不确定性。研究利用 LAF2000 冠层分析仪与跟踪辐射和冠层结构测量仪 (TRAC),测定了岷江上游流域范围内 490 块野外调查样地 (50m × 50m 样方) 的 LAI 数据,结合同期较高精度卫星数据 (TM) 建立了不同植被类型的 LAFNDVI 算法,在经过传感器的相对校正后,将这种算法应用到同期分辨率较低的 MODIS 数据和 SPOT VEGETATION 数据上。结果表明,30m 分辨率的 TM LAI 的均值为 4.53,250m MODIS LAI 的均值为 3.55,1000m VGT LAI 的均值为 4.20,随着栅格分辨率的降低,总体标准差有增加的趋势,并且 LAI 值也有不同程度的低估,其中 MODIS LAI 值被低估约 22%。但利用 TM LAI 数据验证 MODIS 和 VGT LAI 数据后发现,250m 的 MODIS 数据预测误差在 30% 左右,1000m 的 SPOT 数据预测误差则高达 50%,空间重采样分析表明,栅格分辨率的降低是导致预测误差扩大的主要原因,而这也是岷江流域植被分布破碎化的体现。

关键词:叶面积指数;岷江上游;归一化植被指数;TM;MODIS

文章编号:1000-0933(2006)11-3826-09 **中图分类号:**Q948 **文献标识码:**A

Derivation and validation of leaf area index maps using NDVI data of different resolution satellite imageries

SUN Peng-Sen¹, LIU Shi-Rong¹, LIU Jing-Tao¹, LI Chong-Wei¹, LIN Yong², JIANG Hong³ (1. Research Institute of Forest Ecology and Environment, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. College of Life Sciences, Beijing Normal Univ., Beijing 100875, China; 3. International Institute of Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3826~3834.

Abstract: Leaf area index (LAI) is an important vegetation structural parameter for quantitative analysis of many ecological and hydrological processes related to vegetation dynamics as well as phenological trends. Short revisit period and coarse or medium resolution satellite imageries (e.g. SPOT/VEGETATION and MODIS) demonstrate great potential in exploring large scale leaf area index (LAI), but the reliability is still unclear when LAI algorithms based on high resolution satellite imageries applied to coarse resolution imageries. Totally 490 plot-LAIs (50m × 50m) were measured by using Tracing Radiation and Architecture of Canopies (TRAC) and LAF2000 instruments in the upstream catchment of Minjiang river in SW China. Landsat Thematic Mapper (TM) scenes at 30m resolution were used to calculate Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and locate ground sites. Seven land cover-specific NDVI-LAI converting algorithm were constructed by regression analysis.

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (30471383, 30590383); 国家科技部重大基础研究计划资助项目 (2002CB111504); 国家林业局森林生态环境重点实验室基金资助项目

收稿日期:2006-04-03; **修订日期:**2006-09-20

作者简介:孙鹏森 (1971~), 男, 山东莱州人, 博士, 副研究员, 主要从事遥感及其在生态水文学中的应用研究。

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30471383, No. 30590383) and National Key Fundamental Research Program (No. 2002CB111504)

Received date: 2006-04-03; **Accepted date:** 2006-09-20

Biography: SUN Peng-Sen, Associate professor, mainly engaged in remote sensing and its application in ecohydrology. E-mail: sunpsen@forestry.ac.cn

MOD NDVI products at 250m resolution and 1000m resolution SPOT/VEGETATION NDVI were used to produce coarse-resolution LAI data. Since regions of the spectrum among the different sensors are not exactly the same, a mutual calibration among the sensors was first performed before they were used for TM LAI algorithms, and the acquisition date of TM data, VEGETATION and MOD NDVI data were constrained in the same month, i. e. July 2002, field measurements were carried out from 2002 to 2004 with the matching dates.

The mean LAI of the catchment derived from TM, MODIS and VEGETATION imageries are 4.53, 3.55 and 4.20 respectively. MODIS LAI, VEGETATION LAI images and those in the matching TM scenes were compared, TM LAI map is much better correlated to MODIS LAI than to VEGETATION LAI. With the decreasing of the spatial resolution, the LAI was likely to be underestimated, in particular, MODIS LAI was underestimated by 22%. It is possible to use MODIS 250m resolution imagery to map LAI distribution with acceptable error of approximately 30%, but 1000m resolution VEGETATION imagery causes considerable error of 50%. Comparisons of LAI values of different resolution resampled from TM 30m pixels indicate that it is major cause of scaling errors when aggregate map from high-resolution to coarse-resolution. We speculate that it is a likely result of landscape fragmentation of this area.

