

基于 HJ-1 马尾松叶面积指数的遥感反演*

赖日文¹ 刘健^{1,2} 许章华^{1,2} 汪琴¹

(1. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2. 福建农林大学 3S 技术应用研究所, 福州 350002)

摘要:以福建省为研究区,利用环境星(HJ-1)CCD数据,选择并提取了与叶面积指数(LAI)关系密切的4种植被指数,即归一化比值植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)、改进的土壤调节植被指数(mSAVI)及增强型植被指数(EVI),结合研究区内准同步马尾松LAI地面观测数据,通过研究各种指数与马尾松LAI之间的关系,选择与马尾松LAI相关最密切的RVI同实测LAI建立6种非线性回归模型,6种模型中以理查德模型建立的模型精度为最高,总体均值预报偏差相对误差为3.1%,并以此模型实现了福建省马尾松LAI遥感反演。

关键词:马尾松 叶面积指数 植被指数 遥感模型

中图分类号: TP79; P237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)03-0255-07

引言

叶面积指数(Leaf area index, LAI)是植被定量遥感的重要参数,是表征植被冠层结构的最基本参数之一,森林LAI是森林生物量估测和病害评价的有效参数,也是表征林分长势和预测森林产量的重要林学指标之一,通过LAI可定量分析地球生态系统的能量交换特性,对全球变化和碳循环研究具有重要意义^[1-2]。LAI的定义有多种,其中Chen等^[3]把叶面积指数定义为单位面积上总叶面积的一半,此定义常用于针叶林。LAI估算方法主要有4种:植被指数法、混合像元分解法、几何光学模型反演法和辐射传输模型反演法,其中建立LAI与植被指数(Vegetation index, VI)的经验关系模型方法是目前国内外利用遥感技术来估算叶面积指数的主要方法之一^[4-15]。

马尾松是我国南方地区重要的针叶用材树种,该树种具有极强的耐瘠薄性,在林地质量条件极差的区域亦可存活,有“先锋树种”之美誉,生态效益极为可观。叶面积指数是反映马尾松生长状况的一项重要指标,因此快速估测区域马尾松LAI对探索其空间分布及格局,掌握区域马尾松的消长和动态具有重要意义。

本文以2012年HJ-1 CCD数据为信息源,结合地面准同步获取LAI实测数据,分析环境CCD植被指数对福建省马尾松LAI变化的响应能力,比较常用4种植被指数与LAI的相关性,并利用经验函

数建立基于VI的LAI最优的估算模型,以此反演福建省马尾松LAI。

1 研究区概况

研究区福建省位于我国东南沿海,是海峡西岸经济区的主体,经纬度范围为:23°30'~28°22'N、115°50'~120°40'E。东西距离约480 km,南北距离约530 km,土地总面积1 240万hm²,海域总面积1 360万hm²。福建省素有“八山一水一分田”之称,境内峰岭耸峙、丘陵连绵;地势上呈西北高、东南低之态;拥有极为丰富的森林资源,是全国南方重点集体林区,是中国马尾松重要工业原料林基地。至2011年底,全省共有林业用地913.33万hm²,占土地总面积的75.3%;有林地面积1 046.67万hm²,森林覆盖率达63.1%,居全国第一;森林多为人工林,蓄积量达1.96亿m³,居全国第一。

2 研究方法

2.1 数据收集

2.1.1 遥感影像数据收集与处理

收集选取2012年3~5月份环境与灾害监测预报小卫星星座A、B星(HJ-1A/B星)CCD影像数据6景,数据级别为2级,具体参数见表1。经过辐射标定、大气校正、几何校正、直方图匹配、灰度调节、镶嵌及云去除等处理后,最后利用福建省行政区划shp电子图层转为aoi格式,实现福建省域范围HJ-1影像CCD数据4个波段的影像剪裁,见图1。

收稿日期:2013-03-29 修回日期:2013-06-09

*福建省自然科学基金资助项目(2011J01258)

