

文章编号: 1007-4619(2007)02-0228-07

农作物冠层 BRF 及波谱的计算机模拟及其验证

宋金玲, 王锦地, 刘小青

(北京师范大学 地理学与遥感科学学院 遥感与地理信息系统研究中心, 遥感科学国家重点实验室,
环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 计算机模拟模型是以植被真实三维结构场景为基础, 模拟植被冠层的辐射特性。本文以冬小麦为例, 利用辐射度方法模拟了冬小麦在不同 LAI 下的冠层二向反射因子 (BRF) 及其波谱特征; 为了验证并评价模拟数据的质量, 将模拟冠层 BRF 数据与实测数据进行了比较, 并将计算机模拟波谱数据与 ProSail 模型模拟波谱及实测波谱进行了比较。通过研究可以得到以下结论: (1) LAI 是植被群体重要的结构参数, 对于同一品种的植被可以用 LAI 来描述植被的生长进程; (2) 基于计算机模拟的冠层 BRF 数据具有一定的可靠性, 能够满足实际研究的需要, 因此可以把计算机模拟冠层 BRF 数据作为实测数据用于研究, 以弥补因各种条件限制无法得到实测数据的缺憾。

关键词: 二向反射因子; 叶面积指数; 辐射度; ProSail 模型; 计算机模拟

中图分类号: S127 **文献标识码:** A

Computer Simulation and Validation of BRF Data of Vegetation Canopy

SONG Jin-ling WANG Jin-di LIU Xiao-qing

(Research Center for Remote Sensing and GIS School of Geography Beijing Normal University State Key Laboratory of Remote Sensing Science Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities Beijing 100875, China)

Abstract Computer simulation model is based on the 3D realistic structure of vegetation and can simulate the canopy radiation regime. In this paper, taking winter wheat as an example, its canopy BRF and spectrum with different LAI are simulated. And in order to qualify the computer simulated results, firstly, the computer simulated BRF is compared with the measured data. In addition, the computer simulated spectrum is compared with the simulated and measured spectrum ProSail model using. From this study, some conclusions are drawn: (1) LAI is an important structure parameter for vegetations and can depict their growth course; (2) canopy BRF and spectrum based on computer simulation model are reliable and their precision can meet study demands. So computer simulated results can be considered as the measured data for research under certain conditions.

Key words: BRF; radiosity; LAI; prosail model; computer simulation

1 引 言

植被二向反射模型的建立对定量遥感有重要的意义, 在地物二向反射波谱的研究中, 最基础的工作

就是建立计算地物 BRDF 的数学模型。目前专家们已经提出了许多物理模型, 主要分为三大类: 辐射传输模型, 几何光学模型和计算机模拟模型^[1]。

随着定量遥感和计算机技术的发展, 计算机模拟模型越来越为人们所重视, 例如蒙特卡洛 (Monte

收稿日期: 2005-12-15; 修订日期: 2006-03-02

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 40371078, 40571107), 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (编号: 2002AA130010), 国家重点基础研究发展规划项目 (编号: G3000779)

作者简介: 宋金玲 (1978—), 女, 北京师范大学地理学与遥感科学学院遥感中心博士后, 主要从事农作物及林地冠层二向性反射及波谱特征的模拟研究, 已发表论文 8 篇。E-mail: sjlcum@163.com.

Carlo)模拟模型^[1],辐射度(Radiosity)方法,光线追踪(Ray-tracing)模型等,比较有代表性的模型有:RAYTRAN^[2],PARCINOPY^[3],DIANA^[4]等。计算机模拟模型能同时真实地考虑植被各组分的大小、形状和任意的空间分布方式对群体BRDF的影响,模拟出群体内、外辐射场的统计特性,确定出可获得最大光合效能的最佳群体结构类型。另外,在研究群体中辐射与植株间的相互作用过程以及这些过程与群体结构参数之间的关系方面,计算机模拟方法也是很有有效的。例如DIANA模型,它是以Radiosity方法为基础,在建立的真实结构三维场景的基础上,模拟光在场景中的传输,并以玉米场景为例,模拟了玉米场景的方向反射率和反照率。Borel^[5]是早期研究Radiosity方法的主要学者之一,他比较了Radiosity方法与辐射传输方法的异同,推出了Radiosity方法计算的通量密度与辐射传输方程计算的光强之间的联系,在此基础上假设植被叶层和土壤背景为互相平行正对的两个平面层,根据Radiosity原理推出的简单算法公式,Borel等人又得到了用于植被和土壤表面的非线性的光谱混合模型。另外,RGM^[6-9](A Radiosity Graphics Combined Method)也是以Radiosity原理为基础,主要根据植被的结构特点,总结植被的生长规律,利用计算机图形学原理生成植被的三维真实结构场景,将模拟场景作为基本单元来计算场景冠层的辐射特征,包括二向性反射、波谱以及反照率等。

