

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第18期 Vol.31 No.18 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 18 期 2011 年 9 月 (半月刊)

目 次

高寒矮嵩草草甸冬季 CO ₂ 释放特征	吴 琴, 胡启武, 曹广民, 等 (5107)
开垦对绿洲农田碳氮累积及其与作物产量关系的影响	黄彩变, 曾凡江, 雷加强, 等 (5113)
施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响	祁 瑜, 黄永梅, 王 艳, 等 (5121)
浙江天台山甜槠种群遗传结构的时空自相关分析	祁彩虹, 金则新, 李钧敏 (5130)
大兴安岭林区不同植被对冻土地温的影响	常晓丽, 金会军, 于少鹏, 等 (5138)
樟子松树轮不同组分的稳定碳同位素分析	商志远, 王 建, 崔明星, 等 (5148)
内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算	柳艺博, 居为民, 朱高龙, 等 (5159)
杭州西湖北里湖荷叶枯落物分解及其对水环境的影响	史 绮, 焦 锋, 陈 莹, 等 (5171)
火干扰对小兴安岭落叶松-苔草沼泽温室气体排放的影响	于丽丽, 牟长城, 顾 韩, 等 (5180)
黄河中游连伯滩湿地景观格局变化	郭东罡, 上官铁梁, 白中科, 等 (5192)
黄土区次生植被恢复对土壤有机碳官能团的影响	李 婷, 赵世伟, 张 扬, 等 (5199)
我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性	祖元刚, 李 冉, 王文杰, 等 (5207)
黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子	高会议, 郭胜利, 刘文兆 (5217)
宁南山区典型植物根际与非根际土壤微生物功能多样性	安韶山, 李国辉, 陈利顶 (5225)
岩溶山区和石漠化区表土孢粉组合的差异性——以重庆市南川区为例	郝秀东, 欧阳绪红, 谢世友 (5235)
夏蜡梅及其主要伴生种叶的灰分含量和热值	金则新, 李钧敏, 马金娥 (5246)
苏柳 172 和垂柳对 Cu ²⁺ 的吸收特性及有机酸影响	陈彩虹, 刘治昆, 陈光才, 等 (5255)
导入 <i>TaNHX2</i> 基因提高了转基因普那菊苣的耐盐性	张丽君, 程林梅, 杜建中, 等 (5264)
空气湿度与土壤水分胁迫对紫花苜蓿叶表皮蜡质特性的影响	郭彦军, 倪 郁, 郭芸江, 等 (5273)
黄土高原旱塬区土壤贮水量对冬小麦产量的影响	邓振镛, 张 强, 王 强, 等 (5281)
咸阳地区近年苹果林地土壤含水量动态变化	赵景波, 周 旗, 陈宝群, 等 (5291)
苗药大果木姜子挥发油成分变化及其地理分布	张小波, 周 涛, 郭兰萍, 等 (5299)
环境因子对小球藻生长的影响及高产油培养条件的优化	丁彦聪, 高 群, 刘家尧, 等 (5307)
不同基质对北草蜥和中国石龙子运动表现的影响	林植华, 樊晓丽, 雷焕宗, 等 (5316)
安徽沿江浅水湖泊越冬水鸟群落的集团结构	陈锦云, 周立志 (5323)
黑胸散白蚁肠道共生锐滴虫目鞭毛虫的多样性分析与原位杂交鉴定	陈 文, 石 玉, 彭建新, 等 (5332)
基于熵权的珠江三角洲自然保护区综合评价	张林英, 徐颂军 (5341)
专论与综述	
中小尺度生态用地规划方法	荣冰凌, 李 栋, 谢映霞 (5351)
土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展	陈 朝, 吕昌河, 范 兰, 等 (5358)
海洋浮游植物与生物碳汇	孙 军 (5372)
多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展	孙晓新, 宋长春, 王宪伟, 等 (5379)
生源要素有效性及生物因子对湿地土壤碳矿化的影响	张林海, 曾从盛, 仝 川 (5387)
生态网络分析方法研究综述	李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 等 (5396)
研究简报	
不同群落中米氏冰草和羊草的年龄结构动态	金晓明, 艾 琳, 刘及东, 等 (5406)
主题分辨率对 NDVI 空间格局的影响	黄彩霞, 李小梅, 沙晋明 (5414)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-09



封面图说: 在树上嬉戏的大熊猫——大熊猫是中国的国宝, 自然分布狭窄, 数量极少, 世界上仅分布在中国的四川、陕西、甘肃三省的部分地区, 属第四纪冰川孑遗物种, 异常珍贵。被列为中国国家一级重点保护野生动物名录, 濒危野生动植物种国际贸易公约绝对保护的 CITES 附录一物种名录。瞧, 够得上“功夫熊猫”吧。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

柳艺博, 居为民, 朱高龙, 陈镜明, 邢白灵, 朱敬芳, 周艳莲. 内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算. 生态学报, 2011, 31(18): 5159-5170.