作者简介:赖日文,博士生,主要从事3S技术在资源环境中的应用、森林资源经营管理研究,E-mail: fjlw@126.com

表1 所选择的 CCD 影像及相关信息

Tab. 1 Selected CCD images and related information

传感器	轨道号	中心经纬度/(°)	获取时间	数据编号
HJ-1B CCD1	451-84	26.578902N 117.966123E	2012年3月26日	HJ1B-CCD1-451-84-20120326-L20000738043
HJ-1A CCD1	452-84	26.601562N 118.032865E	2012年3月28日	HJ1A-CCD1-452-84-20120328-L20000739562
HJ-1A CCD1	452-88	23.630214N 117.288986E	2012年3月28日	HJ1A-CCD1-452-88-20120328-L20000739438
HJ-1A CCD2	448-84	27.051661N 121.120625E	2012年3月27日	HJ1A-CCD2-448-84-20120327-L20000739109
HJ-1A CCD2	450-84	27.052262N 119.299712E	2012年3月31日	HJ1A-CCD2-450-84-20120331-L20000741660
HJ-1B CCD2	449-88	24.091499N 118.808321E	2012年5月24日	HJ1B-CCD2-449-88-20120524-L20000778779

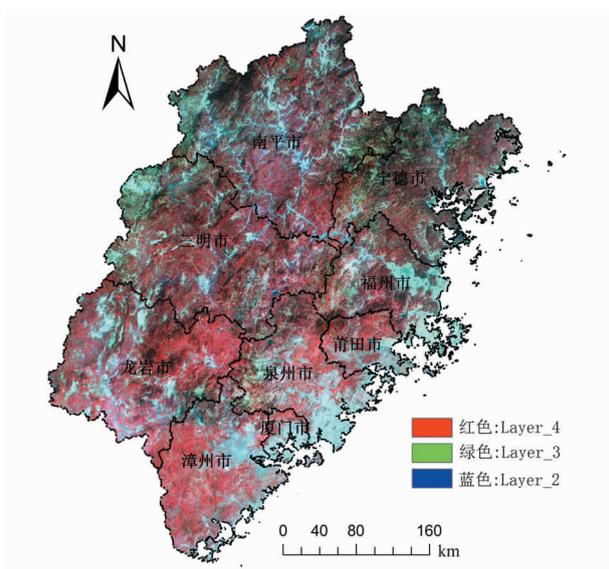


图1 研究区遥感影像

Fig. 1 Remote sensing image of the study area

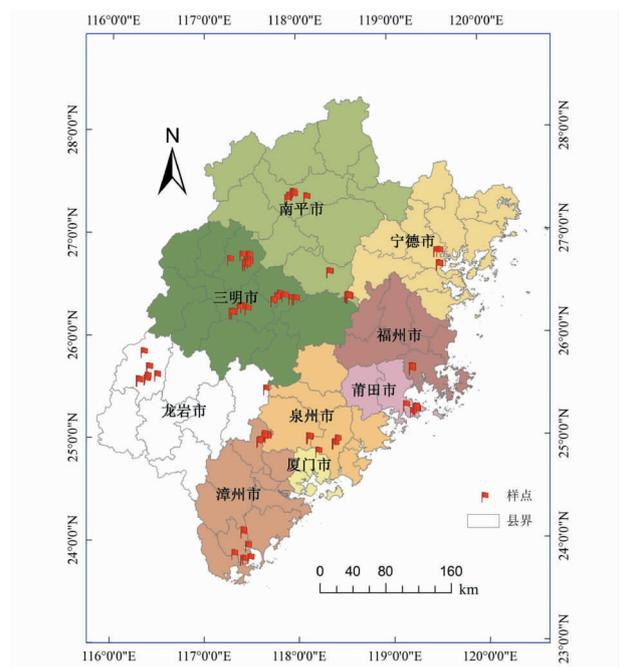


图2 LAI 样点分布

Fig. 2 Distribution of LAI sample points

2.1.2 地面数据调查与收集处理

2012年2—5月,在福建省三明市、将乐县、沙县、南平市、华安县、云霄县、南安市、安溪县、莆田市、长汀县、建阳市、宁德市及福清市等13个县(市)开展马尾松叶面积指数野外调查。原则上,每县(市)调查马尾松林小班12个,并设置长期监测站点,每个小班取4个测点,测点间保持30 m以上的距离,每个测点均进行相同的数据采集工作。测点立地质量等级以Ⅱ、Ⅲ级为主,林分龄组主要为中龄林与近熟林。由于生长的差异性及松毛虫的影响,测点郁闭度范围跨度较大,低者0.20以下,高者0.90以上。本文所用野外测定数据包括:GPS坐标、LAI。收集的地面数据还包括:福建省各县市的行政区图,福建省森林资源地面清查数据。综合野外调查结果与历史数据,选择2010—2012年林分健康状况较为一致的测点,具体分布见图2,得到LAI数据共计151组,数据具体情况见表2。

