

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

张 瀛^{1, 2, 3}, 孟庆岩^{1, 2*}, 武佳丽⁴, 赵 峰⁵

1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院遥感应用研究所, 北京师范大学, 北京 100101
2. 国家航天局航天遥感论证中心, 北京 100101
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039
4. 中国科学院力学研究所, 北京 100190
5. 北京航空航天大学, 北京 100191

摘 要 利用 PROSAIL 前向模型模拟的植被冠层光谱, 在植被指数构造时, 引入修正大气、土壤背景影响的蓝、绿波段, 构建了避免过早饱和的环境植被指数(environmental vegetation index, EVI)。基于多个典型冬小麦生育期的地面观测数据, 建立基于 EVI+LAI 长时间序列反演模型, 并对模型进行不同品种间的交叉检验。研究表明, EVI 建立的叶面积指数(leaf area index, LAI)反演模型精度优于同类植被指数模型, 并具有较好的普适性, 能应用于冬小麦遥感多时相长势监测及 LAI 反演。

关键词 光谱; 环境植被指数; 模型; 交叉检验; LAI

中图分类号: TP79 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)10-2789-05

引 言

叶面积指数(leaf area index, LAI)是单位地表面上单位叶面面积总和^[1], 它对植物光合作用和能量交换具有重要意义。遥感反演叶面积指数的方法大致分为两类, 即经验模型方法和物理模型方法。目前常用的 LAI 遥感反演方法主要是利用植被指数与 LAI 相关关系建立的经验反演法^[2-4]。然而, 植被指数普遍存在土壤背景及大气效应对其影响, 同时又容易忽略饱和现象与地物二向性反射的基本特征, 这正是植被指数法反演的主要缺点。

本研究在植被指数设计时, 针对我国自主研发的环境星 CCD 载荷波段特点及对冬小麦 LAI 变化的响应能力, 引入蓝、绿波段修正大气、土壤背景影响来提高 LAI 对植被指数的敏感性。结合 PROSAIL 前向模型模拟光谱数据与地面同步测量数据, 研制出适合于环境星 CCD 数据(HJ-CCD)的环境植被指数(EVI)。分析各类 EVI 对 LAI 的敏感性及相关性, 优选出适合于 E-CCD 数据的最佳 EVI, 建立优化的 LAI 估算模型, 并应用于遥感反演。

1 研究方法

本研究的技术路线如图 1 所示。

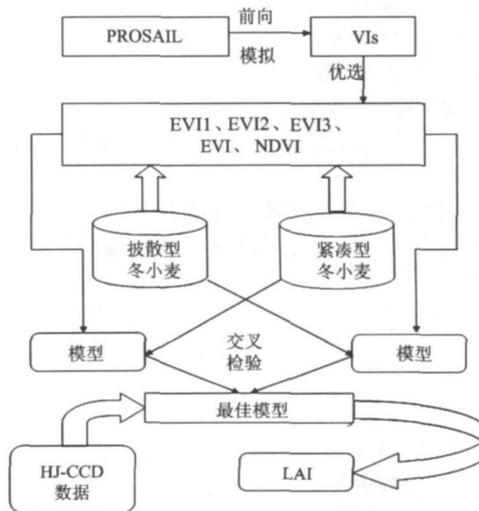


Fig 1 Technical route

收稿日期: 2010-12-10, 修订日期: 2011-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971227), 科技部国际科技合作与交流专项项目(2010DFA21880)和中国博士后科学基金项目资助
作者简介: 张 瀛, 1986年生, 中国科学院研究生院硕士研究生 e-mail: zhangying3662273@163.com

* 通讯联系人 e-mail: mq@irsa.ac.cn

1.1 试验设计

在小汤山精准农业示范基地选取了三种株型冬小麦品种进行实验,即紧凑型品种京冬 13、披散型品种京 9428 以及中间型农大 195。3 个试验区东西长 90 m,南北长 56 m,并将实验区划分为等长等宽的 3 个小区,分别播种京冬 13、京 9428、农大 195。在每个小区中选取长势均匀的 8 个样本点,定点测量了 2010 年 4 月至 2010 年 6 月不同小麦生育期的冠层光谱反射率、结构参数、生理生化参数及 LAI。