本论文以冬小麦为例,采用了RGM模型模拟场景冠层二向性反射以及波谱特征。具体流程如图1所示。首先利用计算机图形学原理描述冬小麦叶片的形状、大小、LAD、LAI植株间距以及植株高度等重要的结构参数,以冬小麦种植地段的积温作为驱动,拟合相对积温与LAI的关系,生成不同LAI下接近真实植被的模拟场景(图2);然后将得到的三维结构文件输入到RGM模型中计算场景中各个面元两两之间的观测因子(View Factor) F_{ij} ;接下来

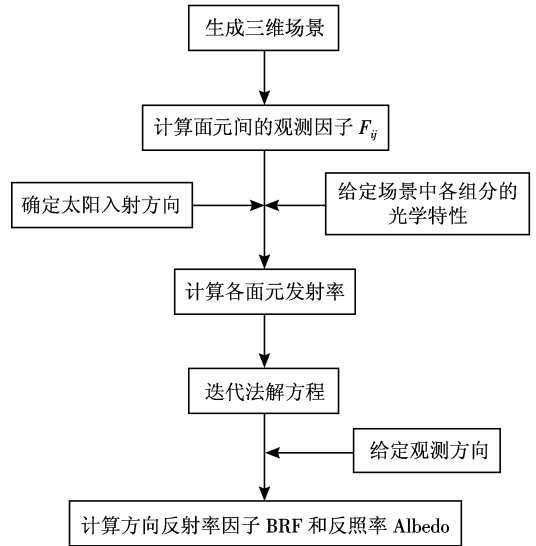


图 1 计算机模拟模型与辐射度结合的流程图

Fig 1 The flow chart of computer simulation model combined radiosity

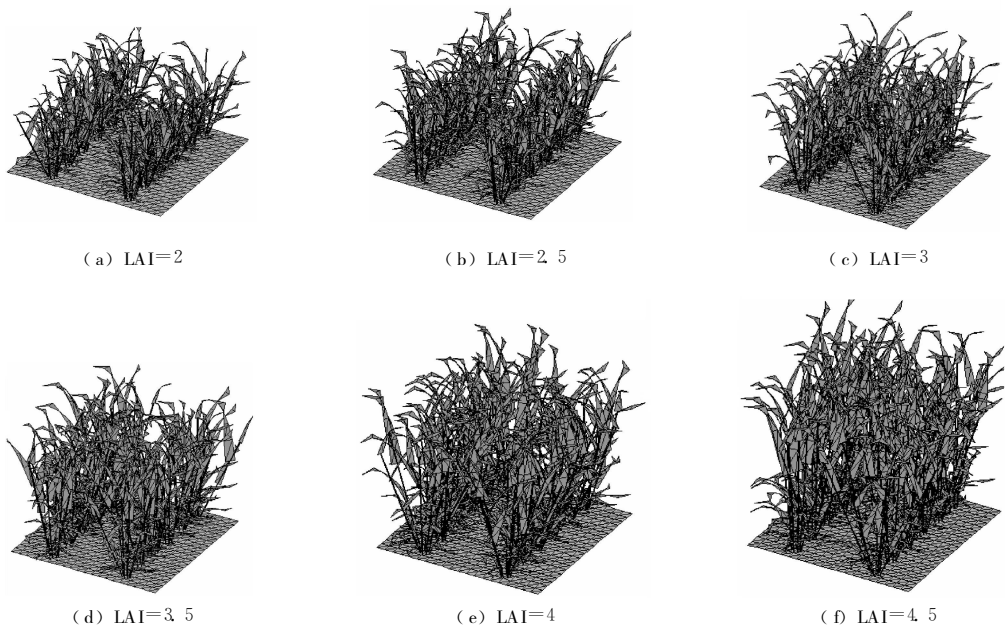


图 2 不同 LAI 下的冬小麦场景

Fig 2 The scene of winter wheat for different LAI values

设置模拟条件:太阳的位置、场景中各个组分及下垫面土壤的光学特性等作为 RGM 的输入参数,计算各个光照面元的发射通量密度;根据面元间的观测因子和发射通量密度建立辐射度方程,利用迭代法求解整个场景给定观测方向的冠层 BRDF 及 Albedo,进而研究植被结构参数及光照条件对植被群体 BRDF 的特性,特别是对冠层“热点”效应的影响。

为了验证计算机模拟模型的可靠性及所得模拟植被冠层二向性反射的正确性,将计算机模拟结果与相同条件下(包括冬小麦结构参数 LAI 和 LAD,太阳位置以及观测条件等)的野外实测数据及 ProSAIL 模型所得前向模拟结果进行比较,从而可以定量评价计算机模拟所采用的算法及模型的质量。

2 场景模拟及其二向反射特性分析

随着计算机图形学方法的诞生,计算机模拟植被真实场景得以实现,计算机产生的真实场景与光线追踪和 Radiosity 方法相结合,能够模拟出场景的光照及能量传输情况,从而为场景辐射特性的分析和研究提供了一种更好的方法。这种方法以真实场景的数值模拟来代替对植被结构的数学假定,因此对于数据有比较高的要求。而准确有效地生成植被的真实结构,是研究植被辐射特性的前提条件。