2.2 植被指数的选择

根据前人研究,与LAI关系密切的植被指数主要有:归一化比值植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)、改进的土壤调节植被指数(mSAVI)及增强型植被指数(EVI),4种植被指数计算公式分别为

$$I_{NDVI} = \frac{R_{nir} - R_r}{R_{nir} + R_r} \quad (1)$$

$$I_{RVI} = \frac{R_{nir}}{R_r} \quad (2)$$

$$I_{mSAVI} = \frac{2R_{nir} + 1 - \sqrt{(2R_{nir} + 1)^2 - 8(R_{nir} - R_r)}}{2} \quad (3)$$

$$I_{EVI} = 2.5 \frac{R_{nir} - R_r}{R_{nir} + 6R_r - 7.5R_b + 1} \quad (4)$$

表 2 马尾松 LAI 野外测定数据

Tab. 2 Data of *Pinus massoniana* LAI measured in wild

参数	安溪县	长汀县	福清市	华安县	建阳市	将乐县	南安市	南平市	宁德市	莆田市	三明市	沙县	云霄县
最大值	1.83	2.07	2.66	1.76	2.77	1.48	2.54	2.50	1.91	2.59	1.87	2.23	2.14
最小值	0.96	1.08	1.05	1.13	0.78	0.92	1.62	0.78	0.09	1.89	1.22	1.05	1.08
均值 ±	1.57 ±	1.65 ±	2.09 ±	1.39 ±	1.46 ±	1.26 ±	2.08 ±	1.30 ±	1.57 ±	2.31 ±	1.55 ±	1.64 ±	1.67 ±
标准差	0.41	0.32	0.52	0.24	0.80	0.20	0.38	0.74	0.26	0.37	0.36	0.43	0.40
测点数	5	8	7	6	6	9	9	6	11	5	5	7	6
总体均值 ± 标准差	1.65 ± 0.46												

式中 R_{nir} ——环境星 CCD 近红外波段亮度
 R_r ——环境星 CCD 红波段亮度
 R_b ——环境星 CCD 蓝波段亮度
 I_{NDVI} ——归一化比值植被指数
 I_{RVI} ——比值植被指数
 I_{mSAVI} ——改进的土壤调节植被指数
 I_{EVI} ——增强型植被指数

2.3 模型的评价标准

采用国际上常用的决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 对模型的模拟值和实测值之间的符合度进行评价和验证。为了更全面地分析比较植被指数对马尾松 LAI 的预测精度和准确度,特引用了谢晓金等^[16]提到的精确度和准确度的概念,精确度是指模拟值与实测值之间的 R^2 , 值越接近于 1, 精确度越高;准确度是指截距为零时的模拟值与实测值之间线性回归方程的斜率, 值越接近于 1, 准确度越高。当精确度和准确度都同时为 1 时, 模拟值与实测值完全吻合。

均方根误差计算公式为

$$e_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

式中 y_i ——LAI 实测值 \hat{y}_i ——LAI 模拟值
 n ——样本数

2.4 总体预报误差分析

回归模型对总体的估测可以用预报偏差中误差和总预报偏差相对误差进行检验。

预报偏差中误差公式为

$$H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\tilde{V}_i - \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \right)^2}{n}} \quad (6)$$

总预报偏差相对误差公式为

$$R = \frac{\left| \sum_{i=1}^n \tilde{V}_i - \sum_{i=1}^n V_i \right|}{\sum_{i=1}^n V_i} \times 100\% \quad (7)$$