1.2 光谱反射率数据与 LAI 测量

采用美国 ASD 光谱仪对关键生育期的小麦冠层进行反射率测定,并同步测定小麦叶面积指数、结构参数及理化参数。观测选择在晴朗无风天气的北京时间 12:00 左右进行。

1.3 遥感数据预处理

使用环境星 HJ1A CCD1 2 级数据,数据经过辐射定标、大气校正、几何精校正后得 4 个波段的地表反射率。大气校正采用 6S 模型;几何精校正基于中国 TM 参考影像数据库,采用二次多项式法进行,纠正误差控制在 0.5 个像元^[5]。

2 数据分析

2.1 基于 PROSAIL 模型的冠层光谱模拟

PROSAIL 模型是将 PROSPECT 模型耦合到 SAIL 模型中反演整个冠层生化组分含量的耦合模型^[6]。模型的输入包括:冠层生理生化参数、土壤参数和其他参数。

本研究对冠层生理生化参数的设置参考 LOPEX' 93 (leaf optical properties experiment) 数据库^[7]、我国典型地物波谱知识库及试验地取样分析结果,土壤背景由小汤山试验同步测得,LAD 根据以往研究者的经验并结合实际测量,选择为球形分布结构参数 N 设为经验值 1.5。

2.2 利用模拟光谱反射率构建环境植被指数(EVI)

在以往 LAI 反演研究中,归一化植被指数被广泛应用,其定义为

$$NDVI = (NIR/RED - 1)/(NIR/RED + 1) \quad (1)$$

然而,NDVI 会在高植被覆盖时出现饱和现象。考虑到 NDVI 存在的缺陷,Liu 和 Huete 提出了综合处理土壤、大气、饱和问题的增强型植被指数,其表达式为

$$EVI = \frac{2.5(NIR - RED)}{NIR + C_1 \times RED - C_2 \times BLUE + L} \quad (2)$$

式中,NIR,RED 和 BLUE 分别为经过大气校正的反射值。 $L=1$,为土壤调节参数,参数 C_1 和 C_2 分别为 6.0 和 7.5,通过 BLUE 来修正大气对 RED 的影响^[8]。

分析环境一号星的 CCD 相机的光谱响应因子,计算出环境星 CCD 数据 4 个波段的反射率,即

$$\rho_i = \frac{\sum_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} r(\lambda) \Phi_i(\lambda)}{\sum_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} \Phi_i(\lambda)} \quad (3)$$

式中, ρ_i 为波段 i 的反射率; λ_{i1} 是波段 i 的起始波长, λ_{i2} 是波段 i 的终止波长; $r(\lambda)$ 为波长 λ 处反射率值; $\Phi_i(\lambda)$ 为波段 i 在波长 λ 处光谱响应因子^[9]。

针对环境星波段特征,在构造 EVI 时引入反映植被长

Table 1 HJ-1A CCD camera band distribution

波段	范围/ μm	波段	范围/ μm
B01	0.45~0.52 蓝	B02	0.52~0.59 绿
B03	0.63~0.69 红	B04	0.77~0.89 近红

势、叶绿素浓度变化的绿色植被反射波段 GREEN,增强植被与土壤背景之间的辐射差异,其表达式为

$$EVI = \frac{C_1(NIR - RED)}{C_2 GREEN + C_3 RED - C_4 BLUE + C_5} \quad (4)$$

式中,参数 C_i 为经验系数。在参数确定时, C_1 作为变量,其余 4 个参数赋予初始值 1 不变, C_1 以 0.5 为步长在 1~9 范围间改变,即可得到不同 C_1 下 EVI 的光谱曲线,选择拟合效果最佳的 C_1 ,确定为参数值;同理即可得到其余 4 个参数值。

