PROSAIL 冠层光谱模型遥感反演区域叶面积指数

李淑敏¹,李 红^{1*},孙丹峰²,周连第¹

1. 北京市农林科学院农业综合发展研究所,北京 100097

2. 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193

摘要 大面积区域作物叶面积指数遥感反演,对指导作物管理具有非常重要的意义,验证和发展基于物理叶面积指数遥感反演可避免基于经验模型的缺点。以北京地区青云店、魏善庄和高丽营为研究区,采用 MODIS 和 ASTER 两类不同空间分辨率遥感数据,探讨 PROSALL 物理模型反演冬小麦叶面积指数的可行性,尤其在不同空间分辨率遥感数据上的稳定性,并与经验模型进行了对比分析。与经验模型相比,物理模型模拟 LAI 值更具真实性;用线性组分加权的方法,对小尺度物理模型反演 LAI 进行尺度扩展并与基于大 尺度遥感数据的 LAI 物理反演结果相对比,相差不大,说明 LAI 物理反演方法在空间尺度上的稳定性。

关键词叶面积指数;遥感反演;MODIS;ASTER;尺度转换;冬小麦 中图分类号:TP722.4,S127 文献标识码:A DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2009)10-2725-05

引 言

-7

植被叶面积指数(leaf area index, LAI),作为陆地生态 系统的一个十分重要的植被特征参量,能够对植被冠层结构 给出直接的量化指标。叶面积指数控制着植被的许多生物、 物理过程,与许多生态过程直接相关^[1-4]。自 1947 年提出以 来,叶面积指数已成为一个重要的植物学参数和评价指标, 并在农业、果树业、林业以及生物学、生态学等领域得到广 泛应用^[3]。

传统LAI测量方法为地面实测,该方法有一定破坏性, 费时费力,而且大区域研究LAI仅靠地面实测是行不通的, 卫星遥感的应用为大区域研究LAI提供了唯一途径^[5]。由于 遥感数据具有覆盖范围广、时间与空间分辨率高等优点,所 以通过遥感反演结合地面实测提取一些重要的生物物理参数 有十分重要的意义^[1,6]。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。经验模型方法简 单灵活、应用广泛,但是由于函数关系是经验型的,随地域、 植被类型、生长季等的变化而变化等因素使得将其用于遥感 像元尺度反演时会带来很大误差^[2,7,8],尤其当遥感数据分 辨率过粗,无法简单与地面样点相匹配。物理模型方法则具 有相当强的物理基础,不过分依赖于植被的具体类型或背景 环境的变化,因而更具普适性,这种模型更适用于均匀的植 被(如农作物)。随着遥感技术的发展和各类参数库的建立, 基于物理模型的反演方法越来越具有吸引力。

MODIS 遥感数据时间分辨率高,时效性强,具有高的动态性,能够反映作物生长发育的动态特征,但空间分辨率较低,而ASTER 遥感数据空间分辨率高,15 m的空间尺度与地面实测尺度更易比较和结合,但时间分辨率低。因此,本文以北京地区青云店、魏善庄和高丽营为研究区,在县域尺度作物类型、种植模式分类基础上,采用 MODIS 和 ASTER 两类不同空间分辨率遥感数据,探讨 PROSALL 物理模型反演冬小麦叶面积指数的可行性,尤其在不同空间分辨率遥感数据上的稳定性,并与经验模型进行了对比分析。

1 研究方法

1.1 研究区

北京市冬小麦的种植情况从分布区县来看,仍主要集中 在传统粮食主产区,即通州、大兴、顺义、房山,这四个区的 冬小麦播种面积占到全市冬小麦播种面积的 80%以上。从冬 小麦品质来看,硬粒小麦播种面积占冬小麦播种面积的比例 最大,种植区主要分布在:通州、大兴、顺义和房山。其次, 参考两景 ASTER 遥感影像数据覆盖的区域范围。最终,研 究区选在大兴区青云店镇、魏善庄镇,顺义区高丽营镇。

