#### DOI: 10.5846/stxb201401100078

耿君, 王磊, 田庆久, 涂丽丽, 黄彦, 王龑, 吕春光, 杨冉冉, 杨闫君. 林下植被对遥感估算马尾松 LAI 的影响研究. 生态学报, 2015, 35(18):

Geng J, Wang L, Tian Q J, Tu L L, Huang Y, Wang Y, Lü C G, Yang R R, Yang Y J.Impact of the understory on estimation of leaf area index of *Pinus massoniana* using remote sensing technology. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(18): - .

# 林下植被对遥感估算马尾松 LAI 的影响研究

耿  $\overline{Z}^{1,2}$ , 王  $\overline{Z}^{1,2}$ , 田庆久<sup>1,2,\*</sup>, 涂丽丽<sup>1,2</sup>, 黄  $\overline{\mathcal{B}}^{1,2}$ , 王  $\overline{\mathbb{Q}}^{1,2}$ , 吕春光<sup>1,2</sup>, 杨冉冉<sup>1,2</sup>, 杨闫君<sup>1,2</sup>

1 南京大学国际地球系统科学研究所,南京 210046

2南京大学江苏省地理信息技术重点实验室,南京 210046

摘要:叶面积指数是一项极其重要的描述植被冠层结构的植被特征参量。本研究根据植被物候规律,利用中国环境卫星 CCD 多光谱影像和野外马尾松样区调查数据,通过建立不同季节和不同郁闭度样区马尾松 LAI 和影像 NDVI 经验回归模型,并利用 一个新的 LAI 观测方式定量比较"乔木层"LAI 和生态系统"总"LAI(包括草本层、灌木层和乔木层)的差异,研究林下植被对马 尾松反演的影响程度。结果表明:(1)由于林下植被的物候变化,冬季林下植被对马尾松 LAI 反演影响最小,马尾松 NDVI 和 LAI 线性关系 R<sup>2</sup>维持在 0.65;夏季林下植被影响最大,线性关系 R<sup>2</sup>只有 0.25;春季和秋季影响居中,NDVI 和 LAI 线性关系 R<sup>2</sup>在 0.47 附近。但是,受林下植被影响较小的 A 类样区四个季节内 NDVI 和 LAI 线性关系基本都在 0.60 以上(夏季略低于 0.60); (2)"乔木层"LAI 和"总"LAI 差距非常大,最大差距达到 2.93,相差的比例最大达到了 2.45 倍;(3)"总"LAI 和 NDVI 相关关系 显著,其中线性关系 R<sup>2</sup>达到 0.66,对数关系 R<sup>2</sup>可达到 0.68,而"乔木层"LAI 和 NDVI 相关关系较差,线性关系 R<sup>2</sup>只有 0.30。本 文指出,分别建立冬季和其它季节实测"总"LAI 和 NDVI 的关系,可以估算出林下植被对马尾松 LAI 反演的影响程度。

# Impact of the understory on estimation of leaf area index of *Pinus massoniana* using remote sensing technology

GENG Jun<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>, TIAN Qingjiu<sup>1,2,\*</sup>, TU Lili<sup>1,2</sup>, HUANG Yan<sup>1,2</sup>, WANG Yan<sup>1,2</sup>, LÜ Chunguang<sup>1,2</sup>, YANG Ranran<sup>1,2</sup>, YANG Yanjun<sup>1,2</sup>

1 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China

2 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210046, China

Abstract: Leaf area index (LAI), defined as half the total developed area of green leaves per unit ground horizontal area, is an extremely important vegetation characteristic parameter that describes the construction of vegetation canopy. For the past few years, LAI has been estimated operationally at a regional or even global scale by means of various retrieval methods using remotely sensed optical imagery. Understory vegetation (e.g., grasses, herbs, shrubs, etc.) is the layer of foliage below the forest canopy. As a background signal source in remote sensing, understory has had a serious impact on estimating many forest canopy parameters by remote sensing techniques for two reasons. On the one hand, it has very similar characteristics to those of the forest canopy because they are all vegetation. On the other hand, it has greater spatial-temporal heterogeneity than other backgrounds in remote sensing, e.g., soil, water, rock and litter, etc. The purpose of this paper is to determine the impact of understory on LAI inversion of forests with different canopy closures in different seasons.