Liu Y B, Ju W M, Zhu G L, Chen J M, Xing B L, Zhu J F, Zhou Y L. Retrieval of leaf area index for different grasslands in Inner Mongolia prairie using remote sensing data. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5159-5170.

内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算

柳艺博^{1,*}, 居为民¹, 朱高龙^{1,3}, 陈镜明¹, 邢白灵¹, 朱敬芳¹, 周艳莲²

(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;

3. 闽江学院地理科学系, 福州 350108)

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 Yibo^{1,*}, JU Weimin¹, ZHU Gaolong^{1,3}, CHEN Jingming¹, XING Bailing¹, ZHU Jingfang¹, ZHOU Yanlian²

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

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

3 Department of Geography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China

Abstract: Leaf area index (*LAI*), defined as one half of the total green leaf area per unit ground surface area, is a crucial parameter of vegetation structure. It provides key quantitative information on the exchange of mass, energy, and momentum between the atmosphere and the land surface. Its retrieval is an important research focus in remote sensing of vegetation. *LAI* of grasslands in Hulunbuir prairie and Xilinhot prairie in Inner Mongolia was acquired using the *LAI* 2000 instrument from June 21 to 26 and June 28 to July 3, 2010, respectively. Six vegetation indices including 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*) obtained from Landsat-5 TM data were correlated with measured *LAI*. *LAI* retrieved from TM data was then used as a benchmark for assessing the accuracy of MODIS *LAI* products. The measured *LAI* values of grasslands over the two study areas range from 0.46 to 4.06 in Hulunbuir and from 0.65 to 4.70 in Xilinhot. The average *LAI* value in Hulunbuir is 1.81, 11% higher than that in Xilinhot (1.63). Since grasses in these areas are short, we dug a small trench at each measurement location to place the *LAI* 2000 sensor head at the same level as the soil surface to ensure the total *LAI* is included in the measurement. Results show that *RSR* has the highest correlation with *LAI* in the two grasslands, with R^2 equal to 0.628 and 0.728, respectively.

基金项目:国家 863 项目(2009AA12Z134);国家 973 项目(2010CB833503);江苏高校优势学科建设工程资助项目

收稿日期:2010-11-05; **修订日期:**2011-06-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yiboliu2012@163.com

The Root Mean Square Error (*RMSE*) values of estimated *LAI* from *RSR* are 0.512 and 0.490, respectively. *RSR* outperforms other VIs more obviously at lower *LAI*. Validation using 15 measured *LAI* values (not used in algorithm development) in both Hulunbuir and Xilinhot shows that *RSR*-derived *LAI* can capture 70% of *LAI* variations. Combined with the surface reflectance images of the grassland, the formulae $LAI = 0.764 \times RSR^{0.675}$ and $LAI = 0.462 \times RSR + 0.582$ were developed to generate *LAI* maps at 30 m resolution for the Hulunbuir and Xilinhot study areas. The retrieved *LAI* is lower in Xilinhot than in Hulunbuir. *LAI* values in the mountainous areas at these two locations are significantly overestimated using the *RSR* based inversion model when compared with ground measurements. The overestimation exceeds 1.0 in several areas with large topographical variations. This may be caused by the topographical sensitivity of *RSR*. Although *RSR* has an advantage in retrieving *LAI* over flat regions, its application to grassland in the mountains requires further study. The level of agreement between MODIS *LAI* and *LAI* retrieved using TM data differs in these two study areas, with R^2 equal to 0.566 and 0.323 in Hulunbuir and Xilinhot, respectively. The average of the MODIS *LAI* is higher in Hulunbuir and lower in Xilinhot than the corresponding TM *LAI*. The inconsistency of MODIS *LAI* in comparison with TM *LAI* derived based on ground measurements in these two study areas suggests the need to carry out MODIS *LAI* validation over more grassland areas.