1.2 遥感影像及其处理

收稿日期: 2008-10-16, 修订日期: 2009-01-20

基金项目:国家"十五"科技攻关计划项目(2004BA617B04)和国家"十一五"科技支撑项目(2006BAD10A06-03,2006BAB15B05)资助 作者简介:李淑敏,1983年生,北京市农林科学院农业综合发展研究所研究实习员 e-mail:edelweiss-bloom @163.com *通讯联系人 e-mail:lihsdf@sina.com 采用的遥感数据包括 2006 年 4 月 23 日的 MODIS 09 数 据(地表比反射率)和 2006 年 4 月 22 日的 ASTER 2B05V 数 据(地表反射系数 VNIR)。

MOD09 数据空间分辨率为 250 m,已经过了大气辐射 校正和几何粗校正,对其进一步的处理有几何精校正、图像 镶嵌、波段运算等;ASTER 2B05V 数据空间分辨率为 15 m, 已经过了几何粗校正、辐射校正、大气较正,对其进行的预 处理包括几何精校正、图像镶嵌、波段运算等。

1.3 叶面积指数反演方法

1.3.1 经验模型方法

2726

通过建立LAI与光谱数据,和(或)基于光谱数据计算的 光谱指数之间的统计关系来求算LAI,通常使用的是植被指 数 VI。目前逐渐形成了 VI与LAI之间的一些经验、半经验 定量关系,从而估算大区域尺度的LAI^[8,9]。在各种植被指 数中,最常使用的光谱植被指数是归一化差植被指数(ND-VI)。

1.3.2 物理模型方法

叶面积指数的物理模型反演方法关键在于给定样区实测 反射率数据,根据不同的辐射传输模型找到一系列最适模型 参数,以便由模型计算得到的反射率值与实测数据获得较好 的匹配。匹配情况的验证通过"误差函数"公式^[10]

$${}^{2} = \prod_{j=1}^{n} (r_{j} - r_{j}^{*})^{2}$$
(1)

其中, r; 是实测反射率; r;* 是模拟反射率。

进行植物生化组分含量与光谱特征之间的关系模拟研究,主要集中在两个方面:一是利用统计分析方法,由叶片和冠层光谱特征估算化学组分含量;第二方面的应用比如 PROSAIL模型,它是在 SAIL, PROSPECT模型基础上,建 立包含化学组分含量的叶片散射和吸收模型(机理模型),将 叶片模型耦合到冠层模型中反演整个冠层的生化组分含 量^[11]。PROSAIL模型的输入参数包括三部分:冠层生理生 化参数;土壤参数和其他参数^[12,13]。

使用模型模拟时,首先通过对生理生化参数的敏感性分 析确定对冠层反射率影响较为敏感的参数,对这部分参数取 多个经验值模拟冠层反射率,不敏感参数则直接赋予经验 值;其他参数则根据成像、观测条件进行取值。参数敏感性 分析表明,在红、近红波段对应的光谱区域,除了叶片叶肉 结构参数 N 和叶片水分含量外,其他参数对反射率的影响是 灵敏的(可参阅北京市农林科学院李淑敏的博士论文, 2008)。

1.4 样点布设及田间观测

7

根据遥感影像和实地考察,在研究区内尽量选择冬小麦 连续种植面积至少 250 m ×250 m 大小(一个 MODIS 像元大 小)的地块为测量样区,并且每个样区内冬小麦生长状况具 有代表性;借助 GPS 和 1 1 万地形图,由样区西南角开始 设样点,记录该点的地理坐标,由此点向北每隔 30 m 设一 个样点,然后再由每点分别向东每 30 m 设样点。

冠层光谱反射率的测量使用 Field spec Pro FR 便携式分 光辐射光谱仪,光谱范围为 325~1 075 nm,采样间隔为 1 nm。叶面积指数的测量使用 LAF2000 冠层分析仪,LAF 2000 使用 320~490 nm 的感应波段。每样点处重复测量光谱 反射率十次、叶面积指数五次,取均值。2008 年 4 月 16 日、 17 日、18 日 3 d 进行冠层反射率、叶面积指数实地测量,均 为晴朗微风天气,天空无积云,大气能见度较好,测量时间 为每天 10:00-14:00。