Key words: leaf area index; upstream of minjiang catchment; normalized difference vegetation index; TM; MODIS

叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)被定义为单位地表面上总绿叶面积的一半^[1],对阔叶林而言是单侧叶面积,针叶林根据叶或小枝的形态用转换系数校正^[2]。叶面积指数不仅作为关键的生物物理参数用来研究生态系统光合生产力、水分以及能量平衡^[3,4],而且还是景观乃至全球尺度生物地球化学循环中重要的植被结构参数^[5,6];在近来的生态水文耦合模拟研究中, LAI 因其水文敏感性(调节蒸散、冠层截留等)成为耦合生态过程和水文过程的关键参数^[7~9],而且,随着空间精细化模型的发展和基于过程的分布式模拟技术的应用,对于关键植被参数 LAI 的准确估算越来越重要。

LAI 在多学科和多尺度的广泛应用得益于其成功的遥感估算技术,其中最多的是基于各类植被指数(VI)(如归一化植被指数,NDVI)的推算技术^[10],近来也有通过冠层辐射传输模型 RT 的反演算法^[11]和遗传算法 GA^[12],以及将 RT 模型和 GA 算法结合的推算技术^[13]。季节性规律是 LAI 的重要特征,在区域和景观尺度上,由于群落组成的复杂性和气候、水分条件的分异性导致区域植被 LAI 的物候特性和时空格局非常复杂,国内学者罗天祥等人根据叶片生长的形态学规律,建立 LAI 物候学模型(PhenLAI),并利用我国的 16 种类型的天然林验证了其模拟的最大 LAI 值^[3]。

短周期的卫星影像为大面积植被 LAI 的季节变化和物候规律研究提供了有利的工具,1981 年 NOAA-AVHRR 数据,1998 年以来的 SPOT VGT 数据,2000 年以后,MODIS 作为新一代环境遥感卫星传感器,它所提供的丰富的遥感信息产品为研究植被在更短周期的物候变化提供了极为便利的条件。

目前的卫星影像具有较高空间分辨的卫星影像,往往其时间周期较长(如 TM,再访周期是 16d),而时间周期较短的卫星影像(如 MODIS,1d 2 次),则数据的空间分辨率较低,本研究旨在探求在较高空间分辨率的情况下建立的植被指数与叶面积指数之间的关系,在较低空间分辨率上应用的可行性,这将有助于进一步探求更加详尽的对于较大尺度植被格局以及季节性变化的描述。

1 研究区概况

岷江发源于岷山,其上游位于东经 102°~104°,北纬 32°~34°,覆盖陆地面积约 24000km²,多年平均年均降水量约 1000mm,年均温 5.8~9.1℃,7 月均温 14.6~17.6℃,≥10℃的连续积温 1300~2500℃^[14]。由于地处四川盆地和青藏高原的过渡地带,海拔高度在 600~4400m 之间变化、气象条件分异性显著,导致该区植被格局复杂。从垂直分布上看,海拔 1600m 以下基带植被为常绿阔叶林,1600~2000m 代表类型为常绿和落叶阔叶混交林,2000~3800m 阴坡代表类型为亚高山针叶林如岷江冷杉(*Abies faxoniana*);阳坡主要有川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)为主的硬叶常绿阔叶林或灌丛,海拔 3800~4400m 为高山草甸;从纬向分布来看,岷江上游南部卧龙自然保护区,植被和水分条件较好,原始植被得以保存;岷江上游中部茂汶地区为峡谷地貌,谷深

2000~3000m,受“焚风效应”影响,降水量不到 500mm,年均温及 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的连续积温都较高。植被为旱生半旱生的草本及灌木,不适合森林生长;北部为松潘草原,地势平坦,海拔较高,是典型的高山灌丛草甸区。

从历史上看,随着人口的增多,岷江流域的耕地面积经历了 1949~1958 年的大幅增长期,1958~1977 年的平稳期和 1977~1998 年的逐年增长期,而与此同时,砍伐和土地开垦致使森林面积也由建国初期的 39.5% 左右降到了 1985 年的最低点 16%,20 世纪 80 年代末期随着森工转产和造林工程,至 1998 年森林覆盖率仅恢复到 27% 左右^[15];而人类活动频繁、破坏严重的镇紫区间(镇江关到紫坪铺两水文站之间流域区间)森林覆盖率至今仍徘徊在 16% 左右^[16]。在今后相当长的一段时间内,该区的森林植被将会逐渐步入全面恢复期,研究 LAI 季节动态和空间分布规律,可以在较短的时期内掌握该区水分环境和植被的动态之间的相互适应关系,对于更深入的了解和定量评价森林植被水文功能具有重要意义。

2 研究方法

2.1 叶面积指数的样地测定

LAI 野外测定选取 50m × 50m 大小的样地,样带周边地区的植被类型较为均一,利用全球定位系统对样地进行定位。LAI 的测定主要利用 LAI-2000 冠层分析仪,LAI-2000 是美国 LICOR 公司的产品,它的设计特点是从低矮草本到高大森林冠层结构的 LAI 均能测定,适用于在本研究区域内进行不同植被类型 LAI 测定。LAI-2000 测定值一般称为有效 LAI^[17],是假设树冠叶片的分布是完全随机的情况下,但实际冠层往往存在一定的间隙尺寸分布,通过测定冠层间隙尺寸分布可以弥补这一不足,因为间隙尺寸分布包含有冠层结构信息,可以定量叶子集聚效应间接测定其对 LAI 的影响。加拿大国家遥感中心的陈镜明博士等研制的跟踪辐射与冠层结构测量仪 (TRAC),它是测定叶面积指数 (LAI) 和冠层吸收光合作用有效辐射分量 (fPAR) 的一种新型光学仪器,使用一种高频抽样技术在冠层下沿横切线测量太阳直射透射光的光合作用有效辐射 (PAR),从高密度空间的 PAR 数据可以得到冠层间隙分量和间隙尺寸分布,进而从间隙尺寸分布可以得到集聚指数 (Ω_E),并通过下面的公式计算实际 LAI:

$$L = (1 - \alpha) L_e / \Omega_E$$

式中, L 为实际叶面积指数, α 为树干等非树叶因素对总的叶面积的比率, L_e 为有效叶面积指数,可以由 LAI 2000 直接测定, γ_E 为不同针叶树种的针叶总面积与簇面积的比率,对于阔叶树种, γ_E 取值为 1, Ω_E 为集聚指数。