收稿日期:2014-01-10; 网络出版日期:2014-11-19

基金项目:国家科技重大专项(30-Y20A01-9003-12/13)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: tianqj@ nju.edu.cn

In this study, data from five field investigations and corresponding Chinese HJ-1 CCD remote sensing images were collected and analyzed to study the impact of understory on LAI inversion of Pinus massoniana during the period September 2012 to October 2013 in Chuzhou, Anhui province. By building empirical models of LAI of Pinus massoniana with different canopy closures and Normalized Difference Vegetation Indices (NDVI) in different seasons based on the phenology of the understory and comparing the difference of LAI of tree layers and the LAI of all layers of the ecosystem using a new way of LAI measurement, the impact of understory on the calculation of LAI of Pinus massoniana with different canopy closures and in different seasons was found. The results show that: (1) Understory had minimal impact on LAI inversion of Pinus massoniana in winter; R<sup>2</sup> of the linear relationship between NDVI and LAI was 0.65. Understory had the most serious impact in summer; R<sup>2</sup> of the linear relationship was only 0.25. The impact of understory in spring and autumn was greater than in winter and lower than in summer,  $R^2$  of linear relationship was about 0.47. However,  $R^2$  of linear relationship in the quadrats A, which were less affected by understory, was almost higher than 0.60 in all seasons (slightly less than 0.60 in summer). The reason was that the phenology of the understory caused different impacts in different seasons; (2) A significant difference between tree layer LAI and LAI of all layers in the same season was found, and the biggest gap was 2. 93 and the maximum multiple was 2.45; (3) the R<sup>2</sup> of the linear relationship between LAI of all layers and NDVI was about 0.66, and R<sup>2</sup> of the logarithmic relationship was more than 0.68. However, the correlation between tree layers and NDVI was poor (R<sup>2</sup> was only 0.30). These findings indicate that the impact of understory on LAI inversion of Pinus massoniana can be calculated when relationships between the LAI of all layers and NDVI in winter and other seasons are determined. Finally, the difficulties of studying understory impact on forest LAI retrieval are discussed, and several suggestions are proposed for future study.

Key Words: Understory; Pinus massoniana; Leaf Area Index; Remote Sensing; Canopy closure; Phenology; Uncertainty

叶面积指数(Leaf Area Index,LAI)是一项极其重要的描述植被冠层结构的植被特征参量<sup>[1]</sup>。LAI 不仅可 以直接反映出生态系统多样化尺度的植物冠层中的能量、CO<sub>2</sub>及物质环境,还可以反映植物生长和发育的动 态变化和健康状况,同时,在生态系统光合作用、水分及能量平衡研究中,LAI 也作为非常关键的生物物理参 数<sup>[2]</sup>。随着全球变化研究的深入,LAI 常常作为生态系统碳循环、能量交换、水文和气候等模型中重要的参数 而成为模型中不可缺少的组成部分<sup>[3]</sup>。

近年来,利用遥感技术估测区域乃至全球森林 LAI 已成为国内外学者们研究 LAI 的主要手段之一<sup>[4-10]</sup>。 然而,遥感信号中往往受到林下植被、土壤、岩石、枯落物和水体等森林背景目标物的干扰,传感器探测到的森 林总反射率,往往不能准确地代表森林冠层反射率,尤其是在郁闭度较低的森林,由于像元混合严重,遥感反 演出的森林冠层参数存在较大误差。例如,马健德指出森林背景所造成的噪音信号对树冠 LAI 的反演会产生 不可忽视的影响,并利用 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)合成多角度遥感影像得到了 250 m 分辨率森林背景反射率<sup>[11]</sup>;Brown 等利用短波红外波段构建减化比值植被指数(RSR, Reduced Simple Ratio),有效地减少了背景反射率影响,并反演出较为准确的森林冠层 LAI<sup>[12]</sup>。Law 等指出利用遥感研究 LAI、光合有效辐射时,应将林下植被和上层树冠区分研究,否则会造成很大误差<sup>[13]</sup>;Pisek 等指出森林背景反 射率对乔木层 LAI 反演影响非常大,并利用 MODIS 合成 BRDF(Birectional Reflectance Distribution Function)数 据,研究了北欧地区北方森林林下植被反射率的季节动态<sup>[14]</sup>。

