

# 不同叶面积指数遥感反演方法 对红壤丘陵区森林的适用性分析

陈 崇<sup>1</sup> 朱延君<sup>1</sup> 李显风<sup>2</sup> 居为民<sup>1\*</sup>

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所 江西 南京 210093; 2. 江西省气象局信息中心 江西 南昌 330046)

摘要:利用 Landsat TM 遥感影像和同期的叶面积指数(LAI)观测数据生成了江西省泰和县 30 m LAI 图。据此比较了基于 4-尺度几何光学模型反演的 LAI 和 MODIS LAI 的质量。结果表明,基于 4-尺度几何光学模型反演的 LAI 和 MODIS LAI 存在着明显的差异,两者相关的  $R^2$  为 0.312 5,在 1 km 尺度两者的平均值比 TM LAI 的平均值分别偏低 14.0% 和 11.7%;在 LAI 低值区,MODIS LAI 偏高,基于 4-尺度几何光学模型反演的 LAI 偏低,而在 LAI 的高值区(LAI > 6.0),MODIS LAI 和基于 4-尺度几何光学模型反演的 LAI 都偏低,MODIS LAI 的偏低尤为明显,达 31.4%。

关键词:叶面积指数;植被指数;MODIS LAI;LAI 反演

中图分类号:S711.8 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2011)03-0508-06

## The Applicability of Different Methods for Retrieving Leaf Area Index of Forests in Red Soil Hilly Regions

CHEN Chong<sup>1</sup>, ZHU Yan-jun<sup>1</sup>, LI Xian-feng<sup>2</sup>, JU Wei-min<sup>1\*</sup>

(1. International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Jiangxi Province Meteorological Information Centre, Nanchang 330046, China)

**Abstract:** Based on field measurements of forest leaf area index (LAI) and concurrent landsat TM data, a high resolution map of forest LAI for Taihe County, Jiangxi Province was produced. Based on this map, the quality of LAI inversed using the method based on 4-scale geometrical optical model and MODIS LAI was assessed. It was found that noticeable difference exists between MODIS LAI and LAI inversed using the method based on the 4-scale model, with a  $R^2$  value of 0.312 5. The means of LAI inversed using the method based on the 4-scale model and MODIS LAI are 14.0% and 11.7% lower than that of TM LAI at 1 km resolution, respectively. In areas with low LAI values, MODIS LAI is higher than TM LAI while LAI inversed using the method based on the 4-scale model is lower than TM LAI. In areas with high LAI values (LAI > 6.0), both MODIS LAI and LAI inversed using the method based on the 4-scale model are lower than TM LAI. Especially, MODIS LAI is 34.1% lower compared with TM LAI.

**Key words:** leaf area index; vegetation Index; MODIS LAI; LAI inversion

叶面积指数(LAI)指单位地表面上全部单面绿叶的面积或所有面总面积的一半<sup>[1]</sup>,它控制着植物的光合、呼吸、蒸腾和降水截留等过程<sup>[2-3]</sup>。因此,它是生态和水文分布式模型的一个重要输入参数。

收稿日期:2010-12-05 修回日期:2011-03-10

基金项目:国家自然科学基金(40871240/D011004)和 863 项目(2009AA12Z134)资助

作者简介:陈崇(1985—) 硕士生,主要从事生态遥感研究, E-mail: iloveciciforever@163.com; \* 通讯作者: 居为民 教授 博士, E-mail: juweimin@nju.edu.cn。

遥感具有广覆盖、多频次的特性,从而成为在区域和全球尺度获取 LAI 的一个重要手段。现有的遥感提取 LAI 的方法可以分为两大类:统计模型法和模型反演法<sup>[4-5]</sup>。统计模型方法需要进行 LAI 的观测,从而建立遥感资料计算的植被指数与实测 LAI 之间的经验方程,生成区域的 LAI 图像。该方法具有简单、易实现、小区域内精度较高的优点,但存在着 LAI 较大时植被指数趋于饱和、LAI 与植被指数之间关系随时间和植被类型变化的缺陷,制约了该方法在大尺度上的应用。现在该类方法常被用来根据高分辨率遥感数据生成小区域的 LAI,验证模型反演的大区域 LAI 产品的精度。模型反演方法通过使几何光学或辐射传输模型模拟的反射率逼近遥感信号反演 LAI,由于该方法具有很强的物理基础,适用于不同的植被类型和环境,近年来得到越来越广泛的应用,成为生成区域和全球 LAI 产品的主要手段<sup>[5]</sup>。

