

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2017.10048

王卿, 刘健, 余坤勇. 基于多角度植被指数的马尾松林 LAI 反演方法[J]. 植物科学学报, 2017, 35(1): 48~55

Wang Q, Liu J, Yu KY. Inversion of Masson pine forest LAI by multiple-perspective vegetation index[J]. Plant Science Journal, 2017, 35(1): 48~55

基于多角度植被指数的马尾松林 LAI 反演方法

王卿^{1,2,3}, 刘健^{1,2,3,4*}, 余坤勇^{1,2,3}(1. 福建省资源环境监测与可持续经营利用重点实验室, 福州 350002; 2. 福建农林大学林学院, 福州 350002;
3. 福建农林大学 3S 技术应用研究所, 福州 350002; 4. 三明学院, 福建三明 365000)

摘要: CHRIS/PROBA 是目前具有最高空间分辨率($17 \text{ m} \times 17 \text{ m}$)的星载多角度高光谱数据, 该款数据在反演植被垂直结构参数, 如树高、叶面积指数(leaf area index, LAI)等方面具有重要的应用前景。基于四尺度几何光学模型得到马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)冠层的归一化差分植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)各向异性分布规律, 利用 CHRIS 红光特征波段和近红外特征波段构建一种新型多角度植被指数(normalized hotspot-dark-spot difference vegetation index, NHDVI), 并将其应用于 CHRIS 数据对马尾松林的 LAI 遥感估算上。结果显示: (1)相比归一化差分植被指数(NDVI)与土壤调节植被指数(soil adjusted vegetation index, SAVI)而言, NHDVI 能很好地融合光谱信息与角度信息, 与地面实测 LAI 的决定系数达到 0.7278; (2)利用 NHDVI-LAI 统计回归模型方法来反演 LAI 值, 将得到的 LAI 值与地面实测值进行相关性分析, 结果拟合优度达到 0.8272, 均方根误差 RMSE 为 0.1232。与传统植被指数相比, 包含角度信息的多角度植被指数对 LAI 的反演在精度上有较大提升, 同时比基于辐射传输模型的反演方法更简易、实用。

关键词: 叶面积指数; 多角度遥感; 植被指数; 反演; 马尾松林

中图分类号: Q948; S718.5

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2017)01-0048-08

Inversion of Masson pine forest LAI by multiple-perspective vegetation index

Wang Qing^{1,2,3}, Liu Jian^{1,2,3,4*}, Yu Kun-Yong^{1,2,3}(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Resources and Environment Monitoring & Sustainable Management and Utilization, Fuzhou 350002, China; 2. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;
3. Institute of Geomatics Application, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;
4. Sanming University, Sanming, Fujian 365000, China)

Abstract: CHRIS/PROBA is a multiple-angle sensor providing hyper-spectral data with $17 \text{ m} \times 17 \text{ m}$ spatial resolution that can be applied for data inversion of vegetation canopy structure parameters, such as tree height and leaf area index (LAI). We used a four-scale geometrical optics model to simulate anisotropy distribution regulation of the normalized difference vegetation index (NDVI) of a *Pinus massoniana* (Masson pine) forest canopy. By extracting the red and near infrared characteristic spectral bands from the 18 bands in CHRIS, a new multi-angle normalized hotspot-dark-spot difference vegetation index (NHDVI) was applied to the estimation of the LAI of *Pinus massoniana* forest using CHRIS data. The results showed that: (1) Compared with the NDVI and soil adjusted vegetation index (SAVI), NHDVI well

收稿日期: 2016-05-19, 退修日期: 2016-06-17。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41401385)“南方红壤水土流失区植被覆盖与管理因子(C 因子)遥感重建研究”。

This work was supported by a grant from the National Natural Science Foundation of Young Scientists of China (41401385): Reconstruction of vegetation cover and management factor (C factor) based on remote sensing in southern red soils water and soil loss region.

作者简介: 王卿(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为森林资源管理(E-mail: 505895152@qq.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: flijian@126.com.com)。

integrated the spectral information and angle information with the ground measured LAI, and the coefficient of determination reached 0.7278; (2) The LAI was calculated by statistical regression of NHDVI-LAI. The correlation between the LAI and the measured values was 0.8272, significantly higher than that of SAVI, and the root mean square error (RMSE) was 0.1232. Thus, these findings indicate that angular information is important for improving the retrieval accuracy of LAI.