式中 H ——预报偏差中误差

R ——总预报偏差相对误差

\tilde{V}_i ——第 i 块样地蓄积估测值

V_i ——第 i 块样地蓄积实测值

3 结果与分析

3.1 植被指数与 LAI 的相关分析

表 3 是综合 4 种植被指数与其对应 LAI 测试资料的统计分析结果,可以看出,这 4 个常见的植被指数与 LAI 间的相关性除了 EVI 外均达到 0.001 的显著性检验水平,其中 LAI、RVI 和 NDVI 之间的相关性最强, R 均在 0.59 以上。对植被指数而言, EVI 与 LAI 之间的相关性相对其他植被指数较低;主要原因是 EVI 的计算对原始数据质量有严格要求, EVI 的合成要优先选择晴天时传感器视角小的像元,在植被覆盖较低的地区 EVI 反应不够灵敏;由于收集的影像时间处于雨季,残留云雾或其他大气噪声可能产生异常大的 EVI 值^[17]。综合分析这 4 个植被指数对相应的 LAI 表现,挑选与 LAI 相关性最强的 RVI 建立 LAI 的模型。

表 3 马尾松 LAI 与各植被指数相关系数(最佳拟合模型)
 Tab.3 Correlation coefficients between *Pinus massoniana* LAI and each vegetation index (best fitting model)

相关系数	EVI	mSAVI	RVI	NDVI	马尾松 LAI
EVI	1.000 0				
mSAVI	-0.137 8	1.000 0			
RVI	-0.179 5	0.962 2 **	1.000 0		
NDVI	-0.154 1	0.993 1 **	0.986 6 **	1.000 0	
马尾松 LAI	-0.123 1	0.571 4 **	0.594 2 **	0.590 2 **	1.000 0

注: * * 表示通过 $p < 0.001$ 的显著性检验。

3.2 马尾松 LAI 遥感反演模型的建立

采用 3 倍标准差法对 151 组样本的“异常”数据进行剔除,即凡是满足 $|X_i - \bar{X}| > 3S_x$ (S_x 为样本的标准差, \bar{X} 为样本的平均值, X_i 为样本的数值)的数据予以剔除,共得到 134 组有效数据。利用 ArcGIS 地统计学模块从 134 组数据中随机选取 74 组马尾松 LAI 测点数据,与从环境星影像提取的相应 GPS 点位 RVI 数据建立经验精度较好的 6 种常用模型,结果见图 3 和表 4。