MODIS(Moderate resolution Imaging Spectroradiometer)是美国 EOS 地球观测系统计划中 TERRA 和 AQUA 卫星所携带的中分辨率多光谱遥感仪器。NASA 生产了一系列 MODIS 产品,包括地表反射率、地表覆盖、植被指数、FPAR 及 LAI 等。MODIS LAI 基于辐射传输理论,利用 MODIS 多达 7 个光谱波段的双向反射因子和相关信息反演 LAI。当提取的光谱数值超出预期范围时,就采用备用算法估算 LAI。备用算法采用全球 6 种植被类型的归一化差值植被指数(NDVI)与 LAI 之间的关系估算 LAI<sup>[6]</sup>。数据源特性、数据处理方式等多种因素不可避免地会对 MODIS LAI 质量产生影响<sup>[7]</sup>。很多研究表明,MODIS LAI 常常会低于野外实测的 LAI。与此同时,Deng 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于 4-尺度几何光学模型的 LAI 反演算法,在进行 LAI 反演时考虑了太阳、卫星和目标物三者之间相对角度变化对遥感观测到的反射率影响。在加拿大<sup>[9]</sup>和中国北方<sup>[10]</sup>的应用表明,该反演方法生成的 LAI 优于 MODIS LAI 产品。

本文以我国红壤丘陵区有代表性的江西省泰和县为研究区,采用 TRAC 进行 LAI 观测,结合 Landsat-5 TM 影像数据生成研究区森林 30 m LAI 分布图,对 MODIS LAI 产品和基于 4-尺度几何光学模型反演生成的 LAI 进行评价比较,以期为我国利用反演模型生成 LAI 产品提供参考。

## 1 研究区概况

研究区为位于亚热带的红壤丘陵区的泰和县(26°27′~26°59′N,114°57′~115°20′E),该县地处江西中部偏南,吉安市西南部。境内地貌以山地、丘陵为主,面积达 1 877.5 km<sup>2</sup>,地势东西高,中间低。泰和属中亚热带季风性气候,气候温和,日照充足,雨量充沛。年平均气温 18.6℃,年均降水量 1 370.5 mm,无霜期 298 d 左右,年蒸发量为 1 767 mm,全年日照平均为 1 767 h。水资源丰富,赣江贯穿中部,过境河段长 59.1 km,有仙槎河、仁善河、牛吼江、禾水、蜀水等 11 条支流汇入赣江,构成羽状的赣江水系,总集水面积为 1.1 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。泰和县森林覆盖率达 59.27%,地带性植被为中亚热带常绿阔叶林。主要植被类型有常绿阔叶林、针叶林、针阔混交林、竹林、灌木草丛等。人工林主要有马尾松、湿地松、杉木、毛竹林、果树林等。

表 1 研究使用的植被指数

Tab. 1 Vegetation indices used in this study

植被指数 Vegetation index	计算公式 Formula
SR	NIR/R
NDVI	$(NIR - R) / (NIR + R)$
RSR	$SR \times [1 - (SWIR - SWIR_{min}) / (SWIR_{max} - SWIR_{min})]$
SAVI	$(NIR - R) / (NIR + R + L) \times (1 + L)$
EVI	$(NIR - R) / (NIR + 6R - 7.5B)$

表中 B、R、NIR、SWIR 分别为蓝光、红光、近红外和短波红外波段的反射率。L 为土壤调整参数,一般取值为 0.5,SWIR<sub>max</sub>、SWIR<sub>min</sub> 分别为短波红外波段的大值、最小值反射率。

B, R, NIR, and SWIR are reflectance in the blue, red, near infrared, and short wave infrared bands. L is the soil adjustment factor, normally assigned a constant of 0.5. SWIR<sub>max</sub>, SWIR<sub>min</sub> are the maximum and minimum values of the SWIR reflectance.