Key words: Leaf area index; Multiple-perspective sensing; Vegetation index; Inversion; Masson pine forest

叶面积指数(LAI)作为植被冠层结构的重要参数,对其定量遥感反演研究一直是国际和国内遥感研究的热点之一。传统遥感观测通常以垂直方向对地表进行影像摄取,而绝大多数非朗伯体对太阳短波辐射的反射、散射能力会随空间方向的变化而改变^[1]。多角度遥感可提供地表目标的立体结构特征信息与方向信息,有助于更加有效地对冠层结构参数进行提取。

拥有较高空间分辨率的多角度遥感数据首推挂载在欧空局 PROBA-1 星上的紧凑型高光谱成像仪 (compact high resolution imaging spectrometer, CHRIS)。当 PROBA 卫星飞跃每一个观测点上空的 2.5 min 周期内,即能摄取 5 张不同观测角度下的影像数据 (-55° 、 -36° 、 0° 、 36° 、 55°)^[2-4]。Chopping 等^[5]使用 CHRIS 数据结合简化的几何光学模型反演荒漠草地的灌木盖度。英国 Quaife 等^[6]采用 CHRIS 数据对大气校正和几何校正后反演了地表 BRDF。芬兰的 Miina 等^[7]根据森林类型和不同的各向异性模型,利用 CHRIS 数据反演冠层结构,获得了精确的森林类型,并提出了森林和地面光谱分离的方法。李欣辉等^[8]利用 CHRIS 多角度遥感数据对内蒙古锡林河流域的典型草地 LAI 进行反演研究,利用多角度信息改善了稀疏植被覆盖情况下的 LAI 低估问题。

CHRIS 数据也是一款高光谱数据产品,国内有研究团队将其作为一款高光谱数据源进行使用,尤其集中在湿地植被分类与土地利用类型分类领域^[9-11]。而对角度间植被冠层响应的差异性研究鲜有涉及,CHRIS 传感器的多角度特性优势没有得到充分利用。欧洲空间局一直以来开放对 CHRIS 多角度遥感数据的预定下载,但还未见利用 CHRIS 数据对中国东南诸省多山丘陵地区广布的马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 人工林进行

研究。有鉴于此,本研究尝试利用 CHRIS 数据的多角度与高光谱属性,构建新型多角度植被指数,探讨其对马尾松林 LAI 的反演估算能力,以期为大面积马尾松林监测提供理论依据与技术支持。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

试验区位于福建省龙岩地区河田镇,该区域长期受人类生产生活影响,原始植被多遭破坏,现有马尾松林占到研究区域林地面积的 90% 以上,以中龄林与幼龄林为主。马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 是亚热带常绿阔叶林演替的主要先锋树种,具有喜光、耐旱、耐瘠薄、适生能力强等特点^[12]。作为荒山绿化造林的主要树种,马尾松被广泛种植于研究区域内。

1.2 数据来源及预处理

对试验区数据的地面采集工作分两期进行:第一期于 2014 年 12 月展开,在研究区域内利用冠层分析仪 LAI-2200 采集 32 个马尾松林样点的 LAI 值(图 1);使用 Trimble 手持 GPS 对所测样点几何中心点进行定位以获取坐标点。第二期于 2015 年的 11 月进行,为了对归一化差分植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 的二向异性反射分布规律进行研究,在研究区域内对 12 个马尾松大样地(每个样地均为 45 m × 45 m 的大方格,其中再划分 9 个 15 m × 15 m 的子样地)中的主要地物的承照面、阴影面内的光谱反射率进行获取,同时采集样地内的 LAI 值作为验证数据。

CHRIS 数据选取 2015 年 10 月 12 日的影像。拍摄当日天气状况良好,影像中无云干扰,由近红外、红光、绿光 3 通道合成的假彩色影像如图 2 所示,图中红色表征植被,蓝色表征河流水体,具有

