

利用郁闭度与 HJ-1 多光谱数据 估算马尾松林叶面积指数

许章华^{1a,1b}, 龚从宏^{1a,1b}, 刘健^{1a,1b,2,①}, 余坤勇^{1a,1b}, 赖日文^{1a,1b}, 李增禄^{1a,2}

(1. 福建农林大学: a. 3S 技术应用研究所, b. 林学院, 福建 福州 350002; 2. 三明学院, 福建 三明 365004)

摘要: 以福建中部的三明市、沙县和将乐县以及福建西部的长汀县为研究区, 利用郁闭度 (CD) 与 HJ-1 多光谱数据 (B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4) 并结合实地踏查数据, 对马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 林叶面积指数 (LAI) 进行估算。结果显示: 利用多光谱波段及归一化差值植被指数 ($NDVI$), 得到三明市、沙县和将乐县马尾松林郁闭度估算模型为 $CD = -0.008B_1 + 0.031B_2 + 0.016B_3 - 0.037B_4 + 0.012NDVI - 0.815$, 平均检验精度为 87.76%; 长汀县马尾松林的郁闭度估算模型为 $CD = -0.024B_1 + 0.130B_3 - 0.083B_4 + 0.026NDVI - 2.355$, 平均检验精度为 86.78%。采用线性、对数、二次、幂和指数模型构建了 2 个研究区马尾松林的 $LAI-CD$ 模型, 经检验分析, 均以指数模型综合预测效果最佳; 综合分析后获得研究区马尾松林 $LAI-CD$ 模型 $LAI = 0.193e^{3.259CD}$, 检验精度达 0.898。研究结果说明: 利用国产 HJ-1 多光谱数据可较精确地估算马尾松林郁闭度, 所构建的 $LAI-CD$ 数学模型预测效果较好, 具有较强的适用性。

关键词: 马尾松林; 郁闭度; HJ-1 多光谱数据; 叶面积指数 (LAI); 估算; 归一化差值植被指数 ($NDVI$)

中图分类号: S791.248; TP79; TP731; P237 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2013)01-0029-07
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2013.01.05

Estimation of leaf area index of *Pinus massoniana* forest by using canopy density and HJ-1 multi-spectral data XU Zhanghua^{1a,1b}, GONG Conghong^{1a,1b}, LIU Jian^{1a,1b,2,①}, YU Kunyong^{1a,1b}, LAI Riwen^{1a,1b}, LI Zenglu^{1a,2} (1. Fujian Agriculture and Forestry University; a. Institute of Geomatics Application, b. Forestry College, Fuzhou 350002, China; 2. Sanming University, Sanming 365004, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2013, 22(1): 29-35

Abstract: Taking Sanming City, Shaxian County and Jiangle County in Central Fujian Province and Changting County in West Fujian Province as research areas, leaf area index (LAI) of *Pinus massoniana* Lamb. forest was estimated by using of canopy density (CD), HJ-1 multi-spectral data (B_1 , B_2 , B_3 and B_4) and combining with investigation data in field. The results show that by using multi-spectral bands and normalized difference vegetation index ($NDVI$), the estimated model of canopy density of *P. massoniana* forest in Sanming City, Shaxian County and Jiangle County is obtained, that is $CD = -0.008B_1 + 0.031B_2 + 0.016B_3 - 0.037B_4 + 0.012NDVI - 0.815$, with the average estimating accuracy of 87.76%; and the model of *P. massoniana* forest in Changting County is $CD = -0.024B_1 + 0.130B_3 - 0.083B_4 + 0.026NDVI - 2.355$, with the average estimating accuracy of 86.78%. The models of $LAI-CD$ of *P. massoniana* forest in two research areas are constructed by using of linear, logarithmic, quadratic, power and exponential models, and the verifying analysis indicates that the comprehensive estimating effect of exponential model is the best. According to comprehensive analysis result, the $LAI-CD$ model $LAI = 0.193e^{3.259CD}$ of *P. massoniana* forest in two research areas was obtained with the estimating accuracy of 0.898. It is suggested that canopy density of *P. massoniana* forest can be estimated accurately by means of China's domestic HJ-1 multi-spectral data, and the $LAI-CD$ model established possesses better prediction effect and stronger applicability.

