

# 内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算研究

柳艺博<sup>1\*</sup>, 居为民<sup>1</sup>, 朱高龙<sup>1</sup>, 陈镜明<sup>1</sup>, 邢白灵<sup>1</sup>, 朱敬芳<sup>1</sup>, 周艳莲<sup>2</sup>

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京, 210093;

2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京, 210093)

**摘要:** 叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 是重要的植被结构参数, 反演LAI是植被遥感的重要研究内容之一。根据在内蒙古呼伦贝尔和锡林浩特草原利用LAI 2000观测的草地LAI, 比较了不同植被指数 (SR、RSR、EVI、NDVI、SAVI和ARVI) 估算不同类型草地LAI的能力, 建立了基于Landsat-5 TM遥感数据的LAI估算模型, 并利用LAI观测数据对模型进行了检验, 生成了研究区内草地LAI分布图, 据此对MODIS LAI产品一致性进行了评价。结果表明, 在呼伦贝尔和锡林浩特两个研究区, RSR与LAI的相关性最高 ( $R^2$ 分别为0.628、0.728, RMSE分别为0.512、0.490), 在低密度草地, RSR的优势更为明显; 验证表明, 根据RSR建立的LAI估算模型的精度可达70%; 利用TM数据生成的两个地区的LAI (TM LAI) 空间变化明显, 锡林浩特草地的LAI值整体上低于呼伦贝尔草地; 在呼伦贝尔和锡林浩特, MODIS LAI产品与TM LAI一致性分别为0.566, 0.323, MODIS LAI产品高估了呼伦贝尔草地LAI值, 而在锡林浩特研究区则存在低估现象。

**关键词:** 草地叶面积指数; 植被指数; LAI 2000; 内蒙古草原

## Retrieval of leaf area index for different grasslands in Inner Mongolia prairie using remote sensing data

LIU Yi bo<sup>1\*</sup>, JU Wei min<sup>1</sup>, ZHU Gao long<sup>1</sup>, CHEN Jing ming<sup>1</sup>, XING Bai ling<sup>1</sup>, ZHU Jing fang<sup>1</sup>, ZHOU Yan lian<sup>2</sup>

*1 International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093*

*2 School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093*

**Abstract:** Leaf area index (LAI) is a crucial parameter of vegetation structure. Its retrieval is an important research focus in remote sensing of vegetation. LAI of grasslands in Hulunbair (HU) prairie and Xilinhot (XI) prairie in Inner Mongolia was acquired using the LAI 2000 instrument. The correlations of six vegetation indices (Simple Ratio (SR), Reduced Simple Ratio (RSR), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI), and Enhanced Vegetation Index (EVI)) with measured LAI were investigated to establish models retrieving LAI from Landsat-5 TM data. LAI retrieved from TM data was then used as a benchmark for assessing the accuracy of MODIS LAI products. Results show that RSR has the highest correlation with LAI in both HU and XI grasslands, with  $R^2$  equal to 0.628 and 0.728, respectively. The Root Mean Square Error (RMSE) values of estimated LAI from RSR are 0.512 and 0.490, respectively. RSR over-performs other VIs more obviously when the density of grasslands is low. The validation using the measured LAI shows that the established model estimating LAI using RSR can capture 70% of LAI variations among 15 plots in HU and XI areas, respectively. LAI retrieved using TM data show distinct spatial variation in two study areas overall, the retrieved LAI is lower in XI than in HU. The agreement between MODIS LAI and LAI retrieved using TM data differs in two study areas, with  $R^2$  equal to 0.566 and 0.323 in HU and XI, respectively. The average of the MODIS LAI is higher in HU and lower in XI than TM LAI.

**Keywords:** leaf area index of grassland; vegetation index; LAI 2000; Inner Mongolia prairie

\*基金项目: 863 项目 (编号:2009AA12Z134); 973项目 (编号:2010CB833503)

收稿日期: 修订日期:

\*通讯作者 Corresponding author. E-mail: yiboliu@smail.nju.edu.cn

# 1 引言

植被叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 定义为单位地表面上绿叶总面积的一半<sup>[1]</sup>, 是重要的植物结构参数, 影响生态系统的物质和能量循环过程, 成为作物生长、陆面过程、水文和生态等模型的输入参数或状态变量<sup>[2-5]</sup>。近年来, LAI的观测与反演一直是一个热点研究问题, 对其进行长期监测的产品已经面世<sup>[6]</sup>。

草地是非常重要的生态系统, 由于草地生态系统的复杂多样性, 其LAI存在着很大的时空变异性, 获得可靠的LAI资料, 对于研究草地对气候变化和人类活动的响应具有非常重要的意义。拓印叶片后用结合求积仪测量、光电叶面积仪扫描直接测量和叶片拍照后进行计算机处理等方法为点的LAI的直接观测方法<sup>[7, 8]</sup>。这些方法虽具有观测精度高的优点, 但耗时费力、操作复杂, 工作繁重, 只适用于小型或少量样区的LAI观测。各种LAI光学观测仪器 (如LAI 2000, DEMON, TRAC, MVI等) 通过测量植物冠层间隙度获得植物冠层LAI<sup>[9]</sup>, 观测效率高于上述传统观测方法, 但在草地应用时易产生较大的误差。无论是直接观测还是光学仪器的间接观测方法, 都不可能得到LAI的空间连续分布数据。遥感技术具有覆盖广、重采样频率高等优点, 为进行区域或全球范围的LAI反演提供了有效途径<sup>[10, 11]</sup>。遥感反演方法可分为统计模型法和物理模型法两大类<sup>[12]</sup>, 物理模型建立在辐射传输模型基础上, 物理机理性强, 但所需参数多, 结果对参数设置敏感。统计模型法以光谱反射率或植被指数为自变量、LAI为因变量, 采用各种统计方法建立的根据遥感资料估算LAI的模型, 该类模型虽然存在着参数随时间和地点变化的不足, 但输入参数少, 形式简洁, 计算简单。统计模型现在常被用于从高分辨率遥感数据生成LAI, 对反演方法得到的LAI进行检验。

到目前为止, 已有许多遥感估算LAI的研究成果, 但多是关于森林<sup>[13-15]</sup>、农作物<sup>[16, 17]</sup>和湿地<sup>[18, 19]</sup>的, 应用遥感数据进行区域草地LAI遥感估算的研究尚显不足。我国是世界第三草地大国, 草地面积占国土面积的40%以上, 东起黑龙江, 西至新疆的北方温带草原是我国天然草地的主体, 有关该地区草地LAI遥感估算的研究还有待深入开展。本文以内蒙古呼伦贝尔市和锡林浩特市两个草地实验站为研究区, 利用LAI 2000进行LAI的野外观测, 对比分析了由Landsat-5 TM遥感数据计算的不同植被指数估算LAI的适用性; 进而建立了两个区域的LAI遥感估算模型, 生成了两个区域的LAI分布图; 据此对MODIS LAI的产品一致性进行了评价。

## 2 数据及方法

### 2.1 研究区概况

选取呼伦贝尔草甸草原<sup>[20]</sup>及锡林浩特干草草原<sup>[21]</sup>这两个具有代表性的草原区作为研究区, 其中呼伦贝尔研究区的观测选择在中国农业科学院呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站周边进行, 而锡林浩特研究区的观测围绕在中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站周围 (图1)。