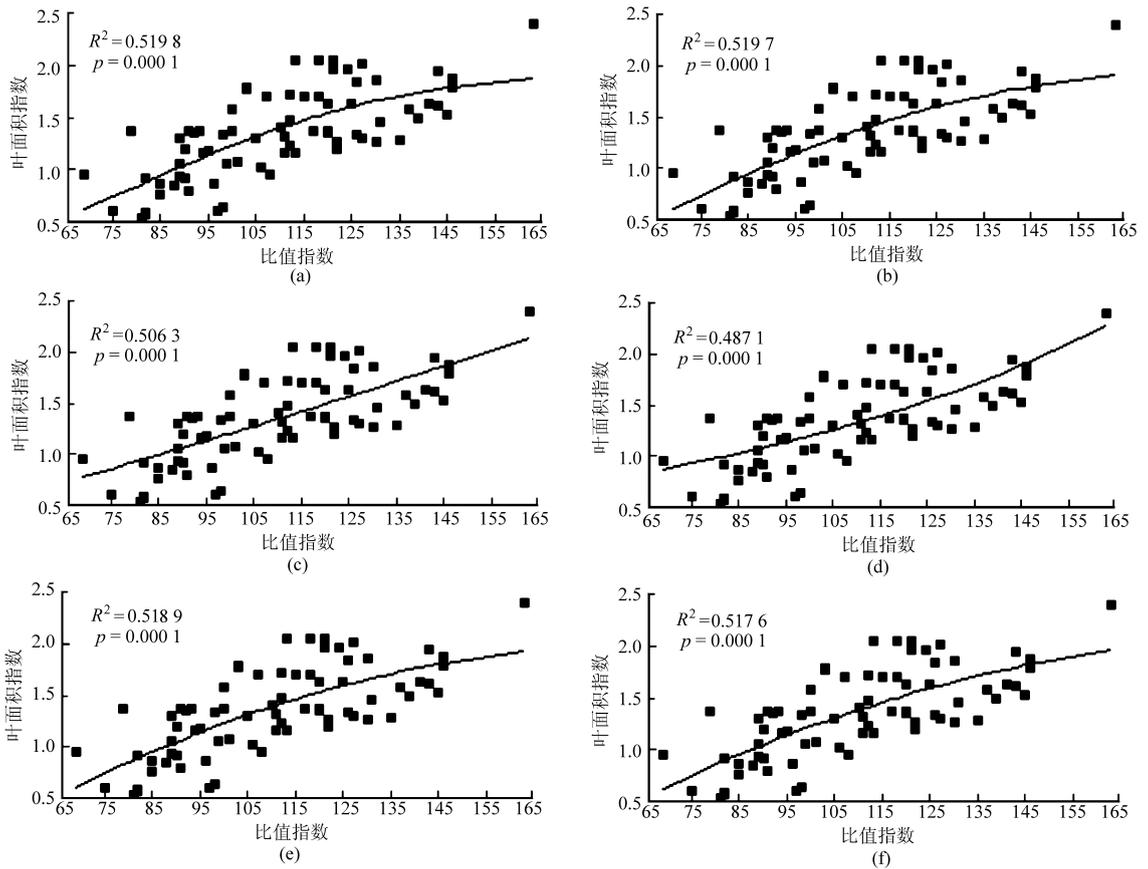


图3 马尾松 LAI 与 RVI 模型回归曲线

Fig. 3 Regression curve between *Pinus massoniana* LAI and RVI

(a) Richards 模型 (b) Gompertz 模型 (c) 幂函数 (d) 指数函数 (e) 韦布尔函数 (f) 二次函数

表4 不同植被指数的 LAI 估算模型

Tab. 4 LAI estimation models based on different vegetation indices

函数关系	回归模型	F 值	决定系数 R^2	均方根误差
Richards 模型	$I_{LAI} = \frac{2.0117}{(1 + 9.1723 \exp(-0.034512 I_{RVI}))^{1/0.519759}}$	25.2569	0.5198	0.2939
Gompertz 模型	$I_{LAI} = 2.1202 \exp(-7.9568 \exp(-0.026832 I_{RVI}))$	38.4046	0.5197	0.2940
幂函数	$I_{LAI} = 0.004994 I_{RVI}^{1.1911}$	73.8241	0.5063	0.2981
指数函数	$I_{LAI} = 0.429711 \exp(0.010235 I_{RVI})$	68.3763	0.4871	0.3038
韦布尔函数	$I_{LAI} = 2.1390 \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{I_{RVI} + 33.0822}{74.1795} \right)^{1.5154} \right) \right)$	25.1713	0.5189	0.2942
二次函数	$I_{LAI} = -1.2925 + 0.033372 I_{RVI} - 0.000082 I_{RVI}^2$	38.0860	0.5176	0.2946

从图3和表4可以看出,RVI与LAI建立的所有6种模型的回归显著性概率均小于0.01,置信度均达到99.9%以上,通过6种模型拟合的回归模型方程都达到极显著。通过比较决定系数和RMSE可以看出,用环境星CCD传感器数据提取的RVI构建的马尾松LAI,6种估算模型拟合结果差异较小,按决定系数大小依次为:Richards模型、Gompertz模型、韦布尔函数、二次函数、幂函数、指数函数。均方根误差(RMSE)大小排序正好相反,RMSE最小的是Richards模型,最大的是指数函数模型。在所有RVI与LAI拟合的6种模型中,Richards模型的决定系数(0.5198)为最高,而RMSE(0.2939)最低,

拟合结果最好。

3.3 总体预报误差分析及可行性分析

以经过3倍标准差法筛选后的样本中未参与建模的60个马尾松样地来验证,由RVI建立估测方程对总体均值预报偏差相对误差较小,为3.1%,验证样地总体预报偏差中误差为0.25023。

建立验证样点LAI实测值 y 与方程估测值 x 之间的一元回归模型,对回归模型进行检验并进行方差分析(表5),估测模型所建立的线性方程为

$$y = -0.1182 + 1.080x \quad (8)$$

通过方差分析回归方程相关系数 R 为0.6159。经 F 检验, $F = 35.4511 > F(1, 59, 0.01) =$

7.084 96,结果表明:在 $\alpha = 0.01$ 可靠性条件下,模型估测样地 LAI 理论值与外业调查实测值相关极显著。

表 5 方差统计分析

Tab. 5 Statistics and analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	p 值
回归	4.381 1	1	4.381 1	35.451 1	0.000 1
剩余	7.167 8	58	0.123 6	相关系数 $R = 0.615 918$	
总和	11.548 9	59	0.195 7	决定系数 $R^2 = 0.379 355$	