收稿日期: 2012-07-18

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD23B04); 福建省科技计划重点项目(2011N0031); 国家自然科学基金资助项目(40971043)

作者简介: 许章华(1985—), 男, 福建福清人, 博士研究生, 研究方向为 3S 技术在资源环境中的应用。

①通信作者 E-mail: fjliujian@126.com

Key words: *Pinus massoniana* Lamb. forest; canopy density; HJ-1 multi-spectral data; leaf area index (LAI); estimation; normalized difference vegetation index (NDVI)

叶面积指数 (leaf area index, LAI) 是定量分析地球生态系统能量交换特性、描述农作物产量特征与林冠特性的重要结构变量^[1]。LAI 比较典型的定义有 2 种: 一是单位面积上所有叶片表面积总和占地面面积的比值; 二是单位面积上所有叶片投影面积总和占地面面积的比值, 后者更为常用。随着对森林碳汇认识的加深, LAI 成为确定森林 CO₂、H₂O 与 O₂ 交换率的重要指标^[2]。吴彤等^[3] 研究认为: 芦苇 [*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.] 冠层高光谱特征参数与 LAI 具有紧密相关性, 依此可实现对东亚飞蝗危害程度的监测; Huang 等^[4] 在利用高光谱指数进行冬小麦 (*Triticum aestivum* Linn.) 条锈病严重度估算时也将 LAI 列为分析参数之一。可见, LAI 已成为植物病虫害检测与预报的重要指标。在森林资源调查中, 郁闭度是一个重要指标, 其反映林分的疏密状态, 定义为单位面积上林冠覆盖林地面积与林地总面积之比。

随着空间技术的飞速发展, 森林虫害监测迎来新的发展契机^[5-6]。20 世纪 70 年代以来, 世界卫星遥感工作取得了重大突破, 多光谱、高光谱及雷达成像数据被运用到森林虫害的监测与预警工作中。马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 具有极强的耐瘠薄性, 是中国南方地区的主要用材树种之一, 但其虫害现象较普遍, 松毛虫、松干蚧、松梢螟、松梢小卷叶蛾等害虫均可对其森林生态系统造成严重破坏, 产生巨大的经济损失; 其中, 马尾松毛虫 (*Dendrolimus punctatus* Walker) 的危害最为严重。研究表明^[7]: LAI 可以较好地反映马尾松的健康状态与虫害程度。LAI 的遥感估算方法主要是经验估算法, 即利用植被指数与 LAI 的相关关系建立模型^[8-9], LAI 与归一化差值植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 关系密切^[10-11], 植被冠层及部分林下信息经大气辐射反映到遥感影像上后, 获得的植被指数普遍受土壤背景及大气效应的干扰, 且极易忽略饱和现象与地物二向性反射的基本特性, 因此, 单纯基于植被指数法估算 LAI 存在较为明显的缺点^[12]。由于 NDVI 及其他光谱波段特征与郁闭度的关系密切^[13], 且郁闭度的调查方法简明直观, 而获取 LAI 则需要昂贵的仪器设备与大量的野外工作, 因此, 若能利用郁闭度实现马尾松叶面积指数的有效估算, 可为开展马尾松毛虫的调查与

监测提供新的方法与手段, 但目前有关 LAI 与郁闭度关系方面的研究却鲜见报道。为此, 作者尝试构建 LAI 与郁闭度的数学模型, 并借助国产 HJ-1 多光谱数据实现马尾松叶面积指数的区域化估算。

1 研究方法

1.1 野外调查

于 2012 年 4 月对福建中部的三明市、沙县和将乐县及福建西部的长汀县的局部马尾松分布区 (包括松毛虫灾区与非虫害区) 进行调查。闽中地区北靠武夷山脉、南傍戴云山脉, 是中国南方林区的重要组成部分, 也是海峡两岸现代林业合作的主要实验区; 长汀县扼闽、粤、赣三省边陲要冲, 属典型的山地丘陵区域, 曾经是中国南方红壤区水土流失最为严重的县份之一。原则上每个县 (市) 选择 12 个调查小班, 每个小班设定 4 个测点, 每个测点间距 30 m 以上。在三明市、沙县和将乐县共踏查了 36 个小班, 获得 147 组有效数据; 在长汀县共踏查了 12 个小班, 获得 48 组有效数据。调查指标包括: 测点 GPS 坐标、林冠郁闭度及马尾松林叶面积指数。郁闭度采用传统的目测方法; LAI 测定采用美国 LI-COR 公司生产的 LAI-2000 冠层分析仪, 数据设置为“↑↓↓↓”, 即在马尾松林冠上空测量 1 个数据、在林冠下层测量 4 个数据。各测点郁闭度与 LAI 的基本对应关系见表 1。

表 1 马尾松林测点郁闭度与叶面积指数 (LAI) 的对应关系 ($\bar{X} \pm SD$)
Table 1 Corresponding relationship between canopy density and leaf area index (LAI) at measuring point of *Pinus massoniana* Lamb. forest ($\bar{X} \pm SD$)

郁闭度	Canopy density	LAI
	0.30-0.35	0.75±0.45
	0.40-0.45	0.94±0.44
	0.50-0.55	1.06±0.51
	0.60-0.65	1.31±0.58
	0.70-0.75	1.95±0.94
	0.80-0.85	2.11±0.77

1.2 影像获取与预处理

经中国资源卫星应用中心 (<http://www.cresda.com>) 获取 2012 年 3 月份至 4 月份影像数十景 (2 级产品), 经筛选得到一景覆盖调查区域、影像质量较好