2.2 LAI 预测模型建立及检验

根据岷江上游流域内的植被分布特点,建立针对不同植被类型的 LAI-NDVI 关系,选取的植被类型有:亚高山暗针叶林(包括云杉林和冷杉林,简称 CF),针阔混交林(MCBF),阔叶林(BF),落叶灌丛(TDS),高山常绿灌丛(AES),高山草甸(AM),农田(CL)等 8 种类型。由于 LAI 具有很强的季节性,为了提高不同类型的可比性,样地测定集中在 2002~2004 年的 7~8 月份,测定叶面积指数应为年度最高值,称为最大叶面积指数(以下通用 LAI 表示),共计样地 490 块,其中 450 块作为建模样地,其余 40 块样地用于检验模型。建模样地中,亚高山暗针叶林包括云杉林和冷杉林共计样地 283 块,亚高山常绿灌丛 22 块,高山草甸 5 块,农田 15 块,阔叶林 26 块,草地 6 块,针阔混交林 44 块,落叶灌丛 46 块。以上样地主要用于建立并测试基于 TM/NDVI 和 LAI 关系模型。样地的分布密度与植被类型的空间分布具有相关性,但同一种类型的取样尽量照顾到整个流域。

利用 LAI-NDVI 的关系模型估计出 LAI 值,对于每一种植被类型,其预测精度可用总均方根差 (RMSE, Root Mean Square Error) 来评价:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

式中, y_i 和 $\hat{y}_i$ 分别为测定值和预测值, n 为样本数, (包括建模样本和测试样本)。

2.3 LAI 的遥感估算与多尺度分析

TM 影像采用 2002 年 7 月的遥感数据,进行大气校正后,从 1:10 万地形图中选取地面控制点,进行几何精校正并建立地理参考 UTM(48)/WGS 84,使其精度控制在一个象元以内,TM 数据被重新采样建立 30m 分辨率的数据集,并在 ENVI 平台下通过波段代数运算方法生成流域 30m NDVI 图, $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$,所采用的红光反射波段(R)和近红外反射波段(NIR,)分别为 630~690nm 和 760~900nm。SPOT-4 VEGETATION 的 NDVI 数据(以下简称 VGT NDVI)来自其全球共享数据集,利用 R(610~680nm)和 NIR(780~890nm)计算得到,并利用最大化合成 MVC(Maximum Value Composition)的方法求取 7 月最大的 NDVI 值,这种方法可进一步消除云、大气、太阳高度角等部分干扰,VGT NDVI 数据被重新采样生成 1km 的数据集。MODIS 250m NDVI 数据(以下建成 MOD NDVI)来源于 NASA 的陆地过程分布式动态档案中心(LP DAAC, <http://edcdaac.usgs.gov/main.asp>)的植被指数三级产品,该产品经过大气校正、16d 限定视角的最大合成(CV-MVC)、并附有基于栅格的质量检验标记,所采用的 R 和 NIR 的波长范围分别为 620~670 nm 和 841~876 nm,数据的获取日期是 2002 年 7 月最大合成值。VGT NDVI,MOD NDVI 图以及 490 块野外样地的位置图均投影到和 TM NDVI 相同的地理参考系中。

利用 30m 分辨率的 TM NDVI,分别不同植被类型,建立 LAI-NDVI 的关系。理论上讲,在植被均一的植被条件下,这种关系不会随着空间分辨率的变化而改变,或者空间分辨率变化引起的预测偏差很小^[18],在此基础上,利用植被分类图、同期的较低分辨率 NDVI 数据可推算全流域 LAI 空间分布。但实际上,由于野外尤其及山区地形条件下,植被分布的破碎化,这种估算方法最主要的误差可能来源于植被类型的分类的精度、植被分布的均一性。在破碎化程度较高的区域,这种关系的精度将大大降低,因此本研究主要集中分析不同来源和分辨率的 NDVI 数据估算 LAI 所产生的误差。

3 研究结果

3.1 NDVI 和 LAI 的相关关系

以往的研究表明,表达 NDVI 和 LAI 之间的双曲线关系是估算 LAI 的最适当的形式^[19]。但由于在生长旺季,不同植被类型的 LAI 均达到其最大值,同一种类型的 LAI 可能分布在较窄的值域区间内,这样,在较小的区段内,有可能用线性关系拟合效果更好。在本文测定的 8 种类型中,针叶林和针阔混交林用双曲线关系拟合效果较好,而其他类型则呈现线性关系。暗针叶林共计 283 块样地,云杉属和冷杉属 LAI-NDVI 为双曲线关系,二者 LAI 的变化范围相似,约为 3.0~8.0 之间。从 LAI-NDVI 的关系图上看,云杉和冷杉的样地混合在一起,不能够被清晰的区分出来,说明这两种类型的暗针叶林在反射特性上具有相似的规律。针阔混交林和针叶林的 LAI-NDVI 关系类似,但其 LAI 变化变化区间小一些,约为 3.0~5.0 之间。从高山常绿灌丛和温带落叶灌丛的情况来看,两者均为线性关系,但高山灌丛的 LAI 变化较小约为 2.0~4.2,而落叶灌丛为 0.5~4.5 之间,主要原因是落叶灌丛包含的种类复杂,分布的海拔高度变化也较大, LAI 波动较大,因此其预测精度低于常绿灌丛。落叶阔叶的 LAI 值一般在 2.5~6.0 之间,且随着 LAI 增大,NDVI 值变化很快,说明在预测阔叶树种 LAI 变化时,尤其当 LAI 在 6.0 以下时,NDVI 是比较敏感的($R_2 = 0.732$, $p < 0.001$) (图 1)。

