DOI: 10.5846/stxb201410212064

王龑, 田庆久, 王琦, 王磊.杨树林全生长期 LAI 遥感估算模型适用性.生态学报,2016,36(8): - . Wang Y, Tian Q J, Wang Q, Wang L.Study on the applicability of leaf area index estimation model in an aspen forest over a growth period. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): - .

杨树林全生长期 LAI 遥感估算模型适用性

王 龑^{1,2},田庆久^{2,*},王 琦³,王 磊²

1 浙江省水利水电勘测设计院,杭州 310002
2 南京大学国际地球系统科学研究所,南京 210023
3 中机十院国际工程有限公司,洛阳 471003

摘要:基于时间序列的植被叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)估算方法一直是遥感领域研究的热点,对植被全生长期 LAI 进行 估算以跟踪其生长情况具有重要的实用意义。本文以此为出发点,以滁州地区杨树林为研究对象,获取多时相环境卫星 CCD (简称 HJ-CDD)遥感影像,并利用 LAI-2000 同步测量杨树林叶面积指数(LAI)。继之,使用归一化植被指数(NDVI)分别建立 展叶期、花果期、叶面积稳定期和落叶始期的 LAI 估算模型,通过对比分析得到了全生长期 LAI 估算模型,并利用实测 LAI 对估 算 LAI 进行了验证。最后进一步对该模型的适用性进行了验证,结果表明,此模型对于各个时期 LAI 的估算具有一定的适用性 和有效性,可用于全生育期的遥感 LAI 生成,从而为 LAI 的动态变化监测提供了一种有效的研究思路和方法途径。 关键词:杨树林;遥感;HJ-CCD;LAI;NDVI

Study on the applicability of leaf area index estimation model in an aspen forest over a growth period

WANG Yan^{1,2}, TIAN Qingjiu^{2,*}, WANG Qi³, WANG Lei²

1 Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China

2 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

3 China Machinery TDI International Engneering Company Limited, Luoyang 471003, China

Abstract: Estimation of leaf area index (LAI) time series is a hotspot in remote sensing, because it allows tracking of vegetation biomass changes over a growth period. In this study, we acquired multi-temporal HJ-CDD remote sensing images of an aspen forest in Chuzhou area and synchronously measured LAI using LAI-2000. LAI estimation models of different growth stages (leaf production, flowering, fruit bearing, leaf constant period, and leaf abscission period) were constructed using normalized difference vegetation index (NDVI). Contrastive analysis was used to obtain LAI estimation model of the aspen forest over a growth period and estimated LAI was verified. The results showed that the model could be applied to estimate LAI over a growth period and provide useful information on the dynamic monitoring change of LAI.

Key Words: aspen forest; remote sensing; HJ-CCD; LAI; NDVI

植被 LAI 是研究植被冠层结构的一个重要参数,它表征着植被的许多生物物理过程,同时也为植冠表面 最初能量交换提供结构化定量信息。传统 LAI 测量方法仅能获得地面有限点的 LAI 值,不能满足植被生态和 作物长势监测的需求。随着遥感技术的飞速发展,遥感估算成为行之有效地获取区域 LAI 的方法^[1]。国内

收稿日期:2014-10-21; 网络出版日期:2015---

基金项目:国家重大科技专项(30-Y20A01-9003-12/13);全球变化研究国家重大科学研究计划项目课题(2010CB951503)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: tianqj@ nju.edu.cn

36 卷

外已利用多光谱与高光谱遥感数据开展了大量研究^[2-9]利用多时相、多波段的遥感影像估算的 LAI 信息,可以进一步分析 LAI 随时间和空间变化特征,对陆地植被的分布及季节变化研究提供强有力的手段。