且与野外调查时间准同步的HJ-1A CCD影像,其过境时间为2012年3月28日,轨道号为452/84。以比例尺1:10 000地形图为参考,基于多项式模型实现HJ-1多光谱影像的快速几何精校正,利用研究区行政范围电子图层实现遥感影像的裁剪。研究区位置示意及预处理后的HJ-1多光谱遥感影像见图1。

1.3 马尾松林信息提取及影像分割

三明市、沙县、将乐县和长汀县皆为山地丘陵地貌,自然资源丰富,但地理条件复杂,要借助遥感影像实现植被信息的识别具有一定难度。受太阳入射角与地形影响,遥感影像呈现出明显的亮、暗2个层次,光谱特征差异大。为此,本研究参照文献[14-15]的“基于片层-面向类”的思路实现研究区马尾松林信息的有效提取,主要思路为:①利用最大似然法提取林地信息,并依此实现林地影像的分割;②利用阈值法^[16]分割出明亮区与阴影区的林地,分别采用缨帽变换+最佳波段组合(OIF)及最佳波段组合实现明亮区与阴影区马尾松林片层的分区;③将明亮区与阴影区马尾松林片层分区图叠加,实现光谱片层的分割;④经主成分变换(PCA),提取出能基本代表原影像信息的第一主成分,利用灰度共生矩阵法(GLCM)提取

出纹理信息,并在选择最佳纹理量的基础上实现马尾松林信息的有效提取。之后,利用掩膜法^[17]实现对应HJ-1多光谱影像的分割。

1.4 郁闭度估算模型构建

传统的二类小班数据库中,1个小班仅有1个郁闭度值。在中国南方地区,受林地条件、经营目标和管理措施等影响,同一小班中的林相并不整齐且存在较大异质性。虽然通过野外踏查可在小班中的不同位置获取不同的郁闭度值,但获得的仍是点状数据,无法覆盖整个研究区。因此,要实现马尾松LAI的估算,首先要获取全区域林分郁闭度分布图。由于郁闭度与遥感影像光谱信息具有较强的相关性,故有学者应用多光谱或高光谱影像波段特征信息成功实现了郁闭度的估算^[18-19]。由于HJ-1多光谱影像也包含较丰富的光谱信息,为此,作者应用多元线性回归分析法构建基于HJ-1多光谱数据的郁闭度估算模型。以郁闭度为因变量、以HJ-1多光谱数据各波段DN(像元灰度)均值及NDVI为自变量,依照公式 $CD = a_1B_1 + a_2B_2 + a_3B_3 + a_4B_4 + a_5NDVI + a_0$ (式中:CD为郁闭度; B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 为HJ-1多光谱数据的1~4波段即蓝光、绿光、红光及近红外波段DN值;NDVI为归一