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

植被叶面积指数(Leaf Area Index, *LAI*)定义为单位地表面积上绿叶总面积的一半^[1],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^[2-5]。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^[6]。

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^[7-8]。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*^[9],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^[10-11]。遥感反演方法可分为统计模型法和物理模型法两大类^[12],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^[13-15]、农作物^[16-17]和湿地^[18-19]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。

1 数据及方法

1.1 研究区概况

选取呼伦贝尔草甸草原^[20]及锡林浩特干草草原^[21]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($49^{\circ}20'24''\text{N}$, $119^{\circ}59'44''\text{E}$)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 $-2\sim-11^{\circ}\text{C}$,无霜期95—110 d,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($43^{\circ}37'48''\text{N}$, $116^{\circ}42'18''\text{E}$)地处内蒙古自治区锡林浩特市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3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°C ,夏季温凉,极端最高温 38.5°C ;冬季寒冷,极端最低温度 -42.8°C ,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 d。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。

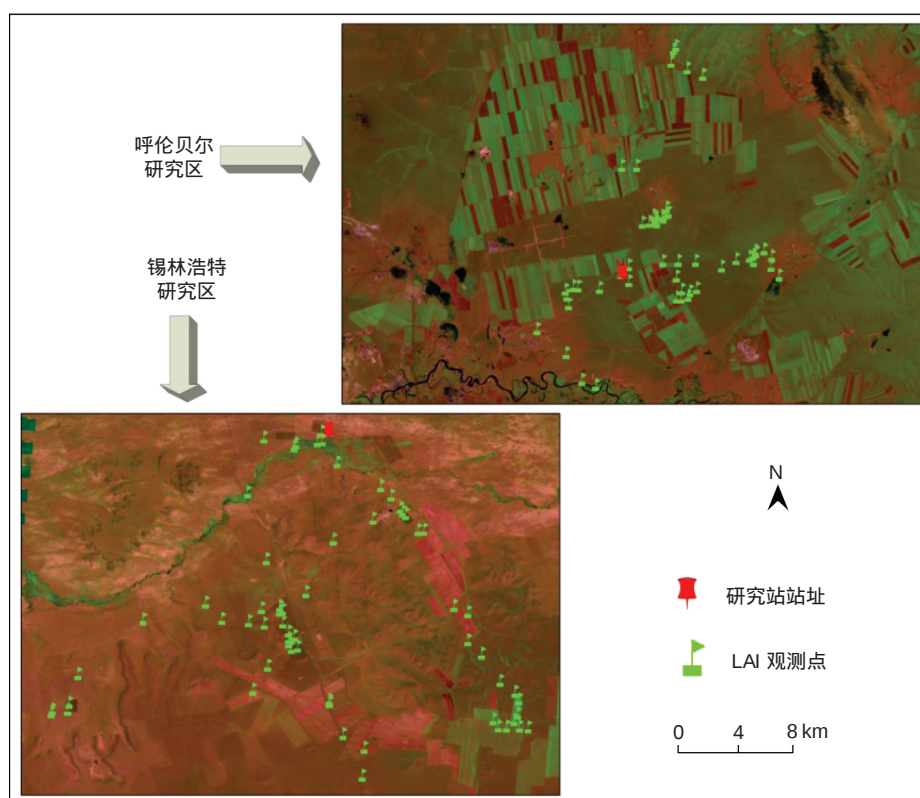


图1 内蒙古草原两个研究区野外实测点分布示意图

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

1.2 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 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的位置。观测在阴天和其它天气的日出(4:00 至 6:30)及傍晚(19:00 到 20:30)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。

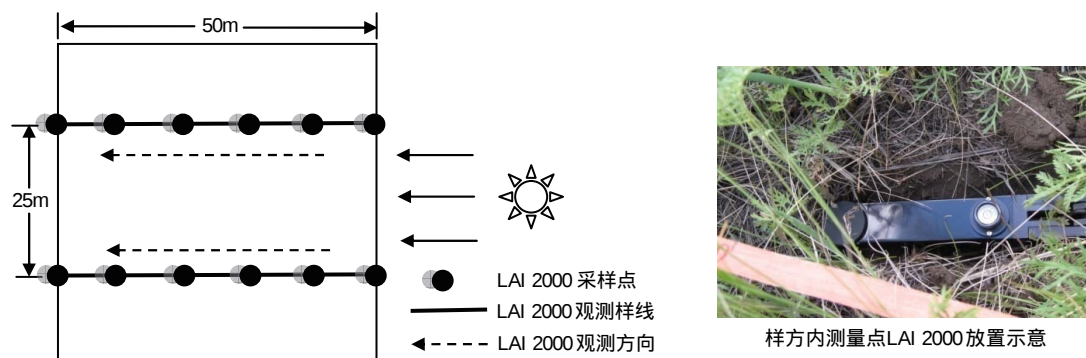


图 2 样区内样方布设及测量样点设置示意图

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

1.3 遥感数据获取及处理

1.3.1 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站的两景 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 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 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^[22]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^[23]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。

1.3.2 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 8d 合成 MODIS LAI 标准产品(hdf 格式)—MYD15A2(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。

1.3.3 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 3 种类型^[24]。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*)^[25]、减小的比值植被指数(Reduced Simple Ratio Index, *RSR*)^[26]、归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)^[27]、土壤调节植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, *SAVI*)^[28]、大气阻抗植被指数(Atmospherically Resistant Vegetation Index, *ARVI*)^[29]和增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, *EVI*)^[30]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。