而在上述森林背景目标物中,一方面,由于林下植被往往作为绿色植被和森林冠层一起被传感器所探测, 导致利用常见植被指数(如归一化植被指数(NDVI,Normalized Difference Vegetation Index))估算出的森林冠 层 LAI存在较大误差;另一方面,由于相对于土壤、岩石等变化非常复杂,林下植被对遥感辐射传输的影响存 在着更大的时空异质性<sup>[15]</sup>,进而会在一定程度上影响到诸多陆地生态系统能量流动和物质循环模型的精度。 因此,有必要将林下植被单独作为研究对象,来探讨其对遥感估算森林冠层 LAI 的影响。 马尾松(Pinus massoniana)是我国松属树种中分布最广的一种,也是我国亚热带东部湿润地区典型的针叶乡土树种,其面积居我国针叶林首位<sup>[16]</sup>。本文根据苏皖地区马尾松林下植被的物候特点,连续获取不同季节实验样区的马尾松冠幅、树高、郁闭度、LAI和林下植被覆盖度等数据,利用中国环境卫星(HJ-1)CCD多光谱影像的高时空分辨率的优势,建立不同季节、不同郁闭度下马尾松样区 LAI和 NDVI回归模型,研究林下植被对遥感估算马尾松 LAI 的影响程度,为今后开展实地观测和遥感反演森林 LAI 研究提出新的认识。

## 1 研究区介绍

滁州市位于安徽省东部,地处江淮之间,处于北纬 31°51′—33°13′和东经 117°09′—119°13′之间(图 1)。 滁州市属北亚热带湿润季风气候区,四季分明,阳光充足,雨量丰富,年平均气温为 15.40 ℃,最热 7 月份的月 平均温度为 28.50 ℃,最冷 1 月份的月平均温度为 1.70 ℃,年均降水量 1035.50 mm,梅雨期约 23 d,年均日照 总时数 2073.40 h,年均无霜期 210 d<sup>[17]</sup>。由于上述气候条件,滁州市适合马尾松的生长,林下植被以一年生 草本和落叶灌木组成,其中狗尾草(Setaria viridis)、一年蓬(Erigeron annuus)、青蒿(Artemisia carvifolia)、野菊 花(Dendranthema indicum)、蛇莓(Duchesnea indica)、刺苋(Amaranthus spinosus)、白茅(Imperata cylindrica)、合 萌(Aeschynomene indica)、鼠李(Rhamnus davurica Pall)和野山楂(Crataegi cuneatae)较为常见。实地调查发现 该地区马尾松以中龄林和成熟林为主,林下植被生长差异明显,且具有明显的季节性变化特征。因此,该地区 适合开展林下植被对遥感估算马尾松 LAI 影响研究。



图 1 研究区地理位置 Fig.1 Geographical location of the study areas

实验样区分为 A 类样区和 B 类样区, A 类样区是指郁闭度大于 80% 及郁闭度小于 80% 且林下植被覆盖度小于 33% 的样区; B 类样区是指郁闭度小于 80% 且林下植被覆盖度大于 33% 的样区。具体在实验设计中详细说明。

# 2 实验设计与数据来源

#### 2.1 实验设计与地面数据获取

本研究在 2012 年 9 月至 2013 年 10 月(具体时间见表 1),利用 LAI-2000 冠层分析仪共进行 5 次马尾松 样区 LAI 观测。为避免复杂天气和地形对辐射传输和 LAI 地面观测造成影响,本研究野外采样均选在全阴 天,选择的样区坡度均小于 5°。

(1)本文以中国 HJ-1 CCD 多光谱影像一个像元(30 m×30 m)作为一个实验样区;为反映一个像元内马 尾松 LAI 总体情况,并避免人为主观选择观测位置,本研究利用对角线法,在记录着的每个观测点东北-西南 方向前后各约 10 m 位置处,再进行两次 LAI 观测(图 2 所示),用三个位置观测的 LAI 平均值代表一个样区