明亮反射特征的地物则是建筑物、采石场或者裸露地。原始文件名为 CHRIS_H5_151012, 包括1个XML文档、HDF文件以及1张JPG图片。

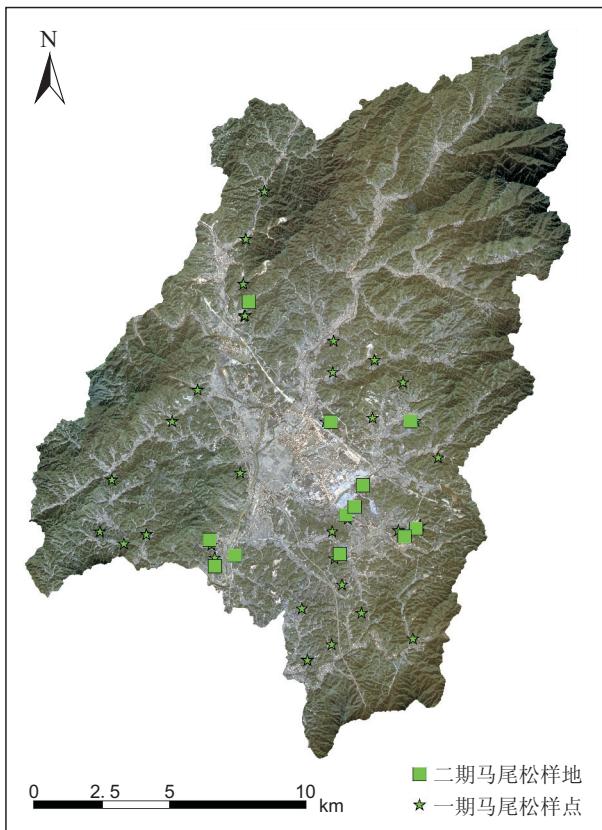


图1 地面样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites

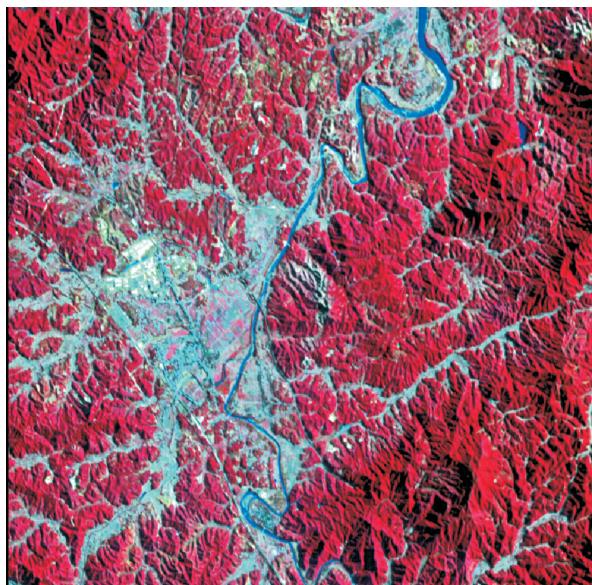


图2 CHRIS假彩色影像图

Fig. 2 False color image by CHRIS

PROBA 小卫星携带 CHRIS 传感器经过研究区域上空摄取影像的相关参数可从元数据中查看到, CHRIS 第四模式的 18 个波段信息见表 1。CHRIS/PROBA 影像的预处理主要包括噪声去除, 辐射校正与几何校正。CHRIS 图像往往存在较严重的水平与垂直噪声, 本文采用欧空局的 BEAM 5.0 软件去除噪声。BEAM 5.0 软件主要用于处理 HDF 方式存储的影像, 对图像进行缺失像元的填充以及条带的去除。几何纠正以同期法国 Pleiades 高空间分辨率影像数据作为基准影像对 CHRIS 数据进行几何校正, 选择 20 个地面控制点, 5 张影像 RMS 均控制在一个像元以内(表 2)。校正后输出影像的重采样方法使用最近邻插值法以尽量保留像元中的原始光谱信息。

表 1 CHRIS 第四模式的 18 个波段波长信息
Table 1 Information of CHRIS mode 4

波段数 Band	波长下限 Wave length low (nm)	波长上限 Wave length high (nm)	中心波长 Center wavelength (nm)	波段幅 Width (nm)	增益 Gain
1	486	495	489	9	3
2	546	556	551	10	3
3	627	636	631	9	3
4	666	677	672	11	2
5	677	683	680	6	3
6	683	689	686	6	2
7	689	694	691	6	2
8	694	700	697	6	2
9	700	706	703	6	2
10	706	712	709	6	3
11	712	719	716	6	3
12	732	738	735	7	2
13	738	745	742	7	3
14	745	752	748	7	1
15	752	759	755	7	1
16	773	781	777	7	2
17	781	788	785	8	3
18	788	796	792	8	2

表 2 几何精校正误差
Table 2 Geometrical rectification accuracy

观测天顶角 VZA	控制点 GCP	X 轴均方根 X RMS	Y 轴均方根 Y RMS	总均方根 RMS
0°	20	0.5400	0.6362	0.8345
+36°	20	0.6000	0.5616	0.8218
-36°	20	0.4732	0.6923	0.8386
+55°	20	0.3443	0.3889	0.5194
-55°	20	0.5054	0.5448	0.7432

Notes: VZA, View zenith angle; GCP, Ground control point; X RMS, X root mean square; Y RMS, Y root mean square; RMS, Root mean square.

1.3 研究方法

1.3.1 CHRIS 光谱特征选择

由于叶面积指数与植被指数间存在较好的线性关系, 可以使用不同的植被指数来反演估测 LAI, 而构造植被指数常常使用红光波段与近红外波段。在 CHRIS 第四模式数据中, 能够表征红光波段的原始波段数可达 12 个波段, 表征近红外的原始波段数也有 3 个, 利用 CHRIS 光谱特征来构建一个植被指数会有多达 36 种组合方式。因此需要针对 CHRIS 数据, 从其拥有的 18 个光谱特征空间中选择一个光谱子集, 这个子集不光是一个维数上缩小的光谱特征空间, 而且它还应该最大限度地保留 CHRIS 数据中的主要特征光谱。本文选取原始波段空间中的 Band13 波段与 Band18 波段作为红光与红外光的代表波段来构建植被指数。

1.3.2 NDVI 各向异性模拟

利用 4-scale 几何光学模型模拟 14 个样地中马尾松冠层的二向异性反射分布规律。从模型模拟结果可看出(图 3), 在太阳主平面上, 红光波段与红外波段在各个观测天顶角方向下的反射率值不同, 但 2 条波段均表现出一定的碗边效应, 以及二者在后向散射方向上能表现出明显的热点效应。