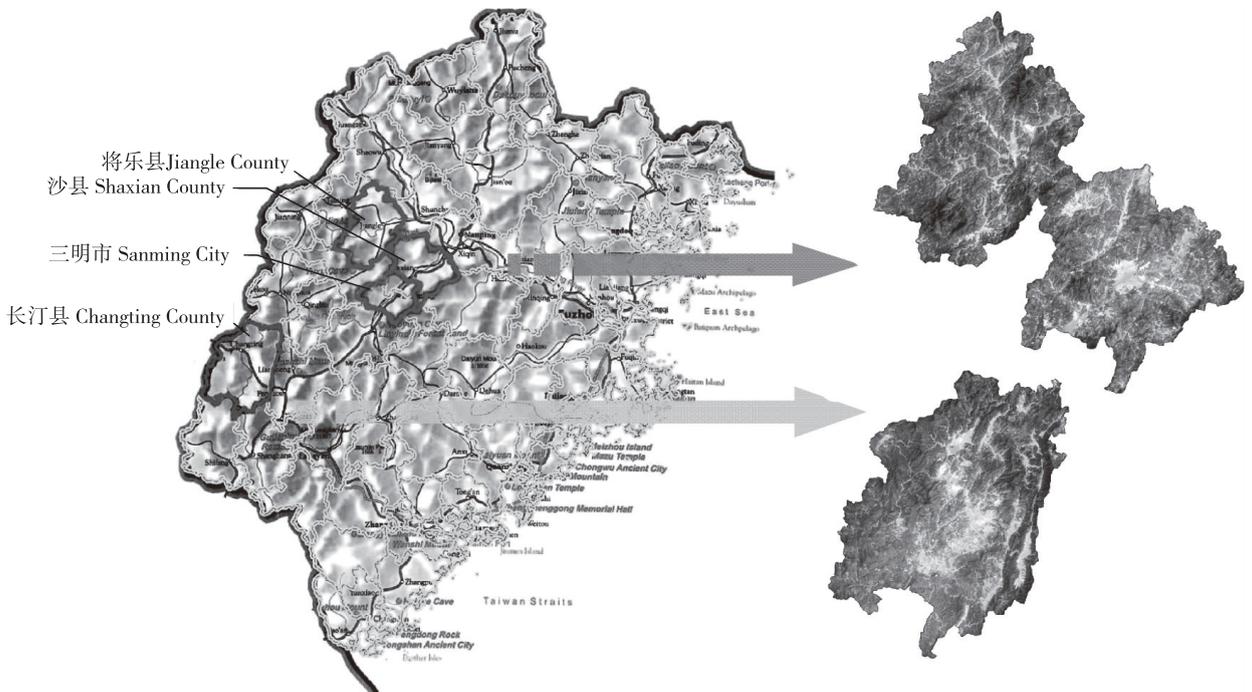


图1 福建省三明市、沙县、将乐县和长汀县位置示意图及预处理后的HJ-1多光谱遥感影像

Fig. 1 Location sketch map and preprocessed HJ-1 multi-spectral remote sensing image of Sanming City, Shaxian County, Jiangle County and Changting County in Fujian Province

化差值植被指数; a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 和 a_5 为待定系数; a_0 为常数项),在SPSS 17.0平台上分别构建闽中三县(市)及闽西长汀县马尾松林郁闭度与HJ-1多光谱数据的数学模型。利用验证组数据评判模型预测精度。

1.5 基于郁闭度的马尾松林 LAI 估算模型构建

依据散点图分布特征,进行线性、对数、二次、幂及指数模型构建;设置建模组与验证组,建模组测点数据占总数据量的70%,剩余30%作为验证组数据,比较各模型的检验精度;此外,将模型 R^2 及RMSE等也作为比较指标。

2 结果和分析

2.1 马尾松林信息提取与影像分割结果

利用HJ-1多光谱影像中的光谱与纹理信息,对福建中部的三明市、沙县和将乐县及福建西部的长汀县马尾松林分布信息进行提取,其结果见图2和图3。随机选择二类数据库中非马尾松林样点,并将其与实地踏查的马尾松林样地设为验证点,利用精度评估法对马尾松林提取结果进行评价,结果显示:三明市、沙县和将乐县的综合精度为88.18%,Kappa系数为0.7650;长汀县的综合精度为90.63%,Kappa系数为0.8125。由此可见,利用HJ-1多光谱影像中的光

谱与纹理信息所获取的马尾松林信息提取结果是较为有效的。基于此分类结果,利用掩膜法可分割出对应的HJ-1多光谱遥感影像图,结果见图4和图5。

2.2 基于HJ-1多光谱数据的马尾松林郁闭度估算

HJ-1多光谱数据包含4个可见光波段,分别为蓝光、绿光、红光及近红外波段,在这些波段组成的光谱曲线中植被有明显的峰谷特征。借助马尾松林测点坐标,在ERDAS平台上读取相应的像元灰度值;在计算NDVI(拉伸至0~255)基础上,以相同方法读取NDVI值。通过逐步回归分析法建立马尾松林郁闭度与HJ-1多光谱数据的数学模型,其中三明市、沙县和将乐县马尾松林郁闭度与HJ-1多光谱数据的数学模型为: $CD = -0.008B_1 + 0.031B_2 + 0.016B_3 - 0.037B_4 + 0.012NDVI - 0.815$ ($R^2 = 0.7194$);长汀县马尾松林郁闭度与HJ-1多光谱数据的数学模型为: $CD = -0.024B_1 + 0.130B_3 - 0.083B_4 + 0.026NDVI - 2.355$ ($R^2 = 0.6621$)。利用验证组数据进行验证,各点精度均达73%以上,平均精度分别为87.76%和86.78%,说明HJ-1数据可以较好地用于马尾松林郁闭度的估算,所构建的数学模型预测效果较好。理论上,CD值应介于[0,1]之间,故当 $CD < 0$ 时,将其值设为0;而当 $CD > 1$ 时,则将其值归于1。依此得到福建中部的三明市、沙县和将乐县及福建西部的长汀县2个研究区域的马尾松林郁闭度图(图6和图7)。

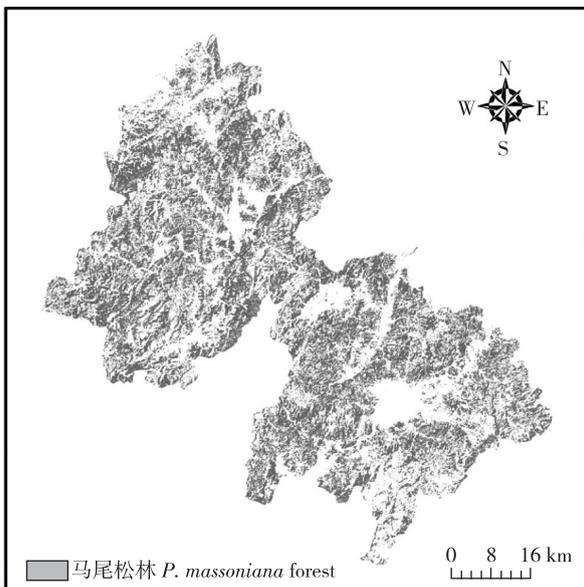


图2 福建三明市、沙县和将乐县马尾松林分布图
Fig. 2 Distribution map of *Pinus massoniana* Lamb. forest in Sanming City, Shaxian County and Jiangle County of Fujian Province