3.2 基于 NDVI 的 LAI 算法及 TM LAI 精度检验

根据图 1 中所示,基于 TM 影像和地面调查建立 LAI-NDVI 关系,即区分不同植被类型的 LAI-NDVI 关系,将这种关系应用到不同分辨率 NDVI 遥感数据上,便可以求算基于 VGT NDVI 的 LAI 最大值及空间分布图。植被分类采用一种优化迭代无监督分类(OIUC)技术^[20],得到全区的植被分类图,将 NDVI < 0.1 的区域包括裸岩、水体和冰雪部分作为非植被处理,即叶面积指数为零,将其他区域按植被类型分别应用下面的转换模型,将 NDVI 计算得到 LAI 值,及最大叶面积指数(表 1)。

首先将上述的关系模型应用到 TM NDVI 中,计算得到 TM LAI 数据。TM LAI 的精度通过上述预留的 40 块测试样地分植被类型进行检验,其根均方差 RMSE 变动范围在 0.384~0.599 之间,即控制在一个 LAI 单位以内,总体预测误差在 8.5%~13.3%之间。

3.3 VGT LAI 与 MODIS LAI 计算与校正

将基于 TM 的 LAI-NDVI 关系模型应用到 MODIS LAI 和 VGT LAI 的推算上,最主要的误差来源可能有:(1)

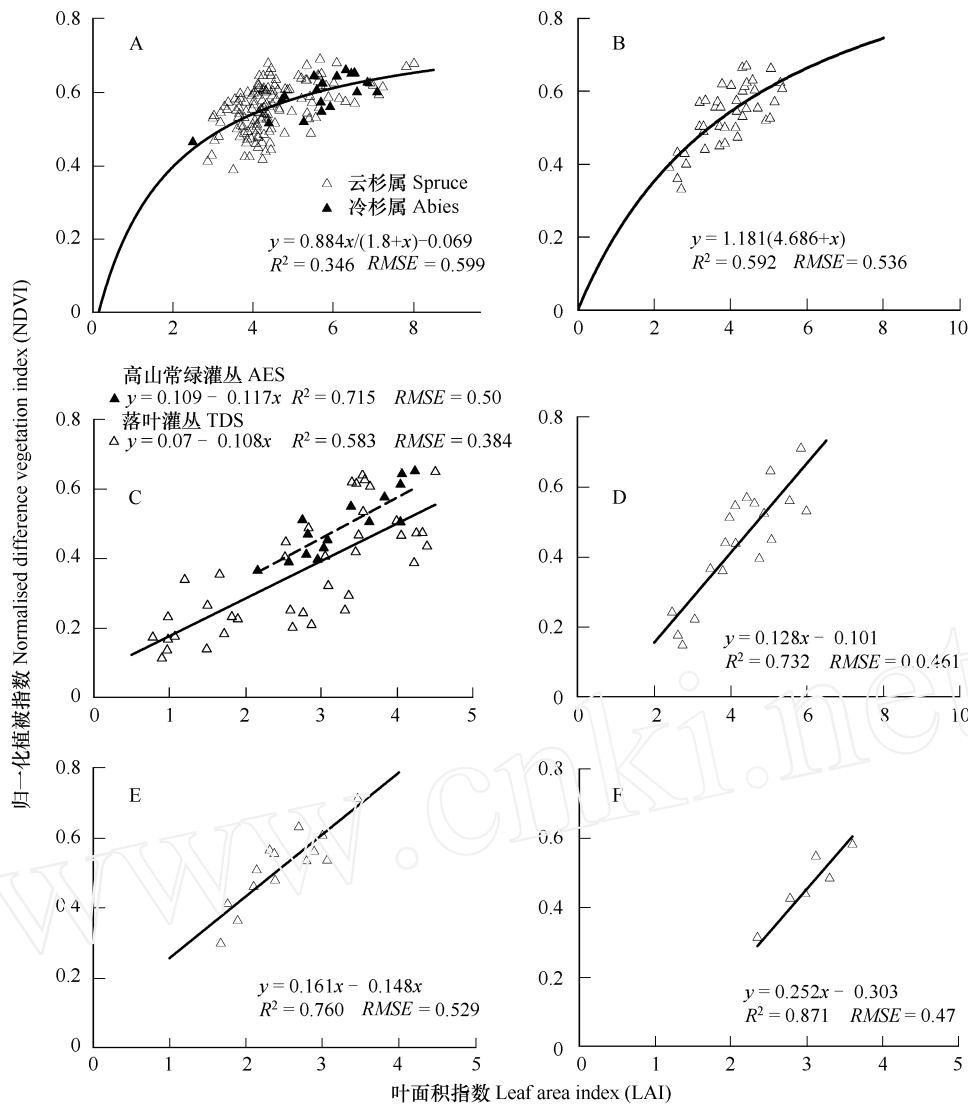


图1 基于 TM 影像和地面测定的岷江上游各植被类型的 LAI-NDVI 关系

Fig.1 Correlation of NDVI derived from Landsat TM with ground measurement across Minjiang watershed for different cover types