#### (像元)内马尾松 LAI;

遥感影像时间 Remote image

Table 1 Date of five experimental observations and the corresponding images					
ta	秋季 Autumn	冬季 Winter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn
则时间 Field investigation	2012-09-19	2013-01-22	2013-04-20	2013-07-22	2013-10-18

2013-04-26

表1 5次观测实验及对应影像的日期

2013-01-19

(2)由于林地郁闭度对 LAI 观测影响很大,在每个 样点观测位置使用 LAI-2000 的 180°镜头盖在水平方向 上分别相向观测两次,以此代表该观测点附近马尾 松 LAI;

2012-09-16

(3)为研究马尾松林下植被的季节动态,需要保证 每次 LAI 观测位置严格一致。本研究在第一次观测 LAI 时,在手持 GPS 辅助下,在第一次样点观测位置插 杆或喷漆标记,后期实验在同一位置进行 LAI 观测。野 外样区实验获取得到的马尾松 LAI 在 FV-2200 软件下 处理,计算出样区内 LAI<sup>[18]</sup>;

(4)考虑到林下植被对遥感传感器信号的影响跟 郁闭度有很大关系,利用拍照法记录每个观测点位置的 马尾松郁闭度(距地面 1.70 m 高处用鱼眼相机竖直向

上拍照)和林下植被生长状况(距地面 1.70 m 高处用普通数码相机竖直向下拍照),后期对样区照片进行处理:①结合样地树高、冠幅和密度信息,在 Fisheye 软件中将半球照片处理为平面二值黑白图像,照片中天空为0,冠层为1,再计算出样区的冠层郁闭度;②竖直向下的照片利用 Photoshop sp3 图像处理工具和 ENVI 5.0 图像分类工具提取出林下植被,并计算出林下植被所占照片中森林背景的比例,即林下植被覆盖度。用三个观测点位置的冠层郁闭度和林下植被覆盖度的平均值,分别代表该样区内的马尾松郁闭度和林下植被生长状况。本文参考了 Spanner 对冠层郁闭度的分类标准<sup>[19]</sup>,并经过反复尝试,发现以郁闭度为 80%作为划分界限最合适。将郁闭度大于 80%及郁闭度小于 80%且林下植被覆盖度小于 33%的样区,统称为"A 类样区"(图 3);将郁闭度小于 80%且林下植被覆盖度大于 33%的样区统称为"B 类样区"(表 1 中 \* 标注)。本研究共观测样区 48 个,其中 A 类样区 21 个,B 类样区 27 个,如表 2 所示。

(5)为了进一步定量地研究林下植被对两类样区 马尾松 LAI 反演的影响程度,本研究于 2012 年 9 月对 马尾松样区进行了新的实验设计:在马尾松 LAI 观测点 同一位置,再对样区所有地上部分植被(包括草本层、 灌木层和乔木层)的 LAI 进行一次观测(图 4 所示)。 为区别起见,本文称传统利用 LAI-2000 观测森林 LAI 观测方式(即对森林冠层 LAI 观测)为"乔木层"LAI 观 测,称新的实验观测方式为生态系统的"总"LAI 观测, 显然"总"LAI 应该包括森林冠层 LAI 和林下植被 LAI。 2.2 遥感数据获取

中国环境(减灾)卫星(简称 HJ)CCD 多光谱影像 具有非常高的时间分辨率和较高的空间分辨率,A 星和



2013-07-23





郁闭度大于80%样区 郁闭度小于80%样区



Fig. 3 Comparison of hemispherical photographs of quadrats with different canopy closure

日期 Da 野外观》

2013-10-13

B 星的重访周期均为 4 d, CCD 多光谱影像空间分辨率均达到 30 m。因此,即便在阴雨天气较多的夏季,拥有如此高重访周期的 HJ 卫星也能获取到若干幅质量较高的多光谱影像,对于监测森林参数的动态变化具有非常明显的优势。

<b>衣</b> ↓ 小问天主件匹奴里							
Table 2 The number of different types of quadrats							
林下植被覆盖度	冠层郁闭度 Canopy closure						
Coverage of understory	> 80%	< 80%					
> 66%	2	15 *					
66%— 33%	5	12*					
< 33%	8	6					

