

基于 CHRIS/PROBA 的植被叶面积指数估算模型研究

曹建军^{1,2}, 顾祝军^{2*}, 徐建华¹, 刘永娟²

(1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 2. 南京晓庄学院生物化工与环境工程学院, 江苏南京 211171)

摘要 选用江西省余干县多角度高光谱遥感数据 CHRIS/PROBA, 提取了 5 种植被指数(VI), 即归一化植被指数(NDVI)、垂直植被指数(PVI)、调整土壤植被指数(MSAVI)、比值植被指数(RVI)、大气阻抗植被指数(ARVI), 与地面实测的植被叶面积指数进行了回归分析, 建立 300 个 LAI-VI 关系模型。结果表明: 在所有的模型中, 从 5 个角度来看, 0° 提取叶面积指数效果最好, $R^2 = 0.591$, $RMSE = 0.650$; -55° 提取叶面积指数效果最差, $R^2 = 0.551$, $RMSE = 0.821$; 从植被类型来看, 针阔林最好, 其次为阔叶林、灌木、针叶林和草地; 从植被模型种类来看, 指数模型好于一次回归模型; 从植被指数来看, PVI 最好, 其次为 MSAVI、NDVI、RVI、ARVI。在 LAI-VI 关系建模过程中, 基于多角度高光谱遥感数据提取植被指数, 有利于充分挖掘遥感影像信息, 能够提高 LAI 估算精度。

关键词 多角度; 高光谱; 植被指数; 叶面积指数; 模型

中图分类号 S126 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2013)02-00907-04

Estimation Models of Leaf Area Index (LAI) Based on Remote Sensing Image of CHRIS/PROBA

CAO Jian-jun et al (Key Lab of GIS of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract The ESA-mission CHRIS-PROBA (Compact High Resolution Imaging Spectrometer onboard the Project for On-board Autonomy) was used for providing space borne imaging spectrometer and multiangular data to assess the LAI. Five spectral vegetation indices (VI) were derived from CHRIS-PROBA image, including normalized difference vegetation index (NDVI), perpendicular vegetation index (PVI), modified soil adjusted vegetation index (MSAVI), ratio vegetation index (RVI), atmospheric resistance vegetation index (ARVI). Three hundreds LAI-VI correlation models were established. The VI-LAI correlation coefficients varied greatly across vegetation, vegetation indices, as well as image angular. In all models, from the perspective of angular, the best model is 0° image, $R^2 = 0.591$, $RMSE = 0.650$, the worst model is -55° image, $R^2 = 0.551$, $RMSE = 0.821$, from the perspective vegetation types, the best model is coniferous forest, followed by the broadleaf forests, shrubs, coniferous forests and grasslands, from the types of vegetation model, exponential model is better than one regression model, from the perspective vegetation index, the best model is PVI, followed by MSAVI, NDVI, RVI, ARVI.

Key words Multi-angular; Hyperspectral; Vegetation index; LAI; Model

目前, 已经发现的遥感资料和植被生物物理性质两者之间存在着相当大的关系^[1-8]。但为了尽量减少由于外部产生的变异因素, 如土壤底层、叶倾角分布和叶的光学特性, 遥感数据已被改造并进一步组合成各种光谱植被指数(VIs)^[9-10]。应用产生的植被指数可以估算植被叶面积指数(LAI)并取得了很好的效果。分析已有的研究不难发现, 影响冠层反射的因素主要有植被类型及相关光学性质、土壤背景反射率、大气环境质量等植物的生物物理和生物化学特性的变化, 这些方面对于植被指数与 LAI 的关系有一定的意义。在森林的研究上面大多数都是用一种或二种基础比率的植被指数来计算的, 如简单的比率或者归一化植被指数, 而计算结果大多从宽波段的遥感数据中得出。