A: 针叶林 Coniferous forest; B: 针阔混交林 Mixed of coniferous and broad-leaved forest; C: 灌木林 Shrub lands; D: 阔叶林 Broadleaved forest; E: 农田 Crop land; F: 高山草甸 Alpine meadow

表1 不同植被类型的基于 NDVI 的 LAI 算法

Table 1 Land cover-specific NDVI to LAI converting algorithms

植被类型 Land cover	回归方程 (Regression)	R ²	RMSE
针叶林 Coniferous forest	LAI = 1.8 (NDVI + 0.069) / (0.815 - NDVI)	0.346	0.599
针阔混交林 Mixed forest	LAI = 4.686NDVI / (1.181 - NDVI)	0.592	0.536
温带落叶灌木 Temperate deciduous shrub	LAI = 8.547NDVI - 0.932	0.583	0.384
高山常绿灌木 Alpine evergreen shrub	LAI = 9.174NDVI - 0.648	0.715	0.500
阔叶林 Broadleaved forest	LAI = 7.813NDVI + 0.789	0.732	0.461
农田 Crop land	LAI = 6.211NDVI - 1.088	0.760	0.529
高山草甸 Alpine meadow	LAI = 3.968NDVI + 1.202	0.871	0.470

传感器之间的系统误差导致 TM NDVI 和 VGT NDVI 之间的差别; (2) 地表异质性大, LAI-NDVI 关系模型在较粗分辨率的 SPOT 上应用导致的误差; (3) 几何精确校正与重建地理参考造成的误差; (4) 植被分类造成的误差; (5) LAI-NDVI 非线性转换模型带来的误差。这些因素都可能会不同程度的影响最终得到的 MODIS LAI 和

VGT LAI 的精度,但这里,前两种误差是主要的误差来源,由于 3 种传感器所覆盖的波段范围不同,因此,计算的植被指数也不同,为了消除这种系统性的传感器误差,以 TM NDVI 为基准进行相对校正。主要步骤如下,选取地面控制点校准地理参考,选取和 TM 影像在时间上最接近的 SPOT 和 MODIS 影像,同时,选取该区植被类型中分布面积较大、植被均一性较好、受人类干扰较低的高山草甸作为背景进行校正,发现 VGT NDVI 整体均值比 TM NDVI 高 0.294 个单位,MOD NDVI 比 TM NDVI 高 0.264 个单位,在将 TM 的 LAFNDVI 转换模型应用到 SPOT 上的时候,首先消除这一差别。

总体上看,3 种分辨率的 NDVI 数据计算 LAI 结果比较接近,其中 TM LAI 的变动范围在 0~9.68 之间,均值为 4.53,MODIS LAI 变化在 0~8.49 之间,均值最小,为 3.55,VGT LAI 变化在 0~9.18,均值为 4.2,尽管进行了传感器之间的相对校正,MODIS 的模拟结果仍然偏低(表 2)。但从模拟精度来看,以 TM 30m LAI 为基础,对 SPOT 1km LAI 和 MODIS 250m LAI 的模拟结果进行检验,发现 MODIS 250m LAI 的总体预测误差为 30 %左右,而 SPOT 1km LAI 的误差达到接近 50 %,且和 TM LAI 数据的相关性较差,MODIS 250m LAI 取得了较好的模拟精度(图 3),进一步分析发现,MODIS 250m 被低估的区域主要在 LAI > 4.0 以上(图 3)。

表 2 不同分辨率的 LAI 数据及其不同植被类型的相关统计特征

Table 2 Summary of LAI statistics of the seven land cover types and those of TM,MODIS and VEGETATION over the same scenes									
		总体	针叶林	针阔混交林	高山常绿	阔叶林	落叶灌丛	农田	高山草甸
		Total	CF	MCBF	灌丛 AES	BF	IDS	CL	AM
TM LAI	最大值 Max	9.68	9.68	7.07	7.72	7.97	4.41	5.12	4.44
	最小值 Min	0.00	2.32	2.37	1.53	2.40	0.93	1.21	2.03
	均值 Mean	4.53	4.98	4.74	4.49	4.73	2.37	3.01	3.23
	标准差 S. D.	1.01	1.56	1.36	1.69	2.09	1.42	1.62	0.86
MOD LAI	最大值 Max	8.49	8.49	6.89	6.31	6.42	3.81	2.94	4.37
	最小值 Min	0.00	2.07	1.14	2.47	1.07	0.71	0.89	2.47
	均值 Mean	3.55	3.95	4.07	3.79	3.78	2.48	2.18	3.28
	标准差 S. D.	1.21	0.76	1.09	1.04	1.45	0.83	0.85	0.63
VGT LAI	最大值 Max	9.18	9.18	4.51	3.52	6.75	6.57	5.77	4.18
	最小值 Min	0.00	2.11	1.43	0.81	0.55	1.70	2.09	0.50
	均值 Mean	4.20	5.10	3.81	3.05	4.47	4.93	4.12	2.23
	标准差 S. D.	1.89	1.51	1.36	1.34	1.73	1.48	1.13	1.30