## 2 研究方法和数据处理

### 2.1 LAI 生成方法

2.1.1 基于植被指数的 LAI 遥感估算模型 在生成的反射率图像上提取每个样点的反射率,计算 SR(比值植被指数)、NDVI(归一化植被指数)、RSR(缩小的比值植被指数)、SAVI(土壤修正植被指数)和 EVI(增强型植被指数)等 5 种植被指数(表 1),分析这些植被指数的各种转换形式与实测 LAI 之间的相关关系,以相关系数最大为原则确定用于建立 LAI 遥感估算模型的植被指数和

转换形式。

2.1.2 LAI 的遥感反演模型 近年来 LAI 的遥感反演模型得到了快速发展,这类模型的基本思路是通过调整 LAI 使辐射传输或几何光学模型模拟的反射率与遥感观测信息之差达到最小确定 LAI,由于反演的计算量大,在进行区域尺度的 LAI 反演时,多采用建立查找表的方式进行。Deng 等<sup>[8]</sup>发展了基于 4-尺度几何光学模型的 LAI 反演算法,该方法的重要特点是考虑了 BRDF 效应对植被指数与 LAI 之间关系的影响。4-尺度几何光学模型模拟的有效叶面积指数 LAI<sub>E</sub> 与植被指数之间关系为:

$$LAI_E = f_{LE-SR}(SR \times f_{BRDF}(\theta_v, \theta_s, \phi)) \tag{1}$$

$$LAI_E = f_{LE-RSR}(SR \times f_{BRDF}(\theta_v, \theta_s, \phi) \times (1 - \frac{\rho_{SWIR} f_{SWIR-BRDF}(\theta_v, \theta_s, \phi) - \rho_{SWIR(min)}}{\rho_{SWIR(max)} - \rho_{SWIR(min)}})) \tag{2}$$

式中 SR、RSR 分别为比值植被指数和减小的比值植被指数;  $f_{LE-SR}$ 、 $f_{LE-RSR}$  为 4-尺度几何光学模型模拟的 SR 和 RSR 与 LAI<sub>E</sub> 之间的关系;  $f_{BRDF}$  和  $f_{SWIR-BRDF}$  是 BRDF 订正因子。  $\theta_s$  是太阳高度角,  $\theta_v$  是传感器观测角,  $\phi$  是太阳和传感器之间的相对方位角;  $\rho_{SWIR}$  是短波红外波段反射率;  $\rho_{SWIR(max)}$ 、 $\rho_{SWIR(min)}$  为短波红外反射率的最大和最小值<sup>[5]</sup>。

LAI 计算为:

$$LAI = LAI_E / \Omega \tag{3}$$

式中  $\Omega$  为植被聚集度系数,根据地表覆盖类型确定。

由于 RSR 植被指数具有与 LAI 之间关系稳定、受地表覆盖类型影响小的优点<sup>[11]</sup>,所以,选用公式 (2) 进行 LAI<sub>E</sub> 的反演。

## 2.2 数据获取与处理

2.2.1 实测 LAI 数据 于 2008 年 7 月 25 日至 27 日,在泰和县境内以中科院千烟洲生态站为中心选择 47 个有代表性的样地使用 TRAC 仪器观测 LAI,观测在每天的 09:00 至 16:30 的晴空条件下进行,同时记录样点中心的经纬度坐标、植被类型、坡度和坡向信息。每个样地的大小为 30 m × 30 m,与 TM 影像的像元大小一致,样点分布如图 1 所示,基本覆盖了研究区内主要的森林类型。

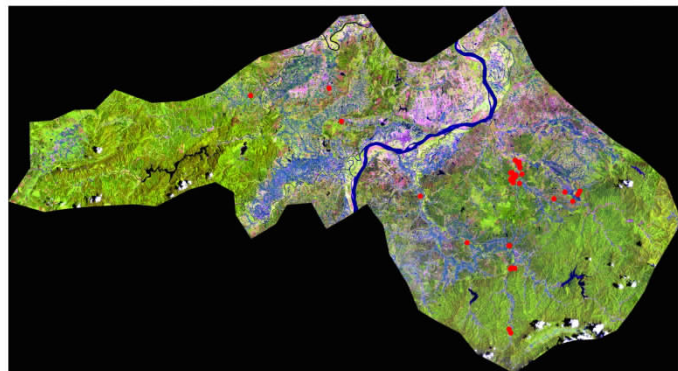


图 1 研究区和 LAI 野外实测点分布

Fig. 1 The study area and sampling sites (red dots) at which LAI was measured

2.2.2 Landsat-5 TM 影像 本研究使用 2008 年 7 月 26 日获取的 2 景 TM 影像(122/41 和 122/42),在对图像进行拼接之前,首先对各景图像进行几何精校正和大气校正处理。几何精校正利用 PCI 软件进行,以获取的 30 m 分辨率的江西省森林资源遥感调查图像为参考收集地面控制点,几何校正的总体误差(RMS)控制在一个像元以内。