对于一直作为遥感反演领域的热点和难点的 LAI, 国内外研究学者利用多光谱与高光谱遥感资料开展了大量研究。伴随着高光谱传感器的成功开发并使用, 又因其具有光谱分辨率高、资料量大、波段多、信息量丰富、谱像合一等优点, 固而对地物的识别能力更突出, 因此应用该数据来反演 LAI 的研究也逐渐增多。不仅如此, 多角度遥感也能够提供出植被辐射方向性信息以及隐含了植被立体结构特征, 因而可有效地提高森林 LAI 反演精度。随着以多角度成像光谱辐射计

MISR (multi-angle imaging spectrum radiometer) 和 CHRIS (compact high resolution imaging spectrometer) 紧凑型高分辨率成像光谱仪的发展, 可同时利用光谱维信息和多角度立体结构信息来增加模型反演过程中的先验知识, 改善因传统单一角度数据植被结构参数反演精度较低等一系列相关问题。

CHRIS/PROBA 是世界上目前唯一可以同时获得高光谱和多角度数据的星载传感器, 不仅有着众多的工作方式, 并且空间分辨率高, 光谱范围宽, 因而使得在生物物理、生物化学方面能收集到丰富的信息。另一个独特之处在于能一次性获取同一地点的 5 个不同角度的成像, 在估测植被或森林冠层结构、叶面积指数反演等研究中效果显著。世界上许多科学研究团队使用了 CHRIS/PROBA 数据后进行了各种各样的科学研究。但是对于使用 CHRIS/PROBA 数据在提取不同植被类型 LAI 方面的研究不是很多。为此, 笔者通过提取植被指数建立不同角度、不同植被类型 LAI 估算模型, 为更大范围的植被类型较为复杂地区 LAI 估算提供技术支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区自然概况 研究区位于江西省余干县大塘乡、三塘乡鄱阳湖的南岸地区(116°13'45"~116°54'24"E、28°21'36"~29°3'24"N), 面积约 278 km²。研究区主要为低山丘陵的地形, 乔木、灌木和草本植被大量分布于此, 采样区植被主要分布于低缓丘陵区。气候类型为亚热带湿润气候, 年平均气温 18 °C, 年平均降水量 1 341 mm, 降雨集中在 4~6 月份。马尾松和阔叶混交林存在于低陵和平原地区。在这项研究中, 主要有 5 个植被群落, 分别是草地、灌木、针叶林、阔叶

基金项目 国家自然科学基金项目(41071281); 江苏省高校自然科学基金项目(10KJD170005)。

作者简介 曹建军(1976-), 男, 陕西黄陵人, 讲师, 从事植物遥感研究, E-mail: jjucaol@163.com。* 通讯作者, 副教授, 博士, 从事植物遥感研究, E-mail: zhujungu@163.com。

收稿日期 2012-11-26

林、针阔林。主要植被采样点见表1。

表1 采样点主要植被

植被类型	采样主要植被
草地	<i>Dicranopteris dichotoma</i> , <i>Woodwardia japonica</i> , <i>Cahnia tristis</i> , <i>Paspalum notatum</i> , <i>Paspalum wetsteinii</i> , <i>Vetiveria nemoralis</i> , <i>Eriachne pallescens</i>
灌木	<i>Camellia oleifera</i> , <i>Rhododendron latoucheae</i> , <i>Lespedeza bicolor</i> , <i>Baekkea frutescens</i>
阔叶林	<i>Schima superba</i> , <i>Elaeocarpus decipiens</i> , <i>Cinnamomum camphora</i> , <i>Castanea mollissima</i> , <i>Liquidambar formosana</i> , <i>Eucalyptus spp.</i>
针阔林	<i>Pinus raassoniana</i> + <i>Schima superba</i> , <i>Pinus raassoniana</i> + <i>Cinnamomum camphora</i> , <i>Pinus raassoniana</i> + <i>Castanea mollissima</i>
针叶林	<i>Pinus raassoniana</i> , <i>Cunninghamia lanceolata</i>

