

# 杉木人工林叶面积指数估测及影响因子分析

严恩萍<sup>1</sup>, 林辉<sup>1</sup>, 洪奕丰<sup>2</sup>, 张雨<sup>1</sup>, 陈利<sup>1</sup>

(1. 中南林业科技大学 林业遥感信息工程研究中心, 长沙 410004; 2. 国家林业局 华东森林资源监测中心, 杭州 310019)

**摘要:**叶面积指数是植被长势监测中最常用的参数之一,开展叶面积指数定量估测可为 LAI 信息的大区域监测提供参考。以湖南攸县黄丰桥林场的 SPOT 5 影像为数据源,结合地面实测数据,通过 MCARI、SAVI、MSAVI、NDVI 间的相关性和回归分析构建 16 种叶面积指数估测模型,探索适合杉木 LAI 的估测模型及影响因子。四种植被指数均与杉木叶面积指数具有较高的相关性,依次为 MCARI、SAVI、MSAVI、NDVI,以 MCARI 为自变量的指数回归模型  $y=1.031\exp(3.379x)$  估测精度最高,达 87.69%;杉木 LAI 随龄组的增大呈上升趋势,最大值出现在成熟林,比 LAI 最小的幼龄林高 0.30;不同坡向杉木 LAI 两两之间差异显著,半阳坡 LAI 明显大于其他坡向。研究表明,龄组和坡向是影响杉木 LAI 的重要因子,限制其生长和分布的首要因素是水湿条件,其次是温度。

**关键词:**遥感;叶面积指数;回归模型;SPOT 5;杉木人工林

中图分类号:S718.55

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)04-0075-07

## Analysis on LAI Estimation and Its Effecting Factors for Chinese Fir Plantation

YAN En-ping<sup>1</sup>, LIN Hui<sup>1</sup>, HONG Yi-feng<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>

(1. *Research Center of Forest Remote Sensing & Information Engineering,*

*Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China;*

*2. East China Monitoring Center of the Forest Resources, State Forestry Administration, Hangzhou 310019, China)*

**Abstract:** Leaf area index (LAI) is one of the most important parameters for monitoring vegetation growth. In order to provide reference for LAI monitoring across large region, the study of LAI estimation and its effecting factors was conducted, which was carried out on Huang Fengqiao Forest Farm, You county, Hunan province, China. Based on the SPOT 5 data and ground survey data, sixteen LAI estimation models were constructed for determining the most suitable LAI estimation model and impact factor by using correlation analysis and regression analysis among four vegetation indexes (NDVI, SAVI, MSAVI and MCARI). The results show that the correlation between four vegetation indexes and fir leaf area index was strong, which were MCARI, SAVI, MSAVI, NDVI correspondingly. Among them, the exponential regression model with NDVI as the independent variable [ $y=1.031\exp(3.379x)$ ] has the highest estimation accuracy (87.69%). The LAI of fir tended to increase with the rise of group ages. The highest LAI value existed in the mature forest, while the lowest LAI value was found in the young forest, and the difference value between these two forests was 0.3. Two fir groups with various slope aspects show significant difference in LAI values, and values from the fir with a half-sunny slope were obviously higher than others. It can be concluded that group age and slope aspect were two important factors affecting the LAI of Chinese fir plantation, and the primary factor limiting the growth and distribution of fir plantation was wet condition, followed by temperature.

**Key words:** remote sensing; leaf area index; regression model; SPOT 5; Chinese fir plantation

叶面积指数(LAI)是定量分析地球生态系统能量交换特性的重要因子,对生态系统碳循环和全球变

化研究具有重要意义<sup>[1]</sup>。作为植被冠层结构研究的重要参数,LAI控制着植被的生物物理过程,同时也

为植冠表面能量交换提供定量信息。传统的叶面积指数测量方法受仪器、人力和物力等因素的影响,只能在局部范围进行测量,随着信息技术的迅速发展,遥感因其宏观、短周期和低成本等特点,为林业中实时大范围 LAI 监测提供了有效途径。