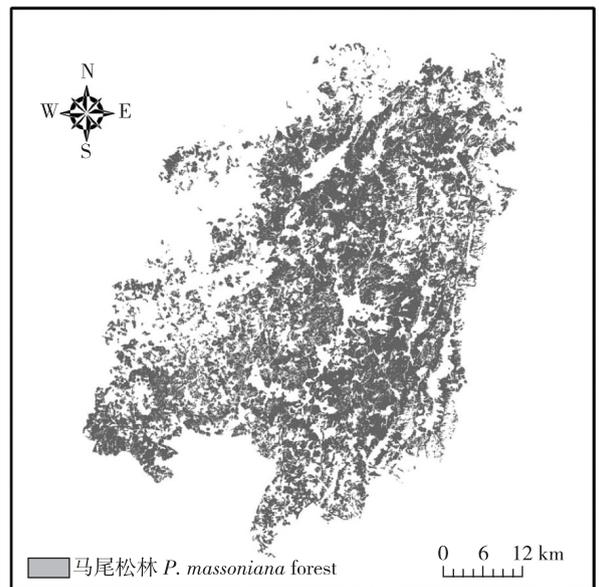


图3 福建长汀县马尾松林分布图
Fig. 3 Distribution map of *Pinus massoniana* Lamb. forest in Changting County of Fujian Province

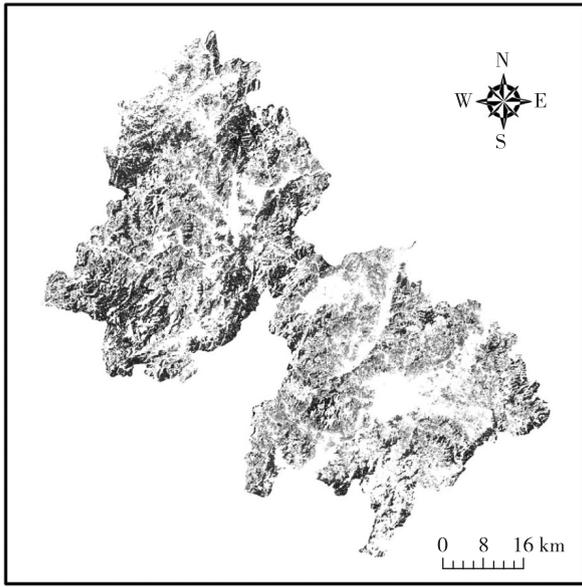


图 4 福建三明市、沙县和将乐县马尾松林 HJ-1 多光谱遥感影像
 Fig. 4 HJ-1 multi-spectral remote sensing image of *Pinus massoniana* Lamb. forest in Sanming City, Shaxian County and Jiangle County of Fujian Province

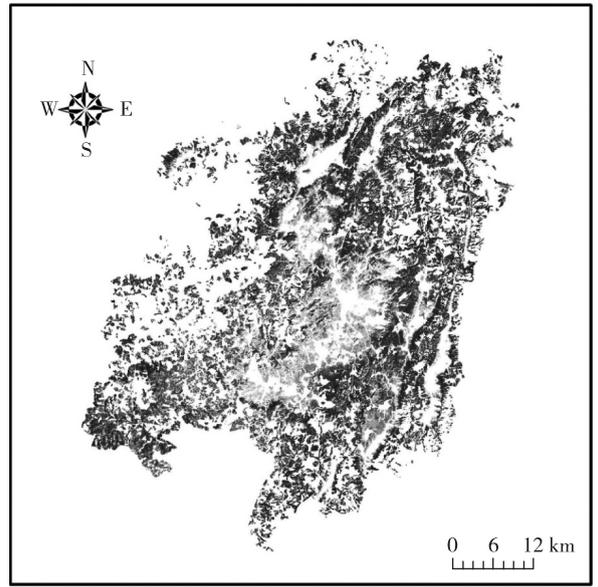


图 5 福建长汀县马尾松林 HJ-1 多光谱遥感影像
 Fig. 5 HJ-1 multi-spectral remote sensing image of *Pinus massoniana* Lamb. forest in Changting County of Fujian Province

