联合 MODIS 与 MISR 遥感数据估算叶面积指数

万华伟^{1,2}, 王锦地^{1*}, 梁顺林³, 秦 军⁴

1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875
2. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100029
3. 美国马里兰大学地理系, MD 20742
4. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085

摘 要 多光谱传感器 MODIS 与多角度传感器 MISR 同时搭载在美国 EOS 观测计划的 Terra 卫星上, 不同的观测方式使得两个传感器的数据组合后形成互补的多光谱多角度观测数据集, 为地表参数的遥感估算提供了更多的对地观测信息。该文通过研究组合 MODIS 与 MISR 两种观测数据估算陆地表面植被覆盖区域叶面积指数的方法, 发展了在物理模型反演的框架内引入基于伴随模型和信赖域优化的反演模式, 改进了叶面积指数的遥感估算效果, 提高了模型反演的运算速度。对试验区反演结果的验证说明融合两种数据源可以提高叶面积指数的估算精度。基于伴随模型和信赖域优化的地表参数反演方法, 为应用于大范围遥感图像数据的模型反演提供了一种有效的途径。

关键词 叶面积指数; 数据融合; 模型反演; 伴随方程

中图分类号: TP701, TP75 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)11-3106-06

引 言

叶面积指数(leaf area index, LAI)是描述植被生长状况的一个重要参数, 也是生态和气候模型中的主要参数之一, 其定义为单位地面面积上绿色叶子的单面面积之和^[1]。由 MODIS, MISR 和 VEGTATION 数据分别生成的全球 1 km 分辨率 LAI 产品已发布^[1,2], 但因这些数据产品的生成中只利用了单一传感器的数据, 产品在时空分布上存在的不连续性有待改进。而且不同的传感器数据产品研究组采用不同的反演算法, 或虽采用类似算法但不同传感器对地观测方式不同(如 MODIS 和 MISR), 最终得到了不同的 LAI 数据产品。这样, 相同时间、地点多种 LAI 遥感数据产品的不一致, 极大地影响着数据产品的有效应用。因此, 对不同卫星数据产品间的异同进行对比, 研究如何综合利用多种卫星数据源得到最佳的地表参数估算数据, 具有重要的研究意义和应用价值。

本文研究联合多光谱传感器 MODIS 和多角度传感器 MISR 数据反演 LAI 的方法, 以 BigFoot 项目 (<http://www.fsl.orst.edu/larse/BigFoot/index.html>) 中部分地面观

测站点为主要研究区, 采用站点所在区域的 MODIS 和 MISR 两种地表多光谱反射率数据, 增加对地表的遥感观测信息, 利用物理模型反演的方法改进研究区 LAI 估算精度。同时引入伴随模型提高反演的运算速度, 得到了试验区 LAI 反演结果图, 并基于站点地面观测和 ETM 数据估算的 LAI, 对 1 km 尺度 LAI 反演结果进行了对比验证。

1 试验区与数据分析

本文选取位于美国马里兰州的 BARC(美国农业部 Beltsville 农业研究中心)为试验区(39.03°N, 76.85°W)。该地区为典型的中纬度温带气候, 地表覆盖类型以阔叶林和阔叶农作物为主, 是 MODIS 数据产品的主要验证点之一^[3,4]。本研究采用的数据包括: (1)2000 年 5 月 11 日和 2001 年 4 月 28 日成像的两景 ETM 多光谱数据, 地面同步采样测量的不同地类 LAI^[5], 和由 ETM 图像估算的 LAI^[6]。(2)同期的多光谱 MODIS(C4 版)和 MISR 方向反射率数据及其 LAI 数据产品^[7,8]。数据处理中将 MODIS 和 MISR 数据进行投影转换到 ETM+ 的投影方式(UTM, 18N), 以 ETM 为底图, 将三种数据的配准误差控制在 1 个 MODIS 像元以内。

收稿日期: 2008-11-06, 修订日期: 2009-02-08

基金项目: 国家“973”计划项目(2007CB714407), 国家自然科学基金项目(40871163)和北京市自然科学基金项目(4083035)资助

作者简介: 万华伟, 女, 1981 年生, 环境保护部卫星环境应用中心筹备办公室工程师 e-mail: livelyhw@163.com

* 通讯联系人 e-mail: wangjd@bnu.edu.cn

从图 1 中可见该实验区 5 月份的 LAI 高于 4 月份,与当地作物生长规律相符,但三种传感器估算的 LAI 明显不一致,MISR LAI 产品在空间上不连续(如图 1(a)和(b)中的矩形空白区),MODIS 和 MISR LAI 产品中有很多高值区域,