国内外学者利用高光谱遥感数据结合地面调查数据开展 LAI 的定量估测研究已有很多探索<sup>[2-4]</sup>;也有学者利用中低分辨率遥感数据(NOAA-AVHRR、MODIS、TM、ASTER),开展了不同尺度的 LAI 反演研究,Gitelson 等提出了新的植被指数 GRVI,用绿波段代替红波段,开展 LAI 估测研究;刘占宇等构建了针对玉米、棉花和水稻等不同作物的植被指数模型<sup>[5-9]</sup>。由多波段数据经线性/非线性组合形成的叶面积指数,在绿色植被探测方面比单波段数据更灵敏,作为植被生长状态及空间分布密度的指示因子,被广泛应用于作物识别预报、植被覆盖密度评价、土地利用覆盖探测等领域<sup>[10-11]</sup>。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方林区主要的速生用材树种,有近千年的栽培历史,面积约占我国人工林总面积的 24%,在南方集体林区生产建设中占有重要地位<sup>[12]</sup>。目前 LAI 监测运用较多的是高光谱和中低分辨率遥感技术,但采用高分辨率遥感进行杉木叶面积指数估测及影响因子(尤其是坡向、龄组)分析的研究不多。鉴于此,本研究以湖南攸县黄丰桥林场的 SPOT 影像为数据源,结合地面实测数据,分析从遥感影像得到的植被指数与实测 LAI 的相关关系,构建适合杉木人工林 LAI 的最佳指数及估测模型,分析龄组、坡向等因子对 LAI 的影响,旨在为大区域杉木 LAI 信息的遥感估算提供科学依据和参考。

## 1 研究区概况、数据与方法

### 1.1 研究区概况

研究区攸县黄丰桥国有林场地处湖南省株洲市攸县东部,位于东经 113°04′—113°43′,北纬 27°06′—27°24′,属亚热带季风湿润气候区,年平均气温 17.8℃、降水量 1 410.8 mm、平均日照时间 67 d、无霜期 292 d 左右。境内以中低山地貌为主,最高海拔 1 270 m,最低海拔 115 m,坡度在 20°~35°之间。土壤以板页岩发育而成的山地黄壤为主。林场属以保护为主的生态公益型林场,境内森林茂盛,有木本植物 430 余种,森林覆盖率达 90.07%。

全场国有林经营面积 228.7 万 hm<sup>2</sup>,有林地面积 151.8 万 hm<sup>2</sup>,划定生态公益林 132.3 万 hm<sup>2</sup>(均为国家级)。拥有森林蓄积量 891 262 m<sup>3</sup>,其中商品林

蓄积 434 991 m<sup>3</sup>,生态公益林蓄积 456 271 m<sup>3</sup>。林分类型以杉木人工林为主,在不同的坡向、坡度和海拔上,广泛分布着杉木幼龄、中龄以及成熟林。试验区主要位于攸县的黄丰桥镇和柏市镇,其中以黄丰桥国有林场柏市分场和广黄分场为核心研究区域,总面积 351.16 km<sup>2</sup>。

### 1.2 数据来源与处理

1.2.1 遥感数据 本研究采用 2009 年 11 月 28 日 3:06 获取的 SPOT5 遥感数据,影像中心坐标为 27°17′33″N,113°49′27″E。数据包括 XS1(540.0 nm)、XS2(650.0 nm)、XS3(835.0 nm)、SWIR(1 630.0 nm)4 个多光谱波段,空间分辨率为 10 m,全色波段空间分辨率达 2.5 m。太阳高度角和方位角分别为 45.11°和 158.74°,视场范围为 60 km×60 km。

1.2.2 地面调查数据 运用角规抽样方法对林分进行调查获取地面数据,结合攸县土地利用类型图以及 2008 年森林资源调查数据,分析杉木人工林的整体分布情况,设置 60 m×60 m 的样地 107 块,调查时间为 2009 年 11 月 15 日至 2009 年 12 月 5 日。所有样地均为人工纯林,其中杉木林 78 块,主要为中龄林和近熟林;其他样地 29 块,包括马尾松林、阔叶树林和竹林。

共采集 107 块样地的地面实测 LAI 数据(图 1),在每个样地的四角和中心分别设置一个测点,每个测点分别进行 4 次叶面积指数测量,取 4 次测量的平均值作为该点的实测叶面积指数,同时用 GPS 记录每一测点的经纬度,最后取每块样地所有测点的平均值作为该样地的叶面积指数。