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源。遥感影像采用的是 CHRIS/PROBA 数据,成像时间为 2008 年 5 月 20 日,选用红、红外和绿 3 个波段,空间分辨率均为 17 m。覆盖江西省余干县大塘乡、三塘乡鄱阳湖南岸,传感器的工作模式为陆地模式 3,共有 -55°、-36°、0°、36°、55° 5 个角度的 5 幅图像。此外,为便于实测样方的布局,选用 1:10 000 地形图作为基础资料。

1.2.2 LAI 地面实测。LAI 等参数的地面测量在 2011 年 5 月下旬一个晴朗无云的天气进行。由于地面测量比遥感成像时间延后 3 年,因此样方植被均选择无明显人工干扰且年季变化较小的植被。首先通过参考地形图、土地利用图、植被类型图和遥感影像目视判读的结果选取了 25 个样区,其

阔叶林、针阔混交林、针叶林、灌木和灌草样区分别为 6、4、4、5、6 个,每个样区布置样方 4 个,共 100 个样方。每个样方大小为 20 m × 20 m,使用仪器为 LAI-2000 植物冠层分析仪(美国 LI-COR 公司)。每个样方随机测量 6 个点,然后从仪器中读出的 LAI 平均值作为样方的 LAI 值(表 2)。样方的经纬度用 Starlink Invicta 210 型差分 GPS 接收仪(RAVEN Industries, INC. USA)测量。

表2 实测植被叶面积指数(LAI)统计(n=100)

植被类型	观测点数量	LAI 最小值	LAI 平均值	LAI 最大值	LAI 标准偏差
草地	39	0.10	2.82	5.32	1.26
灌木	8	0.72	2.21	5.20	1.37
阔叶林	11	0.57	4.99	8.11	2.09
针阔林	12	0.26	4.00	6.44	2.26
针叶林	30	0.62	1.92	4.54	1.32

1.2.3 图像预处理与植被指数提取。研究区的 5 个角度图像覆盖的范围并不一样。针对研究区的 CHRIS/PROBA 资料分别做了噪声去除、大气校正、正射校正等预处理工作。以 0° 图像为基准,在每幅图像中选取 20 个明显的检查点,然后与 0° 图像进行比较。每幅图像与 0° 图像的误差在 1 个像元内。再基于预处理好的 5 幅图像,分别提取归一化植被指数(NDVI)、垂直植被指数(PVI)、调节土壤植被指数(MSAVI)、比值植被指数(RVI)、大气阻抗植被指数(ARVI),其计算方法见表 3。

表3 选定的植被指数的概述

缩写	名称	公式	参考
NDVI	归一化植被指数	$(R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$	Rouse, Haas, Schell, Deering, & Harlan, (1974)
PVI	垂直植被指数	$\frac{\sqrt{(0.355R_{NIR} - 0.149R_{RED})^2 + (0.355R_{RED} - 0.852R_{NIR})^2}}{2}$	Richardson and Wiegand (1977)
MSAVI	调节土壤植被指数	$\frac{2R_{NIR} + 1 - \sqrt{(2R_{NIR} + 1)^2 - 8(R_{NIR} - R_{RED})}}{2}$	Qi, Chehbouni, Huete, Kerr, & Sorooshian, (1994)
RVI	比值植被指数	R_{NIR} / R_{RED}	Pearson and Miller (1972)
ARVI	大气阻抗植被指数	$\frac{R_{NIR} - (2R_{RED} - R_{BLUE})}{R_{NIR} + (2R_{RED} - R_{BLUE})}$	Kaufman and Tanre (1992)

表 3 中, NIR 和 RED 分别表示近红外和红波段, BLUE 表示蓝波段。共得到 25 幅植被指数图像,基于这些分别提取 100 个样方的植被指数。为减少位置偏移而带来的误差,以每个样方为中心、半径为 20 m 的地方画圆,以这个圆作为缓冲区,用缓冲区内的植被指数均值作为对应样方的植被指数值。遥感影像预处理和植被指数提取在通用遥感图像处理软件 ENVI 4.7 (Research Systems, Inc., USA) 中进行并获得。