从不同植被类型的统计特征看,针叶林的 LAI 均值在 3 种分辨率的数据中最高的,其中 MOD LAI 的模拟结果明显偏低。针阔混交林中的 VGT LAI 的均值偏低。高山常绿灌丛和阔叶林的 MOD LAI 和 VGT LAI 都有不同程度的低估。根据 TM 和 MODIS 数据的结果,落叶灌丛的 LAI 均值相对其他类型是最低的,这是因为这种类型在分类时考虑包括了流域内相对较大面积的干旱河谷杂灌在内,而这种灌木的郁闭度和盖度较低,总体 LAI 值也偏低,但同时由于该类型分布比较破碎,VGT LAI 值因象元面积较大,混合了其他类型而偏高,且标准差较高,极差较大。总体上看,相对 TM LAI 而言,MOD LAI 明显被低估,而 VGT LAI 也有被低估的趋势但不明显,对于覆盖度较好的类型而言,VGT LAI 被低估,对覆盖度较差且破碎化的类型,VGT LAI 则倾向于被高估(表 2)。

3.4 LAI 的空间尺度扩展与误差分析

前文讲过,在较高空间分辨率上建立的 LAFNDVI 转换模型在应用到较低分辨率上会产生一系列的误差,这可能是由于较高的空间异质性导致的,这些空间异质性包括同一类型植被的密度不同、单象元混合植被类型,有的学者证明植被密度不同是可以被忽略的^[21],对于混合植被类型,可以采用亚象元面积比率的方法有效的解决,另外,LAFNDVI 之间的非线性关系也可能影响尺度转换,并有可能是 MODIS LAI 和 VGT LAI 被低估的主要原因^[18]。

图 4 中显示了随着象元空间分辨率的增大(100m,250m,500m,1000m),LAI 的的根均方差由 0.99 逐渐增大到 1.80,预测误差也从 23 %增大到 40 %,这些误差包含上述所有的与尺度转换有关的因素,包括空间异质

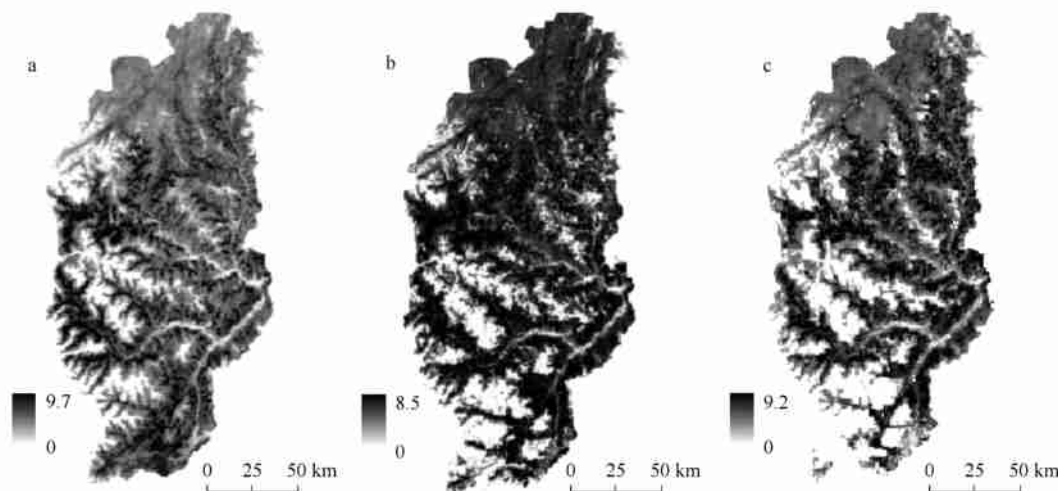


图2 不同来源与分辨率的遥感数据及推算岷江上游 LAI 空间分布图

Fig. 2 Spatial pattern of LAI across Minjiang watershed derived from different sensors' NDVI products

(a) 30m TM, acquisition date 2002-07-10; (b) 250m MODIS composite for the period of July 1~20, 2002; (c) 1000m SPOT VEGETATION composite for the period of July 1~20, 2002

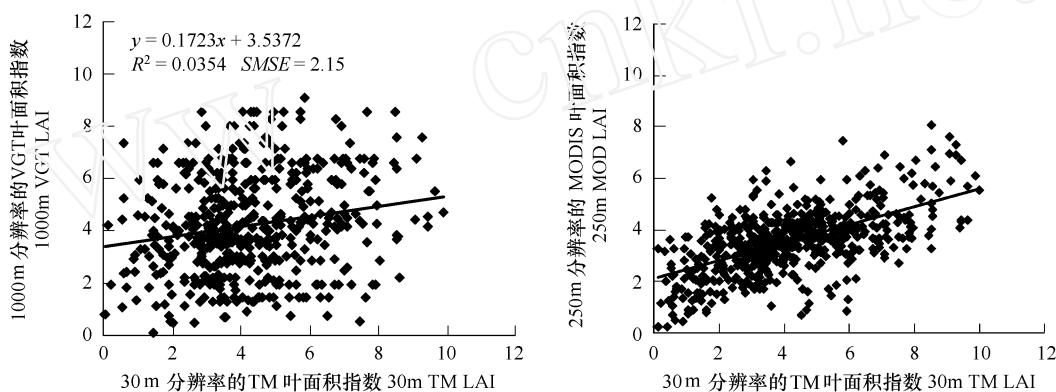


图3 基于相同的算法利用 VEGETATION 与 MODIS 遥感数据推算 LAI 并与 TM 推算结果的比较

Fig. 3 Comparison of VGT LAI and MOD LAI with those derived from TM with the same algorithm