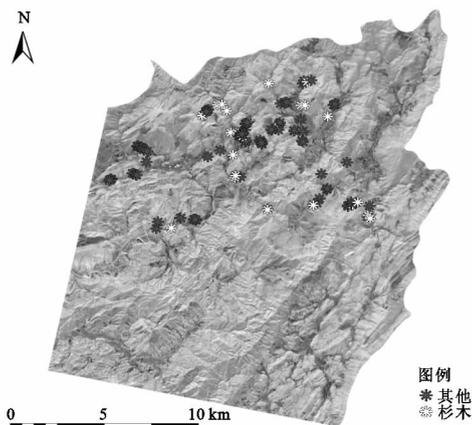


图 1 地面实测 LAI 样点分布

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 地物反射率的计算

(1) 几何校正 使用经过辐射校正的 SPOT 5 多光谱波段数据,在 1:100 000 地形图上选择明显特征点 30 个,对原始影像进行几何校正,误差控制在 1 个

像元以内。数据采用 DIMAP 格式分发,各个参数存放在辅助数据文件中文件名为 METADATA.DIM,采用 XML 格式记录。

(2) 地物辐射亮度的计算 经几何校正后的 SPOT 5 数据,再经过辐射定标处理,即可得到地物的辐射亮度值,定标公式为<sup>[13]</sup>:

$$L = \frac{X}{A} + B \quad (1)$$

式中: $A$ ——辐射校正后图像产品的绝对定标增益; $B$ ——图像产品的绝对定标偏置;在 DIM 参数文件中分别以 Physical-Gain 和 Physical-Bias 的形式给出,单位为  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ;  $X$ ——几何校正后的图像像元值; $L$ ——经像元值  $X$  计算得到的辐射亮度,单位是  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ 。

(3) 地物反射率的计算 从地物能量转换的角度看,地物辐射亮度是一个关于太阳等效辐射亮度  $L$ 、太阳天顶角  $\theta$  和等效地物反射  $E_0$  的函数,考虑到太阳公转时日地距离因子  $d$  的变化,则地物大气顶部等效反射率的计算公式为:

$$\rho = \frac{\pi L d^2}{E_0 \cdot \cos\theta} \quad (2)$$

式中: $d$  以天文单位表示,取值在 0.983~1.017 之间,本文  $d$  值取 1; $E_0$  的单位为  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ 。 $E_0$  在参数文件中以 SOLAR\_IRRADIANCE\_VALUE 为标签给出,太阳高度角以 SUN\_ELEVATION 为标签给出,计算其余角即得到  $\theta$ 。

### 1.3.2 植被指数的计算

(1) 归一化植被指数 归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index)是目前信息提取最常用的参数,因为它与植被覆盖度、植被绿色、植被生产力等均具有很好的线性关系<sup>[14-16]</sup>,是反映不同土地覆盖类型生物特性差异的重要指标<sup>[17]</sup>,如生物量、植被长势、植被覆盖度等<sup>[18]</sup>,计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (3)$$

(2) 土壤调节植被指数 研究表明,不同土壤背景反射率与土结构、颜色、湿度有关,直接影响着植被发射波谱特征。为修正 NDVI 对土壤背景噪声的敏感性,Huete 提出了土壤调节植被指数 SAVI<sup>[19]</sup>,公式如下:

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} (1 + L) \quad (4)$$

其中, $L$  为常量,介于 0~1 之间, $L=1$  时,土壤背景影响为 0; $L=0$  时,土壤背景影响非常大,即植被覆盖度为 0<sup>[20-21]</sup>。为较好地消除土壤背景影响, $L$  通常取值 0.5。

(3) 修正的土壤调节植被指数 NDVI 能反映出植物冠层的背景影响,为进一步削弱土壤背景的影响,Qi 等<sup>[22]</sup> 在 SAVI 的基础上提出了修正的土壤调节植被指数(MSAVI),土壤调节因子由植被指数自身调整,表达式如下:

$$MSAVI = \frac{[2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}]}{2} \quad (5)$$

(4) 修正的叶绿素调节植被指数 为提高植被指数对 LAI 的敏感度,Daughtry 等<sup>[23]</sup> 在叶绿素吸收指数(CARI)的基础上提出了修正的叶绿素调节指数(MCARI),计算公式如下:

$$MCARI = \frac{1.5 \times [2.5(\rho_{NIR} - \rho_{RED}) - 1.3 \times (\rho_{NIR} - \rho_{GREEN})]}{\sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - (6\rho_{NIR} - 5\sqrt{\rho_{RED}}) - 0.5}} \quad (6)$$

式中: $\rho_{NIR}$ ——近红外波段表现反射率; $\rho_{RED}$ ——红波段表现反射率; $\rho_{GREEN}$ ——绿波段表现反射率。