4-scale 几何光学模型是以 670 nm 波长作为红光波段、以 865 nm 波长作为红外波段来构建归一化差分植被指数(NDVI)^[13-15], 因此同时也可以

模拟分析 NDVI 在光线主平面上各观测天顶角下的分布情况。从图 4 可以看出, 植被冠层 NDVI 会随着观测天顶角的变化而变化, 存在着二向异性反射特性。

热暗点指数 (hotspot-dark-spot index, HDS)^[16] 由在热点处的反射率与暗点处的反射率所构成:

$$HDS = \frac{R_{HS} - R_{DS}}{R_{HS}} \quad (1)$$

式中, R_{HS} 表示某波段在热点处的反射率, 通常热点都位于后向散射方向上, 即 $-85^\circ \sim 0^\circ$; R_{DS} 表示该波段在暗点处的反射率, 暗点位置一般出现在正向散射方向上, 即 $0^\circ \sim 85^\circ$ 。显然, 在热点观测处与暗点观测处的反射率差异将决定 HDS 的大小。热暗点指数 HDS, 可以通过多角度光学传感器计算得到, 能够反映植被垂直几何结构。

高光谱、多角度数据在反演 LAI 方面都有各自重要的应用价值。常用的光谱植被指数无法体现地物各向异性反射的基本特征, 因此利用多光谱兼多角度数据来反演地表结构参数, 将有助于提高 LAI 的反演精度。基于以上分析, 构建一个多角度遥感植被指数——标准归一化热暗点植被指数 (normalized hotspot-dark-spot difference vegetation index, NHDVI) 来对研究区域的 LAI 进行反演实验。

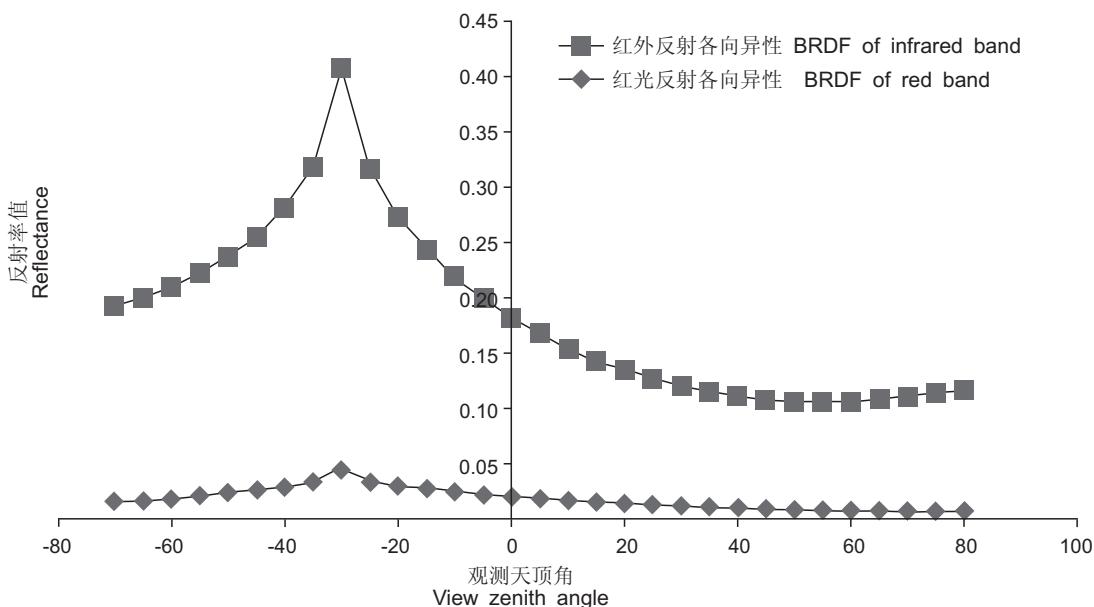


图 3 红光、红外反射各向异性分布图(主平面)

