

文章编号: 1001-8166(2009)07-0834-09

大尺度辐射度模型敏感性分析及 在祁连山林区的应用*

张 阳, 柳钦火*, 黄华国, 刘 强

(北京师范大学/中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100875)

摘 要:辐射度模型(RGM)用于计算植被二向性反射(BRDF)。但是目前基于辐射度方法的计算机模拟模型的应用被局限在较小的、比较单一的场景范围之内。把RGM模型扩展为大场景辐射度模型(LRGM),关键在于如何把大场景分为子场景,既保证模拟精度,又可以显著缩短计算时间。通过不同地形条件下模拟结果的对比,分析讨论了子场景划分方法的敏感性,分析表明:①地形对BRDF是有影响的,主要表现在后向观测方向的增强作用和前向观测方向的减弱作用;②子场景个数对模拟结果影响不大,最大偏差不超过0.007。然后,选取黑河流域大野口山区水源涵养林带为观测试验区,利用大场景辐射度模型进行真实结构模拟,将模拟结果与ASTER数据进行对比,结果表明,二者最大绝对误差不超过0.0382,证明LRGM模型模拟遥感像元尺度的BRDF是可行的。

关 键 词:大尺度辐射度模型;BRDF;森林场景;敏感性分析

中图分类号:TP79;P463.22 **文献标志码:**A

1 引 言

植被的光合作用以及该作用影响到水、气、碳、氮的循环,在整个地球生态系统中占有十分重要的地位。因而在地球系统科学的研究中,对植被的观测和研究受到极大的重视。但限于条件,在20世纪70年代之前,人们通常通过实地测量等人工普查的方式进行植被状况及其变化的研究——这样的研究显然是难以保证其准确性和时效性的。遥感作为获取地表时空多要素信息的先进方法,为从全球角度研究地球表层系统提供了可能,从而成为了地球系统科学研究中一个不可或缺的组成部分。

遥感影像上像元的亮度值在实际上反映的是地表反射率。在定量遥感界普遍达成的共识是,自然地表的反射率不仅仅与地表的几何结构和光谱特性

有关,也同样受影响于入射—观测几何。因此,在定量遥感研究中,必须使用二向性反射分布函数BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)来描述这种方向性反射特性。另一方面,由于卫星能够从不同的角度来观测地表,为定量反演地表的参数提供了可能,多角度遥感成为重要的研究热点方向之一。

描述植被二向性反射分布特性的模型主要有辐射传输模型、几何光学模型、辐射传输—几何光学混合模型和计算机模拟模型等。计算机模拟模型基于植被真实三维结构,能细致模拟目标的各种形态及生长结构特征,克服了理论模型中过多简化和假设的缺点,模拟精度高,可以弥补野外实验的不足,近年来得到了越来越多的重视。计算机模拟模型主要代表有蒙特卡罗模拟模型(Monte Carlo)^[1],辐射度

* 收稿日期:2009-04-28;修回日期:2009-05-07.

* 基金项目:中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(编号:KZCX2-XB2-09);国家重点基础研究发展计划项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”(编号:2007CB714400);国家自然科学基金重点项目“光学与微波遥感的模型协同及联合反演研究”(编号:40730525)资助。

作者简介:张阳(1983-),女,山东济宁人,硕士研究生,主要从事遥感数据的计算机仿真模拟研究. E-mail:sunwind711@yahoo.com.cn

* 通讯作者:柳钦火(1968-),男,江西九江人,研究员,主要从事定量遥感模型和反演研究. E-mail:qhlh@irsa.ac.cn

模型(Radiosity)^[2],光线追踪模型(Ray-tracing)^[3]等。其中蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟与光线跟踪算法是基于计算机模拟的数学统计方法。辐射度方法是继光线追踪算法后,计算植被二向性反射的一个重要进展,它全面考虑了光线与冠层之间相互作用的反射、透射、吸收和多重散射过程,以及冠层内部叶片之间和树冠相互之间的遮蔽现象。

基于辐射度模型的主要有 DIANA 模型^[3,4]和 RGM 模型^[5]等,由于受计算机计算能力的限制,目前应用被局限在较小的、比较单一的场景范围之内——通常只能描述农田、草地等小尺度的植被冠层或者地形均一的森林。现实中,森林的覆盖面往往是大范围的,而且很多情况下还分布在山区,对于遥感像元尺度的森林场景模拟,必须考虑地表起伏。传统的辐射传输模型或几何光学模型,一般只能考虑单一坡度,无法模拟复杂地形条件;光线追踪法,模拟速度慢,不适用于扩展为大场景模拟,因此如何把辐射度模型 RGM 扩展为大场景模型(LRGM),实现复杂地表条件下遥感像元尺度的森林场景模拟以及 BRDF 计算,对于定量遥感建模与反演具有重要的意义。

目前模拟场景的方法可分为两类:层次结构技术和环境局部化方法。而 LRGM^[6]采用将大场景分割为若干个子场景分别计算,并考虑多次散射和子场景之间的地形遮蔽问题,再融合子场景模拟结果,实现复杂地形条件下遥感像元尺度森林场景的辐射特性模拟^[7]。

LRGM 中,核心是如何进行子场景的划分以及计算子场景之间的相互作用,本文针对不同的地形条件,运用 LRGM 进行模拟,分析子场景个数对模拟结果的影响及模型敏感性。并将 LRGM 模型应用于黑河实验区遥感像元尺度,利用 ASTER 影像对模拟结果进行验证。

2 LRGM 模拟方法

2.1 RGM 模型简介

RGM 主要由 3 个计算模块组成:真实冠层结构场景的生成;冠层场景中各组分辐射度的计算;以及场景的二向性反射率因子 BRF 及其它感兴趣参量的计算,例如反照率(albedo)、光合有效辐射吸收系数(fpar)等。