## 2 结果与分析

### 2.1 杉木信息的遥感提取

SPOT 5 影像上杉木人工林的光谱特征明显区别于其他林地,这为准确提取杉木人工林提供了依据。从多光谱影像上提取对植被信息敏感的近红外波段,利用归一化植被指数(NDVI)和全色波段提取的纹理信息,辅助 2008 年黄丰桥林场森林资源分布图和野外调查数据,建立训练样本,采用最大似然监督分类,提取研究区的杉木人工林覆盖信息。经检验,分类精度达 89.94%,Kappa 系数为 0.87,可以满足后续研究要求。

### 2.2 叶面积指数遥感反演

2.2.1 相关特征统计 为探求实测 LAI 数据与各植被指数之间的关系,在 SPSS 16 中进行统计(包括最小值、最大值、平均值和标准差),结果见表 1。

表 1 实测 LAI 数据及其不同植被指数的相关统计特征

统计量	实测 LAI	NDVI	SAVI	MSAVI	MCARI
最小值	1.48	0.16	0.08	0.06	0.04
最大值	5.22	0.71	0.43	0.41	0.48
平均值	2.90	0.55	0.28	0.24	0.29
标准差	0.80	0.12	0.07	0.07	0.09

标准差反映了个体偏离均值的程度,是衡量样本数据质量的重要指标。标准差越大,则样本中所有个体出现的概率趋于相等,个体数据分布越分散;反之,则样本中所有数据集中在某个中心值附近。由表 1 可知:实测 LAI 数据介于 1.48~5.22 之间,标准差

为 0.80, LAI 数据整体质量理想,可以满足后续 LAI 模型估测的要求;四种植被指数的标准差顺序依次为:NDVI>MCARI>MSAVI $\geq$ SAVI。由此可见,NDVI、MCARI 分布比较分散,在模型估测参数选择时可重点考虑。

2.2.2 相关性分析 从 78 组样本数据中剔除两组异常数据,根据年龄、郁闭度、坡度、坡向和海拔,抽取各龄组 2/3 的数据用来构建叶面积指数估测模型,其中包括每个龄组样地数据中 LAI 值最大和最小的两组数据,共有 50 组数据作为样本用于估测模型拟建,剩余 26 组数据作为检验样本评价模型精度。计算各变量与实测杉木叶面积指数之间的相关性(Pearson 简单相关系数),结果见表 2。

表 3 杉木 LAI 与植被指数拟合模型

模型	植被指数	回归方程	$R^2$	df1	df2	F	Sig.
NDVI	一元线性模型	$Y=8.041X-1.879$	0.536	1	49	56.563	0.000
	二次曲线模型	$Y=11.088X^2-4.281X+1.475$	0.548	2	48	29.051	0.000
	对数模型	$Y=4.278\ln X+5.157$	0.517	1	49	52.390	0.000
	指数模型	$Y=0.437\exp(3.122X)$	0.588	1	49	69.971	0.000
SAVI	一元线性模型	$Y=9.480X+0.248$	0.630	1	49	83.556	0.000
	二次曲线模型	$Y=9.612X^2+4.371X+0.885$	0.646	2	48	41.884	0.000
	对数模型	$Y=2.130\ln X+5.678$	0.567	1	49	64.157	0.000
	指数模型	$Y=1.032\exp(3.557X)$	0.636	1	49	89.491	0.000
MSAVI	一元线性模型	$Y=9.398X+0.520$	0.576	1	49	66.497	0.000
	二次曲线模型	$Y=-0.834X^2+9.800X+0.475$	0.576	2	48	32.574	0.000
	对数模型	$Y=1.911\ln X+5.591$	0.531	1	49	55.547	0.000
	指数模型	$Y=1.138\exp(3.544X)$	0.596	1	49	72.333	0.000
MCARI	一元线性模型	$Y=9.255X+0.186$	0.675	1	49	101.929	0.000
	二次曲线模型	$Y=19.567X^2-1.440X+1.549$	0.713	2	48	59.606	0.000
	对数模型	$Y=1.911\ln X+5.306$	0.540	1	49	57.489	0.000
	指数模型	$Y=1.031\exp(3.379X)$	0.662	1	49	96.123	0.000

分析表 3 可知,采用二次曲线模型、指数模型和一元线性模型拟合杉木 LAI,MCARI 拟合效果最好, $R^2$  分别为 0.713,0.662,0.675;其次是土壤调节植被指数 SAVI,决定系数  $R^2$  为 0.646,0.636,0.630;MSAVI、NDVI 拟合效果较前两者略差。