Fig. 3 Reflectivity of red band and near infrared band on the plane direction

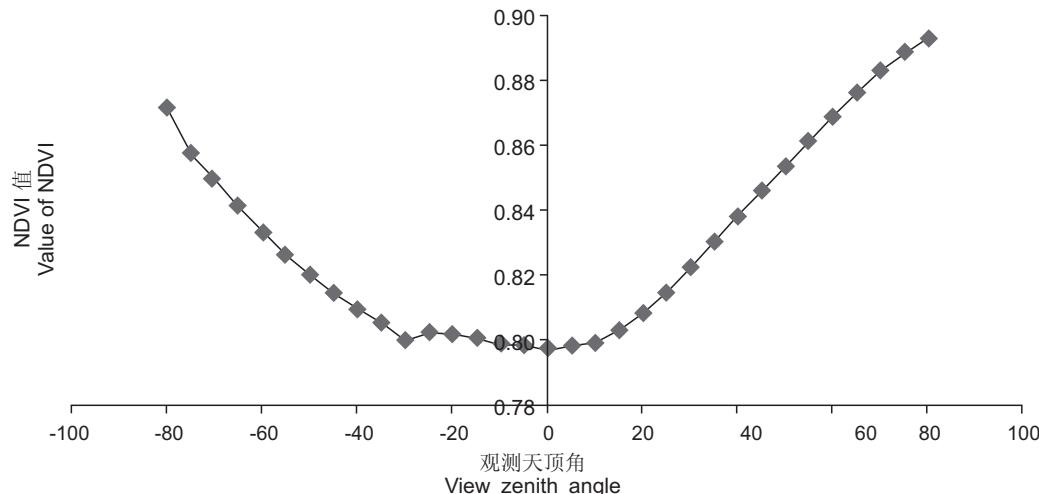


图 4 NDVI 各向异性分布图(垂直主平面)
Fig. 4 Anisotropy of NDVI on the perpendicular plane direction

NHNDVI 指数具有光谱指数 NDVI 与多角度指数 HDS 的双重优势, 它可以在一定程度上消除与太阳天顶角、观测角、地形以及大气条件有关的辐照度条件等的影响, 增强对植被的响应能力, 同时还引入了多角度植被反射率信息。NHNDVI 表达式如下:

$$NHNDVI = \frac{NDVI_D - NDVI_H}{NDVI_D + NDVI_H} \quad (2)$$

式中, $NDVI_H$ 为热点处、 $NDVI_D$ 为暗点处的 NDVI 值。

2 结果与分析

2.1 波段比值指数分析

于 2015 年 10 月 12 日用 CHRIS/PROBA 获取的 5 个角度影像覆盖范围有所差异, $+36^\circ$ 、 -36° 影像与 $+55^\circ$ 、 -55° 影像随着观测天顶角的加大、其影像覆盖范围会呈现东西向逐渐加大, 并在南北方向上逐渐向南推移的趋势, 因此选取 5 个角度影像下所覆盖的最大公共区域作为研究对象。因此, 一期观测数据中研究公共区域范围内的样点数共有 22 个, 二期观测的 14 个数据则用来验证反演精度。依据 NDVI 在垂直主平面上的各向异性反射规律, 提取 -36° 与 $+55^\circ$ 影像作为热点与暗点构建 NHNDVI, 并与 LAI 进行线性拟合。将所得线性模型反演的 LAI 与实测 LAI 进行相关性分析的同时, 我们还选取 NDVI 与土壤调节植被指数 (soil adjusted vegetation index, SAVI) 进行比较研究。用 3 种植

被指数与 LAI 进行相关性统计(表 3), 利用其中 5 个角度影像的 NDVI、SAVI 与 LAI 进行分析。基于 NHNDVI-LAI、NDVI-LAI 和 SAVI-LAI 的反演结果见图 5。

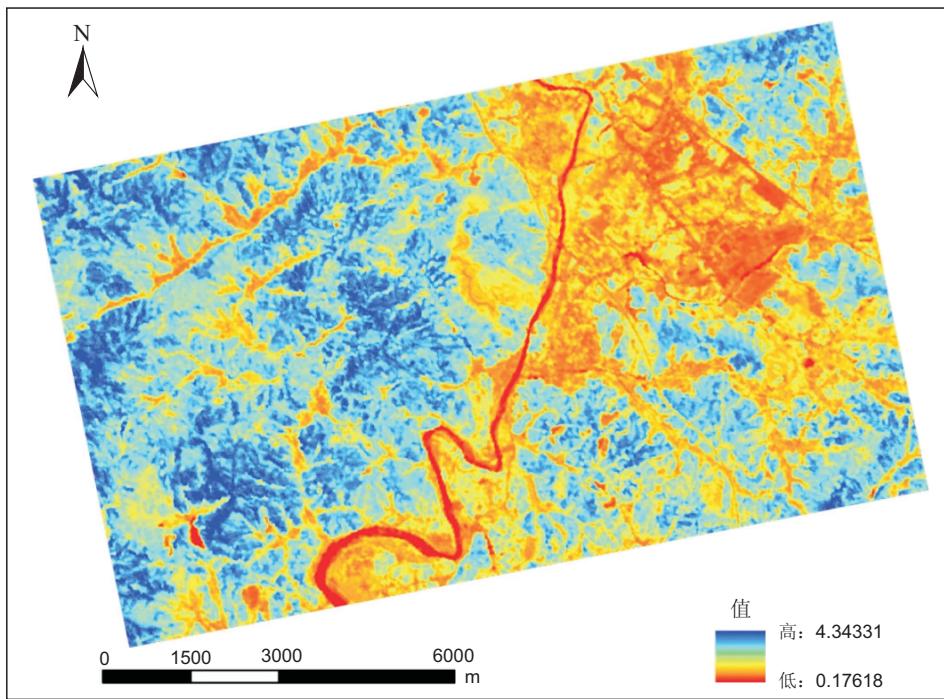
从 NDVI 与 SAVI 两个指数在不同观测角影像与 LAI 的拟合优度来看, 当 CHRIS 传感器观测角度逐渐偏离星下点方向, 拟合优度(相关系数的平