1.2.4 LAI-VI 关系建模。在大多数研究中,提取叶面积指数时是通过线性或指数回归模型。在最近的研究中, Darvishzadeh 等使用 LAI 从 0 ~ 6 这个范围内的相同数据集进行研究,结果表明,线性回归和指数的关系已被证明能产生相同精度的 LAI,可以假设线性回归和指数可以用来模拟在这项研究中 LAI 与植被指数之间的关系。

为了建立和验证 LAI 估算模型:①先将 100 个实测资料分为建模用样方资料(M)和用于模型验证的样方数据(V)这

两个独立的数据集;②再将样方资料按植被类型排序后,根据“M-M-M-V-V”的顺序,选出属于 M 和 V 的样方分别为 60 和 40 个。对不同的植被样方,基于 NDVI、PVI、MSAVI、RVI、ARVI 与实测的 LAI 用最小二乘法建立单变量模型以及多变量模型。植被样方包括阔叶林、针阔混交林、灌木、针叶林、灌草共 5 种相对均质的植被类型样方。模型的拟合程度用 R² (决定系数) 和 RMSE (均方根误差) 来衡量, RMSE 的计算方法为:

$$RMSE = \left(\sum_{i=1}^n (e_i)^2 / N \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中, N 表示验证用样方数, e_i 为估算残差, 即样方 i 的 LAI 估算值与实测值之差。模型建立和验证使用软件 SPSS 17 (SPSS Inc, USA) 进行。回归分析一直是一个受欢迎的连接生物物理变量和提供这些连续估计的变量的遥感数据的一种实证方法。为了验证回归模型, 使用交叉验证程序。在交叉验证中, 每个样品都被剩下的样品估计。交叉验证方法的

好处是可以检测离群点并且能提供几乎无偏差的估计预测误差。

2 结果与分析

2.1 LAI-VI 关系模型 在 60 个建模样方资料的基础上,对 5 个角度图像的 5 种植被样方分别建立了 LAI 与 VI 的单变量模型和多变量模型。而每种植被样方分别建立 50 个单变量模型,所以共建立了 250 个单变量模型。所有单变量模型的决定系数 R^2 如表 4 所示。

从表 4 可以看出,模型的决定系数 R^2 因植被样方、模型种类、图像角度和植被指数类型的不同而不同。 R^2 最大的是 0° 角度图像的针阔林,植被指数是 PVI 的一元线性回归模型 (0.979),最小的是 0° 图像的草地,可见各种模型的拟合度差异较大。在 -55° 角度图像,针阔林 (0.961) > 阔叶林 (0.862) > 灌木 (0.672) > 针叶林 (0.419) > 草地 (0.360); 在

-36° 角度图像,针阔林 (0.975) > 阔叶林 (0.938) > 灌木 (0.645) > 草地 (0.520) > 针叶林 (0.343); 在 0° 角度图像,针阔林 (0.979) > 阔叶林 (0.919) > 灌木 (0.799) > 针叶林 (0.607) > 草地 (0.373); 在 36° 角度图像,针阔林 (0.947) > 阔叶林 (0.894) > 灌木 (0.797) > 针叶林 (0.600) > 草地 (0.352); 在 55° 角度图像,灌木 (0.906) > 阔叶林 (0.888) > 针阔林 (0.854) > 草地 (0.443) > 针叶林 (0.393), 这表明不同的植被结构影响着 LAI-VI 模型的可靠性。从模型种类来看,指数模型 EXP (0.586) > 一元线性模型 LIN (0.568)。从植被指数类型来看, PVI (0.652) > MSAVI (0.610) > NDVI (0.577) > RVI (0.538) > ARVI (0.508), 表明不同遥感信息在表征 LAI-VI 关系模型中的差异。从不同角度来看, 55° (0.609) > 0° (0.591) > 36° (0.572) > -36° (0.561) > -55° (0.551) 说明不同遥感角度对 LAI-VI 关系模型的影响。