综上,基于 SPOT 5 表观反射率计算的四种植被指数与杉木 LAI 均有较高的拟合程度,用它们建立的回归方程的显著性都在 95% 以上,拟合效果最佳的是 MCARI,其次是 SAVI、MSAVI,最差的是 NDVI。表明 NDVI 因受不同背景因素的影响,回归效果不是很理想;而 MCARI、SAVI、MSAVI 因能进一步抑制叶绿素和土壤背景因素的干扰,对植被信息和叶面积指数比较敏感,因而可以更好地用于杉木叶面积指数的遥感定量反演研究。

2.2.4 精度验证 为进一步验证模型的拟合精度,

表 2 植被指数与 LAI 相关性

植被指数名称	相关系数	显著性(Sig.)
NDVI	0.732**	0.000
SAVI	0.807**	0.000
MSAVI	0.782**	0.000
MCARI	0.836**	0.000

注:\*\*表示显著水平  $p \leq 0.01$ 。

由表 2 可知,四种植被指数均与杉木叶面积指数呈显著相关关系,具有较高的相关性,依次为 MCARI、SAVI、MSAVI、NDVI,其中相关性最高的为修正的叶绿素调节植被指数(MCARI),达 0.836。

2.2.3 模型构建 为了实现杉木 LAI 的有效估算,本研究采用叶面积指数与四种植被指数分别建立一元线性模型、二次曲线模型、对数模型、指数模型。

采用余下的 26 组数据分别代入拟合精度最高的四组模型中,求得估测值。将 LAI 实测值与估测值进行一元线性回归模型拟合,检验模型的估测精度。检验公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (8)$$

式中: $n$ ——检验样本容量; $y_i$ ——第  $i$  个检验样本值; $\hat{y}_i$ ——对应第  $i$  个样点估计值;RMSE——总均方根误差,其值越小,表明精度越高;RE——相对误差,以其绝对值的平均值作为模型精度检验指标,值越小表明精度越高。

LAI 既是单植被指标,又与其他植被指数具有良好的相关性。由表 4 可知,以 MCARI 为自变量的二

次多项式模型得到的 LAI 估测值,其拟合方程可靠性最高, $R^2$  达 0.713,居 6 个模型最低,但均方根误差、平均相对误差较以 MCARI 为自变量的指数模型略低,分别为 0.427 8,12.85%;以 MCARI 为自变量的指数回归模型得到的 LAI 估测值, $R^2$  为 0.662, RMSE、平均相对误差最低,分别为 0.417 8,12.31%;以 SAVI(L=0.5)为自变量的二次曲线回归

模型,其拟合方程的可靠性最低, $R^2$  仅 0.646, RMSE 最高达 0.474 0,估测精度最低,仅为 85.87%。

本研究建立的 4 种一元回归模型中拟合程度最高的 4 个模型的估测精度均超过了 85.87%,可对叶面积指数进行较高精度的定量估测,其中以 MCARI 为自变量的指数回归模型估测精度最高,达 87.69%。

表 4 模型精度检验结果比较

估测指标	估算模型	实测值与估测值		检验指标		
		拟合方程		$R^2$	RMSE	RE
MCARI	$Y=19.567X^2-1.440X+1.549$	$Y=0.825X+0.557$	0.713	0.4278	12.8533	
MCARI	$Y=9.255X+0.186$	$Y=0.718X+0.884$	0.675	0.4328	13.5695	
MCARI	$Y=1.031\exp(3.379X)$	$Y=0.795X+0.591$	0.662	0.4178	12.3135	
SAVI	$Y=9.612X^2+4.371X+0.885$	$Y=0.647X+0.975$	0.646	0.4740	13.7919	

2.2.5 反演制图 为了验证 SPOT 5 数据估测杉木人工林 LAI 的可靠性,采用 GIS 的裁剪功能获得研究区杉木人工林的 MCARI 分布图层,将以 MCARI 为自变量的指数回归模型代入 ArcGIS 10.0 的栅格计算器,获得研究区杉木人工林的叶面积指数分布(图 2)。为进一步分析杉木人工林叶面积指数的变化规律,结合研究区 2008 年森林资源分布图,利用 ArcGIS 10.0 的 Spatial Analysis 功能得到研究区 LAI 随不同调查因子的变化情况,结果见表 5、图 3。