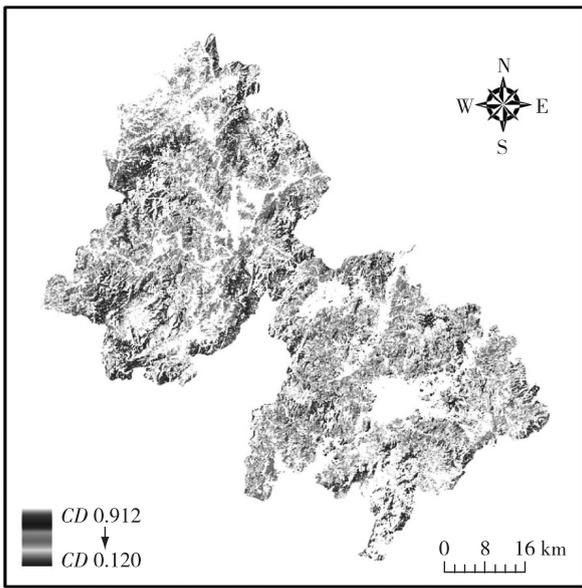


图 6 福建三明市、沙县和将乐县马尾松林郁闭度 (CD) 图
 Fig. 6 Canopy density (CD) map of *Pinus massoniana* Lamb. forest in Sanming City, Shaxian County and Jiangle County of Fujian Province

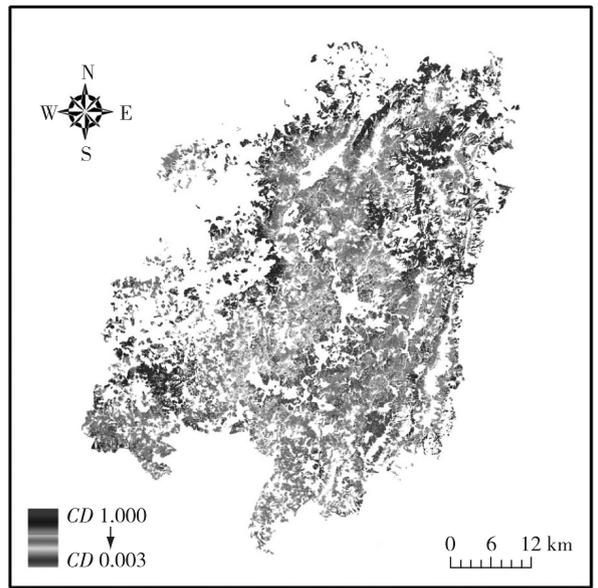


图 7 福建长汀县马尾松林郁闭度 (CD) 图
 Fig. 7 Canopy density (CD) map of *Pinus massoniana* Lamb. forest in Changting County of Fujian Province

2.3 基于郁闭度的马尾松林叶面积指数估算

在对研究区马尾松林郁闭度分布状况估算的基础上,在 SPSS 17.0 平台上分别构建了福建中部的三明市、沙县和将乐县及福建西部的长汀县 2 个研究区域马尾松林叶面积指数(LAI)与郁闭度的线性、对数、

二次、幂及指数模型,结果见表 2。

三明市、沙县和将乐县马尾松林的幂和指数模型的 R^2 值较其他模型高,而这 2 个模型的 RMSE 小于其他 3 个模型;线性、对数和二次模型的 R^2 值差异不大。由此可见,幂和指数模型的回归效果较佳,其中,指数

模型的模外数据检验精度达 0.842。因此,指数模型最适于闽中三县(市)马尾松林叶面积指数的估算。

长汀县马尾松林的二次模型的 R^2 值明显高于其他模型,其次为线性和指数模型;线性和对数模型的 $RMSE$ 高于其他 3 个模型,指数模型的 $RMSE$ 最低;对数、二次、幂和指数模型的模外数据检验精度均在 0.85 以上,其中对数和指数模型的模外数据检验精度更是高达 0.95 以上。由此也认为:指数关系模型对

长汀县马尾松林叶面积指数的预测效果最优。

上述分析结果均显示指数模型的预测效果最佳,因此,进一步将四县(市)所有测点数据合并,构建出叶面积指数与郁闭度模型 $LAI = 0.193e^{3.259CD}$ ($R^2 = 0.588$, $RMSE = 0.313$, 检验精度 0.898)。以马尾松林郁闭度图为基础、利用 $LAI-CD$ 的指数模型,在 ERDAS 平台上实现 2 个研究区马尾松林 LAI 的估算,结果见图 8 和图 9。

表 2 福建三明市、沙县、将乐县和长汀县马尾松林叶面积指数 (LAI) 与郁闭度 (CD) 的关系模型

Table 2 Correlation model between leaf area index (LAI) and canopy density (CD) of *Pinus massoniana* Lamb. forest in Sanming City, Shaxian County, Jiangle County and Changting County of Fujian Province