(1) 中国农业科学院呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站 (49°20'24"N, 119°59'44"E) 位于内蒙古呼伦贝尔市谢尔塔拉牧场, 属大兴安岭西麓丘陵向蒙古高原的过渡区, 站点周围有大量围圈的羊草、针茅实验样地和打草场, 也有不少放牧场, 夹杂着小麦和油菜等农作物。该研究区属温带半干旱大陆性气候, 年均温-2~-11 °C, 无霜期95-110天, 年平均降水量350-400 mm, 降水季节分布不平衡, 主要集中在6-8月份。地带性土壤为黑钙土或暗栗钙土, 土层厚30-40 cm, 有机质含量5.1%左右。代表性的植被类型为温带草甸草原, 主要有羊草 (*Leymus chinensis*)、贝加尔针茅 (*Stipa baicalensis*)、硬质早熟禾 (*Poa sphonbylodes*)、斜茎黄芪 (*Astragalus adsuige*) 等。

(2) 中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站(43°37'48"N, 116°42'18"E)地处内蒙古自治区锡林浩特的白音锡勒牧场境内, 研究站北边荒丘地区零星分布着矮小灌木; 东南部有少许小麦, 草地主要集中在锡林河沿岸及牧场南部的羊草、大针茅及退化等三个常年试验样区周围。气候属于大陆性半干旱草原气候, 年均气温-0.4℃, 夏季温凉, 极端最高温38.5℃; 冬季寒冷, 极端最低温度-42.8℃, 年降水量为350-450 mm, 其中70%集中于7、8月份, 无霜期仅为90-110天。地带性土壤为栗钙土, 土层深度在1 m左右, 腐殖层厚20-30 cm。该区属于干草原, 对欧亚大草原的植被具有广泛的代表性, 以大针茅(*Stipa grandis*)和羊草(*Leymus chinensis*)群落为主。

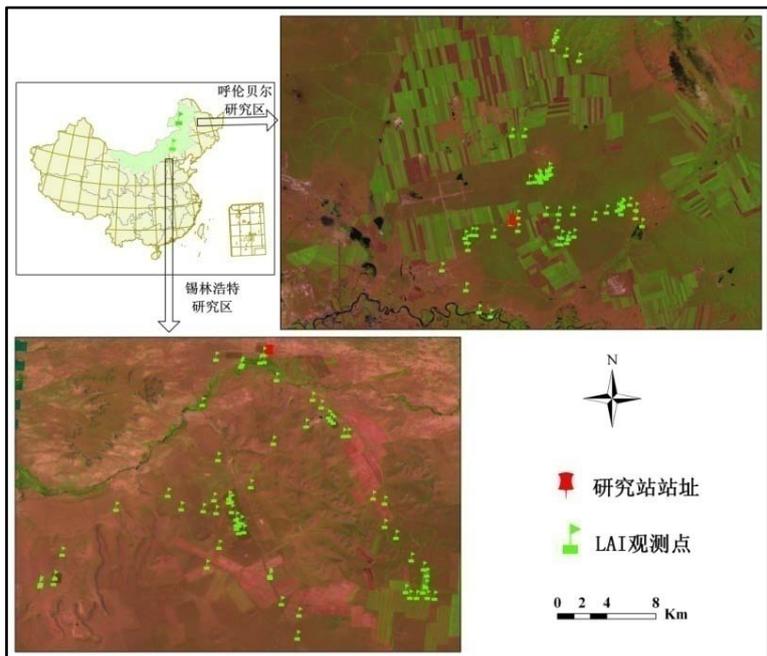


图1 内蒙古草原两个研究区及野外实测点分布示意图

Fig.1 The sketch map of the two study areas and field survey points in Inner Mongolia prairie

## 2.2 草地 LAI 的地面测量

结合地形图和植被类型图, 于2010年6月21-26日和6月28-7月3日期间利用Li-Cor LAI 2000冠层分析仪分别在呼伦贝尔和锡林浩特进行了LAI野外测量。观测样点主要分布在定位站的不同类型、不同盖度的草地试验样区内, 同时也选择了试验样区以外, 站点周围20 km以内有代表性的草地进行LAI观测。为了减小地形及地表不均质对观测结果的影响, 样区尽量设置在地势平坦、草地优势草种比较单一、空间分布均匀、面积大于100 m×100 m 的位置。观测在阴天和其它天气的日出(凌晨4点至6点半)及傍晚(下午7到8点半)进行, 确保观测时天空光为散射光。

在每个样区中心布设两条长度为50 m、与太阳光平行、间隔25 m的观测样线, 在每条样线上每隔10 m设置LAI 2000观测点(图2)。在每个LAI 2000观测点用小铲开挖一个长15 cm、宽5 cm、深约5 cm的小坑, 保证LAI 2000的探头可以正好水平地放置进小坑, 在开挖小坑时尽量不破坏周围草地结构, 以减小观测误差。测量时观测者背对太阳, 将镜头视场角设为270°, 在草地植被上方测量一个A值(冠层顶部天空光), 然后每隔10 m在所挖小坑处测量近地表的B值(冠层底部天空光), 完成12个B值测量后, 再在草地植被上方测量一次A值, 所得2个A值和12个B值用于计算该样区的LAI。为了减小地表枯草对观测结果的影响, 在地表存在枯草的观测点, 将LAI 2000传感器放置在与地表枯草高度相同的位置。用高精度手持GPS记录样区中心经纬度及海拔高度, 并用数码相机拍摄周围景观, 记录样区的群落组成、优势种、层次、盖度、植被