针对环境星 CCD 载荷波段设置特征,以 PROSAIL 前向模型模拟的反射率数据构建适合于环境星的 3 个 EVI,其表达式如下

$$EVI1 = (NIR - RED)/(GREEN - BLUE) \quad (5)$$

$$EVI2 = \frac{2(NIR - RED)}{GREEN + 6RED - 7.5BLUE + 1} \quad (6)$$

$$EVI3 = \frac{2(NIR - RED)}{7GREEN - 7.5BLUE + 0.9} \quad (7)$$

图 2 为各植被指数与叶面积指数间的关系对比分析。

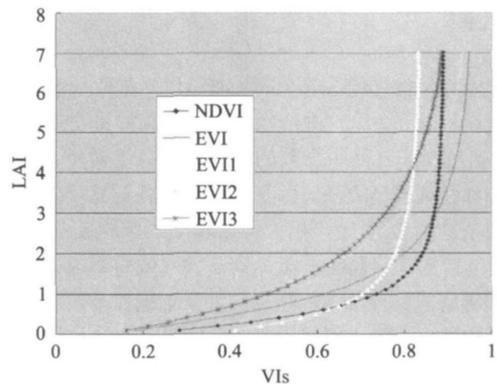


Fig 2 SAIL VIs simulate and the relationship between VIs and LAI

由图 2 可见,EVI2 和 EVI3 的拟合效果明显优于 NDVI,有效避免了饱和现象的过早出现,提高了 LAI 对植被指数的敏感性。因此,本文针对 EVI3, EVI2 和 NDVI 与 LAI 的相关性开展了深入研究。

3 基于环境植被指数的 LAI 反演模型构建

本文根据实测 LAI 与冠层光谱数据,计算前文分析的 NDVI, EVI2 和 EVI3,表 2 给出部分实测建模数据。

本研究以直立型冬小麦京 9428 和披散型冬小麦京冬 13 为研究对象,建立 LAI 与 VI 的回归模型,并对模型进行品种间的交叉检验。图 3 为建立的关系模型。

由植被指数与 LAI 相关性所建立的估算模型及交叉检

Table 2 Parts of simulating data

冬小麦京冬 13				冬小麦京 9428			
LAI	NDVI	EVI2	EVI3	LAI	NDVI	EVI2	EVI3
1.33	0.672554	0.271318	0.282612	1.46	0.675038	0.303156	0.312683
2.79	0.889287	0.561558	0.542258	1.93	0.724262	0.338905	0.338136
2.62	0.843022	0.469926	0.454003	2.05	0.762700	0.411181	0.407275
...
2.38	0.886196	0.591519	0.568389	2.70	0.847008	0.530977	0.511763
2.27	0.796591	0.436337	0.416544	3.02	0.851967	0.548874	0.508791
3.59	0.869248	0.585267	0.564418	3.56	0.867207	0.564899	0.536729
...