表 3 三种植被指数与 LAI 的相关性统计

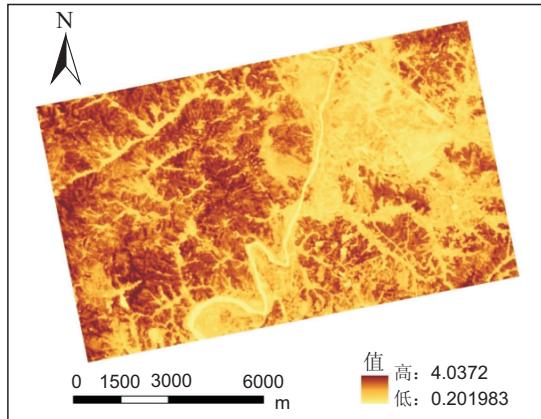
Table 3 Statistical analysis on the relativity of LAI inversion and measured value based regression model

指数 Index	成像角度 View angle	估算方程 Linear model	拟合优度 R^2 Goodness of fit
归一化差分植被指数 NDVI	0°	$y = 0.5018e^{2.5959x}$	0.7341
	$+36^\circ$	$y = 0.4665e^{2.7777x}$	0.5792
	-36°	$y = 0.7637e^{2.0182x}$	0.3467
	$+55^\circ$	$y = 0.7703e^{1.6914x}$	0.2097
	-55°	$y = 0.3917e^{2.9286x}$	0.6128
土壤调节植被指数 SAVI	0°	$y = 0.5017e^{1.7314x}$	0.7341
	$+36^\circ$	$y = 0.4434e^{1.9244x}$	0.6594
	-36°	$y = 0.7639e^{1.3456x}$	0.3466
	$+55^\circ$	$y = 0.7701e^{1.128x}$	0.2098
	-55°	$y = 0.3917e^{1.9531x}$	0.6128
准归一化热暗点植被指数 NHNDVI		$y = 4.6665e^{-3.32x}$	0.7278

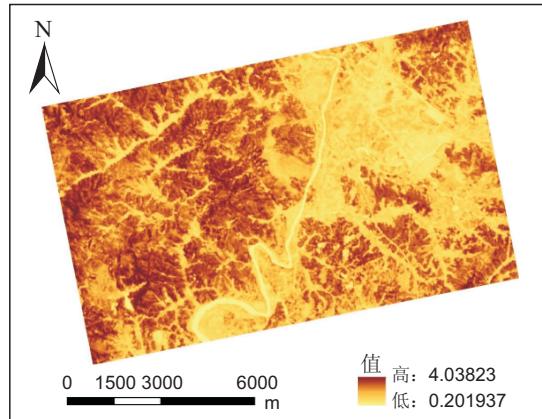
Notes: NDVI, Normalized difference vegetation index; SAVI, Soil adjusted vegetation index; NHNDVI, Normalized hotspot-dark-spot difference vegetation index. Same below.



(a) NHDVI-LAI反演LAI图
LAI retrieval based NHDVI-LAI regression model



(b) 0°影像NDVI-LAI反演LAI图
LAI retrieval based NHDVI-LAI model



(c) 0°影像SAVI-LAI反演LAI图
LAI retrieval based SAVI-LAI model

图 5 各指数线性模型反演 LAI 分布图
Fig. 5 LAI retrieval based SAVI-LAI regression model

方)系数也随之逐渐降低, 从表 3 中可知, $+36^\circ$ 、 -36° 影像 NDVI 与 LAI 的拟合优度为 0.5792、0.3467, 而 $+55^\circ$ 、 -55° 影像的拟合优度则为 0.2097 和 0.6128。可以发现一个有趣的现象: 反演的 NDVI 值与对应实测叶面积指数的测定系数会随着观测天顶角度的加大(即以 0° 、 $+36^\circ$ 、 -36° 、 $+55^\circ$ 的次序)而逐渐降低, 其原因可能是因为地面测取量 LAI 时使用冠层分析仪皆为垂直测取方法, 总体上地面测量数据会与 CHRIS 传感器垂直观测

角度即星下点方向所摄取的影像拟合度最佳, 而偏离星下点方向, 拟合优度则相应逐渐降低。

2.2 VI-LAI 模型反演结果

通过构建植被指数 NDVI、SAVI、NHDVI 与地面参数 LAI 进行建模, 得到不同植被指数与 LAI 的线性关系。再利用经验统计模型针对小研究区域内的反演可以取得较好的结果(图 5)。图 5: a 中的颜色表征叶面积指数的高低, 蓝色越深代表叶面积指数越高, 研究区域内最高值为 4.34331; 颜色越