MODIS LAI 与地面实测数据相比对林地 LAI 高估大约 2.0~3.0^[6]。而 ETM 估算 LAI 与地面实测数据相近,因此我们将 ETM LAI 聚合到 1km 像元,作为验证 LAI 估算结果的“真值”,具有较高的可信度。

Fig. 1 MISR/MODIS/aggregated ETM+ LAI in BARC
(a), (c), (e); April, 28, 2001; (b), (d), (f); May, 11, 2000

以 2001 年 4 月 28 日 MODIS, MISR 和 ETM 数据为例分析其特征。图 2 所示为 MODIS, MISR 成像时太阳方位和观测方向分布。由于 MODIS 为宽幅成像,整景图像中不同像元的观测方向随其在图像中的位置不同而变化,据统计约在图示的两个方向之间;而 MISR 的观测方位平面接近于主平面和垂直主平面之间;两种数据在观测方向上形成互补。对三种传感器质量高的公共区域波谱数据进行统计,可见不

同传感器数据信息量的差异(如表 1)。在蓝、绿和红波段反射率从高到低依次为 ETM, MISR, MODIS,而在近红外波段依次为 MODIS, MISR, ETM;在前 3 个波段 ETM 具有

Fig. 2 MISR/MODIS observing geometry
Black solid points from right to left are for the 9 MISR sensors, red hollow points are for MODIS observing and cross point in the left-upper are the sun position

Fig. 3 Mean and variance of MISR reflectance of 4 spectral bands
(a); Blue band; (b); Green band; (c); Red band; (d); NIR band

Table 1 Comparison of MISR/MODIS/ETM reflectance, mean and variance(in bracket)			
波段	MISR(近天顶)	ETM	MODIS
蓝	0.039(0.012)	0.049(0.025)	0.031(0.011)
绿	0.081(0.016)	0.091(0.029)	0.073(0.016)
红	0.068(0.024)	0.085(0.042)	0.060(0.024)
近红外	0.253(0.078)	0.229(0.078)	0.285(0.094)

较大的方差,在近红外波段 MODIS 数据的方差较大;对 MISR 数据 9 个观测方向的反射率均值和方差作图 3。因此,联合两种数据可构成光谱和方向信息更丰富的观测数据集。

2 LAI 估算方法与关键步骤

遥感估算 LAI 的方法可有:物理模型法、统计方法和混合反演方法等^[9],本文采用基于物理模型的反演流程见图 4。其中,输入的 MODIS 和 MISR 遥感数据为经过大气纠正后的地表方向反射率;前向物理模型采用 Kuusk 模型;反演代价函数定义为

$$J(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} (\text{Kuusk}_{ij}(X) - r_{ij})^2 \quad (1)$$

这里, n 是观测方位数, m 是波段数, w_{ij} 是权重, r_{ij} 为观测数据, X 为待反演参数集, $\text{Kuusk}_{ij}(X)$ 是 Kuusk 模型计算的植被冠层反射率。反演中调整地表参数集输入前向模型计算地表反射率并与观测数据比较,将使代价函数最小的参数集作为最终反演结果。

Fig. 4 The flow chart of LAI inversion by combining MODIS and MISR data

2.1 Kuusk 模型及其伴随模型实现

本文采用的前向模型为 Kuusk 模型的最新版本 MCRM2,是在 MCRM(markov chain reflectance model)上的扩展,可模拟具有双层结构均匀植被冠层的方向反射特性,该模型耦合了叶片反射率模型 PROSPECT 和土壤反射率模型 PRICE,考虑了土壤的非朗伯特特性、叶片的镜面反射、植被冠层的热点效应以及双参数的叶倾角分布,本文采用的模型输入参数包括环境参数、叶片参数和土壤背景参数^[10]。