2 结果与讨论

2.1 经验模型反演结果

(1) 经验模型

建立经验模型,首先根据实测反射光谱曲线,计算遥感数据对应波段的波段反射率,然后计算 NDVI,从而建立 NDVI与LAI的经验关系。关于波段反射率的计算,王璐使用了根据多光谱传感器各波段的光谱响应函数,光谱曲线重 采样的方法^[14],而陈俊惠用的则是计算均值的方法(可参阅 陈俊惠的博士论文,中国农业大学,2005)。本研究使用了后 一种方法,再根据 NDVI 计算公式,计算每个实测点 NDVI 值。建立 NDVI和LAI关系的散点图,添加趋势线。趋势线 类型按照以往经验选择线性、对数和指数三种函数关系,生 成经验模型及 *R*² 值。

Table 1 Correlation coefficient of experience model based on MODIS and ASTER

模型的函数关系	MODIS	ASTER
线性	0. 439	0. 448
对数	0. 419	0. 423
指数	0. 510	0. 519

由表 1, 发现指数关系模型拟合程度相对更好些。 所以, 用于 MODIS 的 LAI 经验反演模型为

$$y = 0.3775e^{2 4293x}$$
(2)

用于 ASTER 的 LAI 经验反演模型为

$$y = 0.377 3e^{2.4317x}$$
(3)

(2) ASTER-LAI 模拟值与 LAI 实测值的相关分析

利用建好的经验模型得到LAI模拟值。假设由于样区内 冬小麦的生长状况均一,实测点数据可以代表 30 m ×30 m (ASTER 遥感尺度)面数据,所以可以直接对 ASTER-LAI 模拟值和 LAI 实测值进行相关分析。对模拟 LAI 与实测 LAI的相关分析使用了 SPSS 简单相关分析里的 Spearman 等级相关分析(Spearman 相关系数又称秩相关系数,对原始 数据分布不作要求,属非参数统计方法,使用范围广)。分析 结果见表 2。

 Table 2
 Relationship analysis of real data and simulation

 ASTERLAI inversion from experience model

			-	
		青云店	魏善庄	高丽营
经验模型	R 值	- 0. 042	0. 144	- 0. 009
	P值	0.818	0. 447	0. 958

由表 2 对 3 个研究区实测值与模拟值相关分析的 R 值

高丽营

(表示进行相关分析二者的相关系数,值越大表示相关性越 大)和 P值(表示二者在 = 0.001 水平下相关关系显著性, 越接近于0说明相关性越显著),说明二者不具有显著线性 关系。表征实测值与模拟值相关关系的散点图(图1)更进一 步反映了这一结论。

2.2 物理模型反演结果

(1)物理模型

前文已给出 PROSAIL 物理模型参数的设置 , 在其基础 之上结合正向模型源代码编写LAI物理反演模型的程序。使 用实测反射率数据得到LAI模拟值。

同样,对用物理模型模拟的 ASTER-LAI 与实测 LAI 进 行 Spearman 等级相关分析,分析结果见表 3。

由分析结果的 R 值和 P 值可以看出,3 个研究区实测 LAI与反演LAI二者在 = 0.001 水平下线性关系显著。作 出反映二者相关性的散点图(图 2)。

Relationship analysis of simulation ASTER-LAI Table 3 inversion from experience model and real data

魏善庄

青云店



Fig. 1 Scattering plot of real data and simulation data inversion from experience model (a):青云店;(b):魏善庄;(c):高丽营



(a):青云店;(b):魏善庄;(c):高丽营

(3)由(1)和(2)的比较分析

物理模型反演LAI值普遍高于实测值;而经验模型反 演LAI值普遍低于实测值。

通过 Spearman 相关系数 R 值和 P 值,发现经验模型 模拟值与实测值相关性不显著,而物理模型模拟值与实测值 在 = 0.001 水平下线性显著相关。

由经验模型得到不同观测点 LAI 值相差不大, 说明经 验模型模拟值反映的是某一时期冬小麦生长状况的总趋势, 忽略了区域 LAI 分布的空间异质性; 而物理模型模拟值则能 够反映出随空间短距离变动LAI也会相应发生改变。因此, 采用线性组分加权的方法对物理模型模拟的 ASTER-LAI 与 MODIS-LAI 进行了检验。