高度以及坡向、坡度等基础数据。在呼伦贝尔和锡林浩特观测的样区分别为52和51个（图1），这些样区基本涵盖了研究区全部草地类型，可以满足建模和验证的需求。

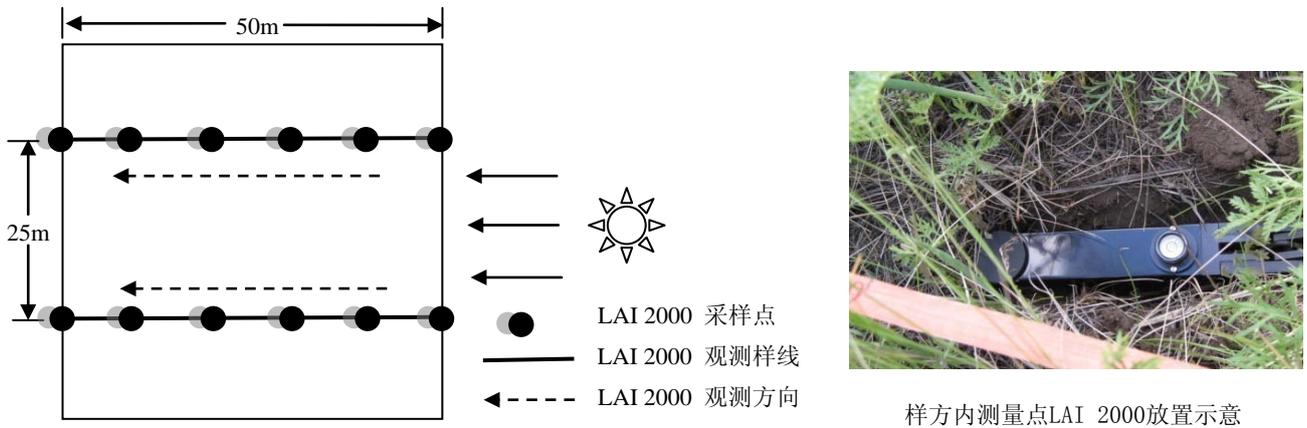


图2 样区内样方布设及测量样点设置示意图

Fig. 2 Sketch map of quadrat and LAI measurement point setting in plots

## 2.3 遥感数据获取及处理

### 2.3.1 TM 数据

根据两个站点的地理坐标，从USGS（United States Geological Survey, <http://www.edc.usgs.gov/>）数据中心下载2010年6月21号覆盖呼伦贝尔和锡林浩特研究区的两景Landsat-5 TM影像（轨道参数分别为path: 123, row: 26和path: 123, row: 30）。参考两个地区的LAI观测点和控制点的地理位置，裁剪得到两幅投影为UTM/WGS84，图像空间分辨率为30 m×30 m的影像（图像大小为呼伦贝尔1100×950,锡林浩特900×1000）。利用PCI软件，根据实地获取的地面控制点（呼伦贝尔28个，锡林浩特32个）坐标对图像进行几何精校正，校正的总体误差（RMS）控制在0.5个像元以内。几何精校正后，采用韦玉春等<sup>[22]</sup>提出的Landsat-5图像定标参数对图像进行辐射定标，然后运行6S模型<sup>[23]</sup>对图像进行大气校正，得到反射率图像。运行6S模型时大气模式选择中纬度夏季模式，气溶胶类型设为大陆型，大气能见度设为30 km，锡林浩特研究区平均海拔设为1100 m，呼伦贝尔地区取650 m。

### 2.3.2 MODIS LAI 产品

通过USGS下属的LPDAAC（Land Processes Distributed Active Archive Center, <https://lpdaac.usgs.gov/>）下载呼伦贝尔和锡林浩特所在区域2010年6月18号的8天合成MODIS LAI标准产品（hdf格式）—MYDI5A2（图幅号分别为h25v04, h26v04）。利用数据重投影工具MRT（MODIS Reprojection Tool）将Sinusoidal投影转换为WGS84，并输出tif格式的1 km分辨率的MODIS LAI图。

### 2.3.3 植被指数选择

现有的各类植被指数大概有40多种，可粗略分为简单的植被指数、基于土壤线的植被指数和基于大气校正的植被指数等三种类型<sup>[24]</sup>。结合研究区草地实际情况和植被指数的自身特点，本文最终选用比值植被指数（Simple ratio Vegetation Index, SR）<sup>[25]</sup>、减小的比值植被指数（Reduced Simple Ratio Index, RSR）<sup>[26]</sup>、归一化差值植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）<sup>[27]</sup>、土壤调节植被指数（Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI）<sup>[28]</sup>、大气阻抗植被指数（Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI）<sup>[29]</sup>和增强型植被指数（Enhanced Vegetation Index, EVI）<sup>[30]</sup>等6种常用于估算植被LAI的植被指数进行建模分析，研

究它们与研究区内草地LAI之间的关系，各种植被指数计算方法如表1所示。

考虑到LAI 2000观测的是50 m×50 m 样区的平均值，GPS记录的是样区中心的经纬度，同时为了减小图像几何校正误差对分析结果的影响，取样区中心点周围3×3像元的反射率平均值计算植被指数，然后与观测的LAI进行统计分析。

表 1 各植被指数计算方法  
Table 1 The formula of various vegetation indices

植被指数	计算公式	参考文献
SR	$NIR / R$	Jordan, 1969
RSR	$SR \times (1 - (SWIR - SWIR_{min}) / (SWIR_{max} - SWIR_{min}))$	Brown et al., 2000
EVI	$(NIR - R) / (NIR + 6R - 7.5B)$	Huete et al., 1997
NDVI	$(NIR - R) / (NIR + R)$	Rouse et al., 1973
SAVI	$(NIR - R) / (NIR + R + L) \times (1 + L)$	Huete, 1988
ARVI	$(NIR - 2R + B) / (NIR + 2R - B)$	Kaufman and Tanre, 1992

注：表中 B、R、NIR、SWIR 分别代表卫星影像数据的蓝光、红光、近红外及短波红外波段的反射率。L 为土壤调整参数，一般取 0.5， $SWIR_{max}$ 、 $SWIR_{min}$  分别为短波红外反射率的最大值、最小值。

## 2.4 LAI 遥感估算模型的构建

分别从呼伦贝尔和锡林浩特研究区的LAI实测数据中随机选择37个和36个样本，用于建立草地遥感估算模型。将计算的SR、NDVI、EVI、SAVI、ARVI和RSR等植被指数与实测的LAI数据分别进行线性、对数、乘幂和指数等形式的拟合，以植被指数与LAI之间的相关系数为指标，选择确定LAI的遥感估算模型。为进一步验证不同植被指数估算内蒙古草地LAI的适用性，将两个研究区的数据归并，从103个样本中随机选择73个数据，建立LAI估算模型。

利用建模样本以外的数据验证所建立的模型（呼伦贝尔和锡林浩特各15个，两个地区一起共30个），使用的精度评价指标包括 $R^2$ ，均方根差（Root Mean Square Error, RMSE）和估算精度EA。其中，RMSE和EA的计算公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (LAI_{pre} - LAI_{mea})^2}{n}} \quad (1)$$

$$EA = (1 - \frac{RMSE}{Mean}) \times 100 \quad (2)$$

其中： $LAI_{pre}$  和  $LAI_{mea}$  分别为LAI的预测值和测量值， $n$ 表示检验样本（测量值）的个数， $Mean$ 表示 $n$ 个LAI观测数据的平均值。

## 2.5 LAI 空间分布图生成

根据研究区地表覆被的实际情况，将呼伦贝尔研究区的土地覆被分为草地、麦田、油菜地、水体、居民地、轮休土地和道路等7种类型，锡林浩特研究区分为草地、麦田、水体、沙漠裸地、居民地和道路等6种类型。借助ERDAS IMAGINE软件对研究区影像进行监督分类，生成30 m分辨率的地表覆被类型图。通过土地覆被类型图提取草地部分地表反射率图像，然后选择最优的LAI估算模型，生成草地LAI空间分布图。

两个研究区的LAI分布图被作为基准来评价MODIS LAI产品的精度。

### 3 结果与分析

#### 3.1 草地 LAI 实测结果

呼伦贝尔和锡林浩特两个研究区观测的草地 LAI 值大部分介于 0.5 到 3.0 之间,长势好的草地 LAI 值大都在 1.5 以上。测得的呼伦贝尔和锡林浩特的 LAI 最小值分别为 0.46 和 0.65, 最大值分别为 4.06 和 4.70。在呼伦贝尔研究区观测的 LAI 数值相对比较集中, 平均值为 1.81, 比锡林浩特的 LAI 平均值 (1.63) 高 11% (表 2)。这是因为呼伦贝尔研究区属草甸草原, 草地的整体长势较好, 草地高度和盖度都比较高, 观测的 LAI 高值出现在试验场和沿海拉尔河的草地。锡林浩特研究区属干草草原, 除锡林河沿岸及羊草、大针茅及退化等三个常年试验样区外, 草地长势明显差于呼伦贝尔草甸草地。该研究区观测到的 LAI 高于 2.0 的比例小于呼伦贝尔, 在锡林河沿岸, 由于水分供应比较充足, 温度高于呼伦贝尔, 草地长势好, 观测的 LAI 最大值达 4.70, 高于呼伦贝尔研究区观测到的 LAI 最高值。