3.4 马尾松 LAI 遥感反演及空间分析

根据马尾松 LAI 与 RVI 最佳拟合模型,结合地面森林资源调查数据,通过 ERDAS 探测遥感影像中马尾松的光谱域值提取马尾松信息,并经过建模得到福建省马尾松 LAI 的空间分布图(图 4),以福建省 9 个地市为单元,分别统计 LAI 及 RVI 均值、最大和最小值(表 6)。

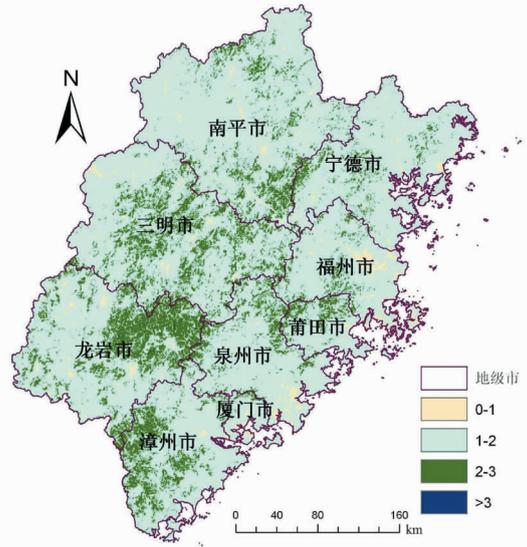


图 4 福建省马尾松 LAI 空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of *Pinus massoniana* LAI in Fujian Province

表 6 福建省 9 地市马尾松 LAI 与 RVI 对应关系

Tab. 6 Correspondences between *Pinus massoniana* LAI and RVI of 9 prefecture-level cities in Fujian Province

参数	南平市	三明市	龙岩市	宁德市	福州市	莆田市	泉州市	厦门市	漳州市	福建省
LAI 均值	1.619	1.680	1.737	1.540	1.479	1.616	1.540	1.362	1.663	1.609
LAI 最大值	4.965	4.254	4.797	4.922	4.881	4.217	4.440	3.373	3.904	4.965
LAI 最小值	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555
RVI 均值	120.547	124.868	128.239	115.487	110.020	120.165	114.456	100.306	123.093	119.609
RVI 最大值	255	237	251	254	253	236	242	210	227	255
RVI 最小值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

从表 6 可以看出:从地市尺度上看,福建省马尾松主产区南平市、三明市、龙岩市 3 地市的 LAI 总体上高于沿海非主产区,尤以龙岩市为最高,南平市、三明市、龙岩市、莆田市、漳州市的 LAI 均值较福建省 LAI 均值高,且高于宁德市、厦门市、福州市等沿海地带。一方面是由于马尾松 LAI 对气候要素的直接响应,另一方面则是由于通过水热条件对松毛虫分布的影响,使 LAI 呈现沿海低、内陆高的空间特征。RVI 与 LAI 具有相同的分布规律。LAI 均值与 RVI 均值具有明显的正相关关系。

福建省属亚热带湿润季风气候,夏季炎热多雨,冬季温暖干旱,加之复杂的山地丘陵地形,水热条件表现出显著的时空分布差异^[18]。从省域尺度上看,马尾松 LAI 对平均气温的响应呈开口向下的抛物线,均温达 20.5℃左右的区域,马尾松 LAI 达到最大;在均温小于 20.5℃的区域,随着平均温度的升高,马尾松 LAI 亦呈升高趋势;而在均温大于 20.5℃的区域,温度升高,LAI 反而下降。马尾松适宜在一个年均温较为一致的环境中生长,全球变暖将给马尾松的生长、发育带来负面影响^[19]。

从年降雨总量看,福建省每年可保持 1 400 ~

2 000 mm 的降雨量,雨量充沛,可充分满足植被生长需要。马尾松最适宜的降雨量是 800 ~ 1 800 mm/a。闽中、闽西北区域是马尾松的主产区,由于武夷山脉、戴云山两大山脉产生的“雨影效应”,山脉阻隔了来自东南沿海的季风,使处于迎风坡的闽中、闽西北年降雨量多于东南沿海区域,故该区域马尾松分布众多,相应 LAI 也比东南沿海区域高。