在迭代反演过程中,因很难对复杂的 MCRM2 模型进行直接求导运算,用伴随模型计算代价函数的梯度。一个数学模型的伴随模型可以通过多种方法得到,包括解析表达式、数字方案和计算机代码层次。本文引用秦军等发展的 Kuusk 模型的伴随模型^[11],使用自动微分软件包 TAPENADE (<http://tapenade.inria.fr:8080/tapenade/form.jsp>),在程序代码层次上通过伴随模型得到方向反射率对 LAI 的导数,实现了对式(1)求代价函数极小值的运算。

2.2 基于信赖域的优化算法

为了保证变量优化过程中的全局最优同时提高反演速度,本文引入了基于信赖域的优化算法。信赖域方法起源于

Powell 的工作^[12],关键思想是在求解无约束优化问题时,在每次迭代时强制性地要求新的迭代点与当前的迭代点之间的距离不超过某一控制步长,以克服传统的线搜索方法中因步长过大而导致算法失败的问题^[13]。控制步长实质上等价于在以当前迭代点为中心的一个邻域内对一个近似于原问题的简单模型求极值,可理解为只在一个邻域内对近似模型信赖,此邻域被称为信赖域(trust region),利用这一技巧的优化方法也就被称为信赖域法。

本研究将约束优化算法^[14,15]与信赖域的方法相结合,通过前向 Kuusk 模型的伴随模型得到代价函数中所需要的梯度和 Hessian 矩阵,在处理大范围遥感图像尺度 LAI 反演时,可通过设置迭代初值和参数取值步长引入了先验知识。基于信赖域的约束优化算法,在极小化代价函数过程中保证了多参数同时反演结果的全局最优化和程序运行速度,并避免了迭代过程中因参数变化步长太大而导致算法失败的现象。

2.3 参数敏感性分析和反演策略

在反演算法研究中,首先基于不确定性敏感性矩阵(USM)^[16]计算多光谱多角度 MODIS, MISR 数据对于模型参数的敏感性,据此选出受大气影响小并对参数敏感的观测数据集进行 LAI 反演。从对 USM 的分析中发现, LAI 对红光和近红外波段数据较为敏感;叶绿素含量(Cab)的信息主要反映在 3 个可见光波段;叶片结构参数 N 控制叶片的反射率和透射率之间的比例,因而对可见光和近红外波段都比较敏感;MODIS 数据在天顶角 10°左右的观测对于参数敏感性要高于 MISR 的大角度观测,等等。

我们依据敏感性分析的结果制定适用的反演策略,选取大气状况参数 Beta, LAI, 热点参数 Hotpot, 叶绿素含量 Cab, 叶片结构参数 N, 土壤模型的输入参数 Rsl1 这 6 个参数为待反演参数,采用不同观测数据集进行反演:(1)在仅用 MODIS 的 7 个波段观测数据时,为保证观测数据量,不进行光谱波段选择,所有观测数据均参与反演。(2)只用 MISR 观测数据时,考虑到 MISR 传感器具有 4 个光谱波段、9 个观测方向共 36 个多光谱观测数据,方向相近引起观测数据之间的相关性较高,去掉易受到大气影响而含一定噪音的蓝波段和绿波段数据,选用红波段和近红外波段接近天顶方向的各 5 个观测,共 10 个敏感观测反演。(3)组合 MODIS 和 MISR 两种数据时,采用 MODIS 的 1, 2, 5, 6, 7 波段(去除了容易受大气影响的蓝波段和绿波段)、MISR 的红光和近红外波段各 5 个接近天顶方向的敏感数据,共 15 个观测数据进行反演。

3 反演结果与分析

本节比较采用单个传感器和联合两种传感器数据的反演结果。按照反演策略选择观测数据,对配准后的 MISR 和 MODIS 多角度观测数据集进行逐像元的 LAI 反演,得到反演结果见图 5;所对应图像的直方图统计结果,及其与 MISR 和 MODIS LAI 产品、作为验证真值的 ETM LAI 估算结果直方图的比较见图 6。结果表明,采用本文方法反演的 LAI

在空间连续性上比图 1 所示的 MODIS 和 MISR LAI 产品均有改进,变化规律与“真值”接近。直方图统计结果也显示,联合两种传感器数据反演的 LAI 最接近 ETM 聚合以后的 LAI,而利用某单一传感器数据反演的 LAI 整体分布比真值偏低。