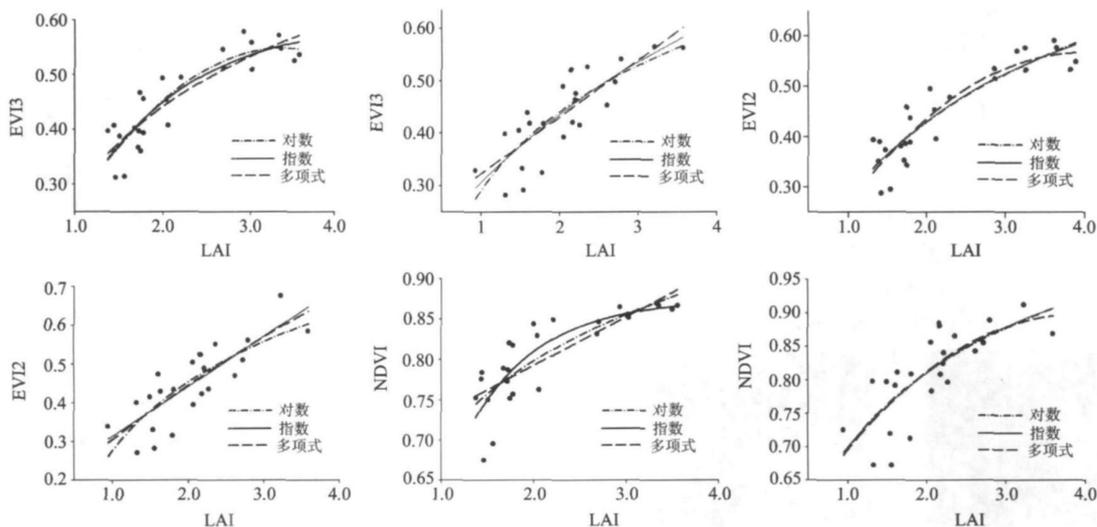


Fig 3 LAI-VI regression analysis

Table 3 Relationship model and cross-validation result

植被指数	模型建立(京 9428)(N = 32)			模型检验(京冬 13)(N = 32)	
	关系模型	R ²	RM SE	R ²	RMSE
EVI3	$y = 0.2366 \ln(x) + 0.2798$	0.8174	0.4231	0.8012	0.4412
	$y = -0.0539x^2 + 0.3622x - 0.0542$	0.8592	0.4052	0.8241	0.4103
	$y = 0.2745e^{0.2213x}$	0.8209	0.4195	0.8120	0.4232
EVI2	$y = 0.2715 \ln(x) + 0.2646$	0.8074	0.4461	0.7812	0.4489
	$y = -0.0495x^2 + 0.3564x - 0.0545$	0.8174	0.4262	0.7910	0.4312
	$y = 0.2635e^{0.2489x}$	0.8018	0.4503	0.7803	0.4569
NDVI	$y = 0.1436 \ln(x) + 0.6994$	0.6958	0.5573	0.6742	0.5890
	$y = -0.0349x^2 + 0.23x + 0.4859$	0.7153	0.5525	0.7032	0.5672
	$y = 0.6797e^{0.0761x}$	0.6372	0.5671	0.6125	0.5874
植被指数	模型建立(京冬 13)(N = 32)			模型检验(京 9428)(N = 32)	
	关系模型	R ²	RM SE	R ²	RMSE
EVI3	$y = 0.2198 \ln(x) + 0.2878$	0.8021	0.4304	0.8009	0.4812
	$y = -0.0166x^2 + 0.1831x - 0.1364$	0.8510	0.4111	0.8171	0.4193
	$y = 0.2645e^{0.1337x}$	0.8159	0.4233	0.8210	0.4302
EVI2	$y = 0.2715 \ln(x) + 0.2646$	0.8012	0.4762	0.7720	0.4750
	$y = -0.1325x^2 + 0.1290x - 0.1845$	0.8155	0.4293	0.7835	0.4342
	$y = 0.2761e^{0.25609x}$	0.8056	0.4417	0.7912	0.4469
NDVI	$y = 0.1650 \ln(x) + 0.6966$	0.6784	0.5650	0.6651	0.5901
	$y = -0.0256x^2 + 0.53x + 0.6254$	0.7212	0.5422	0.7123	0.5652
	$y = 0.5217e^{0.1261x}$	0.6412	0.5871	0.6216	0.5893

验结果如表 3 所示。

由表 3 可见, 针对环境星 CCD 数据构建的 EVI 与 LAI 建立的模型精度均高于 NDVI 建立的模型。EVI 建立的模型中精度最低的是 EVI2 的指数关系模型, R^2 和 RMSE 分别为 0.801 2 和 0.476 2, 而 NDVI 建立的关系模型中精度最高的是多项式关系模型, R^2 和 RMSE 分别为 0.721 2 和 0.542 2, 可见利用 EVI 建立的模型效果最佳。

EVI 与 LAI 建立的关系模型精度较高, R^2 均在 0.8 以上, RMSE 均在 0.45 以下。多项式关系模型的精度高于其他关系模型, 其中 EVI3 建立的多项式关系模型 R^2 和 RMSE 分别为 0.859 2 和 0.540 5, 优于 EVI2 的 0.817 4 和 0.426。因此, EVI3-LAI 多项式关系模型最优。