本文以地面观测尺度下冬小麦的场景作为研究目标,通过实测得到不同物候期冬小麦的叶长、茎半径、株高等与种植天数之间的函数关系。为了更好的表示冬小麦的生长发育进程,利用相对积温(DVS)来表示其生长发育的时间变量。

$$A = \sum_{i=1}^{t_1} (T_i - T_b) \quad DVS = \sum_{i=1}^{t_2} (T_i - T_b) / A$$

式中, T_i 指第 i 日的平均气温, T_b 指小麦生长下限温度,一般取 3° ; 当 $T_i - T_b < 0$ 时,取 0; t_1 是出苗到开花的天数; t_2 为出苗后的天数; A 是出苗到开花的有效积温^[10]。在已有的研究中, Logistic 方程可以作为一种普适性函数来描述作物群体的生长进程,如干物质重量的积累、叶面积指数的增长等。因此对实测数据和相对积温采用 Logistic 方程拟合得到整个生长期的 LAI 结果如下:

$$LAI = \frac{1}{1 / LAI_{max} + b_0 \times (b_1)^{DVS}}$$

其中按一般冬小麦 LAI 值取 $LAI_{max} = 5$, 用数据拟合结果得 $b_0 = 95.398652$, $b_1 = 0.0000869139812$, 相关系数 $R = 0.97256$ 。因为一般情况下,冬小麦的播种

都是机械化的,它们的行距基本上相同,即其空间分布基本不变, LAI 能够很好地描述植被的各个生长时期,且 LAI 为植被重要的结构参数,因此本文就以不同 LAI 下的场景为研究目标来分析冬小麦冠层 BRDF 的特性。图 2 为模拟得到 LAI 为 2—4.5 的一系列冬小麦模拟场景,由于程序中加入了随机数,因此可以使模拟效果看上去更加接近真实情况。对于模拟目标大小的选取,研究发现,场景越大越能准确地反映冬小麦冠层的辐射特征,但是计算机的能力是有限的,大场景会耗费大量的计算时间。通过做了一系列反复模拟实验,得出结论,模拟场景中必须包括两簇及两簇以上的冬小麦,且行数必须不少于两行,即场景中至少两行两列。在本论文中以行距为 20 cm, 株距为 10 cm 的 40 cm × 40 cm 范围的场景(场景中包含两行,每行有 4 簇冬小麦)作为研究对象。