4 结论

(1) 经过相关分析,在 0.001 的显著性检验水平上,EVI 由于植被覆盖度较低及残留云雾或其他大气噪声影响,与 LAI 相关性比较弱,LAI 与 RVI、NDVI 及 mSAVI 之间的相关性均在 0.57 以上,而 LAI 与 RVI 相关性为最大。

(2) 通过 RVI 与 LAI 建立 6 种非线性模型,显著性概率均小于 0.01,置信度均达到 99.9% 以上,6 种回归模型方程都达到极显著。按相关系数大小依次为:Richards 模型、Gompertz 模型、韦布尔函数、二次函数、幂函数、指数函数。均方根差(RMSE)大小排序正好相反,6 种模型中 Richards 模型拟合效果最佳。

(3)在对模型的检验与验证结果中,由 RVI 建立估测方程对总体均值预报偏差相对误差较小,为 3.1%,验证样地总体预报偏差中误差为 0.250 23,可以满足对区域马尾松 LAI 遥感反演的要求。

(4)通过由 RVI 反演的马尾松 LAI,从地市尺度上看,福建省马尾松主产区南平市、三明市、龙岩市 3 地市的 LAI 总体上高于沿海非主产区,尤以龙岩市为最高,南平市、三明市、龙岩市、莆田市、漳州市的 LAI 均值较福建省均值高,且高于宁德市、厦门市、福州市等沿海地带。一方面是由于水热分布不

均,另一方面是由于地理区位对区域 LAI 空间分布格局的影响。

(5)本文主要运用 HJ-1A、B CCD 数据提取的 RVI 对福建省马尾松 LAI 进行了不同模型的拟合比较,进而反演区域马尾松 LAI,未考虑地形及气象因子的影响;野外测定数据与遥感影像数据不能完全同步,这对估测精度有一定影响;样地的分布不够均匀可能对估测结果也会产生一定影响,这些问题将在后续研究中进一步解决。