对经过几何精校正的图像,采用 6S 模型进行大气校正<sup>[12]</sup>。在运行 6S 模型时,大气模式选择中纬度夏季模式,气溶胶类型为大陆型,大气的能见度为 30 km。经过几何校正和大气校正后,对 2 景影像进行拼接,并利用泰和县行政边界对拼接图像进行裁剪,得到研究区的反射率影像,计算植被指数。

2.2.3 MODIS 土地覆盖数据 土地覆盖类型数据是 LAI 反演模型必须输入的数据之一,不同的地物覆盖类型具有不同的植株结构,因此模型需要根据不同的植被类型设置不同的参数。本研究使用的是 MODIS 500 m 的地表覆盖数据(MCD12Q1)(<https://lpdacc.usgs.gov/>)。MCD12Q1 是 MODIS Aqua 和 Terra 数据的合成产品,使用的是 IGBP(国际岩石和生物圈计划)分类体系,共分成 17 种地表覆盖类型。MCD12Q1 数据采用的是 Sinusoidal 投影,为了与 TM 数据进行配准和验证,将其投影转换成 UTM/WGS 84 投影,并利用矢量边界裁剪出研究区覆盖范围。

2.2.4 MODIS 反射率数据 反演 LAI 使用的反射率数据为 8 d 合成的 MODIS 500 m 分辨率的 MOD09A1

产品,生成时间为 2008 年 7 月 28 日。该产品包括 7 个波段 500 m 反射率数据和 3 个角度信息数据。与土地覆盖类型数据一样,反射率数据也需要进行投影转换和数据裁剪。由于模型仅需要输入 3 个波段的反射率(红光波段、近红外波段和短波红外波段)和 3 个角度信息数据。因此从 MOD09A1 产品中提取出由以上 6 层信息组成一个新的数据文件,并与土地覆盖数据一起作为模型的输入数据。

### 2.3 MODIS 和反演的 LAI 精度评价

将利用 TM 数据结合 LAI 观测数据生成的 30 m TM LAI 分别采样到 500 m 和 1 km,评价 MODIS LAI 和本研究反演的 LAI 的精度。由于在 500 m 和 1 km 像元内可能存在着非森林植被,而本研究仅观测了森林的 LAI。所以,在进行 MODIS 和反演的 LAI 的精度评价时,只对森林面积比例大于 50% 的 500 m 和 1 km 像元进行比较分析。每个 500 m 和 1 km 像元内的森林面积比例根据 TM 数据的分类结果统计得到。

## 3 结果与分析

### 3.1 根据不同植被指数建立的 LAI 估算模型

通过统计分析发现,5 种植被指数与 LAI 的相关性存在着差异(表 2)。SR、NDVI 和 RSR 与 LAI 之间的最优相关关系为指数形式,而 SAVI 和 EVI 与 LAI 的最优相关关系为线性。经过指数形式变换后,NDVI 与 LAI 相关性最最好,  $R^2 = 0.6811$ ,其次为 SR,  $R^2 = 0.5938$ ; SAVI 与 LAI 的相关性最差,  $R^2$  为 0.5145。因此,本文采用 LAI = 0.0284e<sup>7.7357NDVI</sup> 模型估算研究区内森林的 LAI。

由于所有进行 LAI 观测的样地的植被都是森林,根据 LAI 实测数据和 NDVI 建立的 LAI 遥感估算模型仅适用于森林。采用决策树分类方法将土地覆盖类型分为水体、城镇和裸土、农田和森林 4 种类型。用生成的地表覆盖分类图掩膜,根据上述所确定的 LAI 估算模型(LAI = 0.0284e<sup>7.7357NDVI</sup>)生成研究区的 30 m 分辨率森林 LAI 的空间分布图(图 2)。图中白色为非森林覆盖区域,在研究区内森林的 LAI 存在着明显的空间变化,其中在中部和东部大部分区域森林的 LAI 处于 2.0~5.0,而在西部森林的 LAI 相对较高,一般在 5.0 以上,有些区域 LAI 甚至高于 7.0。Tian 等的研究表明<sup>[13]</sup>,与泰和县相邻的兴国县针叶林在 2003 年 5 月的 LAI 为 3.0~6.0,与本研究结果比较一致。