场景结构模拟工作完成以后,便可模拟冬小麦冠层 BRDF。首先将模拟得到的三维场景的结构以文本文件的形式存储,然后将文本文件以及土壤、茎和叶片组分的光学特性(表 1)、太阳位置(太阳天顶角为 45° , 方位角为 180°)、观测天顶角 ($-65^\circ - +65^\circ$, 每个观测相隔 5°) 和方位角 ($0^\circ - 360^\circ$) 以及观测视场角 FOV 为 5° 等条件作为 RGM (A Radiosity-Graphics Combined Method) 模型的输入参数,模拟并输出相应条件下冠层在绿光 (556.1 nm)、红光 (670.2 nm) 及近红外 (871.1 nm) 波段的 BRDF 数据。图 3 为三个波段冠层 BRDF 在主平面上随观测天顶角变化的分布。

表 1 场景中冬小麦各组分以及土壤的光学特性

Table 1 The optical characteristics of soil and every component of winter wheat in the scene

组分	波段 /nm	LAI ≤ 3		LAI > 3	
		反射率	透射率	反射率	透射率
叶子	556.1	0.1443	0.0863	0.1443	0.0863
	670.2	0.0736	0.0114	0.0736	0.0114
	871.1	0.4772	0.4608	0.4772	0.4608
茎	556.1	0.1547	0.0037	0.2188	0.0044
	670.2	0.0700	0.0012	0.0831	0.0013
	871.1	0.4658	0.1214	0.7169	0.1105
土壤	556.1	0.1131	0	0.1131	0
	871.1	0.2202	0	0.2202	0

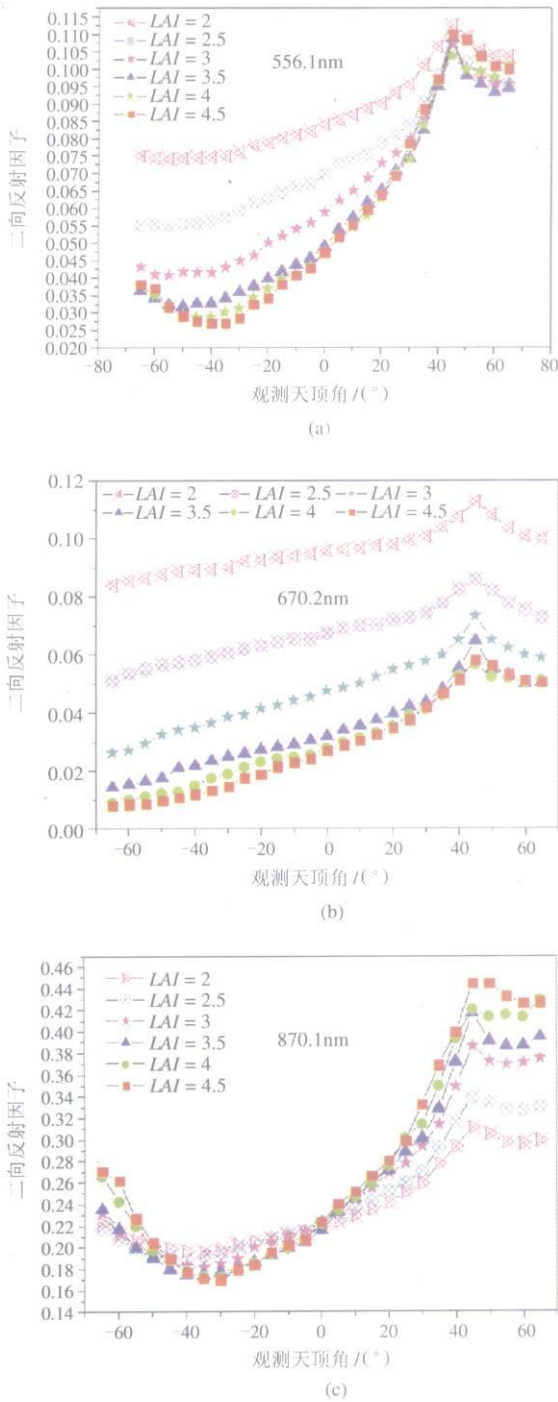


图 3 不同 LAI 下的绿光、红光以及近红外波段的
主平面 BRF 随观测角度的分布
(a) 绿光波段; (b) 红光波段; (c) 近红外波段

Fig 3 Simulated BRF distribution for winter wheat in
principle plane in green, red and NIR bands
under different LAI values
(a) Green region; (b) Red region; (c) NIR region