为进一步验证反演结果,又将估算 LAI 按地表分类进行

统计,得到各类的均值和方差见表 2。从反演结果的对比中可见,MISR 的 LAI 产品对每种地表类别均高估了 LAI,而 MODIS 的 LAI 产品则明显地对林地和稀疏草原的 LAI 估计值较高。采用本文方法,由单一传感器数据反演的 LAI 与真值相比都有改进,联合两种传感器数据反演的 LAI 值更接近真值。对方差的统计显示 MISR LAI 产品具有较大的方差,

Fig. 5 The inversion result by MODIS, MISR and combined data
(a): MISR; (b): MODIS; (c) Combined data

Fig. 6 The histogram of MODIS/MISR/ETM LAI and retrieved LAI by MODIS, MISR and combined data
(a): MISR LAI Product; (b): MODIS LAI Product; (c): Estimated ETM LAI; (d): Retrieved LAI by MISR;
(e): Retrieved LAI by MODIS; (f): Retrieved LAI by combined data

Table 2 The mean and variance of MODIS, MISR LAI product and inversion result of different land cover

类别	MISR LAI	MODIS LAI	ETM LAI(“真值”)	MISR 单独反演	MODIS 单独反演	MODIS, MISR 联合反演
草地	3.56(2.11)	1.47(0.33)	1.97(0.96)	1.58(0.43)	1.62(0.56)	1.88(0.52)
灌木	2.50(2.03)	1.76(0.91)	1.81(1.09)	1.36(0.49)	1.47(0.58)	1.67(0.57)
农作物	2.84(2.20)	1.57(0.47)	1.89(1.09)	1.45(0.50)	1.50(0.57)	1.75(0.56)
稀疏植被	3.73(2.03)	4.06(1.17)	1.97(0.87)	1.62(0.41)	1.69(0.57)	1.92(0.52)
阔叶林	3.39(1.95)	4.75(1.06)	1.93(0.82)	1.58(0.43)	1.69(0.61)	1.86(0.58)
针叶林	2.87(2.07)	4.50(1.69)	1.75(0.91)	1.42(0.54)	1.53(0.63)	1.69(0.63)

采用本文方法的反演结果有明显改进。

4 结论与讨论

本文收集了 BARC 实验区的多光谱多角度 MODIS 和 MISR 数据, 和用地面实测数据验证的 ETM LAI 估算值, 比较了现行不同 LAI 产品间的差异, 提出了联合两种多光谱多角度遥感观测数据和物理模型反演 LAI 的新方法, 由单一或两种传感器数据反演了 LAI, 并用与“真值”和直方图对比方法结果进行了分析评价, 结论如下:

(1) 通过融合多光谱 MISR 数据和 MODIS 数据, 可以得到更完整的多光谱多角度观测数据, 联合两种数据的 LAI 反演结果在空间上连续性更好, 也更接近基于站点地面观测验证的 ETM 数据估算结果, 尤其对于草地、农田和稀疏植被的改进较大。

(2) 基于伴随模型和信赖域优化算法, 可解决多光谱遥

感图像数据反演的运算速度问题, 而且该优化算法中可以通过设定参数的先验值作为迭代过程中的初值, 从而可以在遥感模型反演中有效地融入先验知识。

(3) 联合多源数据反演时需要注意待反演参数和观测数据的选择, 由于多角度观测中的角度间的强相关性, 如果全部同时用在反演中, 不仅造成反演速度下降, 而且不能使所有信息有效传递到参数中, 基于 USM 的波段选择方法, 可以有效地选取信息量大的观测波段组合进行反演。

联合 MODIS 与 MISR 两种数据, 因增加了观测数据的信息量而改进了 LAI 估算结果, 但对不同传感器数据提供的信息在反演过程中信息传递的定量化计算还需研究。另外, 对 1 km 尺度 LAI 的“真值”获取方法也还可改进。