1.4 *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:

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

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

式中, 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。

1.5 *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。

2 结果与分析

2.1 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*

表 1 各植被指数计算方法

Table 1 The formula of various vegetation indices		
植被指数 Vegetation Index	计算公式 Formula	参考文献 Reference
<i>SR</i>	NIR/R	[25]
<i>RSR</i>	$SR \times \left(\frac{1 - (SWIR - SWIR_{min})}{(SWIR_{max} - SWIR_{min})} \right)$	[26]
<i>EVI</i>	$(NIR - R)/(NIR + 6R - 7.5B)$	[30]
<i>NDVI</i>	$(NIR - R)/(NIR + R)$	[27]
<i>SAVI</i>	$(NIR - R)/(NIR + R + L) \times (1 + L)$	[28]
<i>ARVI</i>	$(NIR - 2R + B)/(NIR + 2R - B)$	[29]

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

高值出现在试验场和沿海拉尔河的草地。锡林浩特研究区属于草草原,除锡林河沿岸及羊草、大针茅及退化等 3 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。

2.2 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 $ARVI$ 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, $R^2 = 0.728$ 。

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 two study areas

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

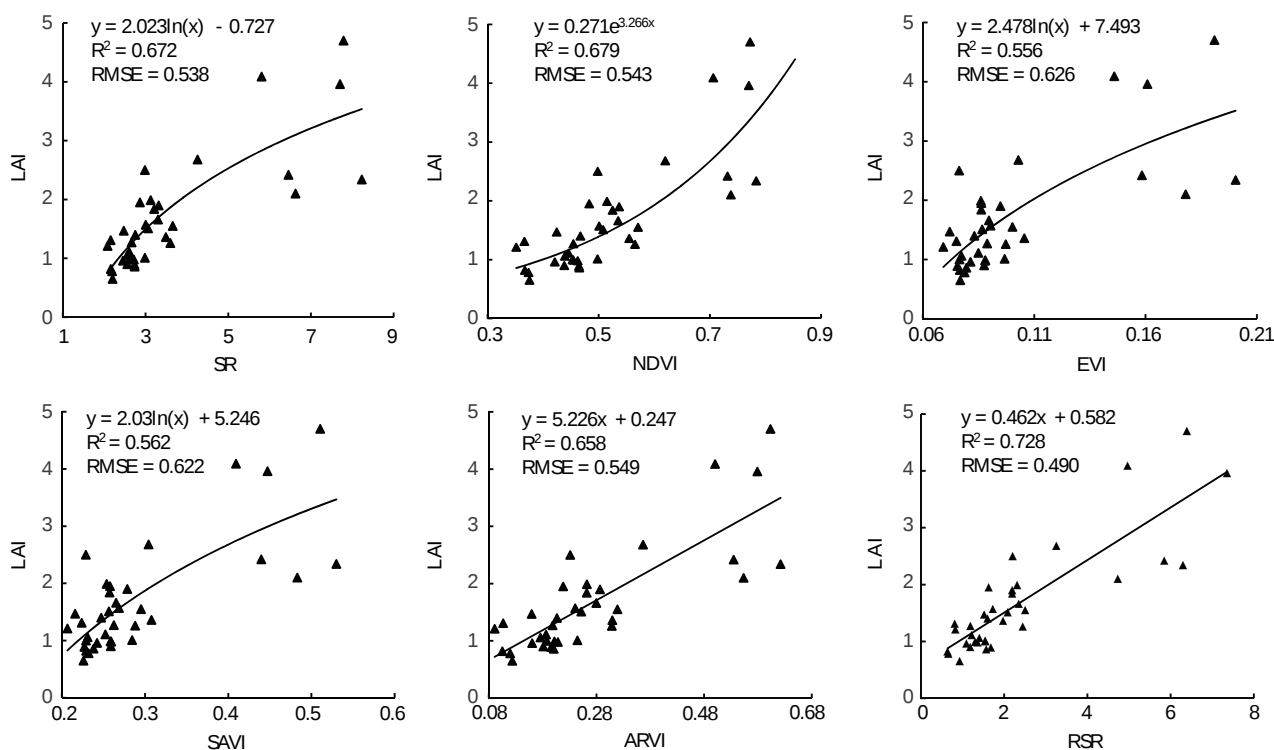


图 3 锡林浩特研究区草地 LAI 与植被指数之间关系

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

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。

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。

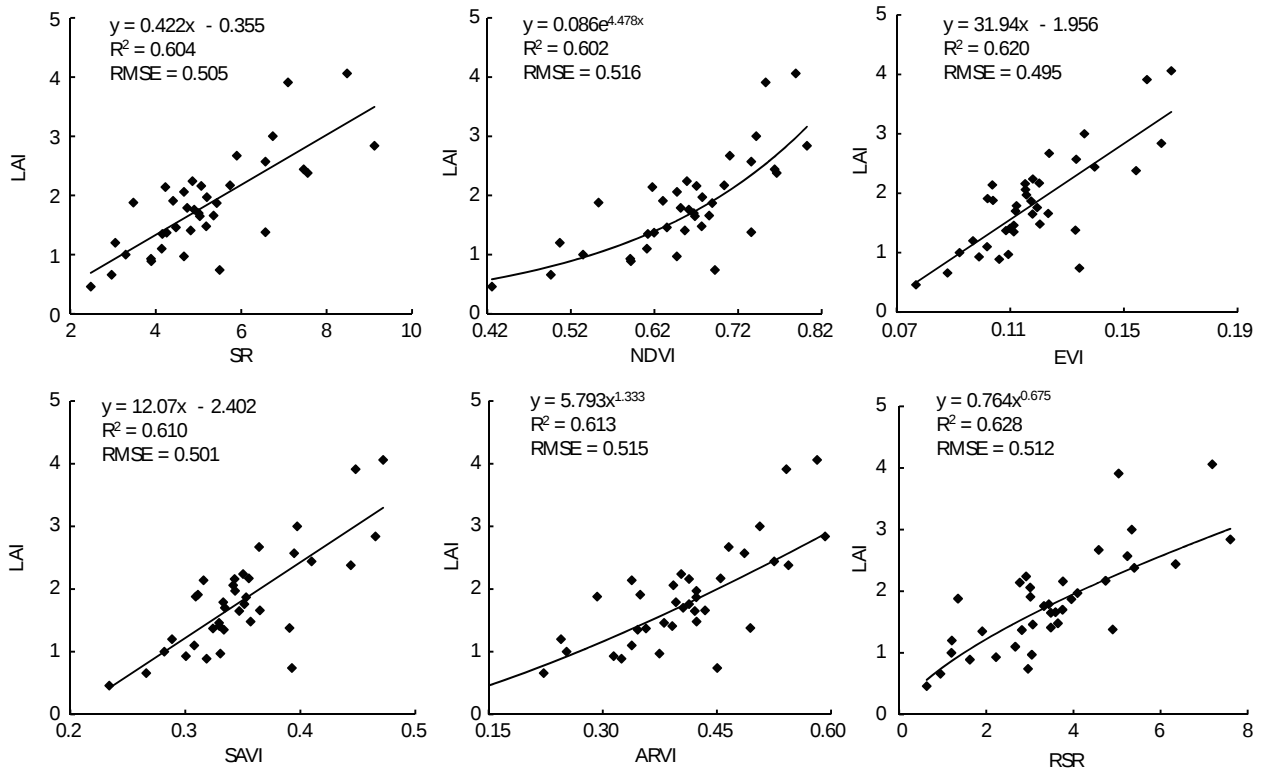


图 4 呼伦贝尔研究区草地 LAI 与植被指数之间关系

Fig. 4 The correlation of LAI of grassland with vegetation indices in Hulunbuir 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^[31]和中国黑龙江帽儿山地区^[14]的研究也表明, RSR 估算森林 LAI 的能力也优于其它植被指数。