地了解不同物候期的冬小麦的结构和长势;另外,也可以根据研究的需要改变场景中冬小麦的结构及其空间分布。图 3 为冬小麦主平面 BRF 随观测天顶角变化的特性,从图中可以看出在绿光、红光及近红外波段的后向观测方向上都有很明显的热点 (Hotspot);尤其在近红外波段的大角度观测方向上有很明显的“碗边效应”,而在可见光波段“碗边效应”不是太明显,这些特性很好地符合了冬小麦在可见光及近红外波段的特性,这是由于其叶子在近红外波段的反射率和透射率的值都比较大,因此叶子以多次散射为主,从而使得在近红外波段的大角度观测方向上有很明显的“碗边效应”。为了评价计算机模拟数据的质量和精度,看其能否满足实际需要,下面对计算机模拟结果做验证。

3 计算机模拟结果验证

利用计算机模拟方法可以得到由植被结构参数 LAI 和 LAD 等控制的任意条件下的场景的结构数据,并通过 Radiosity 方法计算得到相应场景冠层的 BRF。由于观测条件、观测天气等的限制,有时很难得到某些实测数据,因此计算机模拟在研究工作中起着非常重要的作用,在计算机模拟数据比较可靠的前提下,模拟数据可以作为实际测量数据。为此对冬小麦的计算机模拟数据进行了一系列验证。

3.1 与实测冠层 BRF 数据比较

对计算机模拟数据的验证最直接的办法就是与实测数据进行比较,本文采用的数据是 2001 年顺义小样地冬小麦 4 月份期间的实测数据。此次实验采用 SE590 便携式野外光谱仪 (Spectron Engineering Inc, USA),波长范围 400—1100nm,光谱分辨率约 3nm,每组观测可提供 252 个光谱数据,视场角 FOV 15°;手动多角度观测架:天顶角从 0°到 65°,步长 5°;灰板:50%。下面以 4 月 17 日实测数据与相同条件下的计算机模拟数据进行比较,条件: LAI = 2.76,太阳天顶角和方位角分别为 40.5°和 128.5°,比较结果如图 4 所示。

图 4 为近红外与可见光波段计算机模拟 BRF 与实测 BRF 在主平面上随观测天顶角变化特性的比较结果。从图中可以看出,在近红外与可见光波段冠层 BRF 模拟结果与实测结果符合比较好,其中数值上的微小差别是因为计算机模拟是在一种理想