致谢: 文中所用由 ETM 数据估算的 LAI 由美国马里兰大学方红亮(Dr. Hong-liang Fang)博士提供, 并得到他的有益讨论, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, et al. Remote Sens. Environ., 2002, 83: 214.
- [2] Knyazikhin Y, Martonchik J V, Diner D J, et al. J. Geophys. Res., 1998, 103: 32; 239.
- [3] Liang S, Fang H, Townshend J, et al. Data Assimilation Method for Improving Estimation of Land Surface Variables from Satellite Observations. In: The 9th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing (ISPMSRS), Beijing, 2005.
- [4] Morisette J T, Baret F, Privette J L, et al. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2006, 44(7): 1804.
- [5] Fang H, Liang S, Kuusk A. Remote Sens. Environ., 2003, 85: 257.
- [6] Fang H, Liang S. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2003, 41(9): 2052.
- [7] Myneni R B, Nemani R R, Running S W. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1997, 35(6): 13803.
- [8] Knyazikhin Y, Martonchik J V, Myneni R B, et al. J. Geophys. Res., 1998, 103(D24): 32; 257.
- [9] Fang H, Liang S. Remote Sens. Environ., 2005, 94: 405.
- [10] Kuusk A. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2001, 71(1): 1.
- [11] Qin J, Liang S, Li X, et al. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2008, 46(7): 2028.
- [12] Powell M J D. A Fast Algorithm for Nonlinearly Constrained Optimization Calculations. Numerical Analysis, Proceedings, Biennial Conference, Dundee, 1977.
- [13] Fletcher R. Practical Methods of Optimization. Chichester: John Wiley & Sons, 1981.
- [14] Zhou J L, Tits A L, Lawrence C T. User's Guide for FFSQP Version 3. 7: A FORTRAN Code for Solving Constrained Nonlinear (Minimax) Optimization Problems, Generating Iterates Satisfying All Inequality and Linear Constraints. 1997.
- [15] QI Xue-feng, FAN Ding(戚雪峰, 樊丁). Computer Simulation(计算机仿真), 2004, 21(5): 53.
- [16] LI Xiao-wen, GAO Feng, WANG Jin-di, et al(李小文, 高峰, 王锦地, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 1997, 1(1): 5.

Estimating Leaf Area Index by Fusing MODIS and MISR Data

WAN Hua-wei^{1,2}, WANG Jin-di^{1*}, LIANG Shun-lin³, QIN Jun⁴

1. School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 100875, China
2. Environment Satellite Center, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Beijing 100029, China
3. Department of Geography, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA
4. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract Moderate-resolution imaging spectrometer (MODIS) and multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) are two important sensors on TERRA satellite. The authors can have more spectral and multi-angular observations on the land surface objects by combining these two datasets. In the present paper, both MODIS and MISR observations were combined to estimate leaf area index (LAI) of land surface. The adjoining model and trust-region optimal algorithm were introduced into the framework of physical model inversion to speed up the running of the model inversion algorithm. And the algorithm allows the prior knowledge on the retrieved parameters to be input into the inversion procedure. The uncertainty and sensitivity matrix (USM) based analysis is helpful for selecting the observed data subset with more information and less noise to retrieve LAI. The measured LAI in situ and estimated LAI from ETM data were scaling-up to MODIS/MISR LAI product scale, and were taken as the ground truth to evaluate the new approach. The result suggests that combining two sensors datasets can improve the accuracy of LAI estimation, and the developed inversion method in this paper can be applied to the large area remote sensed image data effectively.

Keywords Leaf area index; Data fusion; Model inversion; Adjoining equation

(Received Nov. 6, 2008; accepted Feb. 8, 2009)

* Corresponding author

作者: 万华伟, 王锦地, 梁顺林, 秦军
作者单位: 万华伟(北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 北京, 100875; 环境保护部卫星环境应用中心, 北京, 100029), 王锦地(北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 北京, 100875), 梁顺林(美国马里兰大学地理系, MD, 20742), 秦军(中国科学院青藏高原研究所, 北京, 100085)
刊名: 光谱学与光谱分析
英文刊名: SPECTROSCOPY AND SPECTRAL ANALYSIS
年, 卷(期): 2009, 29(11)
被引用次数: 2次

参考文献(16条)