表 4 LAI 的单变量模型 R^2

植被指数	模型种类	不同角度图像的 R^2														
		-55°					-36°					0°				
		GR	SH	BF	CB	CF	GR	SH	BF	CB	CF	GR	SH	BF	CB	CF
NDVI	LIN	0.196	0.422	0.799	0.961	0.352	0.224	0.420	0.855	0.975	0.288	0.105	0.472	0.847	0.917	0.553
	EXP	0.281	0.615	0.651	0.874	0.396	0.371	0.581	0.773	0.878	0.290	0.231	0.622	0.740	0.815	0.583
PVI	LIN	0.298	0.485	0.860	0.959	0.354	0.408	0.493	0.938	0.965	0.152	0.257	0.694	0.919	0.979	0.526
	EXP	0.360	0.672	0.734	0.934	0.419	0.520	0.645	0.784	0.906	0.182	0.373	0.799	0.902	0.924	0.581
MSAVI	LIN	0.221	0.444	0.862	0.961	0.365	0.293	0.456	0.895	0.972	0.232	0.140	0.611	0.900	0.956	0.572
	EXP	0.276	0.625	0.705	0.884	0.417	0.407	0.612	0.773	0.881	0.247	0.248	0.736	0.801	0.857	0.607
RVI	LIN	0.142	0.407	0.745	0.943	0.380	0.169	0.412	0.819	0.973	0.311	0.036	0.487	0.784	0.840	0.597
	EXP	0.190	0.591	0.557	0.843	0.413	0.273	0.573	0.677	0.860	0.298	0.118	0.635	0.592	0.740	0.599
ARVI	LIN	0.111	0.322	0.748	0.945	0.353	0.126	0.354	0.816	0.968	0.343	0.020	0.182	0.800	0.872	0.583
	EXP	0.166	0.482	0.603	0.836	0.378	0.235	0.531	0.755	0.846	0.315	0.091	0.321	0.662	0.759	0.585

植被指数	模型种类	不同角度图像的 R^2									
		36°					55°				
		GR	SH	BF	CB	CF	GR	SH	BF	CB	CF
NDVI	LIN	0.125	0.413	0.846	0.860	0.514	0.207	0.805	0.839	0.782	0.305
	EXP	0.235	0.588	0.809	0.764	0.534	0.341	0.876	0.837	0.701	0.361
PVI	LIN	0.250	0.652	0.881	0.947	0.564	0.325	0.860	0.880	0.884	0.311
	EXP	0.352	0.797	0.894	0.912	0.600	0.443	0.906	0.888	0.854	0.374
MSAVI	LIN	0.158	0.537	0.896	0.894	0.555	0.247	0.854	0.865	0.813	0.311
	EXP	0.253	0.694	0.859	0.809	0.577	0.362	0.896	0.857	0.743	0.369
RVI	LIN	0.061	0.400	0.799	0.748	0.563	0.167	0.838	0.814	0.683	0.314
	EXP	0.139	0.572	0.677	0.660	0.559	0.275	0.887	0.759	0.618	0.365
ARVI	LIN	0.033	0.156	0.792	0.797	0.536	0.110	0.751	0.826	0.725	0.352
	EXP	0.096	0.282	0.731	0.684	0.528	0.211	0.834	0.824	0.632	0.393

注:GR、SH、BF、CB、CF 分别代表草地、灌木、阔叶林、针阔叶、针叶林。

2.2 优选模型 在综合考虑模型的稳定性和精度后,对各个角度的图像和每种植被样方一共挑选出 25 个最优模型 (表 5)。这些优选模型的自变量包含 5 个角度的 5 种植被指数,即 NDVI、PVI、MSAVI、RVI、ARVI,由此可发现,不同角度遥感数据的植被指数在植被 LAI 遥感反演中具有一定的应用潜力。