目前常用的 LAI 遥感估算方法主要是经验估算法,经验估算法主要通过建立植被指数与叶面积指数的统 计关系来估算叶面积指数,归一化差值植被指数(NDVI)为最普遍使用的一种植被指数。但是这种方法估算 林地 LAI 的缺陷是:1)叶面积稳定期 LAI 达到一定值,使 NDVI 出现饱和,造成 LAI-NDVI 估算模型几乎表现 不出 LAI 随 NDVI 变化的趋势。2)落叶期由于落叶及林窗,造成林下灌草混合的影响变大,使 NDVI 不能真 实反映单一研究对象的信息,从而导致 LAI-NDVI 模型不能准确估算 LAI。这两大问题一直是遥感 LAI 估算 领域研究的热点和难点,目前国内外研究甚少^[10-13],并且这些研究仅做了分析,而没有提出明确的解决方法。

鉴于此问题,以杨树林为研究对象,获取多时相 HJ-CCD 数据和实测 LAI 数据,构建了各个生长期和整个时期的 LAI 估算模型并对模型进行了对比分析,得到了可用于叶面积稳定期和落叶始期 LAI 估算的模型—— 全生长期 LAI 估算模型,并进行了精度验证。最后通过对该模型的适用性进行验证,进一步说明了此模型可 用于时间序列的 LAI 估算,进而进行 LAI 季节变化特征分析。

1 研究区概况

研究区位于安徽省滁州市境内,滁州市位于安徽省东部,长江三角洲西部边缘。地貌大致可分为丘陵区、 岗地区和平原区三大类型,全市森林总面积达410万亩,森林覆盖率达到20.5%,人工林占95%以上,群落类 型有阔叶林,针叶林,针阔混交林。杨树已成为滁州市的主要造林树种之一,其中黑杨类占的比例达80%以 上,在树种结构中占有绝对优势。

2 数据获取与处理

2.1 地面数据获取

2012 年 5 月至 2013 年 6 月,在安徽滁州地区共开展了 4 次野外杨树林测量实验,样地和控制点分布如图 1。使用 LAI-2000 测量杨树 LAI。测量中采取 A 值(天空光)、B 值(冠层下方)分开测量,即在空旷地方测量 A 值,进入林分后测量 B 值。

研究一共选定了 70 个固定杨树样地,210 个样点,每次都在相同样地的相同测点进行相同观测方式重复 观测。为了减小地形及地表不均质对观测结果的影响,样区设置在地势相对平坦、优势树种较单一、杨树林空 间分布面积大于 90m×90m 的位置。为了提高观测精度,探头佩带 90°张角的镜头盖,每个样区布置 3—5 个 样地,每个样地大约 30m×30m,每个样地内沿对角线随机选取 3 个样点,每个样点测 3 次 B 值,取测量时间最 接近的 A、B 值估算各样点 LAI,求 3 个样点的平均值作为该样地的 LAI。考虑到天顶角最大的 A 值第 5 圈数 据可能存在地物遮挡影响,以及相对严重的蓝光多次散射影响,本研究仅用 LAI2000 的 1—4 圈数据计算 LAI^[14],结果如表 1。用手持 GPS(Mobile Mapper 6)记录各个样地的中心经纬度,同时详细记录各个对应样点 的杨树长势状况及周围植被覆盖情况,并用数码相机拍照作为辅助信息。

	Table 1 The aspen forest LAI values in different measurement time				
观测时间	样本量	一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一			
Measurement time	Simple	最小值 Max	最大值 Min	均值 Mean	方差 Variance
20112-5-4	21	1.98	4.12	2.53	0.41
2012-9-22	22	1.75	3.99	3.02	0.40
2013-4-19	25	1.34	2.87	2.12	0.20
2013-6-8	24	2.17	4.29	3.2	0.24

表 1 各观测时期杨树林 LAI 实测值的统计

2.2 HJ-CCD 遥感数据获取及处理

获取与地面观测时间相近的 4 景滁州地区 HJ-CCD 影像数据,分别为 2012 年 5 月 4 日、2012 年 9 月 16



图 1 研究区控制点和主要植被样地分布示意 Fig. 1 The distribution diagram of GPS control points and main vegetation sample plots for study area