4 结果及验证

4.1 结果分析

根据上文分析, 选择 2010 年 5 月 7 日、5 月 19 日两个时相的 HJ1A CCD1 2 数据, 经过几何校正、大气纠正等数据处理, 使用 EVI3-LAI 多项式反演模型, 计算北京昌平区冬小麦的 LAI, 计算结果如图 4 所示。

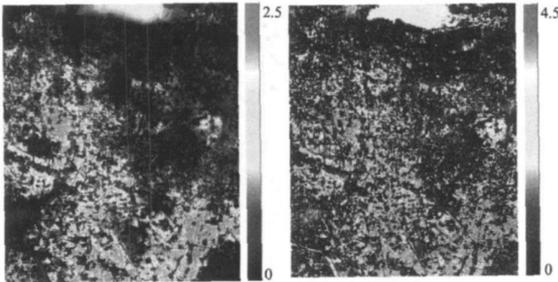


Fig 4 Winter wheat LAI distribution image of Changping district, Beijing

由图 4 可见, 北京昌平地区的冬小麦种植主要分布在西南部 and 东南部, 该区域冬小麦的生长状况良好。根据冬小麦的正常生育期, 五月中旬为冬小麦的开花期, 此时的 LAI 应达到整个生育期的最大值 5 左右。然而, 由于今年入春以来寒潮的影响, 使冬小麦的生育期推迟半个月左右。由图 4 可见, 2010 年 5 月 19 日冬小麦 LAI 反演结果在 4.5 左右, 与今年冬小麦的生长状况一致。

4.2 结果验证

建立 LAI 估算模型时往往会出现“过度拟合”现象^[10], 现有的验证表明, 中高分辨率的 LAI 误差在 25% ~ 50% 之间, 这是一个很大的误差区间^[11], 所以为增加反演结果的可靠性, 通过野外实测数据对反演结果进行检验是必要的。

为保证 LAI 图像反演值与野外实测 LAI 值在像元尺度上绝对匹配, 取试验区前后相邻四个样本点的平均 LAI 值与模型反演结果进行对比, 结果如图 5 所示。

通过 5 月 7 日与 5 月 19 日两个不同冬小麦生育期 16 组实测 LAI 数据与图像反演 LAI 数据的比较, 实测值与反演值之间的斜率分别为 0.821 2 和 0.832 1, 反演模型达到了较

高精度, 反演结果真实可信。说明环境星数据可以准确地动态监测冬小麦生长状况。

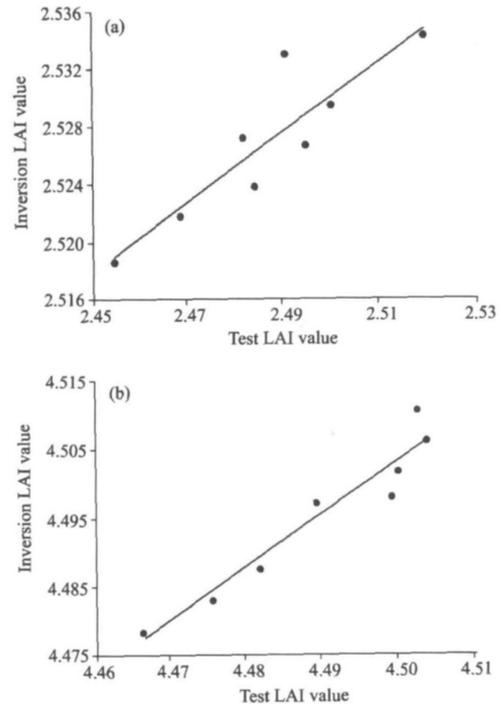


Fig 5 Correlation between LAI inversion value and test value

5 结论

(1) 本研究针对环境星 CCD 数据特点与波段设置, 在构建环境植被指数 (EVI) 中引入了能在一定程度上消除大气和土壤背景干扰的蓝、绿波段, 改善了基于红波段和近红外波段比值植被指数的饱和问题。与传统的 NDVI 在高植被覆盖区容易饱和相比, EVI 明显改善了在植被覆盖度较高时过早出现饱和的现象, 提高了 LAI 对植被指数的敏感性。