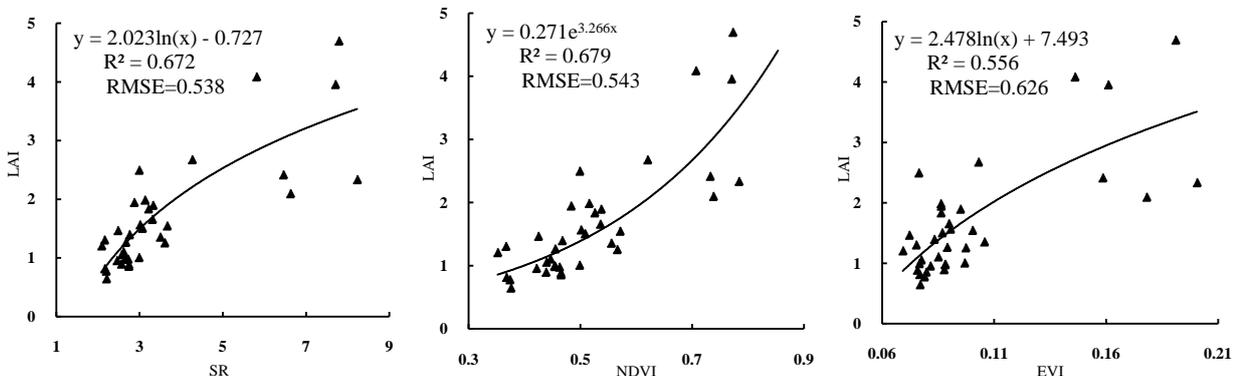
表 2 两个研究区草地 LAI 实测值统计  
Table 2 Statistic of measured LAI of grassland in the HU and XI prairie

	最小值	最大值	平均值	标准差
呼伦贝尔	0.46	4.06	1.81	0.75
锡林浩特	0.65	4.70	1.63	0.87

#### 3.2 植被指数与 LAI 的相关关系

从图3可以看出, 在锡林浩特, 各种植被指数与LAI存在着正相关关系, 其中ARVI和RSR与LAI之间的相关关系为线性, 其它各植被指数经过对数转换后与LAI的相关性最好 (图3)。在所有6个指数中, EVI与LAI的相关性最差,  $R^2=0.556$ ; SAVI次之,  $R^2=0.562$ ; SR、NDVI和AVRI与LAI的相关性类似,  $R^2$ 分别为0.672、0.679和0.658; RSR与LAI的相关性最好,  $R^2=0.728$ 。

当LAI小于2时, LAI的拟合误差较小; 随着LAI的上升, LAI的拟合误差上升。在锡林浩特的大部分样地, 草地较为稀疏, 覆盖度不高, 遥感得到的反射率包含大量的背景反射信息, RSR利用短波红外反射信息对SR进行订正, 既保持了SR对LAI变化敏感的优点, 同时又有效地消除了背景反射干扰, 提高了稀疏草地 LAI估算的精度 (图3)。由于大部分样点的LAI小于3.0, NDVI也表现出了与LAI较强的相关性, 仅次于RSR。利用6种植被指数建立的LAI估算统计模型拟合LAI的RMSE基本都在0.5左右, 其中, 利用RSR所建模型的RMSE最小为0.490, 利用EVI所建模型的RMSE最大, 为0.626。



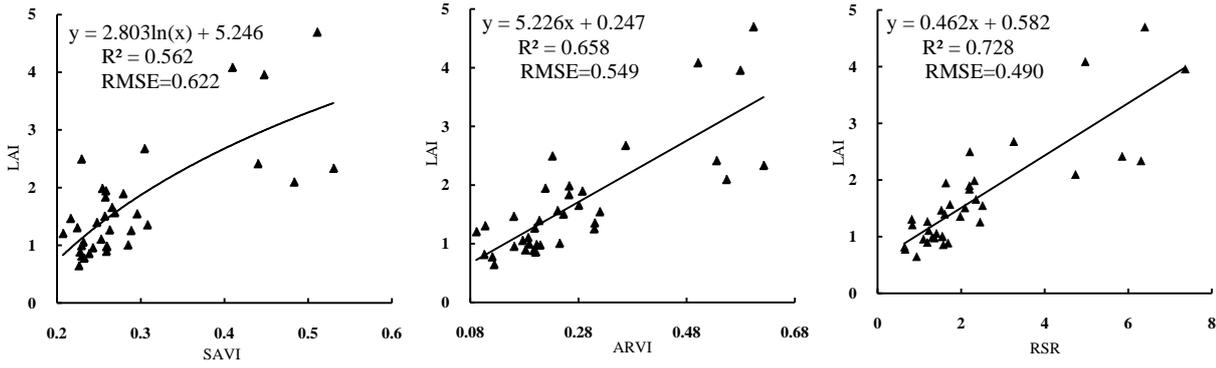


图3 锡林浩特研究区草地LAI与植被指数之间关系

Fig.3 The correlation of LAI of grassland with vegetation indices in XI study area

在呼伦贝尔研究区，6种植被指数与LAI具有类似的相关性， $R^2$ 介于0.60到0.63之间，植被指数与LAI之间相关关系为线性（SR、EVI和SAVI）、对数（NDVI）或幂指数形式（ARVI和RSR）。NDVI和SR与LAI之间的相关性类似， $R^2$ 分别0.602和0.604，差于其它植被指数与LAI的相关性；SAVI、ARVI和EVI与LAI的相关性依次变好， $R^2$ 由0.610增大到0.620；RSR与LAI的相关性最好， $R^2$ 达到了0.628。所建模型拟合LAI的RMSE为0.495（EVI）到0.516（NDVI）。RSR估算LAI的优势在呼伦贝尔研究区不如在锡林浩特研究区明显，主要原因是在呼伦贝尔研究区，草地稀疏（ $LAI < 2.0$ ）的样本较少，遥感的反射率受背景影响的程度相对较低。