### 2.3 叶面积指数影响因子分析

2.3.1 叶面积指数空间分布特征 图 2 给出了研究区叶面积指数的分布,从 SPOT 5 遥感反演的结果来看,效果理想,叶面积指数整体呈现南北高东西低的趋势。从区域分布来看,研究区北部一柏市分场一带,水热条件好,人为干扰活动少,植被以常绿针叶林为主,叶面积指数居整体区域最高,遥感反演的数值多在 3~5 之间,部分区域  $>5$ ;东南部因有几条比较大的山脉,天然林较多, LAI 多在 2~4 之间;西部叶面积指数偏低,集中在 1~2 之间,城镇、石漠化地区叶面积指数  $<1$ ,人为干扰程度较大。通过比较发现,研究区最大叶面积指数主要出现在西北部的高山少人区,受水分湿度、人为因素限制明显。

2.3.2 龄组对杉木叶面积指数的影响 龄组是影响杉木光辐射量及其冠层结构的重要因子,因为不同龄组树木树干、冠层大小等明显不同,相应叶片的光合能力也不同。对比幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的杉木人工林 LAI,结果显示,杉木 LAI 随龄组的增大呈上升趋势(表 5),至成熟林 LAI 达到最大,平均叶面积指数为 3.20,比幼龄林 LAI 的 2.90 高出 0.30;其增长速率逐步递减,从幼龄林到成熟林依次递增 0.18,0.09,0.03,可能是随着林龄的增长,杉木

光合作用能力减弱,但总体上 LAI 处于逐步上升状态。均值比较结果显示,同一地区不同龄组杉木 LAI 两两之间有差异,说明不同龄组杉木的树冠和叶片生长状况差异较大,在实施经营措施时应该区别对待。

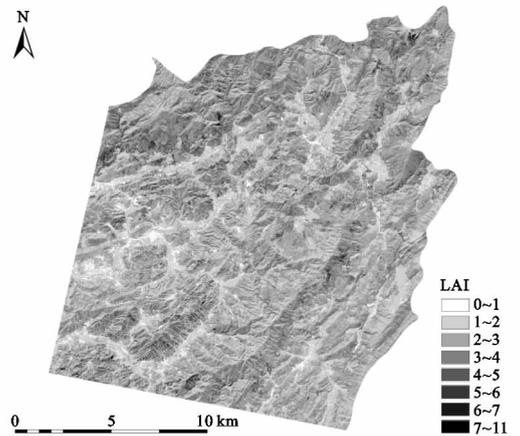


图 2 研究区 LAI 分布图

2.3.3 坡向对杉木叶面积指数的影响 坡向是影响 LAI 的主要地形因子,因为它是表征地表面局部接受阳光和重新分配太阳辐射量的指标,能直接造成局部地区气候特征的差异,导致不同坡向上植被类型及其生长状况明显不同<sup>[24]</sup>。对比阳坡、半阳坡、阴坡杉木(坡度介于  $20^\circ \sim 30^\circ$  之间) LAI,结果显示,不同坡向的 LAI 在整个杉木生长期随龄组的增大均呈不断上升趋势(图 3)。同一龄组内,半阳坡 LAI 最大,阴坡其次,阳坡最小。其中成熟林半阳坡 LAI 最大(达 4.33),约为阴坡的 1.44 倍,整体高出 1.33。这是由于杉木为较喜光树种,半阳坡湿度、光照合适,适宜杉木生长;阴坡次之,而阳坡因温差大、日照长、湿度小,杉木生长差。坡向分析结果表明,对杉木生长和分布起限制作用的首要因素是水湿条件,其次是温度条件。

表 5 各影响因子与杉木 LAI 的相关性统计

龄组	LAI	海拔/m	坡度/(°)	平均胸径/cm	平均树高/m	郁闭度
幼龄林	2.90	327.2	16.5	11.0	8.6	0.65
中龄林	3.08	338.4	21.4	17.4	12.4	0.68
近熟林	3.17	357.1	18.1	21.9	14.5	0.69
成熟林	3.20	378.8	17.2	25.6	16.9	0.74
范围	1.00~5.00	35.3~782	0~45	6.2~31.9	5.7~21.8	0.2~0.9