偏红则表示 LAI 值越低, 最低值为 0.17618。对比地面实测 LAI 最高值 3.44, 用 NHDVI 反演得到 LAI 值从目视判读角度来看与实地情况相吻合。调查区域内主要为马尾松针叶林, 占林地面积的 95%, 实测的马尾松林 LAI 值一般在 1~4 区间内。从 NHDVI-LAI 反演结果的极值范围(0.17618 到 4.34331)来看, 图中 LAI 高值部分都处于山地区域, 尤其以一些分布在南向山麓的马尾松林 LAI 值较高。图 5: a 中偏低的 LAI 则出现在无乔木覆盖区域, 如沿朱溪河分布的河床及其河漫滩, 还有沿山间谷地分布的呈辐射状的农田。而基于 NDVI-LAI、SAVI-LAI 反演的 LAI 值则略微偏低(图 5: b、c)。

利用 VI-LAI 最优拟合方程预测来估算 LAI 值, 其预测精度可以用均方根误差(root mean square error, RMSE)来评估, 即:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (3)$$

(3)式中, y_i 与 \bar{y}_i 分别为 LAI 的实际测量值与预测值, n 为样本数。将上述模型应用于 CHRIS 数据中, 即可得到 LAI 分布图, LAI 预测精度通过 12 个样本点数据进行验证, 均方根误差见表 4。

表 4 反演值与实测值的相关性统计

Table 4 Statistical analysis on the relativity of LAI inversion and measured value

植被指数反演 Index	回归方程 Regression model	拟合优度 R^2 Goodness of fit	均方根误差 RMSE
0° NDVI	$y = 0.7504x + 0.414$	0.7235	0.4692
+36° NDVI	$y = 0.6253x + 0.9127$	0.6229	0.4583
-36° NDVI	$y = 0.8332x + 0.661$	0.7035	0.4225
+55° NDVI	$y = 0.6408x + 0.7776$	0.4064	0.5507
-55° NDVI	$y = 0.8046x + 0.0914$	0.5171	0.6490
0° SAVI	$y = 0.7024x + 0.4821$	0.7238	0.2151
+36° SAVI	$y = 0.6206x + 0.9293$	0.6233	0.1943
-36° SAVI	$y = 0.7992x + 0.2745$	0.7062	0.1954
+55° SAVI	$y = 0.7329x + 0.4827$	0.4079	0.2127
-55° SAVI	$y = 0.5825x + 1.0886$	0.321	0.207
NHDVI	$y = 0.9355x + 0.8272$	0.8272	0.1232

基于 NDVI 各向异性分布规律的 NHDVI 指数, 囊括了 5 个角度的信息, 因此其反演得到的 LAI 与地面实测的 LAI 拟合优度表现最好, 达到了 0.8272, 比只包含光谱信息的 NDVI 星下点方向 0.7235、SAVI 的星下点方向 0.7228 反演精度提高了约 0.1。NHDVI 反演结果的均方根误差 RMSE

也是所有反演结果中最低的。

3 讨论

基于植被指数的 LAI 经验统计反演法虽然缺乏较强的机理性, 但它是将遥感观测与地面实际测量相联系的重要手段, 可以及时有效、无损地对植被进行监测。用植被指数估算 LAI 的一般过程是先建立二者之间的经验关系, 并使用观测数据进行拟合, 再使用拟合好的模型进行估算, 这种方法的优势是简单易用, 需要相应的实测数据和对应的遥感数据。物理模型法虽然具有较强的机理性和通用性, 但是存在病态反演的问题, 同时模型模拟所需要的实测参数多, 计算成本高。考虑到本研究区域的地表结构复杂、模型该研究区域的不确定性与实际采集相关参数的合理性, 本文主要采用基于植被指数的 LAI 经验统计反演法, 对福建长汀河田镇试验区内的马尾松林进行 LAI 反演研究, 结果显示同种 VI-LAI 模型在不同角度下的反演精度差异较明显。NDVI 与实测 LAI 拟合度较高, 其中以 0° 影像的相关性最好, 而当 CHRIS 传感器观测角度逐渐偏离星下点方向时, 拟合优度系数也随之逐渐降低, NDVI 值与对应实测叶面积指数之间的拟合优度会随着观测天顶角的加大(即以 0°、+36°、-36°、+55° 的次序)而逐渐降低, 而在 -55° 的方向上 R^2 却不会依循前几个角度所表现出的趋势, 拟合优度值反而升高, 这种现象也同样出现在 SAVI-NDVI 的结果中。推测其原因是 CHRIS 传感器在 +55° 角的影像获取上可能存在辐射定标性能上的误差, CHRIS 作为欧空局第一款多角度成像光谱仪在光谱与辐射性能上仍有待改善^[17]。

河田镇裸露的表土和低植被覆盖度区域会导致影像中总体土壤背景亮度加大, 而 SAVI 通过引入植被覆盖密度因子, 可以有效地达到减弱土壤背景的影响。试验中植被覆盖密度因子选择了经验性数值 0.5。今后可以尝试不同值对降低背景噪声效果的影响, 以期构建融合土壤背景信息与角度信息的新型植被指数。