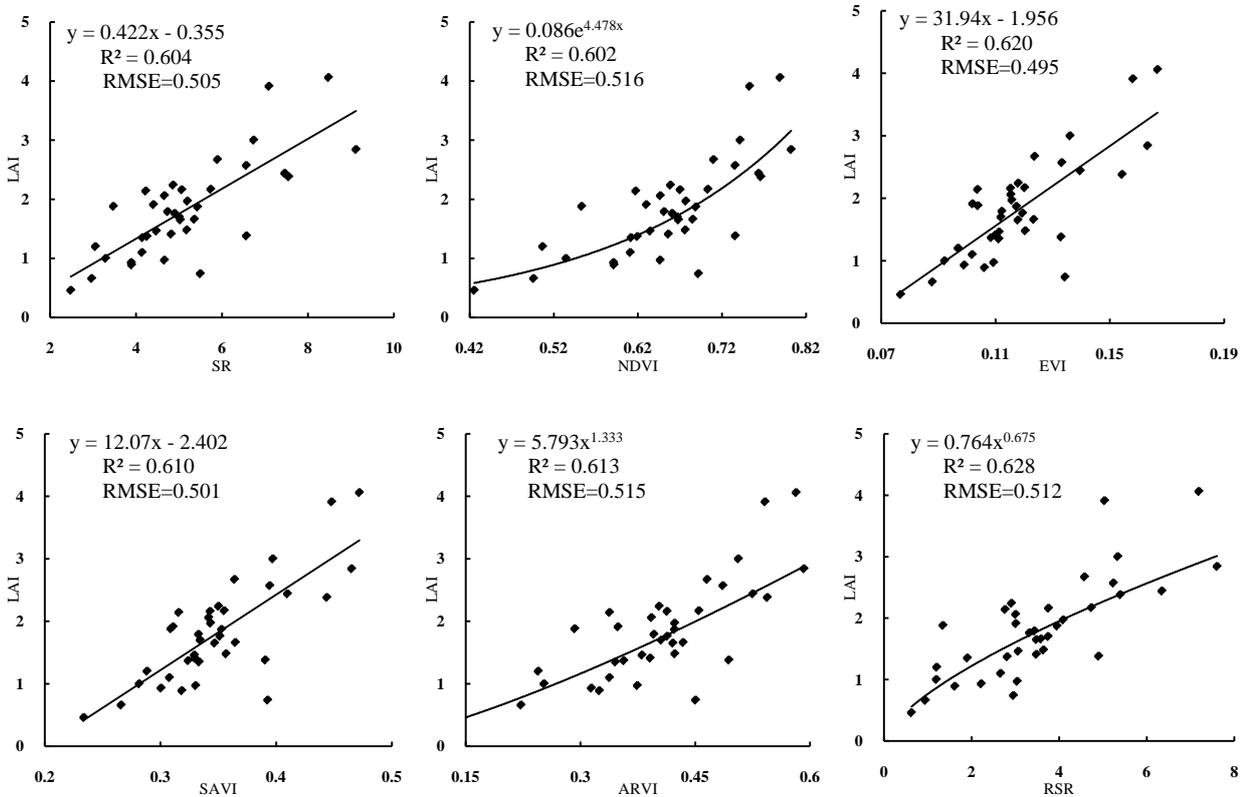


图4 呼伦贝尔研究区草地LAI与植被指数之间关系

Fig.4 The correlation of LAI of grassland with vegetation indices in HU study area

两个研究区的草地类型与长势以及土壤背景等存在着明显的差异，为了检验不同植被指数估算不同类

型草地LAI的适用性，将两个研究样区73个样本合并在一起进行分析。在6种植被指数中，RSR与LAI的 $R^2$ 仍可达到0.621，其次为SR ( $R^2=0.532$ )，最低为NDVI ( $R^2=0.502$ ) (图5)。表明RSR在估算LAI时，具有对背景反射率和植被类型不敏感的优点，可以适用于不同区域草地LAI估算。在加拿大北部<sup>[31]</sup>和中国黑龙江帽儿山地区<sup>[14]</sup>的研究也表明，RSR估算森林LAI的能力也优于其它植被指数。

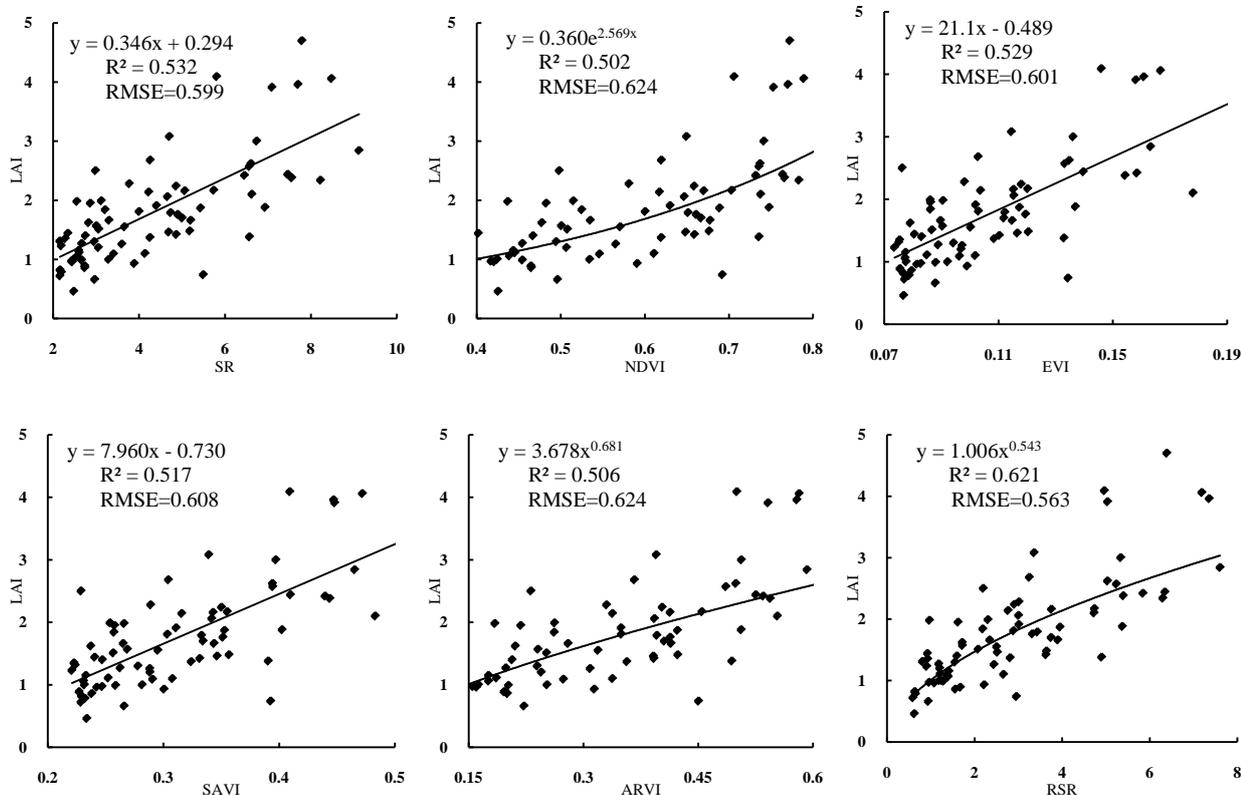


图 5 由呼伦贝尔和锡林浩特两个研究区总体观测样本得到草地LAI与植被指数之间相关关系

Fig.5 The correlations between the LAI of grassland and vegetation indices based on the total measured samples of the two study areas