2.3 对物理反演 MODIS-LAI 的检验分析

由于LAI地面点测量的代表尺度不到 1 m^2 ,如果以野 外实测 LAI 数据直接检验 MODIS 尺度为 250 m × 250 m 的 异质像元,不可避免的会出现很大误差。所以,本研究将实 测数据与 ASTER 小尺度 LAI 采用线性组分加权的方法扩展 至 MODIS 大尺度 LAI^[15]。

低分辨率像元的叶面积指数通过下式计算

$$LAI_{L} = LAI_{H}(i) \times \mu_{H}(i)$$
(4)

其中,LAL 为低分辨率像元的叶面积指数,LAI_H(i)为组成 该低分辨率像元的第i组高分辨率的叶面积指数, $\mu_{\rm H}(i)$ 为第 i 组高分辨率像元面积占区域总面积百分比。

对于不同尺度叶面积指数的比较,使用线性组分加权公 式,计算结果见表4。

由表 4 可以看出: A1 值越大, M 值越大, 表明物理模型 用于 ASTER/ MODIS 两种不同遥感数据,模拟 LAI 值有效 性相差不大;魏善庄区域内有 10 m × 250 m 大小的裸地,所 以 A1 与 M 的相对误差明显高于青云店和魏善庄; A2 与 S 相对误差均在 0.2 左右, 此值稳定又一次说明物理模型模拟 的LAI值对LAI实际大小有一定代表性。

	A1	A2	S	М	(A2 - S)/S	ABS(A1-M)/M
青云店	4. 35	4. 11	3. 44	4. 25	0. 19	0. 023 5
魏善庄	1. 53	3. 79	3. 03	2. 25	0. 25	0.32
高丽营	3. 52	3. 96	3. 27	3. 25	0. 21	0. 083 1

Table 4 Comparison between linear weighted of small scale LAI and large scale LAI

注:表中各个字母代表含义;A1:每个研究区(一个 MODIS 像元)对应 ASTER 遥感影像上 16 ×16 个像元,对这 16 ×16 个像元 LAI 值进 行线性综合;A2:与实测点相对的 ASTER 影像像元 LAI 值的线性综合;S:实测点 LAI 值的线性综合;M:每个研究区所代表 MODIS 像 元经物理模型反演的 LAI 值

3 结 论

本文应用经验模型和物理模型对北京地区区域冬小麦叶 面积指数进行了反演,并对实测LAI值、ASTER、MODIS 不同尺度遥感反演LAI值进行了比较分析,得出结论为,

(1)反演叶面积指数的经验模型一般为指数关系模型, 模型的拟合程度比较理想。经验模型反演结果低于实测 LAI,而且反演值反映的是冬小麦生长状况的总趋势,模拟 值与实测值线性关系不显著,经验模型反演LAI忽视了叶面 积指数的空间分布情况;

(2)物理模型反演叶面积指数的过程因多个比较难以获 取的输入参数而变得较为复杂,多次迭代使得计算量较大, 而且模拟值普遍高于实测值,但模拟值与实测值线性显著相 关, 说明物理模型反演结果对叶面积指数的空间分布情况具 有一定代表性;

(3)比较线性组分加权的结果,表明物理模型应用于 ASTER/MODIS不同遥感数据上的模拟结果差别不大,推 测LAI物理反演模型对遥感数据的类型具有普适性,并且物 理反演模型可用于大尺度遥感数据;

(4)地面试验与遥感数据获取时间有差别,利用经验统 计模型建立样点光谱数据和LAI关系应用到遥感数据时,实 测值与模拟值不具有显著相关关系,一方面可能年份间环境 条件的差别导致,但在一定程度上说明经验统计模型在实践 上的不稳定;而物理模型用于LAI反演的结果表明尽管存在 年份间差异的可能,但遥感数据反演结果与地面实测值具有 显著相关性,一定程度表明物理模型具有时间上的稳定性。