由于本研究使用的多角度影像数据产品 CHRIS 在 5 个角度下摄取影像的面积范围并不完全一致, 致使 5 张影像所覆盖的公共区域面积有限, 因此只采用先行地面采集的 LAI 数据的子集进行试验, NHDVI-LAI 模型稳定性仍需进行尺度上的

推绎以及更大数据量的验证分析。

参考文献:

- [1] 徐希孺. 物理遥感 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 21–22.
Xu YR. Physical Principle of Remote Sensing [M]. Beijing: Peking University Press, 2005: 21–22.
- [2] 盖利亚, 刘正军, 张继贤. CHRIS/PROBA 高光谱数据的预处理 [J]. 测绘工程, 2008, 17(1): 40–43.
Gai LY, Liu ZJ, Zhang JX. Preprocessing of CHRIS/PROBA hyperspectral data [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2008, 17(1): 40–43.
- [3] 夏天, 吴文斌, 周清波, 周勇. 冬小麦叶面积指数高光谱遥感反演方法对比 [J]. 农业工程学报, 2013, 33(3): 139–147.
Xia T, Wu WB, Zhou QB, Zhou Y. Comparison of two inversion methods for winter wheat leaf area index based on hyperspectral remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 33(3): 139–147.
- [4] 金晟业. 承德地区植被参数多角度遥感反演 [D]. 长春: 吉林大学, 2009: 32.
Jing CY. Inversion of vegetation parameters in Chengde using multi-angle satellite date [D]. Changchun: Jilin University, 2009: 32.
- [5] Chopping M, Su L, Laliberte A, Rango A, Peters DPC, Kollikkathara N. Mapping shrub abundance in desert grasslands using geometric-optical modeling and multi-angle remote sensing with CHRIS/Proba [J]. *Remote Sens Environ*, 2006, 104(1): 62–73.
- [6] Quaife T, Barnsley M, Thackrahm TG, Lewis P. Mission status of CHRIS/PROBA and its utility for sampling the earth surface BRDF [C]//RSPS Proceedings. Rochester: Bypdell & Brewer Publishers, 2001: 128–134.
- [7] Miina R, Mait L, Matti M, Matti Möttus, Andres Kuusk, Tiit Nilson, Joel Kuusk, Tõnu Lükk. Multi-angular reflectance properties of a hemiboreal forest. An analysis using CHRIS/PROBA data [J]. *Remote Sens Environ*, 2008, 112(5): 2627–2642.
- [8] 李新辉, 宋小宁, 冷佩. 利用 CHRIS/PROBA 数据定量反演草地 LAI 方法研究 [J]. 国土资源遥感, 2011(3): 61–66.
Li XH, Song XN, Leng P. A Quantitative method for grassland LAI inversion based on CHRIS/PROBA data [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2011(3): 61–66.
- [9] 韦玮. 基于多角度高光谱 CHRIS 数据的湿地信息提取技术研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
Wei W. Study on Wetland information extraction using multi-angle hyperspectral CHRIS image data [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [10] 李小梅. 多角度高光谱遥感森林类型分类方法研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
Li XM. Study on classification of forest types using multi-angle and hyperspectral remote sening [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2010.
- [11] 李晓敏, 张杰, 马毅, 任广波. 基于主成分分析和决策级融合的高光谱图像分类方法研究 [J]. 海洋科学, 2015, 39(2): 25–34.
Li XM, Zhang J, Ma Y, Ren GB. Research on the classification method of the hyper-spectral image based on principal component analysis and decision-level fusion [J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(2): 25–34.
- [12] 林培治. 福建长汀水土流失区马尾松种群动态及其机制研究 [D]. 福州: 福建师范大学, 2013: 23–25.
Lin PZ. Population dynamics and mechanism of *Pinus massoniana* Lamb. in the restoring ecosystem, Changting County of Fujian Province [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013: 23–25.
- [13] Chen JM, Leblanc SG. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture [J]. *IEEE T Geosci Remote*, 1997, 35(5): 1316–1337.
- [14] Zhu GL, Ju W, Chen JM, Gong P, Xing B, Zhu J. Foliage clumping index over China's landmass retrieved from the MODIS BRDF parameters product [J]. *IEEE T Geosci Remote*, 2012, 50(6): 2122–2137.
- [15] Chen JM, Leblanc SG. Multiple-scattering scheme useful for geometric optical modeling [J]. *IEEE T Geosci Remote*, 2001, 39(5): 1061–1071.
- [16] Hasegawa K, Matsuyama H, Tsuzuki H, Sweda T. Improving the estimation of leaf area index by using remotely sensed NDVI with BRDF signatures [J]. *Remote Sens Environ*, 2010, 114(3): 514–519.
- [17] 张霞, 张兵, 胡方超, 童庆禧. 航天成像光谱仪 CHRIS 辐射与光谱性能评价 [J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2006, 36(B07): 85–93.
Zhang X, Zhang B, Hu FC, Tong QX. Evaluation of CHRIS imaging radiation characteristics [J]. *Science in China (Seris E): Technological Sciences*, 2006, 36(B07): 85–93.