### 3.3 LAI 遥感估算模型验证

通过以上分析发现，RSR在两个研究区都是估算草地LAI的最佳植被指数，为了检验所建模型的可靠性，利用建模样本以外的LAI观测数据对基于RSR所建的模型进行了验证，结果如表3所示。与验证数据相比，模型估算的LAI最小值较观测数据偏大、最大值则明显小于实测值。如在呼伦贝尔研究区，15个检验样本LAI的最大值为3.18，而模型估算的LAI的最大值仅为2.38。在呼伦贝尔和锡林浩特模型估算的LAI的标准差分别为0.431和0.432，而观测数据的标准差分别为0.576和0.624，说明模型估算的LAI范围低于观测数据。模型估算的LAI平均值在呼伦贝尔为1.80，与观测数据相等；在锡林浩特为1.34，比观测数据的平均值偏低0.19；当两个研究区的数据一起建模和验证时，模型估算的LAI平均值为1.67，比观测数据高0.12。模型估算LAI的RMSE为0.405-0.477，估算精度为69.78%-73.59%，证明在容忍估算误差不大于31%时所建模型可用于内蒙古草地的遥感估算制图。

表3 利用RSR植被指数建立的LAI估算模型估算的LAI与实测数据比较的结果

Table 3 Comparison of estimated LAI calculated using inversion model based on RSR and measured LAI

研究区	名称	最小值	最大值	平均值	标准差	均方根误差	估算精度
		Min	Max	Mean	STDV	RMSE	EA/ %
呼伦贝尔	观测的LAI	0.96	3.18	1.80	0.576	—	—

N=15	估算的LAI	0.95	2.38	1.80	0.431	0.477	73.51
锡林浩特	观测的LAI	0.72	2.86	1.53	0.624	—	—
N=15	估算的LAI	0.86	2.31	1.34	0.432	0.405	69.78
两个区数据	观测的LAI	0.65	2.86	1.55	0.574	—	—
N=30	估算的LAI	0.91	2.40	1.67	0.449	0.441	73.59

### 3.4 研究区草地 LAI 的空间分布特征

结合研究区草地的地表反射率图像，分别采用  $LAI = 0.764 \times RSR^{0.675}$  和  $LAI = 0.462 \times RSR + 0.582$  生成呼伦贝尔和锡林浩特两个研究区的 30 m 分辨率的草地 LAI 空间分布图（图 6）。图 6 中灰色区域为非草地区域。从图中可以看出，呼伦贝尔研究区的 LAI 空间变化比较明显，区内草地 LAI 大都在 0.5 以上，中国农业科学院呼伦贝尔草原生态站周围和南部的海拉尔河沿岸的草地 LAI 值基本都在 2.0 左右，有的地方甚至达到 3.0 以上。生态站西部的一些放牧场的 LAI 值则较小，基本都在 1.0 以下。东北部山区的草地 LAI 值在 3.0 以上，在个别样点估算的 LAI 比实测值大 1.0 以上，这可能是由于 RSR 对地形的敏感性所造成，Chen<sup>[31]</sup> 等对森林的研究也表明 RSR 在地形平坦地区具有优势，但在山区的阴坡 RSR 指数有可能被高估。如何进行山区草地 LAI 的遥感估算还有待进一步研究。在锡林浩特研究区内，LAI 高值区主要集中在锡林河沿岸，LAI 达到了 3.0 以上，羊草和退化试验样地的 LAI 值也较高，达到 2.0 左右。由于属于干草草原，且地形多丘陵，锡林浩特草地的 LAI 与呼伦贝尔相比整体要低，大部分地区 LAI 为 1.0 左右。与呼伦贝尔研究区一样，在中国科学院内蒙古草原生态站东部山区，估算的 LAI 也偏高。

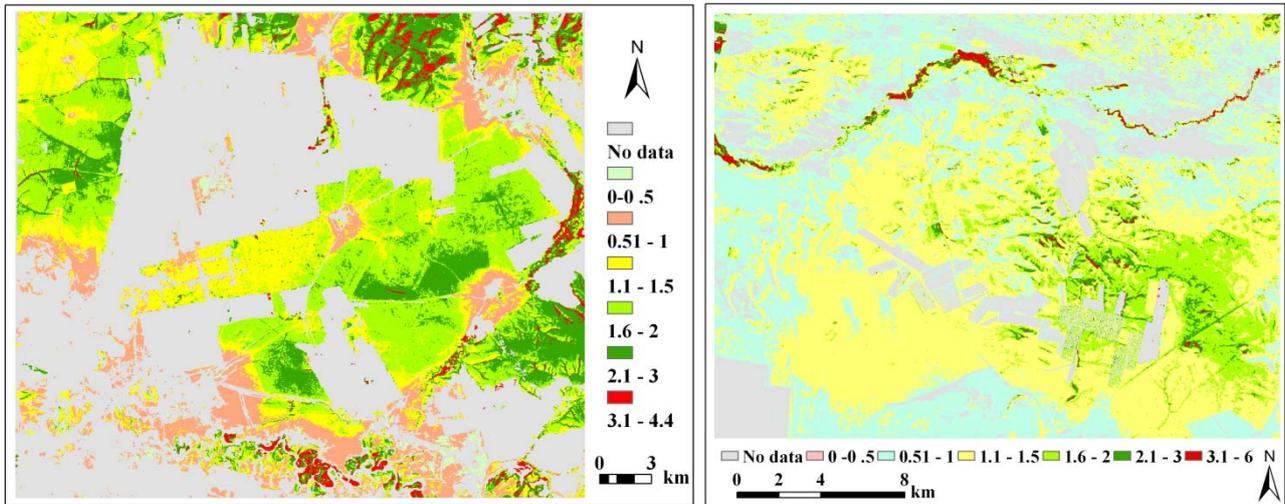


图 6 TM 数据生成的呼伦贝尔（左）和锡林浩特（右）30m 草地 LAI 空间分布图

Fig.6 30m resolution spatial distribution maps of grassland LAI generated from TM data in HU (left) and XI (right)

### 3.5 MODIS LAI 产品验证

为了验证 MODIS LAI 产品在两个研究区的精度，参照 CEOS（Committee Earth Observing Satellites）提出的全球中等分辨率 LAI 产品的验证框架<sup>[32]</sup>，将两个研究区 TM 数据生成的 30 m 草地 LAI 采样到 1 km 后对 MODIS LAI 进行了评估（为方便起见，将由 30 m TM LAI 重采样后生成的 1 km LAI 称为 TM 1 km LAI）。考虑到 MODIS 的混合像元问题，仅对草地面积大于 50%（由 30 m 的 TM 地表覆被分类数据统计得到）的 MODIS 像元进行了 MODIS LAI 的精度分析。在呼伦贝尔研究区，TM 1 km LAI 值在 0.49–3.04 之间，均值为 1.62；而 MODIS LAI 值在 0.7–6.6 之间，均值为 1.84，该地区 MODIS LAI 产品的平均值比 TM 1 km LAI

偏高约 13.6%。而在锡林浩特研究区，TM 1 km LAI 的范围为 0.81-2.64，均值为 1.19，MODIS LAI 的范围为 0.5-2.7，均值为 0.95，TM 1 km LAI 的均值比 MODIS LAI 均值偏低约 25.3%。