性问题、非线性转换模型等因素。这种误差反映了该区地面特征的现实状况,从某种程度上将是很难被可克服的。同时还发现,当象元大小从 30m 增加到 250m 的过程中,其预测误差迅速扩大,而 500~1000m 的区间内,预测误差增加减缓。据此,可以推断,该区进行 LAI 的测定,其象元大小只有小于 250m,其预测误差才有望控制在 30 % 左右,象元空间尺度增大,预测精度将大大降低。

4 分析与讨论

利用高分辨率卫星影像、区分不同植被类型建立 LAI 算法,进而将这种算法用在更大的尺度上是目前许多学者关注的问题,关键是如何控制误差扩大化。由于 TM 影像具有较高的空间分辨率,基本可以保证象元内植被类型的单一性,野外样地的大小覆盖一个以上的象元,因此经过精确几何校正完全能够保证野外工作和遥感分析工作在相同的对象上。本研究证实了 NDVI 估算 LAI 取得了相对可靠的精度,当然也有学者利用其他与植被有关的光谱指数取代 NDVI,也取得了相当好的效果,例如利用 NIR 和 R 波段的简单比率 ($SR = \rho_{NIR}/\rho_{red}$),本文主要目的并不是比较哪种植被指数的预测效果好,所以没有对其他植被指数进行比较。

重采样后, LAI 图的空间分辨率降低,但不同分辨率与最初样点的吻合程度也逐渐降低,数据趋向离散

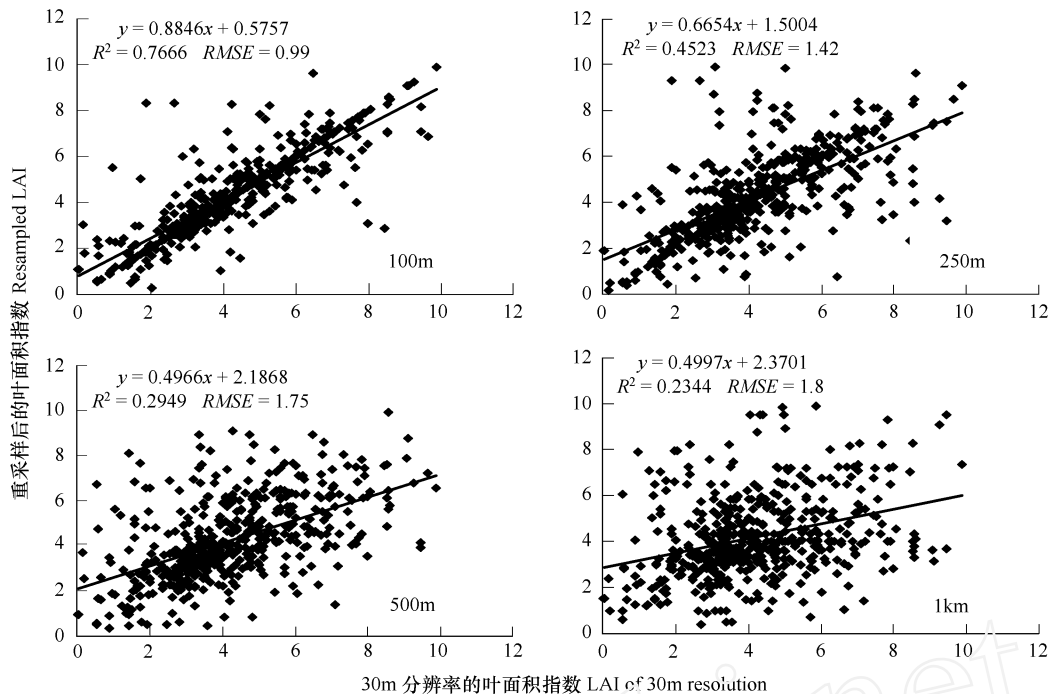


图4 TM LAI 及其重采样后形成的不同分辨率结果的比较

Fig.4 Comparison of LAI derived from TM 30m scene with that resampled to different resolutions, 100m, 250m, 500m and 1km

化,这主要是由于该区的地形条件和景观破碎化程度决定的,破碎化程度越高,重采样前后象元值的变化就越大,这明显区别于大面积均一的下垫面,例如在加拿大的试验结果表明,被重采样到 1 km 和 4 km 后, TM LAI 和 AVHRR LAI 仍然表现除良好的吻合关系,预测精度没有明显的变化^[18],但这一结论却不能在岷江流域被证实,关键在于两者的植被均一性差别太大了。空间分辨率降低后,本研究也发现 LAI 出现负向偏差,这一点和 Chen 的结论一致^[18],即尺度增大, LAI 有被低估的趋势,胡少英等在黑河及汉江流域 LAI 产品质量评价研究中证实相对于经过验证的 TM LAI, 1km MODIS LAI 产品被低估 10%~58%^[22]。