### 3.2 利用 MODIS 反射率数据反演的 LAI

利用方程(2)和 MODIS 500 m 光谱数据反演的研究区 LAI 分布如图 3 所示。LAI 呈现出两边高中间低的特征,在西部和东南部,森林茂密, LAI 多在 5.0 以上,部分可达 8.0;在北部和中部的森林密度相对较低, LAI 为 2.5~5.0;泰和县的农作物主要为一年两熟制的水稻,7 月下旬处于早稻收获、晚稻移栽

表 2 根据不同植被指数建立的 LAI 遥感估算模型

Tab.2 Models for empirically estimating LAI based on different vegetation indices

植被指数 Vegetation index	方程形式 Formula	$R^2$ Coefficient of determination
SR	$y = 0.1878e^{0.6704x}$	0.5938
NDVI	$y = 0.0284e^{7.7357x}$	0.6811
RSR	$y = 0.488e^{0.6071x}$	0.5773
SAVI	$y = 17.749x - 3.5992$	0.5145
EVI	$y = 37.706x - 2.7586$	0.5607

表中  $y$  对应于叶面积指数,  $x$  对应于植被指数。  
 $y$  represents LAI and  $x$  indicates vegetation index.

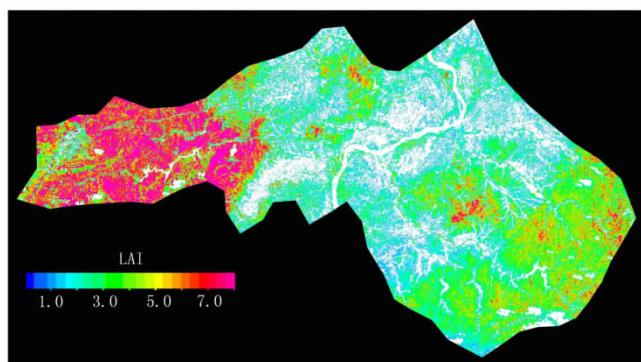


图 2 利用 TM 影像生成的泰和县 30 m 森林叶面积指数分布图(图中白色区为非森林)

Fig.2 The LAI map of forests at 30 m resolution generated using the TM remote sensing data (the white colored areas are non-forested areas)



期,所以农田的 LAI 普遍低于 1.0。

对比图 2 和图 3 可以发现,根据 MODIS 反射率数据反演的 500 m LAI 的空间分布特征与 TM LAI 具有较好的相似性,但在东南部反演的 LAI 明显高于 TM LAI;相反,在西部反演的 LAI 较 TM LAI 略偏低。图 4 为采样到 500 m 的 TM LAI 与反演的 500 m LAI 之间的比较结果,两者之间相关的  $R^2$  为 0.424 2,达到了极显著水平。一些像元的 TM LAI 仅为 2~4,而反演的 LAI 却高达 6~8;还有一些像元的 TM LAI 为 4~6,反演结果高达 8.0。这些像元主要集中在研究区的东南部。相反,也有部分像元,反演的 LAI 低于 TM LAI。

### 3.3 MODIS LAI 产品精度评价

将 30 m TM LAI 采样到 1 km (图 5a) 验证 2008 年 7 月 28 日的 MODIS LAI (图 5b)。可以发现,在西部 MODIS LAI 较 TM LAI 明显偏低,而东南部分像元的 MODIS LAI 略偏高。与本研究利用 MODIS 反射率反演的 LAI (图 5c) 相比,MODIS LAI 在西部和东南部偏低,而在中部和北部地区偏高。

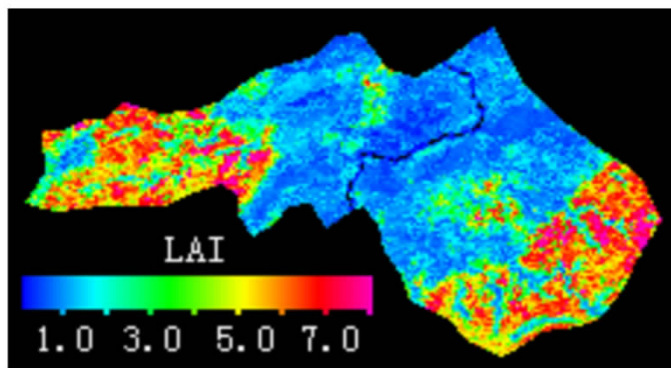


图 3 利用 MODIS 反射率数据反演的泰和县 500 m 叶面积指数分布  
Fig. 3 A map of LAI at 500 m resolution inverted using the MODIS reflectance data