2.3 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。

2.4 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

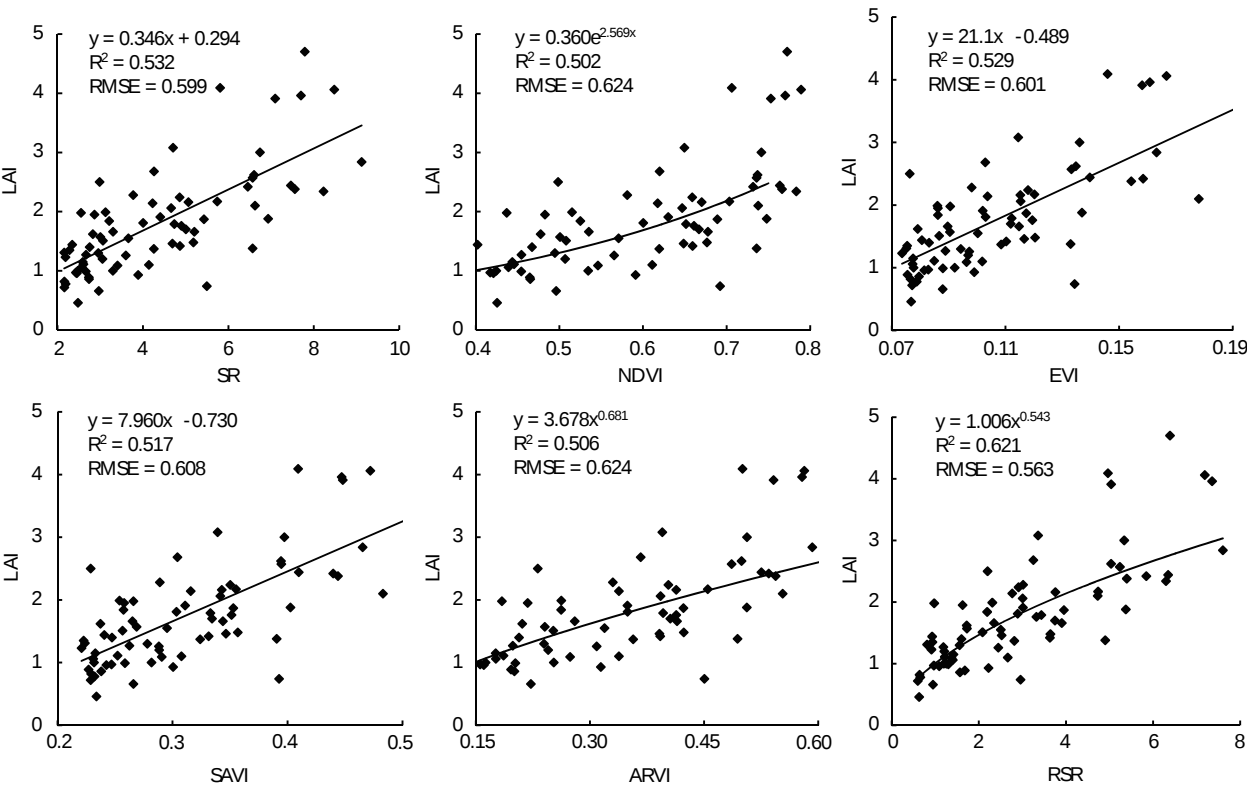


图5 由呼伦贝尔和锡林浩特两个研究区总体观测样本得到草地 LAI 与植被指数之间相关关系

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

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^[31] 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。

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 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 StDev	均方根误差 RMSE	估算精度 EA/%
呼伦贝尔 N=15	观测的 LAI	0.96	3.18	1.80	0.576	—	—
	估算的 LAI	0.95	2.38	1.80	0.431	0.477	73.51
锡林浩特 N=15	观测的 LAI	0.72	2.86	1.53	0.624	—	—
	估算的 LAI	0.86	2.31	1.34	0.432	0.405	69.78
两个区数据 N=30	观测的 LAI	0.65	2.86	1.55	0.574	—	—
	估算的 LAI	0.91	2.40	1.67	0.449	0.441	73.59

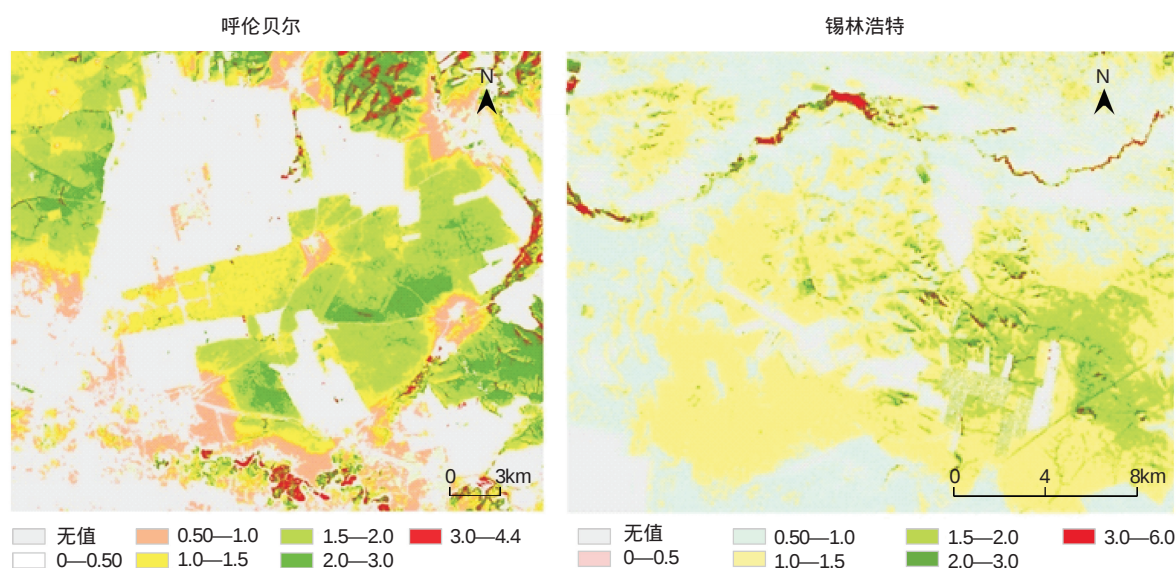


图6 TM数据生成的呼伦贝尔和锡林浩特30m草地LAI空间分布图

Fig. 6 30m resolution spatial distribution maps of grassland LAI generated from TM data in Hulunbuir and Xilinhot