5 结论

本研究利用地面调查数据和 TM 影像数据,建立区分不同植被类型建立 LAI 算法,经验证具有较高的可靠性。

LAI 算法在较低空间分辨率遥感数据上应用时,主要的预测误差由于象元尺度扩大导致,而尺度扩大对误差的影响与下垫面的均一化程度有很大关系,在植被分布复杂、景观破碎化程度高的地区,尽可能选取高分辨率的遥感影像进行 LAI 预测。综合岷江上游地形、植被等因素考虑,选择 250m 的分辨率的遥感数据比较合适,一方面有望将预测误差控制在 30% 以内,另外,从数据源的可获取性来看,LP DAAC 数据中心已经向全球提供 250m 的 16d 合成数据,具有较短的时间周期,基本能够满足 LAI 物候过程等短周期分析的需要。

References:

- [1] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves, *Plant Cell and Environment*, 1992, 15: 421~429.
- [2] Chen J M, Gihlar J. Retrieving Leaf Area Index of Boreal Conifer Forests Using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*. 1996, 55: 153~162.
- [3] Luo T X, Neilson, Ronald P, Tian H, Vörösmarty, Charles J, Zhu H Z, Liu S R. A model for seasonality and distribution of leaf area index of forests and its application to China. *Journal of Vegetation Science*, 2002, 13: 817~830.
- [4] Bonan G B. Land-atmosphere interactions for climate system models: coupling biophysical, biogeochemical, and ecosystem dynamical processes. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51: 57~73.
- [5] Running S W, Nemani R R, Peterson D L, Band L E, Potts D F, Pierce L L, Spanner M A. Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by

- coupling satellite data with ecosystem simulation. *Ecology*, 1989, 70, 1090~1101.
- [6] Turner D P, Cohen W B, Kennedy R E, Fassnacht K S, Briggs J M. Relationships between leaf area index, fPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70, 52~68.
- [7] Warrick R Daves, Lu Z, Tom J H, Peter H R. Evaluation of a distributed parameter ecohydrological model (TOPOG. IRM) on a small cropping rotation catchment. *Journal of hydrology*, 1997, 191: 64~86.
- [8] Watson F G R, Grayson R B, Vertessy R A. Large scale distribution modeling and the utility of detailed ground data. *Hydrological Processes*, 1998, 12: 873~888.
- [9] Sun P S, Liu S R. Large-scale eco-hydrological model and its integration with GIS. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2115~2124.
- [10] Curran P J, Dungan J L, Gholz H L. Seasonal LAI in slash pine estimated with landsat TM. *Remote Sensing of Environment*, 1992, (39): 3~13.
- [11] Kuusk A. A fast invertible canopy reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51: 342~350.
- [12] Allard J W de Wit. The Application of a Genetic Algorithm for Crop Model Steering using NOAA-AVHRR Data, *Remote Sensing for Earth Science, Ocean, and Sea Ice Applications*, 1999, 3868: 167~181.
- [13] Fang H L, Liang S L, Kuusk A. Retrieving leaf area index using a genetic algorithm with a canopy radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85, 257~270.
- [14] Zhang W H, Lu T, Zhou J Y, Kang Y X, Ma K M, Liu G H. A floristic study on seed plants in the upper reaches of Minjiang River. *Acta Bot. Borea l. Occident. Sin.* 2003, 23(6): 888~894.
- [15] Fan H. A study on 50a land use and cover change of watershed of upper Minjiang river. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(1): 64~69.
- [16] Chen Z M, Ren S X. Effect of forest in the upstream minjiang river on Zipingpu reservoir and Dujiangyan irrigation region. *Journal of Chengdu University of Science and Technology*, 1995, 3: 1~14.
- [17] Chen J M, Gihlar J. Plant canopy gap size analysis theory for improving optical measurements of leaf area index. *Applied Optics*, 1995, 34, 6211~6222.
- [18] Chen J M, Pavlic G, Brown L, *et al.* Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurement. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80: 165~184.
- [19] Pu R L, Gong P. *Hyperspectral remote sensing and its applications*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [20] Jiang H, Liu S R, Sun P S. The influence of vegetation type on the hydrological process at the landscape scale. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, 30(5): 743~763.
- [21] Hu Z, Islam S. A framework for analyzing and designing scale invariant remote sensing algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35: 747~755.
- [22] Hu S Y, Zhang W C. A Quality Assessment of MODIS LAI Product in Heihe and Hanjiang River Basins, *Remote Sensing Information*, 2005, 4: 22~27.

参考文献:

- [9] 孙鹏森, 刘世荣. 大尺度生态水文模型的构建及其与 GIS 集成. *生态学报*, 2003, 23(10): 2115~2124.
- [14] 张文辉, 卢涛, 周建云, 康永祥, 马克明, 刘国华. 岷江上游流域种子植物区系研究. *西北植物学报*, 2003, 23(6): 888~894.
- [15] 樊宏. 岷江上游近 50a 土地覆盖报道变化趋势. *山地学报*, 2002, 20(1): 64~69.
- [16] 陈祖铭, 任守贤. 岷江上游森林对紫坪铺工程和都江堰灌区的影响. *成都科技大学学报*, 1995, 3: 1~14.
- [19] 浦瑞良, 宫鹏. *高光谱遥感及其应用*. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [22] 胡少英, 张万昌. 黑河及汉江流域 MODIS 叶面积指数产品质量评价. *遥感信息*, 2005, 4: 22~27.