日、2013年4月14日和2013年6月3日。首先对这4景影像进行辐射定标、大气校正,得到反射率图像,然 后利用实地测量的控制点分别对其进行几何精校正,误差控制在0.5个象元以内。

3 杨树林 LAI 估算模型构建

3.1 各时期 LAI 估算模型构建

NDVI 在植被遥感中应用最为广泛,是植被生长状态及植被覆盖的最佳指示因子,并且经过比值可部分 消除与太阳角、地形、云/阴影和大气条件有关的辐照度条件的变化^[15]。因此,研究选择了归一化植被指数 (NDVI)开展研究。

在模型的形式上,考察了 NDVI 的线性、指数、对数 3 种形式。首先用 4 个时相 HJ-CCD 影像计算出 NDVI,使用 GPS 点提取对应样点 NDVI 值,分别建立各时期地面 LAI 和 NDVI 的模型,如图 2 所示,A、B、C、D 分别为 4 月份、5 月份、6 月份和 9 月份三种形式的估算模型,相关系(R²)如表 1 所示。

3.2 杨树林全生长期 LAI 估算模型构建

使用以上所有时期共 112 个样本的实测 LAI 与对应影像象元的 NDVI 建立线性、指数、对数三种形式的 模型, 如图 3 所示。

由表 2 可以看出,单个时期的 LAI 估算模型相关性在 4 月份和 5 月份比较高,而在 6 月份和 9 月份比较低。整个观测时期的 LAI-NDVI 模型相关性虽然比 4 月份和 5 月份低,但是相比于 6 月份和 9 月份,模型有了 很大改善。其中 LAI 与 NDVI 的指数模型(1)的相关性最高(图 3)。由于对于一般的林地,密度和林窗等大 小不均匀,且较小 LAI 的林地易受林下背景植被的影响,因此模型的复相关系数(*R*²)很难达到较高值。为了 验证模型的可靠性,使用未参加建模的 55 个样点的地面 LAI 测量数据对(1)式的 LAI 估算模型进行了验证 (如图 4)。经验证,实测值与估算值的相关系数 *R*² = 0.531,均方根误差 RMSE = 0.38,可见该模型精度较高。因此,(1)式能够可靠的反映统计关系。

$$LAI = 0.481e2.889 * NDVI(R^2 = 0.5073)$$
(1)

定义此模型为全生长期 LAI 估算模型。



图 2 各时期 LAI-NDVI 估算模型

Fig. 2 The estimation model of LAI (Leaf Area Index) for each period

6.0

5.0

4.0

3.0

2.0

measured LAI

估算叶面积指数 Estimated LAI







= 0.719x + 0.936

 $R^2 = 0.531$ RMSE = 0.38

样本数N=55

1:1线

Fig.3 The LAI estimation model of aspen forest during the whole growth period

表 2 不同观测时期杨树林 LAI 与 NDVI 的相关性

Table 2	The correlation of LAI and NDVI of aspen forest for each period and the whole growth period					
观测时间	对应生长期	线性 R ²	指数 R ²	对数 R ²		
Measurement time	Growth period	Linear	Exponent	Logarithm		
2012-5-7	花果期	0.6048	0.5874	0.5952		
2012-9-22	落叶始期	0.2375	0.229	0.234		
2013-4-19	展叶期	0.6615	0.7158	0.6575		
2013-6-8	叶面积稳定期	0.1151	0.135	0.1189		
2012-5-7—2013-6-8	以上所有时期	0.4772	0.5073	0.4866		

4 结果分析与验证

4.1 结果分析

上述研究表明,4月份(展叶期)和5月份(花果期)的模型相关性高于全生长期模型,而6月份(叶面积 稳定期)和9月份(落叶始期)则低于全生长期模型。这是由于:

(1) 4 月份杨树林处于展叶期,5 月份处于花果期,这两个时期是杨树林生长最旺盛的时期,LAI 随时间 增大的速度比较快,NDVI 变化比较灵敏,并且林下灌草影响比较小。尤其是4月份,此时杨树处于展叶期,而 林下灌草则刚刚开始发芽,其覆盖度很小,几乎可以忽略不计,LAI-NDVI 模型反映的是单一杨树林对象真实 的生长特点。对于5月份,虽然杨树林生长也比较快,NDVI随LAI变化也比较明显,但是,由于此时林下灌草 已经逐渐开始生长,叶子开始展开,因此对于杨树林,尤其是对较稀疏的杨树林的影响变大。因为林下灌草与 杨树林混合后在影像上表现为两者的混合信息,NDVI不能真实的反映杨树林像元信息,所以造成此时期 LAI-NDVI 模型相关性较 4 月份低。而全生长期模型的样本量较大,个别样本尤其是处于叶面积稳定期和落 叶始期的样本的影响,这两个时期的样本几乎占到了整个时期样本的 50%,因此这些样本带来的误差对整个 时期样本的分布趋势影响较大,所以全生长期模型相关性低于4月份和5月份。

(2)6月份,杨树林处于生长高峰期,叶子已经封顶,林下灌草几乎对其无影响。但是,此时 LAI 值基本达 到 3.0 左右,使 NDVI 出现一定程度的饱和,且个别 LAI 值较小的样点主要是受林窗的影响,这些原因导致该 时期模型几乎表现不出 LAI 随 NDVI 的变化趋势。9月份,杨树林处于落叶始期,部分叶子已落,叶子已变稀 疏,然而林下灌草却依然生长旺盛,尤其对于密度较小和叶片较稀疏的样点,受灌草和林窗的影响较大。由于 不同植被类型的 LAI 随 NDVI 变化的趋势有较大差异,因此,位于林窗较大处的样点受灌草的影响较大,使得 LAI-NDVI 模型相关性大大降低。并且单个时期的样本数量偏小,单个数据的测量误差对数据的整体分布趋

势影响较大,而全生长期模型用整个时期的 LAI 数据进 行统计时,样本量较大,样本中各时期的单点测量误差 对数据整体分布趋势影响较小,因此全生长期模型相关 性比6月份和9月份估算模型好。

(3)另外,数据样本代表性较差,造成单时期 LAI 比较集中,而整个时期的 LAI 分布与单时期的 LAI 分布 相比,相对均匀,且分散在 LAI-NDVI 二维空间的不同 位置,能够表现出 LAI 随 NDVI 的变化趋势,因此全生 长期模型相关性较6月份和9月份的模型好。如图5 所示,4月份65%以上的LAI测量数据集中在1.0-2.0 之间, 而 NDVI 分布在 0.43—0.54 之间: 5 月份 70% 的 LAI 测量数据集中在 2—3.5 之间, NDVI 在 0.55—0.72 Fig. 5 Scatter of multitemporal NDVI and LAI for simple points 之间:6月份 62.5%的 LAI 集中在 2.90—3.50, NDVI 在







0.63—0.72 之间;9 月份 73%以上的 LAI 集中在 2.5—4.0, NDVI 在 0.50—0.66; 而整个时期的 LAI 变化范围由 1.3 到 4.3, NDVI 由 0.43 变化到 0.72, 扩大了 LAI 的变化范围, 而且不同时期的数据在 NDVI-LAI 二维空间的 位置不同,4 月份 LAI 数据分布在 LAI-NDVI 的低值区域,6 月份和 9 月份 LAI 数据分布在相对高值区域,5 月份分布在相对中间位置, 因此全生长期模型的数据能够表现出 LAI 随 NDVI 的变化趋势。