图 8 为两种 1 km 尺度 LAI 比较的散点图，可以看出，在呼伦贝尔研究区，对绝大部分草地像元，MODIS LAI 与 TM 1km LAI 具有很好的一致性， $R^2$  达到 0.566，但 MODIS LAI 也存在少数 LAI 值大于 4.0 的像元，LAI 值远高于对应 TM 1 km LAI 像元。在锡林浩特研究区，MODIS LAI 与 TM 1 km LAI 的一致性相对较差， $R^2$  为 0.323，总体而言，随着 LAI 的增大，MODIS LAI 的低估现象越明显。由于两个研究区地理环境和草地状况不同，MODIS LAI 产品的精度存在差别，MODIS LAI 的精度在草地覆盖度高的呼伦贝尔研究区高于在草地覆盖度低的锡林浩特研究区。其他学者也证实了 MODIS LAI 在不同地区、不同植被类型存在不同程度的低估或高估现象<sup>[33,34]</sup>。

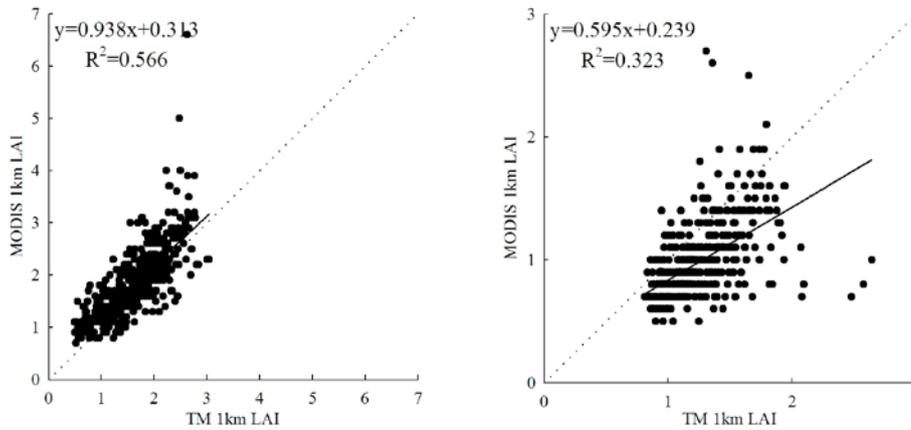


图 8 呼伦贝尔（左）和锡林浩特（右）1km 分辨率 TM LAI 和 MODIS LAI 产品比较（虚线是 1:1 的线）  
Fig.8 Comparison of TM 1km LAI and MODIS LAI products in HU (left) and XI (right) (The dotted line is 1: 1)

#### 4 结论

本文以内蒙古自治区呼伦贝尔和锡林浩特两个地区的典型草地为研究对象，利用LAI 2000观测的LAI数据比较了SR、RSR、NDVI、SAVI、ARVI和EVI等6种植被指数与LAI之间的相关性，确定了草地LAI遥感估算模型，基于生成的TM LAI数据对MODIS LAI产品精度进行了评价。

通过研究可知在内蒙古草地区，SR、RSR、NDVI、SAVI、ARVI和EVI等6种植被指数与LAI之间均具有较好的相关性；其中，RSR是草地LAI估算的最佳植被指数，能够较好地用于LAI的反演，在锡林浩特该植被指数的优势更为明显。验证表明，RSR建立的LAI估算模型的LAI估算精度可达近70%，两个研究区中的大部分草地地势平坦，也存在少部分坡地和沟谷，在此情况下，RSR估算的LAI误差较大。利用TM数据和所建模型生成的30m LAI在两个研究区都存在着显著的空间变化。

利用本研究生成的精度为70%的TM LAI验证MODIS LAI产品的结果表明，MODIS LAI在呼伦贝尔研究区的质量较高，与TM LAI具有很好的一致性， $R^2$  达到0.566；而在锡林浩特研究区，MODIS LAI与TM LAI的一致性较差（ $R^2=0.323$ ）。MODIS LAI产品高估了呼伦贝尔草地的LAI，而在锡林浩特研究区则存在低估现象。

估算LAI的统计模型是根据LAI实测数据和植被指数所建立的。本研究采用挖坑放置LAI 2000传感器的方法进行LAI的观测，虽然提高了工作效率，但土坑大小也会对观测结果有一定影响；此外，由于LAI 2000

通过测量草地冠层的孔隙率来计算LAI的值，草地冠层中混杂的枯草会导致所测LAI在一定程度上偏大，如何订正枯草对LAI观测结果的影响还有待继续深入研究。

植被指数受诸如地形、土壤背景、大气状况和表面双向性等非植被因素的影响，由于没有大气状况实测数据，本研究利用6S模型进行大气订正时对模型参数的取值进行了简化；而且未进行地形订正，这些处理方面的误差会对研究结果有一定影响，复杂地形条件下草地LAI的遥感估算研究仍需进一步深入。

## 致谢

本研究草地叶面积野外观测过程中得到中国科学院内蒙古草原生态系统定位站和中国农业科学院呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站的大力支持，南京大学国际地球系统科学研究所顾祝军博士后对论文提出了建设性的修改意见，在此表示衷心地感谢！

## References

- [1] Chen JM, Black T A. Defining Leaf-Area Index for Non-Flat Leaves. *Plant Cell and Environment*, 1992, 15(4):421-429.
- [2] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, Moore B, Churkina G, Nemry B, Ruimy A, Schloss AL, Intercompariso P P N M. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, 1999, 5:1-15.
- [3] Liu J, Chen J M, Cihlar J, Park W M. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote sensing of environment*, 1997, 62(2):158-175.
- [4] Reich P B, Turner D P, Bolstad P. An approach to spatially distributed modeling of net primary production (NPP) at the landscape scale and its application in validation of EOS NPP products. *Remote sensing of environment*, 1999, 70(1):69-81.
- [5] Scurlock J M O, Cramer W, Olson R J, Parton W J, Prince S D. Terrestrial NPP: Toward a consistent data set for global model evaluation. *Ecological Applications*, 1999, 9(3):913-919.
- [6] Wu B F, Zeng Y, Huang J L. Overview of LAI/FPAR Retrieval form Remotely Sensed Data. *ADVANCE IN EARTH SCIENCE*, 2004 90(4):585-590.
- [7] Bao Y J, Ji Z H, Zhang Y. Comparison of Measure Methods of Leymus chinensis Leaf Area. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol*, 2001, 33(1):62-64.
- [8] Zhang W L, Chen S P, Miao H X, Lin G H. EFFECTS ON CARBON FLUX OF CONVERSION OF GRASSLAND STEPPE TO CROP LAND IN CHINA. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(6):1301-1311.
- [9] Chen J M, Rich P M, Gower S T, Norman J M, Plummer S. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1997, 102(D24):29429-29443.
- [10] Rautiainen M. Retrieval of leaf area index for a coniferous forest by inverting a forest reflectance model. *Remote sensing of environment*, 2005, 99(3):295-303.
- [11] Weiss M, Baret F. Evaluation of Canopy Biophysical Variable Retrieval Performances from the Accumulation of Large Swath Satellite Data. *Remote sensing of environment*, 1999, 70(3):293-306.
- [12] Fang X Q, Zhang W C. THE APPLICATION OF REMOTELY SENSED DATA TO THE ESTIMATION OF THE LEAF AREA INDEX. *REMOTE SENSING FOR LAND & RESOURCES*, 2003, 57(3): 58-62.
- [13] Li X F, Ju W M, Chen S, Zhou Y L. Influence of land cover data on regional forest leaf area index inversion. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(5):982-996.
- [14] Zhu G L, Ju W M, Chen J M, Fan W Y, Zhou Y L, Li X F, Li M Z. Forest canopy leaf area index in Maoershan Mountain: Ground measurement and remote sensing retrieval. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(08):2117-2124.
- [15] Cohen W B, Maersperger T K, Yang Z Q, Gower S T, Turner D P, Ritts W D, Berterretche M, Running S W. Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM plus and MODIS for four sites in North America: a quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(3):233-255.
- [16] Meng J H, Wu B F, Li Q Z. Method for estimating crop leaf index of China using remote sensing. *Transactions of the CASE*, 2007, 23(2):160-167.