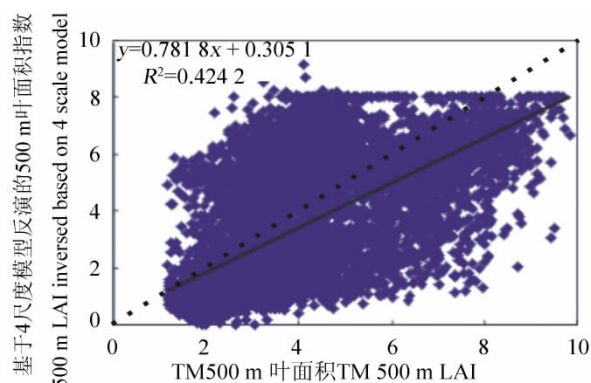
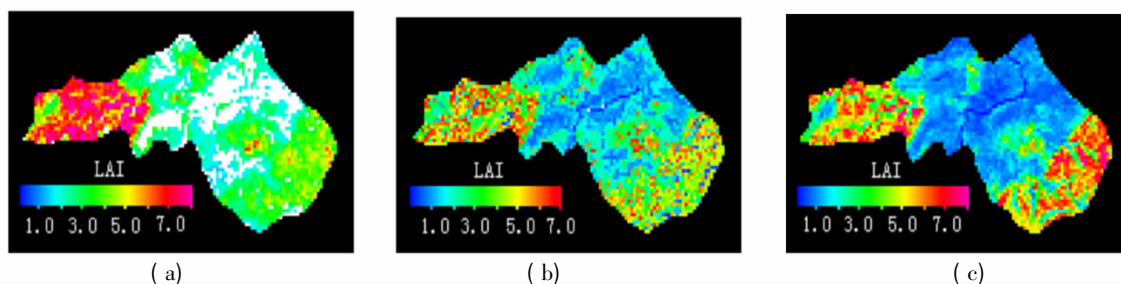


图 4 MODIS 反射率数据反演的 500 m LAI 与 TM LAI 的比较(虚线为 1:1 线)

Fig. 4 Comparison of 500 m LAI inverted using the MODIS reflectance data with TM LAI (The dashed line is the 1:1 line.)



(a) TM 1 km LAI; (b) MODIS 1 km LAI; (c) 基于 4-尺度模型反演的 1km LAI。

(a) TM 1m LAI; (b) MODIS 1km LAI; (c) LAI inverted using the method based on the 4-scale geometric optical model.

图 5 泰和县 1 km 叶面积指数分布图

Fig. 5 Maps of 1 km LAI in Taihe county

在 1 km 尺度,MODIS LAI 产品与 TM LAI 相关的  $R^2$  为 0.306 3 (图 6a),而本研究利用 MODIS 反射率反演的 LAI 与 TM 之间相关的  $R^2$  为 0.478 8 (图 6b)。1 km MODIS LAI 的最大值为 6.2,而 1 km TM LAI 可高达 9.0 以上。本研究反演的 LAI 与 MODIS LAI 存在着差异,两者  $R^2$  仅为 0.312 5。分析表明,在该研究区,本研究利用 MODIS 反射率数据反演的 LAI 的可靠性高于 MODIS LAI,这一结果与 Liu 等<sup>[10]</sup>在中国北部和 Pisek 等<sup>[9]</sup>在加拿大的研究结论一致。结果表明,反演算法对 LAI 反演结果有较大影响。

就整个研究区而言,1 km 的 TM LAI、MODIS LAI 和本研究反演的 LAI 的平均值分别为 3.84、3.39

和 3.30(表 3)。MODIS LAI 和本研究反演的 LAI 的平均值分别比 TM LAI 偏低 11.7% 和 14.0%。为了更详细地比较 3 种 LAI 数据的差异,我们将 LAI 值分成 4 个区间,分别为 0~2、2~4、4~6 和大于 6,以 1 km TM LAI 为依据判定 MODIS LAI 和本研究反演的 LAI 所处区间,计算各自的平均值。发现在各个区间,本研究反演的 LAI 的平均值比 TM LAI 的平均值都偏低,特别是当 TM LAI 为 0~2 和大于 6.0 时,反演的 LAI 偏低尤为明显。而 MODIS LAI 的平均值在 TM LAI 为 0~2 和 2~4 的区间内分别比 TM LAI 平均值偏高 0.1 和 0.07,而在 TM LAI 为 4~6 和大于 6 的区间,MODIS LAI 的平均值分别比 TM LAI 的平均值低 0.58 和 2.23,也比本研究反演生成的 LAI 的平均值分别偏低 0.43 和 0.58。