通过上述结果分析可知,全生长期模型相关性较好,而6月份和9月份的LAI-NDVI 模型相关性较差。而 6月份主要是因为LAI基本达到稳定,使得 NDVI 比较集中,所以不能表现出LAI随 NDVI 的变化趋势;9月份则由于林下灌草及林窗的影响,导致其 NDVI 不能反映杨树林的真实信息,因此LAI和 NDVI 的相关性较差。 这两种情况一直是遥感反演领域的研究热点,也是至今尚未解决的难点。本论文以此为出发点,通过对各时 期估算模型和全生长期估算模型的研究,以及具体的对比分析,找到了一种全生长期 LAI 估算模型,可用来估 算叶面积稳定期和落叶始期的LAI。

4.2 杨树林全生长期 LAI 估算模型适用性验证

为了进一步验证此模型的适用性,选择一个大样 方,布设了 8 个样地,分别于 2012 年 5 月 7 日(花果 期)、2012 年 9 月 22 日(落叶始期)、2013 年 4 月 19 日 (展叶期)、2013 年 6 月 8 日(叶面积稳定期)进行连续 观测,计算每个时期 8 个样地的平均值作为此时期的实 测 LAI 值,得到 LAI 观测值随时间变化特征,如图 6 所 示。另外,分别用这四个时期对应的 LAI-NDVI 线性模 型(如图 2)估算 8 个样地的 LAI 取平均作为此生长期 的 LAI,同时从全生长期模型估算的四景 LAI 影像(如 图 6)中取出这 8 个样地的 LAI 估算值并取平均,得到 各个生长期估算模型的 LAI 估算值和全生长期估算模 型的 LAI 估算值随时间变化特征,如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,从整个生长期 LAI 的变化趋势 看,用全生长期模型估算的 LAI 的季节变化趋势比用各 个生长期单个模型估算的 LAI 的季节变化趋势更为接 近实测 LAI 的季节变化趋势,即 4 月份至 6 月份处于上





升趋势,6月份达到顶峰,6月份至9月份处于下降趋势,这与研究区杨树林的生长规律相符合,这进一步证明 了全生长期模型用于各个时期 LAI 估算的适用性。虽然在4月份和5月份,用各个生长期单个 LAI 估算模型 估算的 LAI 值比全生长期模型稍接近实测 LAI 值,但是这两种模型估算的 LAI 与实测 LAI 的差值相差不大。 在6月份和9月份,用全生长期模型估算的 LAI 值比各个生长期 LAI 估算模型估算的 LAI 值更接近真实值, 明显提高了精度;而且,可以明显看出,6月份的 LAI-NDVI 估算模型估算得到的 LAI 值偏小,而9月份的偏 大。这是因为6月份 LAI 基本达到最大,NDVI 相对集中,加上个别样点受林窗影响,导致 LAI 几乎表现不出 随 NDVI 变化的趋势;而9月份部分叶子已经凋落,叶片密度变小,但林下灌草生长茂盛,引起杨树林像元在 影像上的 NDVI 值反映的是杨树林和灌草的混合信息,比真实的杨树林 NDVI 值大,因此用9月份 LAI-NDVI 估算模型估算得到的 LAI 值也比杨树林的真实值大,这与实际情况相符合。

结合全生长期估算模型的验证结果(图4)及两种不同估算模型估算 LAI 值与实测 LAI 随时间变化的趋势特征(图6)可知,全生长期模型对于各个生长期 LAI 估算具有一定的适用性和有效性。因此,基于此模型可生成时间序列的 LAI,进而研究 LAI 的动态变化,这为 LAI 动态变化研究提供了一种有效的遥感方法和思路。

6

5 结论与讨论

本研究利用多个时期 LAI 地面观测数据和遥感数据,对不同时期杨树林 LAI 估算模型相关性进行了探索,得到了杨树林全生长期 LAI 估算模型,最后通过验证进一步证明了全生长期模型用来估算各个时期 LAI 的适用性,为杨树林季节变化监测提供了有效途径。研究结论如下:

(1) 杨树林 LAI 与 NDVI 的相关性随着季相的变化而变化,4 月中旬(展叶期)和5 月初(花果期)的较高,6 月份(叶面积稳定期)和9 月份(落叶始期)的较低。

(2)全生长期 LAI 估算模型的相关性较 4 月份和 5 月份稍低,但是较 6 月份和 9 月份却有大大提高。这 说明用全生长期模型来估算叶面积稳定期和落叶始期的 LAI 具有一定的可行性,可改善这两个时期 LAI 估算 模型的局限性。

(3)杨树林全生长期 LAI 估算模型可以推广到其他任何时期杨树林 LAI 的估算,并且基于此模型得到的 LAI 值随时间变化趋势较接近实测 LAI 随时间变化趋势。

(4)环境星具有分辨率较高和成像周期较短的优势,能兼顾时效性和精度要求,更有利于跟踪植被生长 情况。

(5)由于观测天气及卫星重访周期的限制,要获取与地面观测时间完全同步的影像数据比较困难,因此本研究获取了成像时间与观测时间最接近的准同步遥感影像。虽然获取影像与地面观测时间不完全同步,但 6月份杨树林 LAI 已经稳定,9月份 LAI 已封顶且几天内物候基本无变化,因此对于各个时期 LAI 的总体变化 趋势影响很小。

参考文献(References):

- WeissM, 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.
- [2] Kuusk A, Lang M, Nilson T. Simulation of the reflectance of ground vegetation in sub-boreal forests. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 126(1/2): 33-46.
- [3] Fang H L, Liang S L. A hybrid inversion method for mapping leaf area index from MODIS data: experiments and application to broadleaf and needle leaf canopies. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(3): 405-424.
- [4] Soudani K, François C, le Maire G, Le Dantec V, Dufrêne E. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(1/2):161-175.
- [5] 杨贵军,赵春江,邢著荣,黄文江,王纪华等.基于 PROBA/CHRIS 遥感数据和 PROSAIL 模型的春小麦 LAI 反演.农业工程学报,2011, 27(10):88-94.
- [6] 赵丽芳. 利用 Hypeion 高光谱遥感数据估测森林叶面积指数[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [7] Colombo R, Bellingeri D, Fasolini D, Marino C M. Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(1): 120-131.
- [8] Turner D P, Cohen W B, Kennedy R E, Fassnacht K S, Briggs J M. Relationships between leaf area index and landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(1): 52-68.
- [9] Manninen T, Korhonen L, Voipio P, Lahtinen P, Stenberg P. Leaf area index (LAI) estimation of boreal forest using wide optics airborne winter photos. Remote Sensing, 2009, 1(4): 1380-1394.
- [10] Wang Q, Tenhunen J, Granier A, Reichstein M, Bouriaud O, Nguyen D, Breda N. Long-term variations in leaf area index and light extinction in a Fagus sylvatica stand as estimated from global radiation profiles. Theoretical and Applied Climatology, 2004, 79(3/4): 225-238.
- [11] Wang Q, Adiku S, Tenhunen J, Granier A. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(2): 244-255.
- [12] Birky A K. NDVI and a simple model of deciduous forest seasonal dynamics. Ecological Modelling, 2001, 143(1/2): 43-58.
- [13] LÜDEKE M, JANECEK A, KOHLMAIER G H. Modelling the seasonal CO₂ uptake by land vegetation using the global vegetation index. Tellus B, 1991, 43(2): 188-196.
- [14] 朱高龙,李明泽,居为民,陈镜明,吴中忠. HJ-1CCD 与 Landsat-5TM 在森林叶面积指数估算中的比较分析. 东北林业大学学报,2011,39 (1):127-130.
- [15] 赵英时.遥感应用分析原理与方法.北京:科学出版社,2003.