(2) 利用实地测量的 LAI 与冠层光谱数据计算的植被指数, 建立了长时间序列冬小麦 LAI 的估算模型。由品种京 9428 建立的 EVI3-LAI 二次多项式估算模型 R^2 和 RMSE 分别为 0.859 2 与 0.405, 模型验证的 R^2 和 RMSE 分别为 0.824 1 和 0.410 3, 其精度明显高于其他植被指数构建的估算模型, 与同类研究相比取得的结果最佳。

(3) 考虑到利用统计方法建立模型存在的局限性, 本研究选取不同品种的冬小麦分别构建模型, 并对模型进行不同品种间的交叉检验来验证模型的普适性程度。验证结果表明由 EVI 建立的模型复相关系数 R^2 均在 0.8 以上, 说明 EVI 建立的模型适合于不同品种的冬小麦 LAI 反演, 具有较高普适性, 能推广应用于环境星 LAI 反演及动态监测冬小麦生长状况。

致谢: 感谢国家农业信息化工程技术研究中心的黄文江博士与李存军博士在小汤山光谱测量试验中给予的指导与帮助!

References

- [1] Kouiti Hasegawa, Hiroshi Matsuyama, Hayato Tsuzuki, et al. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 514.
- [2] Brown L, Chen J M, Leblanc S G, et al. Remote Sensing of Environment, 2000, 71: 16225.
- [3] Haboudane D, Miller J R, Elizabeth Pattey, et al. Remote Sensing of Environment, 2004, 90: 3372352.
- [4] Turner D P, Cohen W B, Kennedy R E, et al. Remote Sensing of Environment, 1999, 70: 52268.
- [5] CHEN Xue yang, MENG Ji hua, DU Xin, et al(陈雪洋, 蒙继华, 杜鑫, 等). Remote Sensing for Land & Resources (国土资源遥感), 2010, 84(2): 55.
- [6] RUAN Wei li, NIU Zheng(阮伟利, 牛铮). Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences(中国科学院研究生院学报), 2004, 21(1): 78.
- [7] Hosgood H, Jacquemoud S, Andreoli G, et al. European Commission Joint Research Centre. Italy: Institute for Remote Sensing Application, 1995.
- [8] WANG Zheng xing, LIU Chuang, Huete Alfredo, et al(王正兴, 刘闯, Huete Alfredo, 等). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2003, 23(5): 979.
- [9] WANG Lu, LIN Qi zhong, JIA Dong, et al(王璐, 蔺启忠, 贾东, 等). Environmental Science(环境科学), 2007, 28(8): 1822.
- [10] PU Rui liang, GONG Peng(浦瑞良, 宫鹏). Hyperspectral Remote Sensing and Its Application(高光谱遥感及其应用). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2000.
- [11] WU Bing fang, ZENG Yuan, HUANG Jin liang(吴炳方, 曾源, 黄进良). Advances in Earth Sciences(地球科学进展), 2004, 19(4): 585.

Study of Environmental Vegetation Index Based on Environment Satellite CCD Data and LAI Inversion

ZHANG Ying^{1,2,3}, MENG Qing-yan^{1,2*}, WU Jia-li⁴, ZHAO Feng⁵

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. Center for Spaceborne Remote Sensing Demonstration, China National Space Administration, Beijing 100101, China
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
4. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
5. Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The present study used the PROSAIL forward model to simulate vegetation canopy spectrum, introducing blue and green bands to amend the effects of atmosphere and soil background, and constructing HuanJing vegetation Index (HJVI) to avoid premature saturation. Based on ground observation data of different typical winter wheat, we established HJVI-LAI long time series inversion models and implemented different varieties cross-validation to the models. The results show that the LAI inversion model of HJVI has higher precision than similar vegetation index model, has good universality, and can be applied to remote sensing multi-temporal winter wheat growth monitoring and LAI inversion.

Keywords Spectrum; Environmental vegetation index; Model; Cross-validation; LAI

(Received Dec. 10, 2010; accepted Apr. 9, 2011)

* Corresponding author