模型类型 Model type	模型 Model	R^2	$RMSE$	P	检验精度 Estimating accuracy
三明市、沙县和将乐县 Sanming City, Shaxian County and Jiangle County					
线性 Linear	$LAI = 3.886CD - 0.887$	0.575	0.379	0.000	0.696
对数 Logarithmic	$LAI = 1.920 \ln CD + 2.446$	0.540	0.394	0.000	0.740
二次 Quadratic	$LAI = 3.110CD^2 + 0.504CD - 0.008$	0.585	0.376	0.000	0.707
幂 Power	$LAI = 3.523CD^{1.852}$	0.673	0.287	0.000	0.728
指数 Exponential	$LAI = 0.158e^{3.555CD}$	0.645	0.299	0.000	0.842
长汀县 Changting County					
线性 Linear	$LAI = 4.186CD - 0.864$	0.540	0.474	0.000	0.639
对数 Logarithmic	$LAI = 1.984 \ln CD + 2.673$	0.442	0.521	0.000	0.962
二次 Quadratic	$LAI = 15.528CD^2 - 13.034CD + 3.692$	0.718	0.378	0.000	0.868
幂 Power	$LAI = 2.689CD^{1.156}$	0.389	0.339	0.000	0.898
指数 Exponential	$LAI = 0.346e^{2.420CD}$	0.468	0.316	0.000	0.968

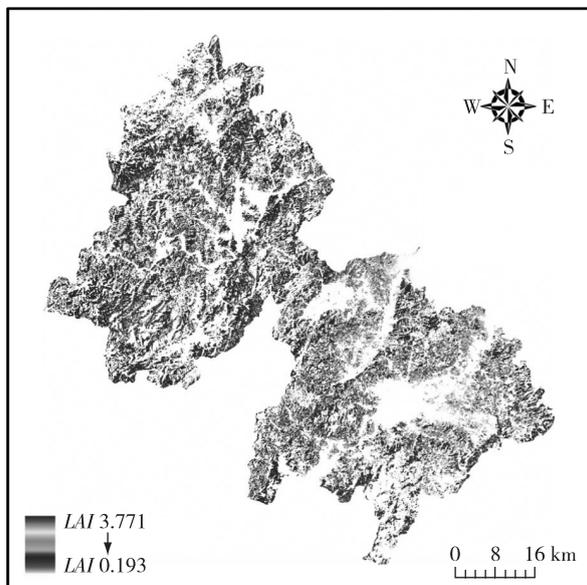


图 8 福建三明市、沙县和将乐县马尾松林叶面积指数 (LAI) 图
Fig. 8 Leaf area index (LAI) map of *Pinus massoniana* Lamb. forest in Sanming City, Shaxian County and Jiangle County of Fujian Province

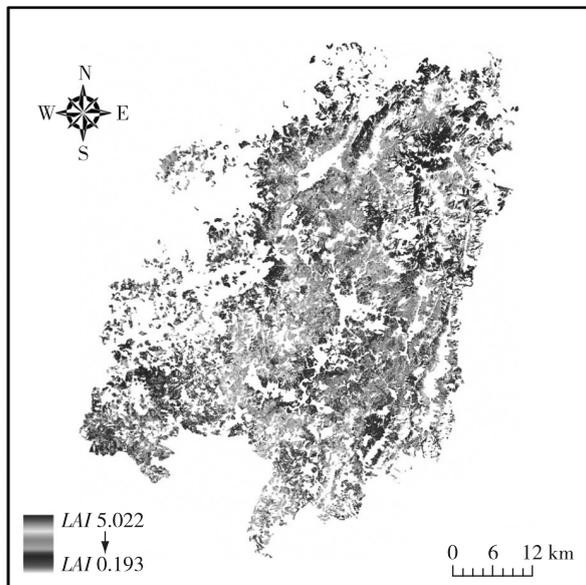


图 9 福建长汀县马尾松林叶面积指数 (LAI) 图
Fig. 9 Leaf area index (LAI) map of *Pinus massoniana* Lamb. forest in Changting County of Fujian Province

3 讨论和结论

传统的森林虫害调查耗时、费用高,且覆盖面极为有限。随着遥感技术的发展与应用,一套实时、简便、区域性、无破坏的森林虫害监测体系正逐步建立。在马尾松林发生毛虫危害时其松针量减少,随着虫害等级的提升其失叶量也随之上升,因此,叶面积指数被认为是松毛虫害检测和监测的有效指标,目前已得到广泛应用。基于这一原理,通过上述研究可见:

①作为传统调查指标,郁闭度与HJ-1多光谱数据间相关性较强,利用多光谱波段及NDVI,三明市、沙县和将乐县马尾松林郁闭度估算模型为 $CD = -0.008B_1 + 0.031B_2 + 0.016B_3 - 0.037B_4 + 0.012NDVI - 0.815$,平均预测精度为87.76%;长汀县马尾松林郁闭度估算模型为 $CD = -0.024B_1 + 0.130B_3 - 0.083B_4 + 0.026NDVI - 2.355$,平均预测精度为86.78%,可依此模型实现马尾松林郁闭度的区域化估算。