参考文献

- [1] YAO Yan-juan, CHEN Liang-fu, LIU Qim-huo, et al(姚延娟,陈良富,柳钦火,等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2006, 10
 (6): 869.
- [2] LI Kairli, JIAN GJianrjun, MAO Rongrzheng, et al (李开丽, 蒋建军, 茅荣正, 等). Acta Ecologica Sinica (生态学报), 2005, 25(6): 1491.
- [3] WANG Xi-qun, MAL üyi, JIA Zhong-kui, et al (王希群, 马履一, 贾忠奎, 等). Chinese Journal of Ecology (生态学杂志), 2005, 24 (5): 537.
- [4] WU Bing fang, ZENG Yuan, HUANG Jim liang (吴炳方, 曾 源, 黄进良). Advances in Earth Science (地球科学进展), 2004, 19(4): 585.
- [5] FANG Xiurqin, ZHANG Warrchang(方秀琴, 张万昌). Remote Sensing for Land & Resources(国土资源遥感), 2003, (3): 58.
- [6] Qi J, Moran M S, Cabot F, et al. Remote Sensing of Environment, 1995, 54(1): 71.
- [7] CHEN Jian, NI Shao-xiang, LI Yun-mei, et al (陈 健, 倪绍祥, 李云梅, 等). Remote Sensing for Land & Resources (国土资源遥感), 2005, (2): 20.
- [8] Jesuswc, Valefxr, Coelhorr. Agronomy Journal, 2001, 93(5): 989.
- [9] SJacquemoud, et al. Remote Sensing of Environment, 1995, 53(3): 163.
- [10] Privette J L, Emery W J, Schimel D S. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(2): 187.
- [11] 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.
- [12] SHI Run-he, ZHUANG Darfang, NIU Zheng, et al (施润和, 庄大方, 牛 铮, 等). Chinese Journal of Ecology(生态学杂志), 2006, (5): 1.
- [13] CHEN Xirrfang, AN Shurqing, CHEN Jing-ming, et al (陈新芳, 安树青, 陈镜明, 等). Chinese Journal of Ecology(生态学杂志), 2005, 24(9): 1074.
- [14] WANGLu, LIN Qirzhong, JIA Dong, et al (王 璐, 蔺启忠, 贾 东, 等). Environmental Science(环境科学), 2007, 28: 1822.
- [15] TANG Shi-hao, ZHU Qi-jiang, SUN Rui(唐世浩,朱启疆,孙 睿). Progress in Natural Science(自然科学进展), 2006, 16(3): 331.

Estimation of Regional Leaf Area Index by Remote Sensing Inversion of PROSAIL Canopy Spectral Model

LI Shu min¹, LI Hong^{1*}, SUN Damfeng², ZHOU Lian di¹

- 1. Institute of Agricultural Integrated Development, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China
- 2. Resources and Environment College, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract The present paper selected *Qingyundian* town and *Weishanzhuang* town in *DaXing* District, and *Gaolingying* town in *Shunyi* District as test areas, using MODIS data and ASTER data in different scales. The feasibility of winter wheat LAI inversion by PROSA L physical model, especially the stability of remote sensing data in different scales, was discussed, and the results from experience model inversion were compared with that from statistical methods. The values of all samples LAI inversion from experience model are close in a region, which means experience model is a reflection of general growing trend, ignoring spatial heterogeneity of the regional leaf area index. But the value of LAI inversion from physical model can be truer in reflecting spatial heterogeneity of the regional leaf area index. The value of LAI inversion from physical model is more real, compared with experience model. With the method of linear weighing, the scale conversion was accomplished, and the LAI inversion results from different remote sensing scale data were compared, and were found similar. The result shows that in the process of large-scale regional LAI inversion, physical model inversion is more valid.

Keywords Leaf area index; Remote sensing inversion; MODIS; ASTER; Scale conversion; Winter wheat

(Received Oct. 16, 2008; accepted Jan. 20, 2009)

* Corresponding author