在 25 个最优模型中,不同角度和不同植被类型模型有所不同,在 5 个角度图像中,草地植被类型最优模型为 0° 角度的图像,模型为: $LAI = 5.405826 \times NDVI + 100.655 \times PVI - 60.1715 \times MSAVI - 3.28959$, $R^2 = 0.7664$, $RMSE = 0.938$ 。

在 5 个角度图像中,灌木植被类型最优模型为 0° 角度图像,模型为: $LAI = 182.9888 \times PVI - 115.032 \times MSAVI - 5.55869$, $R^2 = 0.9307$, $RMSE = 0.411$ 。在 5 个角度图像中,阔叶林植被类型最优模型为 55° 角度图像,模型为: $LAI = 124.9 \times PVI - 19.006$, $R^2 = 0.8795$, $RMSE = 0.538$ 。在 5 个角度图像中,针阔林植被类型最优模型为 0° 角度图像,模型为: $LAI = 24.142 \times MSAVI - 0.9302$, 模型 $R^2 = 0.956$, $RMSE = 0.353$ 。在 5 个角度图像中,针叶林植被类型最优模型为 36° 角度图像,模型为: $LAI = -103.51 \times NDVI - 151.512 \times PVI + 254.8215 \times MSAVI + 15.9629$, $R^2 = 0.6387$, $RMSE = 0.972$ 。

从所有植被类型最优模型可以看出,多变量模型优于单变量模型,说明在反演叶面积指数时,多个植被指数组合的多变量模型具有更好的稳定性和准确度。从所有角度的模型可以看出,观测角度为 0° 的图像所得出的估算模型总体上要好于其他角度图像,因为 0° 观测角度更靠近于主平面。从植被

类型看,林地模型优于草地,在林地模型中,针阔林的模型最好,其次为阔叶林、针叶林。这表明林地反射率的各向异性,不同林地和不同观测角度下多次散射与LAI之间呈现弱的正相关。

表5 LAI的单变量和多变量模型

角度	植被类型	模型	R^2	RMSE
-55°	草地	$LAI = 94.988 \ 13 \times PVI - 46.254 \ 6 \times MSAVI - 3.067 \ 95$	0.540 6	1.236
	灌木	$LAI = 0.793 \ 7 \times \exp(9.199 \ 2 \times PVI)$	0.671 8	0.604
	阔叶林	$LAI = 48.285 \times MSAVI - 5.996 \ 9$	0.862 3	0.830
	针阔林	$LAI = 2.617 \ 1 \times RVI - 2.629 \ 3$	0.942 6	0.436
	针叶林	$LAI = 27.486 \times PVI - 2.605 \ 9$	0.353 7	0.998
-36°	草地	$LAI = 4.7761 \ 8 \times NDVI = 120.298 \ 5 \times PVI - 63.885 \ 8 \times MSAVI - 5.036 \ 35$	0.685 3	1.115
	灌木	$LAI = 0.790 \ 1 \times \exp(9.241 \times PVI)$	0.645 2	0.531
	阔叶林	$LAI = 51.81 \ 7 \times MSAVI - 6.344 \ 1$	0.895 3	0.604
	针阔林	$LAI = 10.25 \times ARVI + 0.208 \ 4$	0.9682	0.495
	针叶林	$LAI = 9.434 \ 5 \times ARVI - 1.302 \ 3$	0.3432	1.104
0°	草地	$LAI = 5.405 \ 826 \times NDVI + 100.655 \times PVI - 60.171 \ 5 \times MSAVI - 3.289 \ 59$	0.766 4	0.938
	灌木	$LAI = 182.988 \ 8 \times PVI - 115.032 \times MSAVI - 5.558 \ 69$	0.930 7	0.411
	阔叶林	$LAI = 31.169 \times MSAVI - 3.054 \ 9$	0.899 7	0.787
	针阔林	$LAI = 24.142 \times MSAVI - 0.930 \ 2$	0.956 0	0.353
	针叶林	$LAI = 0.072 \ 3 \times \exp(18.189 \times PVI)$	0.580 5	0.759
36°	草地	$LAI = 111.633 \ 9 \times PVI - 57.591 \ 1 \times MSAVI - 3.522 \ 88$	0.689 7	1.094
	灌木	$LAI = 170.604 \times PVI - 99.934 \times MSAVI - 5.791 \ 2$	0.905 5	0.905
	阔叶林	$LAI = 38.299 \times MSAVI - 4.844 \ 1$	0.896 4	0.768
	针阔林	$LAI = 26.086 \times MSAVI - 0.924 \ 9$	0.89 42	0.484
	针叶林	$LAI = -103.51 \times NDVI - 151.512 \times PVI + 254.821 \ 5 \times MSAVI + 15.796 \ 29$	0.638 7	0.972
55°	草地	$LAI = 12.0591 \ 2 \times NDVI + 187.270 \ 5 \times PVI - 115.519 \times MSAVI - 9.500 \ 23$	0.652 7	1.294
	灌木	$LAI = 48.312 \times PVI - 2.6449$	0.859 9	0.439
	阔叶林	$LAI = 124.9 \times PVI - 19.006$	0.879 5	0.538
	针阔林	$LAI = 99.964 \times PVI - 11.665$	0.883 7	0.678
	针叶林	$LAI = 0.100 \ 7 \times \exp(17.29 \times PVI)$	0.373 6	0.959