2.3.4 其他因子对叶面积指数的影响 作为表征植被冠层结构的基本参数之一,叶面积指数被广泛用于植物生长、能量和冠层反射的模型研究<sup>[25]</sup>。影响叶面积指数的因子很多,包括土壤湿度、作物种类、种植密度、海拔、坡度等。分析表 5 可知,海拔、胸径、树高、郁闭度对杉木叶面积指数均有一定的影响,而且随着这些因子值的升高,LAI 逐渐增大,特别是在高海拔、高郁闭度地区,叶面积指数均高于平均值,可能因为这些地区土壤湿度大,光照气温适宜,比较适合于杉木的生长。与其他地形因子相比,坡度对 LAI 的影响并不显著。

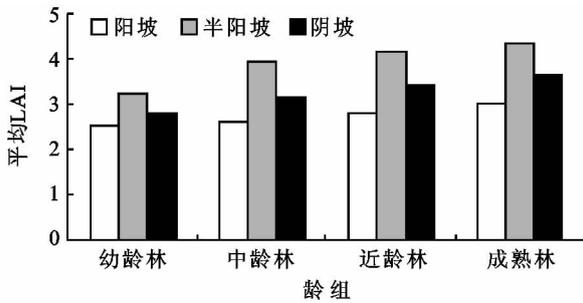


图 3 不同坡向杉木人工林 LAI 分布

### 3 结论

LAI 作为计算干物质累积和植物蒸散的重要参数,最能反映植被生长状态与遥感数据的密切关系<sup>[26]</sup>。本研究利用 SPOT 5 数据提取植被指数,与实测杉木 LAI 建立回归模型,利用 ArcGIS 10.0 得到研究区 LAI 的空间分布,分析龄组、坡向等因子对杉木 LAI 的影响。相关性分析表明,4 种植被指数均与杉木叶面积指数具有较高的相关性,依次为 MCARI、SAVI、MSAVI、NDVI,以 MCARI 为自变量的指数回归模型  $y = 1.031\exp(3.379x)$  估测精度最高,达 87.69%;模型精度检验说明利用遥感因子对 LAI 进行快速、高精度、大范围的定量估测是可行的。杉木 LAI 随龄组的增大呈上升趋势,最大值出现在成熟林;不同坡向杉木 LAI 之间差异显著,半阳坡 LAI 明显大于其他坡向。研究表明,龄组和坡向是影响杉木 LAI 的重要因子,限制其生长和分布的首要因素是水湿条件,其次是温度。

### 4 讨论

叶面积指数作为植被长势遥感监测中最常用的综合参数之一,国内外已有众多研究,并提出了不同敏感区域和波段组合的植被指数<sup>[27-28]</sup>,利用植被指数估算 LAI 虽能取得较好效果,但其稳定性和预测能力难以保证<sup>[29]</sup>。(1) LAI 的空间分布特征主要受降水量、平均温度和光照的影响。相关研究认为,杉木 LAI 在 0~5 时,其与生物量呈显著的相关关系,即随着 LAI 的增大,生物量明显增加<sup>[30]</sup>。水湿条件是影响坡地杉木 LAI 的主要因素。(2) 龄组是影响杉木冠层结构及生长状况差异的重要因子。不同龄组杉木叶片光合能力各异,针对不同龄组杉木的经营措施也应有所侧重:生长期则主要以控制树形,修枝剪枝为主;而成熟期主要以稳定材积,增强树势为目的。受试验条件的限制,关于同一龄组不同地形条件杉木的 LAI 是否存在明显差异,未进行研究。(3) 地形因子中坡向对 LAI 的影响比较显著<sup>[31]</sup>,半阳坡降水量、相对湿度比阳坡大,前者太阳辐射、温度比阴坡大,加之杉木为较喜光树种,因此研究区半阳坡的杉木比阳坡长势好,阴坡次之,且成熟林 LAI 为阳坡的 1.44 倍。结果显示,对杉木生长和分布起限制作用的首要因素是水湿条件,其次是温度。其他因子对杉木 LAI 也有影响,至于是否显著有待今后进一步研究。

叶面积指数估测一直是遥感反演领域的热点,虽然通过构建各种植被指数能提高叶面积指数遥感估测的精度,但有效构建 LAI 的物理模型还需加强。同时,本研究构建的 LAI 估算模型成果能否在更大范围内适用也需要进一步验证。杉木 LAI 除受仪器、算法等的影响外,还取决于植被周围的环境因素,如植株密度、叶冠、土壤背景、大气等,其影响否显著有待进一步验证。

#### 参考文献:

- [1] Haboudane D, Miller J R, Pattery E, et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture[J]. Remote sens-