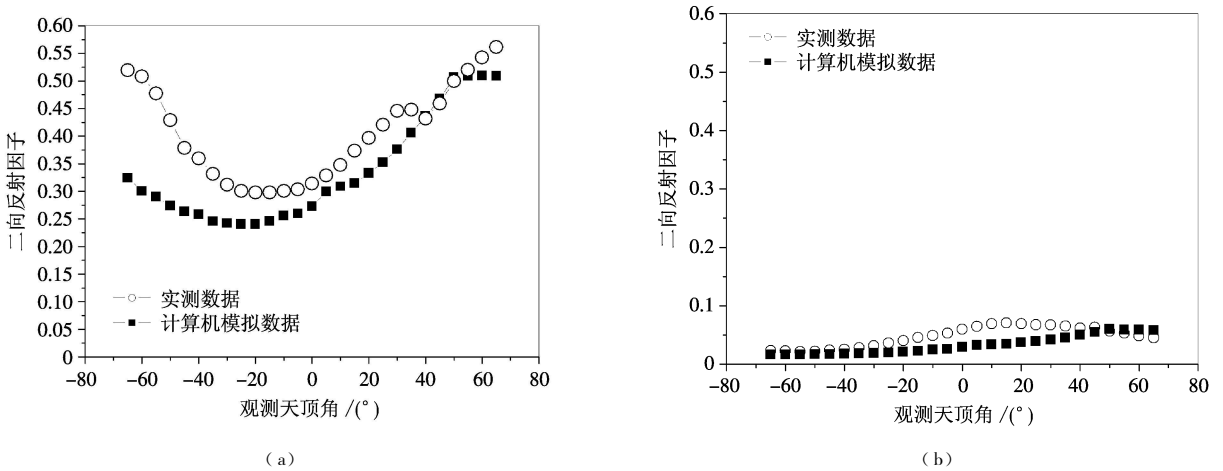


图 4 实测结果与模拟结果在可见光与近红外波段主平面 BRDF 的比较结果
(a) 近红外波段; (b) 可见光波段

Fig 4 The comparing results of measured data and simulated data in principle plane in Visible and NIR regions
(a) near infrared region; (b) visible region

状况下的模拟, 仅由天空漫射光比例 (Sky1) 系数来描述大气状况, 即当大气能见度高、日光强烈时, Sky1 大约为 10%, 而在阴天, Sky1 可高于 90%, 而实际情况比较复杂, 如云、风等情况都对实验结果有一定影响; 另一方面, 计算机模拟模型对观测对象进行了简化和近似, 如冬小麦的叶角分布对冠层 BRDF 的影响很大, 但是模拟中叶角分布是根据实测数据拟合规律得到的, 而实际情况很复杂, 因此也会给模拟结果带来一定的误差。

3.2 与 ProSAIL 模型模拟波谱及实测波谱比较

为了进一步验证计算机模拟数据的可靠性, 将计算机模拟所得可见光与近红外波段的波谱数据与同条件下的实测的波谱数据以及 ProSAIL (Prospect + SAIL) 模拟得到的波谱数据进行比较。ProSAIL 模型的输入参数为: 叶面积指数 LAI 平均叶倾角 ALA, 叶片反射率 ρ 叶片的透射率 τ , 土壤的反射率 p_s , 太阳天顶角 θ_s , 太阳方位角 φ_s , 观测天顶角 θ_v , 观测方位角 φ_v 以及天空光的漫反射部分所占的比例 Sky1。输出参数: 冠层反射率。

图 5 为计算机模拟、实测以及 ProSAIL 模拟在太阳天顶角和方位角分别为 40.5° 和 128.5° , 观测方位角为 130° , 观测天顶角分别为 45° (图 5(a)) 和 50° (图 5(b)) 的波谱特征数据比较。由比较结果可以看出, 计算机模拟与 ProSAIL 模拟在模拟植被冠层辐射传输方面各有所长, 若把实测数据作为真值, 则 ProSAIL 模型模拟比计算机模拟更接近真值 (图 6

(b))。从图 5 和图 6 的比较结果可以看出, 计算机模拟数据与实测数据在趋势上有很好的 consistency, 但在数值上有一定差别, 分析其原因: 一方面, 实测数据本身的误差, 有外界各方面条件的影响 (例如, 云、风) 以及人员观测误差等; 另一方面, 计算机模拟所用到的冬小麦组分的光学特性的获取与冠层反射特性实测数据的获取不是同步的, 一般情况下是先在野外测得冠层的反射特性, 然后将所测目标的样本放入密封的薄膜带中, 回到实验室再利用积分球测得目标的组分的光学特性, 这期间相隔至少 1 个小时, 甚至更长, 这期间冬小麦生化组分 (特别是叶片水分) 会有不同程度的流失, 因此计算机模拟所用到的冬小麦组分的光学特性与实测冠层反射特性时的组分光学特性有了一定差别, 从而使得实测数据与模拟结果出现了差异。这种情况基本上是不可能避免的, 只有尽可能缩短样本放置的时间, 以及采用更密封的设备放置样本, 使其成分尽可能保持完整。图 5(a) 和 (b) 中计算机模拟与 ProSAIL 模拟采用的组分及土壤的光学特性都是相同的, 因此它们模拟出来的符合得非常好, 然而, 与实测数据比较虽然总体趋势一致, 但是在 850nm 波段附近有一些差异, 但误差一般在 6% 左右, 在计算机模拟结果误差范围内。综上所述, 无论是辐射传输模型还是 Radiosity 方法都不能很好地模拟叶片内部近红外多次散射, 这是由于模型都是进行了各种条件的假设和近似, 所以不能很好地模拟真实波谱数据。当然, 也不能排除实测数据的误差。