3 结论

本研究使用高光谱多角度遥感数据 CHRIS/PROBA 估算植被的LAI,得出以下结论:对于草地这种植被,效果最好的是 0° 角度图像,其模型的 R^2 为0.766 4, RMSE为0.938;效果最不好的是 -55° 角度图像,其模型的 R^2 为0.540 6, RMSE为1.23 6。对于灌木这种植被,提取LAI效果最好的是 0° 角度图像,其模型的 R^2 为0.930 7, RMSE为0.411;效果最不好的是 -36° 角度图像,其模型的 R^2 为0.645 2, RMSE为0.531。对于阔叶林植被,效果最好的是 55° 角度图像,其模型的 R^2 为0.879 5, RMSE为0.538。对于针阔林植被,效果最好的是 0° 角度图像,其模型的 R^2 为0.956, RMSE为0.353。对于针叶林植被,效果最好的是 36° 角度图像,其模型的 R^2 为0.638 7, RMSE为0.972;效果最差的是 -36° 角度图像,其模型的 R^2 为0.343 2, RMSE为1.104。

参考文献

- [1] BARET F, CHAMPION I, GUYOT G, et al. Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer[J]. Remote Sensing of Environment, 1987, 22(3): 367-378.
- [2] BROGE N H, LEBLANC E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf

- area index and canopy chlorophyll density[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 156-172.
- [3] ELVIDGE C D, CHEN Z. Comparison of broad-band and narrowband red and near-infrared vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 54(1): 38-48.
- [4] GILABERT M A, GANDIA S, MELIA J. Analyses of spectral biophysical relationships for a corn canopy[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(1): 11-20.
- [5] JACKSON R D, PINTER J P J. Spectral response of architecturally different wheat canopies[J]. Remote Sensing of Environment, 1986, 20(1): 43-56.
- [6] RONDEAUX G, STEVEN M D. Comparison of vegetation indices to retrieve vegetation cover from remotely sensed data: A simulation study for the ATSR-2 channels[C]// GUYOT G. Photosynthesis and remote sensing. Proc. Colloquium, Montpellier. EARSel, 1995: 237-242.
- [7] SCHLERF M, ATZBERGER C, HILL J. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 177-194.
- [8] WANG Q, ADIKU S, TENHUNEN J, et al. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(2): 244-255.
- [9] BARET F, GUYOT G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2): 161-173.
- [10] TURNER D P, COHEN W B, KENNEDY R E, et al. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(1): 52-68.