- ing of Environment, 2004, 90(3): 337-352.
- [2] 柏军华, 李少昆, 王克如, 等. 棉花叶面积指数冠层反射率光谱响应及其反演[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 63-69.
- [3] 张正杨, 马新明, 贾方方, 等. 烟草叶面积指数的高光谱估算模型[J]. 生态学报, 2012, 32(1): 168-175.
- [4] 靳华安, 刘殿伟, 王宗明, 等. 三江平原湿地植被叶面积指数遥感估算模型[J]. 生态学杂志, 2008, 27(5): 803-808.
- [5] 何磊, 唐姝娅, 苗放, 等. 岷江上游典型流域叶面积指数的遥感模型及反演[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 218-221.
- [6] Ahl D E, Gower S T, Burrows S N, et al. Monitoring spring canopy phenology of a deciduous broadleaf forest using MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(1): 88-95.
- [7] 徐涵秋, 张铁军. ASTER 与 Landsat ETM<sup>+</sup> 植被指数的交互比较[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1902-1907.
- [8] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶. 中国四川间作地区作物高度、覆盖度和叶面积指数的时间变化[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 72-75.
- [9] 刘占宇, 黄敬峰, 王福民, 等. 估算水稻叶面积指数的调节型归一化植被指数[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3350-3356.
- [10] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(4): 327-333.
- [11] 陆广勇, 杨勤科, 王海江. 基于 MODIS-NDVI 时序数据的黄土丘陵区土地覆盖分类研究[J]. 水土保持研究, 2012, 18(2): 112-120.
- [12] 邓宝珍. 生态型林地清理对杉木生长及物种多样性的影响[J]. 林业科技开发, 2007, 21(5): 32-34.
- [13] 刘宇光, 金明, 冯钟葵, 等. SPOT 数据反演地物辐射亮度和反射率的基础研究[J]. 地球信息科学, 2005, 7(2): 111-115.
- [14] Tomoaki M, Alfredo H, Hiroki Y. An empirical investigation of cross-sensor relationships of NDVI and red/near-infrared reflectance using EO-1 Hyperion data [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(2): 223-236.
- [15] Asrar G, Fuchs M, Kanemasu E T. Estimating absorbed photosynthetically active radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat [J]. Agronomy Journal, 1984, 76(2): 300-306.
- [16] Boegh E, Soegaard H, Hanan N. A remote sensing study of the NDVI-Ts relationship and the transpiration from sparse vegetation in the Sahel based on high-resolution satellite data [J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 69(3): 224-240.
- [17] 裴欢, 魏勇, 房世峰, 等. 基于 SPOT 高分辨率遥感数据的绿洲荒漠化土地分类方法: 以吐鲁番绿洲为例 [J]. 2011, 33(6): 1204-1210.
- [18] 庞吉林, 张克斌, 乔娜, 等. 基于 RS 的盐池县近 10 年植被覆盖度动态变化研究 [J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 112-121.
- [19] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295-309.
- [20] Kaufman Y J, Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1992, 30(2): 261-270.
- [21] Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977, 43(12): 1541-1552.
- [22] Qi J, Huete A R. Interpretation of vegetation indices derived from multi-temporal SPOT images [J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 44(1): 89-101.
- [23] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(2): 229-239.
- [24] 何婷婷, 汪有科, 张陆军, 等. 黄土高坡地枣树林龄和对叶面积指数的影响 [J]. 果树学报, 2010, 27(2): 293-298.
- [25] Daniel A C. Spectral short-circuiting and wake production within the canopy trunk space of an alpine hardwood forest [J]. Boundary Layer Meteorol, 2008, 126(2): 415-431.
- [26] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(5): 537-541.
- [27] 程乾, 黄敬峰, 王人潮, 等. MODIS 植被指数与水稻叶面积指数及叶片叶绿素含量相关性研究 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1363-1367.
- [28] 宋开山, 张柏, 王宗明, 等. 基于人工神经网络的大豆叶面积高光谱反演研究 [J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1138-1145.
- [29] 张柏, 宋开山, 张渊智, 等. 大豆面积的高光谱模型 [J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(4): 396-400.
- [30] 林伟, 郑博福, 胡里乐, 等. 井冈山森林碳储量与 LAI 和材积的相关性 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(12): 1831-1835.
- [31] 吕瑜良, 刘世荣, 孙鹏森, 等. 川西亚高山暗针叶林叶面积指数的季节动态与空间变异特征 [J]. 林业科学, 2007, 43(8): 1-7.