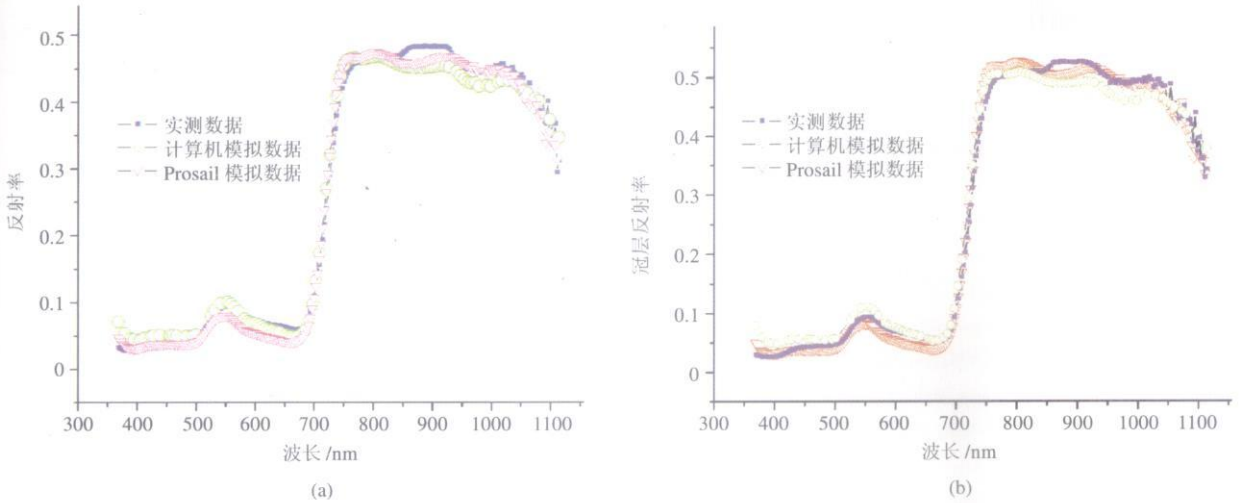


图 5 实测波谱、计算机模拟波谱以及 ProSail模拟波谱在可见光与近红外波段比较结果

(a) 观测天顶角和方位角分别为 45°和 130°; (b)观测天顶角和方位角分别为 50°和 130°

Fig 5 The comparing result of measured spectrum, computer simulated spectrum and ProSail simulated spectrum data in V isible and N IR regions

(a) View zenith and azimuth are 45° and 130° respectively; (b) View zenith and azimuth are 50° and 130° respectively