1. Myneni R B; Hoffman S; Knyazikhin Y [查看详情](#) 2002
2. Knyazikhin Y; Martonchik J V; Diner D J [查看详情](#) 1998
3. Liang S; Fang H; Townshend J [Data Assimilation Method for Improving Estimation of Land Surface Variables from Satellite Observations](#) 2005
4. Morisette J T; Baret F; Privette J L [查看详情](#) 2006(07)
5. Fang H; Liang S; Kuusk A [查看详情](#) 2003
6. Fang H; Liang S [查看详情](#) 2003(09)
7. Myneni R B; Nemani R R; Running S w [查看详情](#) 1997(06)
8. Knyazikhin Y; Manonchik J V; Myneni R B [查看详情](#) 1998(D24)
9. Fang H; Liang S [查看详情](#) 2005
10. Kuusk A [查看详情](#) 2001(01)
11. Qin J; Liang S; Li X [查看详情](#) 2008(07)
12. Powell M J D A [A Fast Algorithm for Nonlinearly Constrained Optimization Calculations](#) 1977
13. Fletcher R [Practical Methods of Optimization](#) 1981
14. Zhou J L; Tits A L; Lawrence C T [User's Guide for FFSOP Version 3.7: A FORTRAN Code for Soling Constrained Nonlinear \(Minimax\) Optimization Problems](#) 1997
15. 戚学峰; 樊丁 [查看详情](#) 2004(05)
16. LI Xiao-wen; GAO Feng; WANG Jin-di [查看详情](#) 1997(01)

本文读者也读过(10条)

1. 刘洋, 刘荣高, 刘纪远, 陈仲新, 王利民, 邹金秋 [基于MODIS数据反演作物叶面积指数](#)[会议论文]-2008
2. PROSAIL冠层光谱模型遥感反演区域叶面积指数[期刊论文]-[光谱学与光谱分析](#)2009, 29(10)
3. 方秀琴, 张万昌 [叶面积指数\(LAI\)的遥感定量方法综述](#)[期刊论文]-[国土资源遥感](#)2003(3)
4. 蒙继华, 吴炳方, 李强子, Meng Jihua, Wu Bingfang, Li Qiangzi [全国农作物叶面积指数遥感估算方法](#)[期刊论文]-[农业工程学报](#)2007, 23(2)
5. 杨晓华, 黄敬峰, 王秀珍, 王福民, YANG Xiao-hua, HUANG Jing-feng, WANG Xiu-zhen, WANG Fu-min [基于支持向量机的水稻叶面积指数高光谱估算模型研究](#)[期刊论文]-[光谱学与光谱分析](#)2008, 28(8)
6. 马茵驰, 阎广建, 丁文, 王跃智, Ma Yinch, Yan Guangjian, Ding Wen, Wang Yuezhi [基于人工神经网络方法的冬小麦叶面积指数反演](#)[期刊论文]-[农业工程学报](#)2009, 25(12)
7. 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研究](#)[期刊论文]-[北京林业大学学报](#)2004, 26(6)

8. [茅荣正](#) [基于Landsat图像的LAI信息提取研究](#)[学位论文]2004
9. [王希群](#), [马履一](#), [贾忠奎](#), [徐程扬](#), [WANG Xiqun](#), [MA Luyi](#), [JIA Zhongkui](#), [XU Chengyang](#) [叶面积指数的研究和应用进展](#)[期刊论文]-[生态学杂志](#)2005, 24(5)
10. [刘伟东](#), [项月琴](#), [郑兰芬](#), [童庆禧](#), [吴长山](#), [LIU Wei-dong](#), [XIANG Yue-qin](#), [ZHENG Lan-fen](#), [TONG Qing-xi](#), [WU Chang-shan](#) [高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析](#)[期刊论文]-[遥感学报](#)2000, 21(4)

引证文献(3条)

1. [陈瀚阅](#), [黄文江](#), [牛铮](#), [高帅](#) [基于几何光学模型的人工林叶面积指数遥感反演](#)[期刊论文]-[地球信息科学学报](#) 2012(3)
2. [苗乃哲](#), [姚顽强](#), [黄文江](#), [徐新刚](#), [张东彦](#), [任鹏](#) [主成分变换方法在叶面积指数反演中的应用分析](#)[期刊论文]-[安徽农业科学](#) 2012(8)
3. [赖日文](#), [刘健](#), [许章华](#), [汪琴](#) [基于HJ-1马尾松叶面积指数的遥感反演](#)[期刊论文]-[农业机械学报](#) 2014(3)

引用本文格式: [万华伟](#), [王锦地](#), [梁顺林](#), [秦军](#) [联合MODIS与MISR遥感数据估算叶面积指数](#)[期刊论文]-[光谱学与光谱分析](#) 2009(11)