- [17] Yang P, Shibasaki R, Wu W B, Zhou Q B, Chen Z X, Zha Y, Shi Y, Tang HJ. Evaluation of MODIS land cover and LAI products in cropland of North China plain using in situ measurements and landsat TM images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(10):3087-3097.
- [18] Jin H A, Liu D W, Wang Z M, Song K S, Li F, Yang F, Du J, Li F X. Remote sensing estimation model of wetland vegetation LAI in Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(5):803-808.
- [19] Li X R, Liu Q J, Cai Z, Ma Z Q. Leaf area index measurement of *Pinus elliotii* plantation. *ACTA ECOLOGICA SINICA*, 2006, 26(12):4099-4105.
- [20] Li L Z, Zhang D G, Xin X P, Yan Y C, Yang G X, Li J. Photosynthetic characteristics of *Leymus chinensis* under different soil moisture grades in Hulunber prairie. *ACTA ECOLOGICA SINICA*, 2009, 29(10): 5271-5279.
- [21] Zh L Y, Zhang J X, SAI Y J Y, Bao H X, Shan J G, Guo Z Z. Remote sensing monitoring model I for grassland vegetation biomass monitoring in typical steppe — a case study from Xilinguole, *PRATACULTURAL SCIENCE*, 2008, 25(4): 31-36.
- [22] Wei Y C, Huang J Z. The gains/biases values and their effects on the calculation results of planetary reflectance in Landsat-5 Image. *GEO-INFORMATION SCIENCE*, 2006, 8(1):110-113,126.
- [23] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L., Herman M, Morcrette J J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3):675-686.
- [24] Chen X L, Zhao H M, Tian L Q. Remote Sensing of Environment: Models and Applications. WUHAN: WUHAN UNIVERSITY PRESS, 2008: 110-113.
- [25] Jordan C F. DERIVATION OF LEAF-AREA INDEX FROM QUALITY OF LIGHT ON FOREST FLOOR. *Ecology*, 1969, 50(4):663-666.
- [26] Brown L, Chen J M, Leblanc S G, Cihlar J. A Shortwave Infrared Modification to the Simple Ratio for LAI Retrieval in Boreal Forests: An Image and Model Analysis. *Remote sensing of environment*, 2000, 71(1):16-25.
- [27] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, Deering D W. Monitoring vegetation systems in the Great plains with ERTS. *Proceedings of Third ERTS Symposium*, 1973, 1:48-62.
- [28] Huete A R. A SOIL-ADJUSTED VEGETATION INDEX (SAVI). *Remote sensing of environment*, 1988, 25(3):295-309.
- [29] Kaufman Y J, Tanre D. ATMOSPHERICALLY RESISTANT VEGETATION INDEX (ARVI) FOR EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2):261-270.
- [30] Huete A R, Liu H Q, Batchily K, vanLeeuwen W. A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote sensing of environment*, 1997, 59(3):440-451.
- [31] Chen J M, Pavlic G, Brown L, Cihlar J, Leblanc S G, White H P, Hall R J, Peddle D R, King D J, Trofymow J A, Swift E, Van der Sanden J, Pellikka P K E. Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote sensing of environment*, 2002, 80(1):165-184.
- [32] Morisette J T, Baret F, Privette J L, Myneni R B, Nickeson J E, Garrigues S, Shabanov N V, Weiss M, Fernandes R A, Leblanc S G, Kalacska M, Sanchez-Azofeifa G A, Chubey M, Rivard B, Stenberg P, Rautiainen M, Voipio P, Manninen T, Pilant A N, Lewis T E, Iames J S, Colombo R, Meroni M, Busetto L, Cohen W B, Turner D P, Warner E D, Petersen G W, Seufert G, Cook R. Validation of global moderate-resolution LAI products: A framework proposed within the CEOS Land Product Validation subgroup. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006 44(7):1804-1817.
- [33] Li X, Ju W, Zhou Y, Chen S. Retrieving leaf area index of forests in red soil hilly region using remote sensing data. *Second International Conference on Earth Observation for Global Changes (EOGC 2009): Remote Sensing of Earth Surface Changes* (pp. 74710-74719). Chengdu, China: SPIE.
- [34] Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen MS. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3-4):490-507.

## 参考文献

- [6] 吴炳方,曾源,黄进良. 遥感提取植物生理参数 LAI/FPAR 的研究进展与应用. *地球科学进展*,2004 90(4): 585-590.
- [7] 鲍雅静,季政海,张颖. 羊草叶面积测量方法的比较. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2001, 33(1): 62-64.
- [8] 张文丽,陈世苹,苗海霞,林光辉. 开垦对克氏针茅草地生态系统碳通量的影响. *植物生态学报*,2008, 32(6): 1301-1311.
- [12] 方秀琴,张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述. *国土资源遥感*,2003, 57(3): 58-62.
- [13] 李显凤,居为民,陈姝,周艳莲. 地表覆盖分类数据对区域森林叶面积指数反演的影响. *遥感学报*,2010, 14(5):982-996.

- [14] 朱高龙,居为民,Chen J M,范文义,周艳莲,李显风,李明泽. 帽儿山地区森林冠层叶面积指数的地面观测与遥感反演. 应用生态学报,2010, 21(08): 2117-2124
- [16] 蒙继华,吴炳方,李强子. 全国农作物叶面积指数遥感估算方法. 农业工程学报,2007, 23(2): 160-167.
- [18] 靳华安,刘殿伟,王宗明,宋开山,李方,杨飞,杜嘉,李凤秀. 三江平原湿地植被叶面积指数遥感估算模型. 生态学杂志 2008, 27(5): 803-808.
- [19] 李轩然,刘琪璟,蔡哲, 马泽清. 湿地松林叶面积指数测算. 生态学报,2006, 26(12):4099-4105.
- [20] 李林芝,张德罡,辛晓平,闫玉春,杨桂霞,李瑾. 呼伦贝尔草甸草原不同土壤水分梯度下羊草的光合特性. 生态学报,2009, 29(10):5271-5279.
- [21] 张连义,张静祥,赛音吉亚,包红霞,谭建国,郭志忠. 典型草原植被生物量遥感监测模型——以锡林郭勒盟为例. 草业科学,2008, 25(4):31-36.
- [22] 韦玉春,黄家柱. Landsat5 图像的增益、偏置取值及其对行星反射率计算分析. 地球信息科学,2006, 8(1): 110-113,126.
- [24] 陈晓玲,赵红梅,田礼乔. 环境遥感模型与应用. 武汉: 武汉大学出版社, 2008: 110-113.