スロ米刑社区粉

\*表示 B 类样区,其余为 A 类样区



图 4 "乔木层"LAI 和"总"LAI 观测示意图 Fig.4 Schematic diagram of measurement of tree layer's and all layer's LAI

分别获取与野外地面数据获取时间相近的高质量 HJ-1 CCD 多光谱影像,并结合最新发布 CCD 的辐射定标系数和研究区地面 GPS 控制点,在 ENVI 5.0 中对影像进行辐射定标、大气校正和几何精校正等处理,获得观测样区对应像元的各个波段反射率,并计算出对应像元的 NDVI。

## 3 结果与分析

#### 3.1 不同季节林下植被对 LAI 反演的影响

利用 2013 年 1 月至 10 月连续四个季节马尾松样区的观测与对应的遥感数据,分别建立不同时期所有样 区 LAI(本文提到的 LAI 除非特别指明,均代表马尾松 LAI)和 NDVI 经验统计模型和 A 类样区 LAI 和 NDVI 经验统计模型。研究结果表明:林下植被对遥感估算马尾松 LAI 的影响程度存在明显的季节差异(图 5):

(1)冬季,所有样区的 LAI 与 NDVI 关系总体较好(图 5-a 中所有圆),线性关系决定系数 R<sup>2</sup>达到 0.65,而 A 类样区的 LAI 与 NDVI 关系(图 5-a 中实心圆)跟所有样区的关系相近,R<sup>2</sup>达到 0.61。这是由于冬季林下植 被基本枯萎,样区内植被基本只有马尾松,加上涵盖了不同郁闭度的样区,LAI 差距明显,因此,样区所有样点 的关系比 A 类样区的关系稍好;

(2)春季,林下植被开始生长,对郁闭度较低的马尾松样区的影响逐渐显现。图 5-b 左下方的空心圆是 受到林下植被影响的直接反应,这些点对应的实测冠层 LAI 较低但像元 NDVI 较高,因此,消弱了所有样区 LAI 和 NDVI 关系,R<sup>2</sup>降为 0.47,但受林下植被影响较小的 A 类样区与 NDVI 的回归模型决定系数 R<sup>2</sup>保持在 0.64;

(3)夏季,林下植被生长最为茂盛,其对遥感估算马尾松 LAI 影响程度最为严重,受到 B 类样区,尤其是 图 5-c 左上方空心圆的影响,所有样区线性回归散点图分布非常发散,线性关系的决定系数 R<sup>2</sup> (2) 0.25,但 A 类样区对应的关系较好, R<sup>2</sup> 为 0.57;

(4)秋季,与春季类似,林下植被开始枯萎,所有样区 LAI 和 NDVI 线性关系 R<sup>2</sup>有所上升, R<sup>2</sup>为 0.47, 而 A 类样区关系 R<sup>2</sup>保持在 0.61。

总体而言,由于研究地区自然气候特点,林下植被基本由一年生草本和落叶灌木组成,受季节更替其生长 有明显规律性变化,而马尾松生长缓慢且是常绿乔木,一年内LAI变化较小,所以导致了不同季节林下植被对 LAI反演的影响程度差异有上述明显规律。

3.2 林下植被对马尾松 LAI 反演的定量影响研究

利用本文 2.1 节第 5 部分具体介绍的新实验设计方案,试图研究林下植被对马尾松 LAI 反演的定量影



图 5 不同季节一类样区和二类样区 LAI 与 NDVI 关系 Fig.5 Relationships between A. quadrats and B. quadrats

图中圆点(包括空心圆和实心圆)表示所有观测样区的"乔木层"LAI及对应像元 NDVI的关系,其中实心圆表示 A 类样区 LAI和 NDVI;实 线表示 A 类样区 LAI与 NDVI 线性关系;虚线表示所有样区 LAI与 NDVI 线性关系;观测具体时间:冬季:2013年1月22日,春季:2013年4月20日;夏季:2013年7月22日;秋季:2013年10月18日

响。新实验设计在夏秋交替之际,此时滁州地区马尾松林下植被生长茂盛。

(1)图 6 定量地描述出了 A 类样区和 B 类样区中"乔木层" LAI 和生态系统"总" LAI 的差距,这些差距既 代表林下植被的 LAI,也代表林下植被对马尾松反演的影响程度:

①在 A 类样区中(图 6 中实心圆),"乔木层"LAI 和"总"LAI 均保持在 1:1 关系线附近,"总"LAI 整体略 大于"乔木层"LAI。这是由于当采用新观测方式时,"总"LAI 中增加少量树干影响,再加上零星的林下植被 影响,会略大于该位置的"乔木层"LAI;

②在 B 类样区中(图 6 中空心圆),"乔木层"LAI 和"总"LAI 差距显著:"乔木层"LAI 普遍较小,LAI 在 1. 11—2.98 范围变化,主要集中在 1.70—2.21; 而"总"LAI 整体明显较大,LAI 在 1.91—4.96 范围变化,且主要集 中在 2.60—4.50。其中,LAI 最大差距达到 2.93,相差的比例最大也达到了 2.45 倍(此时"乔木层"LAI 为 2.03 时,"总"LAI 为 4.96)。

(2)图 7 表示 B 类样区中"乔木层" LAI 和"总" LAI 与 NDVI 线性回归关系。从图 7 中可以得出:

①B 类样区的"乔木层" LAI 与 NDVI 关系不显著,线性关系决定系数 R<sup>2</sup>为 0.30。这说明在用 LAI-2000 以传统观测方式得到实测 LAI 与影像 NDVI 建立经验关系时,由于林下植被的存在,会导致一定程度的误差, 尤其是在林下植被生长旺盛的季节,传统方法得到的经验关系会造成相当大的误差;

②"总"LAI 与 NDVI 关系显著,其中线性关系的 R<sup>2</sup>为 0.66,对数关系的 R<sup>2</sup>更是达到了 0.68 以上,且在对 数关系中发现,当实测 LAI 超过 4 时,NDVI 趋于饱和,这符合前人建立的马尾松 LAI 与 NDVI 经验关系<sup>[20]</sup>。 这说明,在郁闭度较低的 B 类样区,影像 NDVI 和样区"总"LAI 成线性正相关关系。考虑到马尾松生长缓慢, 如果假设马尾松从冬季到夏季半年内 LAI 几乎不变,通过以上经验回归关系,于是对于 B 类样区理论上有以

#### 下结论:

夏季马尾松 LAI≈冬季马尾松 LAI≈冬季样区 NDVI 的经验函数 (2)

综合(1)式和(2)式得到:

夏季林下植被 LAI≈夏季样区 NDVI 的经验函数-冬季样区 NDVI 的经验函数 (3) 同理,春、秋季林下植被影响程度也可以用上述公式表达并计算。总体而言,利用的新观测方案分别观测 两类样区"乔木层"LAI 和"总"LAI,可以清晰地表明马尾松样区受林下植被的影响程度。



图 6 两类样区的"乔木层"LAI 和"总"LAI 比较

Fig.6 Compare between tree layer's and all layer's LAI of two kinds of quadrats

实心点表示 A 类样区"乔木层"LAI(叶面积指数, Leaf Area Index)和"总"LAI,空心点表示 B 类样区"乔木层"LAI和"总"LAI。观测时间为2012年9月19日



7

图 7 B 类样区两种观测位置下 LAI 与 NDVI 关系

# Fig.7 The relationship between LAI and NDVI under different measuring position in B. quadrats

空心圆表示"乔木层"LAI和 NDVI,实线表示"乔木层"LAI和 NDVI线性关系;空三角形表示"总"LAI和 NDVI,虚线分别表示"总"LAI和 NDVI,虚线分别表示"总"LAI和 NDVI线性和对数关系。观测时间为 2012 年 9 月 19 日

## 4 结论

本文利用植被物候变化规律和国产 HJ-1 CCD 多光谱影像高时空分辨率的优势,在科学的地面样区实验 设计方案支持下,以地面实验数据为依据,通过建立 LAI 与遥感植被指数的关系,研究林下植被对马尾松 LAI 反演影响的时空异质性,并分析了造成不同影响程度的原因。

通过观测不同季节马尾松样区郁闭度、LAI、树高、冠幅和林下植被覆盖度等数据,将48个马尾松样区分为A类和B类样区,分析了不同季节两类样区的林下植被对LAI反演的影响程度;设计了一个新的观测方案,在林下植被生长旺盛的季节,分别观测了两类样区的"乔木层"LAI和"总"LAI,试图研究林下植被对遥感反演LAI的影响程度。结果表明:

(1)受物候期影响,林下植被对马尾松 LAI 反演的影响存在明显的季节规律:冬季研究区林下植被基本 枯萎,对 LAI 反演结果影响最小,实测 LAI 和影像 NDVI 关系显著,线性回归模型决定系数为 0.65;夏季林下 植被生长最为茂盛,对 LAI 反演结果影响最严重,实测 LAI 和 NDVI 关系不显著;春、秋两季影响居中;

(2)由于 B 类样区马尾松相对稀疏且受林下植被干扰严重,利用新观测方式得到的"总" LAI 和传统方式 得到的"乔木层" LAI 差距非常大,最大差距达到 2.93,相差的比例最大也达到了 2.45 倍;

(3)实测"乔木层" LAI 和 NDVI 关系不显著,但是实测"总" LAI 和 NDVI 有明显正相关关系,其中,"总"

LAI 和 NDVI 线性回归关系的 R<sup>2</sup>为 0.66, 对数关系决定系数 R<sup>2</sup>达到 0.68 以上, 且当 LAI 超过 4 时, LAI 和 NDVI 关系有饱和趋势; 分别建立冬季和某季节的实测"总" LAI 和 NDVI 的关系, 可以估算出林下植被对马尾 松 LAI 反演的影响程度。

研究结果证实,当根据样区实测 LAI 和影像 NDVI 建立统计关系来反演森林 LAI 时,必须要考虑不同生 长季的不同郁闭度下林下植被的生长情况,并分别建立不同类型样区(如本文中 A 类和 B 类样区)的实测乔 木层 LAI 和总 LAI 与遥感植被指数的回归模型,才能更准确地估算出森林冠层 LAI。

5 讨论

遥感的本质就是反演,利用遥感手段反演目标物特征参数,不可避免的会存在各种不确定性问题,对于森林结构参数反演来说,林下植被就是一个不确定性问题。一方面,林下植被本身会作为绿色植被和森林冠层一起被传感器所探测,从而一定程度上增加了遥感反演森林冠层参数的误差;另一方面,由于林下植被的时空异质性非常强,因此,造成的混合像元问题往往比岩石、土壤等森林背景更难解决。由于上述原因,通过植被的物候规律并利用多时相遥感数据进行对比分析,很好地描述了林下植被带来的影响。然而,植被反射率往往受到其生长期的影响,即便对于常绿乔木,一年内反射率会因物候期不同而异,因此,利用多时相遥感植被指数反演植被参数时,必须要结合近期的地面实测数据进行研究。本文以连续季节的地面实验观测数据为依据,通过建立其与对应影像植被指数的关系,研究林下植被对马尾松 LAI 反演影响的时空异质性,为日后深入进行遥感定量估算森林 LAI 提供了新的地面实验设计方案和研究思路。作者认为有以下几方面值得进一步探讨:

(1)本文所制定的郁闭度分类标准,是在参考前人研究成果基础上,尝试了多个其它划分标准后得到的一个相对可靠的分类标准,因此,此分类标准只针对本研究区,当在其它样区进行类似实验时,应结合样区实际情况而设定郁闭度分类标准。理论上,可以结合树冠形状、树冠内部结构、树冠密度及卫星传感器观测天顶角等参数构建几何光学模型,求出林下植被对冠层结构参数反演影响程度的郁闭度分类标准。但在自然界中,即便对于纯林,其树冠形状、树冠内部结构及树冠密度存在很大的时空异质性,用传统观测手段获取这些参数会不可避免地产生很大误差。条件允许下,可以结合地面激光雷达技术对样区内林分结构进行快速、准确的测量,构建准确的几何模型,进而设定更科学的郁闭度分类标准;

(2)不同林下植被的光谱差异对本文结果会产生影响,但一方面由于林下植被混杂严重;另一方面受林下光照条件限制,利用目前的地面光谱测量仪器很难得到准确的林下植被光谱。未来在条件允许下,应对林下植被进行分类并结合其光谱特性来开展更准确的地面实验;