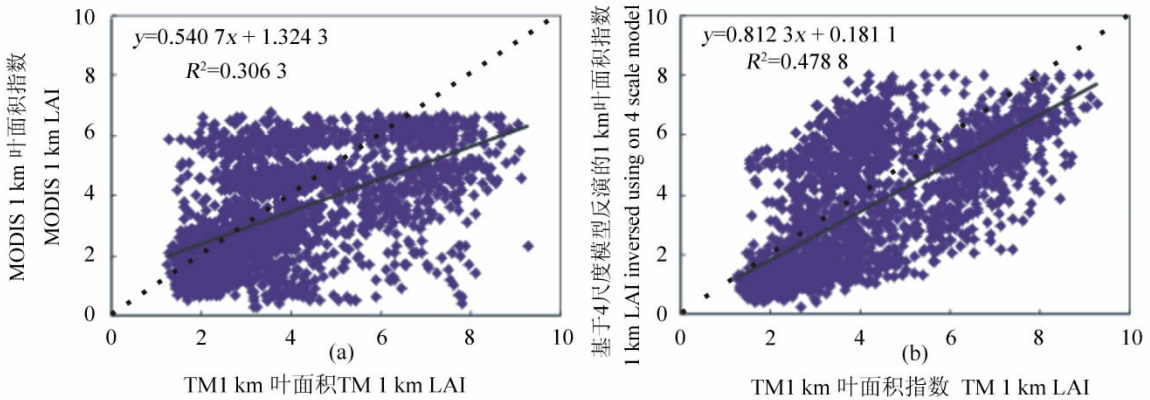


图 6 MODIS LAI (a) 和本研究反演的 LAI (b) 与 TM LAI 在 1 km 的比较结果

Fig. 6 Comparison of MODIS LAI (a) and LAI inverted in this study (b) with TM LAI at 1 km resolution (The dashed line is the 1:1 line)

表 3 MODIS LAI 和本研究反演的 LAI 与 TM LAI 比较的统计结果

Tab.3 Statistics of TM LAI , MODIS LAI and LAI inverted in this study at 1 km resolution

叶面积指数 Leaf area index	LAI 区间 LAI range				均值
	0~2	2~4	4~6	>6	
Average TM 1 km 叶面指数 TM 1 km LAI	1.76	2.92	4.78	7.10	3.84
基于 4 尺度模型反演的 1 km 叶面积指数 1 km LAI inverted using 4 scale model	1.20	2.63	4.63	5.45	3.30
MODIS 1 km 叶面积指数 MODIS 1 km LAI	1.86	2.99	4.20	4.87	3.39

### 4 结 论

本研究以江西省泰和县为研究区,利用 TRAC 进行森林 LAI 观测,分析了 TM 数据计算的不同植被指数与 LAI 之间的相关性,生成了区域的森林 LAI 分布图,据此评价了在典型丘陵红壤区 MODIS LAI 和基于 4-尺度几何光学模型反演的 LAI 的可靠性。得出的主要研究结论有:

(1) 在研究区,NDVI 是 LAI 估算最佳的植被指数,利用 47 个实测 LAI 数据,建立的 LAI 估算方程为  $LAI = 0.0284e^{7.7357NDVI}$ 。

(2) 基于 4-尺度几何光学模型反演的 LAI 与 TM LAI 具有较好的一致性,在 500 m 和 1 km 尺度,两者相关的  $R^2$  分别为 0.4244 和 0.4788。但是,反演的研究区内森林 LAI 的平均值比 TM LAI 的平均值偏低了 14%。反演的 LAI 偏低主要发生在 TM LAI 为 0~2 和大于 6.0 的情况下。

(3) MODIS LAI 与 TM LAI 之间存在着一定的差异,在 1 km 尺度,两者相关的  $R^2$  为 0.3125。研究区内森林的 MODIS LAI 平均值为 3.39,比 TM LAI 的平均值偏低了 11.7%。当 TM LAI 低于 4.0 时,MODIS LAI 的平均值偏高;而当 TM LAI 高于 4.0 时,MODIS LAI 的平均值较 TM LAI 明显偏低,而当 TM LAI 高于 6.0 时,MODIS LAI 的平均值较 TM LAI 偏低 31.4%。

#### 参考文献:

[1]Chen J M ,Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. Plant , Cell and Environment ,1992 ,15(4) :421-429.