2.5 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^[32],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

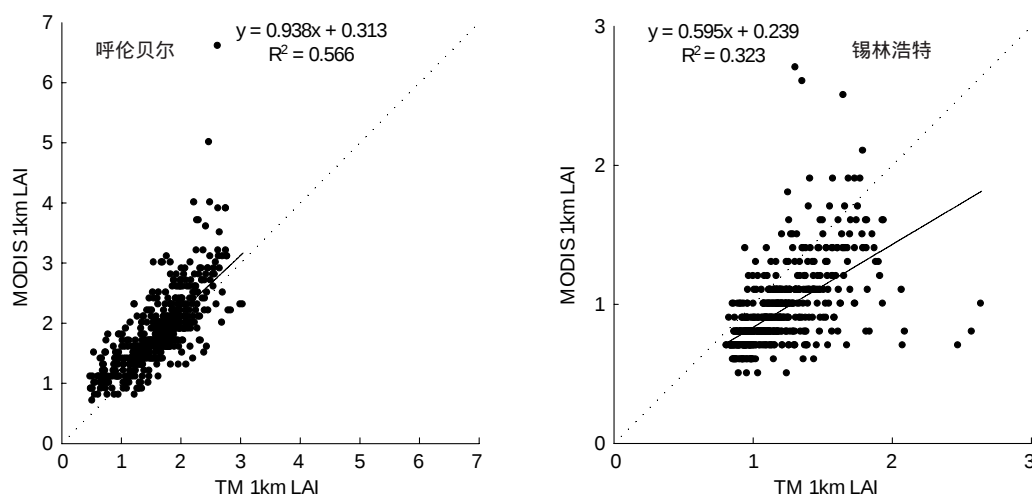


图8 呼伦贝尔和锡林浩特1km分辨率TM LAI和MODIS LAI产品比较(虚线是1:1的线)

Fig. 8 Comparison of TM 1km LAI and MODIS LAI products in Hulunbuir and Xilinhot (The dotted line is 1:1)

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^[33-34]。

3 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对研究和写作给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Chen J M, 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 A L, Intercompariso P P N M. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, 1999, 5(S1): 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, 19(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*, 2002, 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 cropland 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 and 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(8): 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+ 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 area index of China using remote sensing. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2): 160-167.
- [17] Yang P, Shibasaki R, Wu W B, Zhou Q B, Chen Z X, Zha Y, Shi Y, Tang H J. 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, Wang X. 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 the 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: 309-317.
- [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, van Leeuwen W. A comparison of vegetation indices over a 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 F, Ju W M, Zhou Y L, 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. Chengdu: SPIE, 2009: 74710-74719.
- [34] Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen M S. 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, 19(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] 李显风, 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(8): 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, 王旭. 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, 126-126.
- [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.