(3)后期将利用多源遥感数据(如多角度、多时相、高分辨率光学及激光雷达等遥感数据),结合不同植被的结构和物候特点,构建研究区更精确的林分反射率模型,深入探讨林下植被带来的不确定性问题,更深层地研究林下植被对森林冠层 LAI 反演的影响。

#### 参考文献(References):

- [1] 汪小钦, 江洪, 傅银贞. 森林叶面积指数遥感研究进展. 福州大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 822-828.
- [2] 吴炳方,曾源,黄进良.遥感提取植物生理参数 LAL/FPAR 的研究进展与应用.地球科学进展,2004,19(4):585-590.
- [3] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, Berry J A, Field C B, Dazlich D A, Zhang C, Collelo G D, Bounoua L. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. part I: model formulation. Journal of Climate, 1996, 9: 676-705.
- [4] Ganguly S, Nemani R R, Zhang G, Hashimoto H, Milesi C, Michaelis A, Wang W L, Votava P, Samanta A, Melton F, Dungan J L, Vermote E, Gao F, Knyazikhin Y, Myneni R B. Generating global leaf area index from landsat: algorithm formulation and demonstration. Remote Sensing of Environment, 2012, 122(SI): 185-202.
- [5] Fang H L, Jiang C Y, Li W J, Wei S S, Baret F, Chen J M, Garcia-Haro J, Liang S L, Liu R G, Myneni R B, Pinty B, Xiao Z Q, Zhu Z C. Characterization and intercomparison of global moderate resolution leaf area index (LAI) products: analysis of climatologies and theoretical uncertainties. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, 118(2): 529-548.

- [6] Vyas D, Christian B, Krishnayya N S R. Canopy level estimations of chlorophyll and LAI for two tropical species (teak and bamboo) from Hyperion (EO1) data. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(5): 1676-1690.
- [7] 石月婵,杨贵军,冯海宽,李伟国,王仁礼.北京山区森林叶面积指数季相变化遥感监测.农业工程学报,2012,28(15):133-139.
- [8] Liu Y, Liu R G, Chen J M. Retrospective retrieval of long-term consistent global leaf area index (1981-2011) from combined AVHRR and MODIS data. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2012, 117(G), doi: 10.1029/2012JG002084.
- [9] 吴国训, 阮宏华, 李显风, 居为民, 耿君. 基于 MODIS 反演的 2000-2011 年江西省植被叶面积指数时空变化特征. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2013, 37(1): 11-17.
- [10] Simic A, Chen J M, Freemantle J R, Miller J R, Pisek J. Improving clumping and LAI algorithms based on multiangle airborne imagery and ground measurements. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(4): 1742-1759.
- [11] 马健德.森林背景反射率对冠层叶面积指数反演的影响研究 [D].南京:南京大学, 2013: 61-61.
- [12] 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.
- [13] Law B E, Waring R H. Remote sensing of leaf area index and radiation intercepted by understory vegetation. Ecological Applications, 1994, 4(2): 272-279.
- [14] Pisek J, Rautiainen M, Heiskanen J, Mõttus M. Retrieval of seasonal dynamics of forest understory reflectance in a Northern European boreal forest from MODIS BRDF data. Remote Sensing Environment, 2012, 117: 464-468.
- [15] Eriksson H M, Eklundh L, Kuusk A, Nilson T. Impact of understory vegetation on forest canopy reflectance and remotely sensed LAI estimates. Remote Sensing of Environment, 2006, 103(4): 408-418.
- [16] 莫江明, 彭少麟, Brown S, 孔国辉, 方运霆. 鼎湖山马尾松林群落生物量生产对人为干扰的响应. 生态学报, 2004, 24(2): 193-200.
- [17] 许雯. 江淮丘陵区马尾松林碳密度和碳储量研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2011: 54-54.
- [18] Spanner M A, Pierce L L, Peterson D L, Running S W. Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index the influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(1): 95-111.
- [19] 傅银贞, 汪小钦, 江洪. 马尾松 LAI 与植被指数的相关性研究. 国土资源遥感, 2010, (3): 41-46.
- [20] 汪永文,王力,王丽丽,张令峰,傅松玲.马尾松混交林林下植被结构及生物量特征研究.安徽农业大学学报,2010,37(2):312-316.