参 考 文 献

- Poock M J O, Evans D M, Memmott J. The impact of farm management on species-specific leaf area index (LAI): farm-scale data and predictive models[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010,135(4): 279-287.
- Poulter B, Heyder U, Cramer W. Modeling the sensitivity of the seasonal cycle of GPP to dynamic LAI and soil depths in tropical rainforests[J]. *Ecosystems*, 2009,12(4): 517-533.
- Chen J M, Black T A. Define leaf area index for non-flat leaves[J]. *Plant Cell Environ*, 1992,15(4): 421-429.
- 赵丽芳, 谭炳香, 杨华, 等. 高光谱遥感森林叶面积指数估测研究现状[J]. *世界林业研究*, 2007,20(2): 50-54.
Zhao Lifang, Tan Bingxiang, Yang Hua, et al. Review of the estimating forest leaf area index with hyperspectral remote sensing data[J]. *World Forestry Research*, 2007,20(2): 50-54. (in Chinese)
- 李开丽, 蒋建军, 茅荣正, 等. 植被叶面积指数遥感监测模型[J]. *生态学报*, 2005,25(6): 1491-1496.
Li Kaili, Jiang Jianjun, Mao Rongzheng, et al. The modeling of vegetation through leaf area index by means of remote sensing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005,25(6): 1491-1496. (in Chinese)
- 姚延娟, 阎广建, 王锦地. 多光谱多角度遥感数据综合反演叶面积指数方法研究[J]. *遥感学报*, 2005,9(2): 117-122.
Yao Yanjuan, Yan Guangjian, Wang Jindi. The approach on leaf area index inversion using multiangular and multispectral data sets[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005,9(2): 117-122. (in Chinese)
- Mc Gwire K, Minor T, Fenstermaker L. Hyperspectral mixture modeling for quantifying sparse vegetation covering in arid environments[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000,72(3): 360-374.
- Gong Peng, Pu Ruiliang, Greg S, et al. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from hyperion hyperspectral data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003,41(6): 1355-1362.
- Schlerf M, Atzberger C, Vohland M. Derivation of forest leaf area index from multi-and hyperspectral remote sensing data[J]. *EARSel eProceedings*, 2004,3(3): 405-413.
- Schlerf M, Atzberger C, Hill J. Remote sensing of forest biophysical variables using hmap imaging spectrometer data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005,95(2): 177-194.
- 席建超, 张红旗, 张志强. 应用遥感数据反演针叶林有效叶面积指数[J]. *北京林业大学学报*, 2004,26(6):36-39.
Xi Jianchao, Zhang Hongqi, Zhang Zhiqiang. Retrieving effective leaf area of conifer forests using Landsat TM images[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004,26(6):36-39. (in Chinese)
- 万华伟, 王锦地, 梁顺林, 等. 联合 MODIS 与 MISR 遥感数据估算叶面积指数[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009,29(11): 3106-3111.
Wan Huawei, Wang Jindi, Liang Shunlin, et al. Estimating leaf area index by using MODIS and MISR data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009(11): 3106-3111. (in Chinese)
- 杨贵军, 黄文江, 王纪华, 等. 多源多角度遥感数据反演森林叶面积指数方法[J]. *植物学报*, 2010,45(5): 566-578.
Yang Guijun, Huang Wenjiang, Wang Jihua, et al. Inversion of forest leaf area index calculated from multi-source and multi-angle remote sensing data[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2010,45(5): 566-578. (in Chinese)
- 董莹莹, 王纪华, 李存军, 等. 基于数据分割与主成分分析的 LAI 遥感估算[J]. *红外与毫米波学报*, 2011,30(2): 124-130.
Dong Yingying, Wang Jihua, Li Cunjun, et al. Estimating leaf area index from remote sensing data: based on data segmentation and principal component analysis[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011,30(2): 124-130. (in Chinese)
- 何亚娟, 潘学标, 裴志远, 等. 基于 spot 遥感数据的甘蔗叶面积指数反演和产量估算[J]. *农业机械学报*, 2013,44(5):226-231.
He Yajuan, Pan Xuebiao, Pei Zhiyuan, et al. Estimation of LAI and yield of sugarcane based on SPOT remote sensing data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(5):226-231. (in Chinese)
- 谢晓金, 李秉柏, 朱红霞. 利用高光谱数据估测不同温度胁迫下的水稻籽粒中粗蛋白和直链淀粉含量[J]. *农业现代化研究*, 2012,33(4): 481-484.
Xie Xiaojin, Li Bingbai, Zhu Hongxia. Estimating contents of crude protein and amylose content in rice grain by hyper-spectral

- under different high temperature stress[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(4): 481-484. (in Chinese)
- 17 王正兴, 刘闯, Alfredo H. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 979-987.
Wang Zhengxing, Liu Chuang, Alfredo H. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 979-987. (in Chinese)
- 18 Allasia G, Cavoretto R, De R A. A class of spline functions for landmark-based image registration[J]. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2012, 35(8): 923-934.
- 19 张容焱, 邓自旺, 沈新勇, 等. 福建春雨多时空尺度变化特征[J]. *南京气象学院学报*, 2009, 32(1): 121-127.
Zhang Rongyan, Deng Ziwang, Shen Xinyong, et al. Multiple spatiotemporal scale characteristics of Fujian spring precipitation [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2009, 32(1): 121-127. (in Chinese)

Inversion Model of *Pinus massoniana* Leaf Area Index Based on HJ-1

Lai Riwen¹ Liu Jian^{1,2} Xu Zhanghua^{1,2} Wang Qin¹

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2. Institute of Geomatics Application, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Taking Fujian province as the research object and basing on the CCD data of HJ-1, four vegetation indices were selected which closely related to LAI. The selected indices included NDVI, RVI, mSAVI and EVI. Meanwhile, data synchronized with LAI of *Pinus massoniana* was obtained, and then the relationship between the indices and the LAI was built. At last, six kinds of the non-linear regression models, between the LAI of *Pinus massoniana* and the selected index RVI that most closely related to the LAI, was established. It was found that the model based on the Richards distribution function is the best and the relative error of the prediction of mean value is 3.1%. Based on this model, the remote sensing inversion of the LAI of *Pinus massoniana* in Fujian province was implemented.

Key words: *Pinus massoniana* Leaf area index Vegetation index Model of remote sensing