CONTENTS

CO ₂ emission from an alpine <i>Kobresia humilis</i> meadow in winters	WU Qin, HU Qiwu, CAO Guangmin, et al (5107)
Effect of cultivation on soil organic carbon and total nitrogen accumulation in Cele oasis croplands and their relation to crop yield ...	 HUANG Caibian, ZENG Fanjiang, LEI Jiaqiang, et al (5113)
Biomass and its allocation of four grassland species under different nitrogen levels	 QI Yu, HUANG Yongmei, WANG Yan, et al (5121)
Small-scale spatial patterns of genetic structure in <i>Castanopsis eyrei</i> populations based on autocorrelation analysis in the Tiantai Mountain of Zhejiang Province	 QI Caihong, JIN Zexin, LI Junmin (5130)
Influence of vegetation on frozen ground temperatures the forested area in the Da Xing'anling Mountains, Northeastern China	 CHANG Xiaoli, JIN Huijun, YU Shaopeng, et al (5138)
Analysis of stable carbon isotopes in different components of tree rings of <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	 SHANG Zhiyuan, WANG Jian, CUI Mingxing, et al (5148)
Retrieval of leaf area index for different grasslands in Inner Mongolia prairie using remote sensing data	 LIU Yibo, JU Weimin, ZHU Gaolong, et al (5159)
Decomposition of lotus leaf litter and its effect on the aquatic environment of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake	 SHI Qi, JIAO Feng, CHEN Ying, et al (5171)
Effects of fire disturbance on greenhouse gas emission from <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> forested wetlands in XiaoXing'an Mountains, Northeast China	 YU Lili, MU Changcheng, GU Han, et al (5180)
Wetland landscape transition pattern of Lianbo Beach along the Middle Yellow River	 GUO Donggang, SHANGGUAN Tieliang, BAI Zhongke, et al (5192)
Effect of revegetation on functional groups of soil organic carbon on the Loess Plateau	 LI Ting, ZHAO Shiwei, ZHANG Yang, et al (5199)
Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China	 ZU Yuangang, LI Ran, WANG Wenjie, et al (5207)
Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau	 GAO Huiyi, GUO Shengli, LIU Wenzhao (5217)
Soil microbial functional diversity between rhizosphere and non- rhizosphere of typical plants in the hilly area of southern Nixia	 AN Shaoshan, LI Guohui, CHEN Liding (5225)
Differences in the surface palynomorph assemblages on a karst mountain and rocky desertification areas: a case in Nanchuan District, Chongqing	 HAO Xiudong, OUYANG Xuhong, XIE Shiyu (5235)
Ash content and caloric value in the leaves of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> and its accompanying species	 JIN Zexin, LI Junmin, MA Jine (5246)
Uptake kinetic characteristics of Cu ²⁺ by <i>Salix jiangsuensis</i> CL J-172 and <i>Salix babylonica</i> Linn and the influence of organic acids ...	 CHEN Caihong, LIU Zhikun, CHEN Guangcai, et al (5255)
Introduction of <i>TaNHX2</i> gene enhanced salt tolerance of transgenic puna chicory plants	 ZHANG Lijun, CHENG Linmei, DU Jianzhong, et al (5264)
Effects of air humidity and soil water deficit on characteristics of leaf cuticular waxes in alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	 GUO Yanjun, NI Yu, GUO Yunjiang, et al (5273)
Influence of water storage capacity on yield of winter wheat in dry farming area in the Loess Plateau	 DENG Zhenyong, ZHANG Qiang, WANG Qiang, et al (5281)
Research of dynamic variation of moisture in apple orchard soil in the area of Xianyang in recent years	 ZHAO Jingbo, ZHOU Qi, CHEN Baoqun, et al (5291)
Volatile oil contents correlate with geographical distribution patterns of the miao ethnic herb <i>Fructus Cinnamomi</i>	 ZHANG Xiaobo, ZHOU Tao, GUO Lanping, et al (5299)
Effect of environmental factors on growth of <i>Chlorella</i> sp. and optimization of culture conditions for high oil production	 DING Yancong, GAO Qun, LIU Jiayao, et al (5307)
The effects of substrates on locomotor performance of two sympatric lizards, <i>Takydromus septentrionalis</i> and <i>Plestiodon chinensis</i>	 LIN Zhihua, FAN Xiaoli, LEI Huanzong, et al (5316)
Guild structure of wintering waterbird assemblages in shallow lakes along Yangtze River in Anhui Province, China	 CHEN Jinyun, ZHOU Lizhi (5323)
Phylogenetic diversity analysis and <i>in situ</i> hybridization of symbiotic Oxymonad flagellates in the hindgut of <i>Reticulitermes chinensis</i> Snyder	 CHEN Wen, SHI Yu, PENG Jianxin, et al (5332)
An entropy weight approach on the comprehensive evaluation of the Pearl River Delta Nature Reserve	 ZHANG Linying, XU Songjun (5341)
Review and Monograph	
On planning method of mesoscale and microscale ecological land	 RONG Bingling, LI Dong, XIE Yingxia (5351)
Effects of land use change on soil organic carbon: a review	 CHEN Zhao, LÜ Changhe, FAN Lan, et al (5358)
Marine phytoplankton and biological carbon sink	 SUN Jun (5372)
Effect of permafrost degradation on methane emission in wetlands: a review	 SUN Xiaoxin, SONG Changchun, WANG Xianwei, et al (5379)
A review on the effects of biogenic elements and biological factors on wetland soil carbon mineralization	 ZHANG Linhai, ZENG Congsheng, TONG Chuan (5387)
A review of studies using ecological network analysis	 LI Zhongcai, Xu Junyan, WU Changyou, et al (5396)
Scientific Note	
Dynamics of age structures on <i>Agropyron michnoi</i> and <i>Leymus chinensis</i> in different communities	 JIN Xiaoming, AI Lin, LIU Jidong, et al (5406)
The impact of thematic resolution on NDVI spatial pattern	 HUANG Caixia, LI Xiaomei, SHA Jinming (5414)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 18 期 (2011 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 18 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元