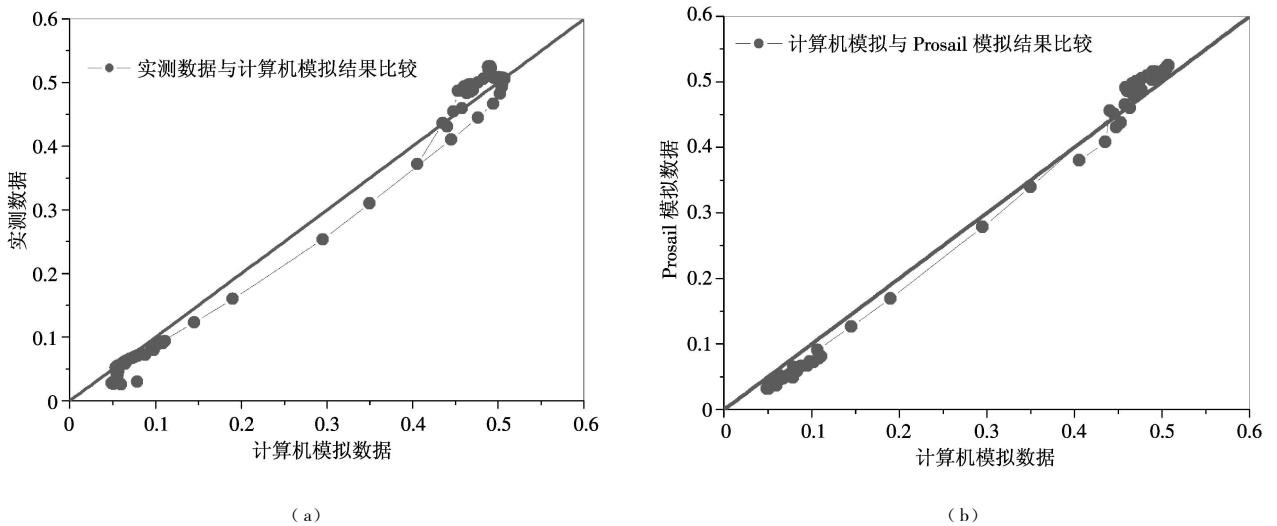


图 6 比较结果

(a) 计算机模拟数据与实测数据的比较; (b)计算机模拟数据与 ProSail模拟数据比较

Fig 6 The comparing results

(a) The comparing result of computer simulated data and measured data; (b)The comparing result of computer simulated data and ProSail data

4 结 论

叶面积指数 (LAI)是表征作物群体生长进程的最重要的特征量,以 LAI为控制参数,利用计算机模拟得到的三维结构场景,能比较真实直观地反应场景中植被植株的形态、长势以及植被下垫面的情况;采用辐射度方法得到的场景冠层 BRf

及波谱特征与实测数据及 ProSail模拟结果相比较,可以看出计算机模拟数据的精度能够满足实际的需要,因此,可以把计算机模拟方法作为研究中数据获取的一种手段,以弥补实际研究中遥感实测数据不足的缺憾。

致 谢 在此对覃文汉教授和项月琴研究员对本文工作的支持与帮助表示衷心的感谢!

参 考 文 献 (References)

- [1] Li X W, Wang J D. Models of Vegetation Optics Remote Sensing and Parameterize of Vegetation Geometry[M]. Beijing: Science Press, 1995. [李小文,王锦地. 植被光学遥感模型与植被结构参数化[M]. 北京:科学出版社, 1995.]
- [2] Ross J K, Marshak A L. Calculation of Canopy Bidirectional Reflectance Using the Monte Carlo Method[J]. Remote Sens of Environment, 1988, **24**: 213-225.
- [3] Govaerts Yves M, Verstraete Michel M. Raytran: a Monte Carlo Ray-Tracing Model to Compute Light Scattering in Three-dimensional Heterogeneous Media [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1998, **36**(2): 493-505.
- [4] España M L, Baret F, Aries F, et al. Modeling Maize Canopy 3D Architecture Application to Reflectance Simulation [J]. Ecological Modeling, 1999, **122**: 25-43.
- [5] Narendra S, Goel Ivan, Rozehnal Richard L, Thompson A. Computer Graphics Based Model for Scattering from Objects of Arbitrary Shapes in the Optical Region [J]. Remote Sens of Environment, 1991, **36**: 73-104.
- [6] Borel C C, Gerstl S A W, Powers B J. The Radiosity Method in Optical Remote Sensing of Structure 3-D Surfaces [J]. Remote Sens of Environment, 1991, **36**: 13-44.
- [7] Qin W H, Siegfried A W, Gerstl S A W. 3-D Scene Modeling of Semidesert Vegetation Cover and its Radiation Regime [J]. Remote Sens of Environment, 2000, **74**: 145-162.
- [8] Qin W, Goel S, Wang B. The Hotspot Effect in Heterogeneous Vegetation Canopies and Performances of Various Hotspot Models [J]. Remote Sens Rev, 1996, **14**: 283-332.
- [9] Qin W H. Modeling Bidirectional Reflectance of Multicomponent Vegetation Canopies [J]. Remote Sens of Environment, 1993, **46**: 235-245.
- [10] Xiang Y Q, Wang J D, Li X W. Seasonal Change of Features of Foliage Components of Winter Wheat and Soil Background Applied in BRDF Remote Sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 2000, **4**(suppD): 90-99. [项月琴,王锦地,李小文等. 二向反射遥感中冬小麦植被组分和土壤特性的季相变化[J]. 遥感学报, 2000, **4**(增刊): 90-99.]