(下转第 552 页)

- breeding and genetics of forest trees. Proceedings of QFRI/CRC - SPF Symposium Noosa Queensland Australia 2000: 27-43.
- [4] 栾启福 姜景民 张建忠 等. 国外松种间杂交育种及其  $F_1$  代早期生长评价 [J]. 林业科学研究 2008 21(3): 314-319.
- [5] 栾启福 姜景民 张建忠 等. 不同松树杂种  $F_1$  代在浙北和皖南的生长差异及其早期评选 [J]. 林业科学研究 2010 23(1): 25-30.
- [6] 王润辉 赵奋成 胡德活 等. 杂交松 3 个育种交配组遗传结构的 SSR 分子标记分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2008 28(5): 28-31 41.
- [7] 张应中 赵奋成 李福明 等. 湿加松  $F_1$  杂种家系年度生长相关及其早期选择 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008 32(4): 37-41.
- [8] 殷亚方 王莉娟 姜笑梅. Pilodyn 方法评估阔叶树种人工林立木的基本密度 [J]. 北京林业大学学报 2008 30(4): 7-11.
- [9] 朱景乐 王军辉 张守攻 等. 毛白杨材性指标预测及选择 [J]. 林业科学 2008 44(7): 23-28.
- [10] WU Shi-jun, XU Jian-min, LI Guang-you et al. Use of the pilodyn for assessing wood properties in standing trees of Eucalyptus clones [J]. Journal of Forestry Research 2010 21(1): 68-72.
- [11] 朱景乐 王军辉 张守攻 等. Pilodyn 在日本落叶松活立木材性指标预测中的应用 [J]. 林业科学研究 2009 22(1): 79-83.
- [12] 王军辉 张守攻 张建国 等. Pilodyn 在日本落叶松材性育种中应用的初步研究 [J]. 林业科学研究 2008 21(6): 72-76.
- [13] 朱景乐 王军辉 张守攻 等. 毛白杨材性指标预测及选择 [J]. 林业科学 2008 44(7): 23-28.
- [14] 成俊卿. 木材学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1985: 282-464.
- [15] 黄少伟 谢维辉. 实用 SAS 编程与林业试验数据分析 [M]. 广东: 华南理工大学出版社 2001: 268-278.
- [16] 陈晓阳 沈熙环. 林木育种学 [M]. 北京: 高等教育出版社 2005: 15-21.
- [17] 张颂云. 主要针叶树种应用遗传改良论文集 [C]. 北京: 中国林业出版社, 1990: 215-218.

(上接第 513 页)

- [2] Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images [J]. Remote Sensing of Environment, 1996 55(2): 153-162.
- [3] Sellers P J, Dickinson R E, Randall D A, et al, Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere [J]. Science, 1997 275(5299): 502-509.
- [4] 方秀琴 张万昌. 叶面积指数的遥感定量方法综述 [J]. 国土资源遥感 2003 3: 58-62.
- [5] Tang S, Chen J M, Zhu Q, et al. LAI inversion algorithm based on directional reflectance kernels [J]. Journal of Environmental Management, 2007 85(3): 638-648.
- [6] Justice C O, Townshend J R G, Vermote E F, et al. An overview of MODIS land data processing and product status [J]. Remote Sensing of Environment 2002 83(1-2): 3-15.
- [7] 胡少英 张万昌. 黑河及汉江流域 MODIS 叶面及指数产品质量评价 [J]. 遥感信息, 2005 4 22-27.
- [8] Deng F, Chen J M, Plummer S, et al, Algorithm for global leaf area index retrieval using satellite imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing of Environment, 2006 44(8): 2219-2229.
- [9] Pisek J, Chen J M, Deng F. Assessment of a global leaf area index product from SPOT-4 vegetation data over selected sites in Canada [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2007 33(4): 341-358.
- [10] Liu R, Chen J M, Liu J, et al, Application of a new leaf area index algorithm to China's landmass using MODIS data for carbon cycle research [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3): 649-658.
- [11] Brown L J, Chen J M, Leblanc S G, et al. A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: an image and model analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 2000 71: 16-25.
- [12] Vermote E F, Tanre' D, Deuze' J L, et al, Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing of Environment, 1997 35(3): 675-686.
- [13] Tian Q, Luo Z, Chen J M, et al, Retrieving leaf area index for coniferous forest in Xinguo County, China with ETM<sup>+</sup> images [J]. Journal of Environmental Management, 2007 85(3): 624-627.