②叶面积指数与郁闭度(CD)具有概念上的相似性,经检验分析,马尾松林叶面积指数与CD的指数模型 $LAI = 0.193e^{3.259CD}$ 的综合预测效果最佳,适用性较强,可依此实现三明市、沙县和将乐县以及长汀县马尾松林LAI的估算。

③国产HJ-1多光谱数据具有时间分辨率极高、空间分辨率较高及光谱信息较丰富的优势,本文结果也说明国产卫星数据可在森林病虫害检疫、防治以及森林经营管理领域发挥重要作用,应将其作为资源和环境可持续发展的主要基础数据之一。

作者不仅对马尾松林叶面积指数与郁闭度、HJ-1多光谱数据的关系进行了研究,也是对国产卫星数据在资源环境领域应用的一次探索。此外,作者在分析过程中还发现:LAI与郁闭度、HJ-1多光谱数据间的关系可能更为复杂。随着计算机技术的发展,出现了诸多更为复杂、新颖的模型构建方法,这些方法是否具有更优的预测效果,是未来需要补充研究的问题。

致谢:福州大学福建省空间信息工程研究中心(SIRC)在野外数据采集工作中给予的帮助与支持,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 李凤秀,张柏,宋开山,等.玉米叶面积指数与高光谱植被指数关系研究[J].遥感技术与应用,2007,22(5):586-592.
- [2] TIAN Q, LUO Z, CHEN J M, et al. Retrieving leaf area index for coniferous forest in Xinguo County, China with Landsat ETM +

images[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85: 624-627.

- [3] 吴彤,倪绍祥,李云梅,等.基于地面高光谱数据的东亚飞蝗危害程度监测[J].遥感学报,2007,11(1):103-108.
- [4] HUANG W J, HUANG M Y, LIU L Y, et al. Inversion of the severity of winter wheat yellow rust using proper hyper spectral index[J].农业工程学报,2005,21(4):97-103.
- [5] ROBERTSON C, FARMER C J Q, NELSON T A, et al. Determination of the compositional change (1999-2006) in the pine forests of British Columbia due to mountain pine beetle infestation[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 158: 593-608.
- [6] KOCH F H, YEMSHANOV D, MCKENNEY D W. Evaluating critical uncertainty thresholds in a spatial model of forest pest invasion risk[J]. Risk Analysis, 2009, 29: 1227-1241.
- [7] 谢舒菁,李秀平,刘健,等.马尾松毛虫害林分失叶量估测研究[J].三明学院学报,2010,27(16):558-564,592.
- [8] 杨飞,张柏,宋开山,等.大豆叶面积指数的高光谱估算方法比较[J].光谱学与光谱分析,2008,28(12):2951-2955.
- [9] 孙鹏森,刘世荣,刘京涛,等.利用不同分辨率卫星影像的NDVI数据估算叶面积指数(LAI)——以岷江上游为例[J].生态学报,2006,26(11):3826-3834.
- [10] GUPTA R K, PRASAD T S, VIJAYAN D. Relationship between LAI and NDVI for IRS LISS and Landsat TM bands[J]. Advances in Space Research, 2000, 26: 1047-1050.
- [11] STENBERG P, RAUTIAINEN M, MANNINEN T, et al. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands[J]. Silva Fennica, 2004, 38: 3-14.
- [12] 张瀛,孟庆岩,武佳丽,等.基于环境星CCD数据的环境植被指数及叶面积指数反演研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(10):2789-2793.
- [13] D'ARRIGO R D, MALMSTROM C M, JACOBY G C, et al. Correlation between maximum latewood density of annual tree rings and NDVI based estimates of forest productivity[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21: 2329-2336.
- [14] 余坤勇,许章华,刘健,等.“基于片层-面向类”的竹林信息提取算法与应用分析[J].中山大学学报:自然科学版,2012,51(1):89-95.
- [15] 余坤勇,刘健,许章华,等.南方地区竹资源专题信息提取研究[J].遥感技术与应用,2009(4):449-455.
- [16] 杨晖.图像分割的阈值法研究[J].辽宁大学学报:自然科学版,2006,33(2):135-137.
- [17] 仇大海,冯涛,高晖,等.基于波谱角和掩膜的卫星影像阴影去除研究[J].遥感信息,2010(5):12-14,20.
- [18] 高云飞,李智广,杨胜天,等.基于SPOT5影像的郁闭度反演方法[J].水土保持研究,2012,19(2):267-270.
- [19] 赵蕊. Hyperion EO-1森林郁闭度反演研究[D].哈尔滨:东北林业大学林学院,2007:39-46.

(责任编辑:张明霞)