RGM 的模拟场景被分割为许多离散的多边形,这些多边形的表面被称为面元。这样,场景中的面元数是场景中多边形数的 2 倍。RGM 定义场景内

离开某面元的辐射通量由发射、反射和透射三部分组成,用下面的数学公式描述:

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^N B_j F_{ij} + \tau_i \sum_{k=1}^N B_k F_{ik} \quad (1)$$

其中: B_i 为第 i 个面元的表面辐射度; E_i 表示从第 i 个面元发射出去的辐射度; ρ_i 表示面元 i 的表面反射率; F_{ij} 称作面元 i 与面元 j 之间的形状因子,描述离开第 j 个面元到达第 i 个面元的辐射度比例; τ_i 为面元 i 的透射率; N 是场景中的面元总数。公式(1)描述了场景内面元的辐射收支平衡关系^[8]。

由于受计算机内存和计算速度等因素的限制,RGM 模型能处理的多边形数量有限(不超过 50 000 个),因此不适合模拟大场景或复杂场景的辐射特性。

2.2 LRGM 模型扩展

为了实现遥感像元尺度的大场景遥感辐射特性的计算机模拟,陈敏等^[6]将 RGM 模型扩展为 LRGM,其基本思想就是把大场景划分为若干子场景相对独立进行辐射模拟,合理降低运算量;然后利用子场景的投影作为信息传递的途径,考虑子场景间相互作用和能量交换,合并后得到与整个场景相同或相似的模拟结果。因为辐照度方程求解的计算量大致正比于 N^2 ,所以分子场景能减少计算量,如一百万个多边形的计算量是 10^{12} ,而分成 100 个 1 万的多边形,计算量就是 $100 \times 10^8 = 10^{10}$ 。分子场景的模拟计算量大致是整个大场景直接模拟消耗时间的 $1/N$ 。而且,分子场景后有利于采用并行计算技术,通过将这 N 个子场景分别发送到 M 台计算机上分别模拟计算,计算时间可以有更大幅度的减少。

可以借鉴图像处理中 mask 来解释分割算法:首先将场景划分为 $n \times n$ 个小格。取 mask 为一个 3×3 的模板,在划分为 $n \times n$ 个小格的场景的 XY 平面上移动时,产生 $(n-2) \times (n-2)$ 个子场景。这样,子场景的划分就归结到小格子的划分问题上来。只须保证每个 3×3 的子场景中多边形数目不超过 500 000 个,即可保证程序运行。

模拟流程可由图 1 表示。

用 LRGM 模型模拟大尺度场景时,最大的问题在于:由于人为的分割,使得每个子场景与其周边场景的相互影响被剥离,从而不符合实际情况,因此必须考虑子场景之间的相互作用,子场景与周边场景的相互影响主要体现在它们之间对入射光的相互遮蔽效应上。陈敏等^[6]对于子场景间相互作用和能量交换的处理,进行了深入的研究,下面分别介绍

LRGM 处理单次散射中的太阳直射光、天空散射光以及多次散射光相互遮蔽效应的思路。

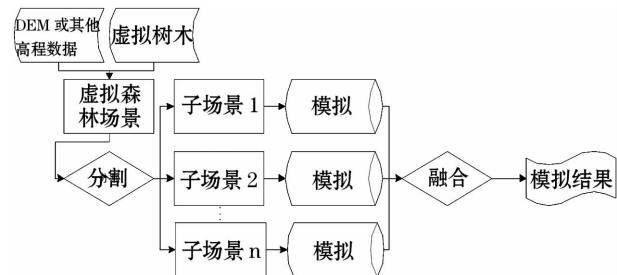


图 1 大尺度场景辐射度模型模拟流程图

Fig. 1 Flow chart for LRGM simulation of large scale scenario

对于子场景间太阳直射光的相互遮蔽效应,把这些子场景沿太阳入射光作深度排序,然后按离太阳由远到近的顺序投影,再根据投影之间的重叠情况,就可以得到子场景间对太阳光的遮蔽情况。

LRGM 中定义了投影面的大小,本文中模拟使用的是 $5\,000 \times 5\,000$ 像素,将投影结果存储下来,就能得到投影图像。投影算法一开始将投影图像的“底色”即图像的像素数值均设为 0。投影计算开始后,把投影图像上被某多边形投影所覆盖像素的数值改为该多边形的序号。这样,根据画家算法,当所有的投影计算结束后,投影图像上显示的就是各多边形投影而没有被覆盖的部分,因而也就是能够被投影方向光线照亮的部分。如某多边形在投影平面上的投影占 100 个像素,但经其他多边形的投影重叠覆盖后,剩下 50 个,这时就可以认为,该多边形有一半被投影方向的光线照亮。

对于天空散射光,引入了天空观测因子 V_d [9] 的概念。其定义为地表某点所接收到的天空漫散射与未被遮挡的水平表面所接收的漫散射之比。显然, V_d 的值在 0 和 1 之间。LRGM 模型认为地球上任意两点接收到的天空漫射与它们各自的天空观测因子成正比。因此分割子场景前后带来某点接收天空散射辐射不同的根本原因是子场景的分割造成某点的天空观测因子发生变化。通过求每个子场景以及大场景的 V_d 分布对天空散射进行纠正。

对于多次散射,LRGM 认为多次散射的发生范围仅限于其 8 个邻域内(图 2),假设场景划分为 4×4 个小格,于是产生了 I、II、III、IV 这 4 个子场景,以子场景 I 为例,小格 5 只受小格 1、2、3、4、6、7、8 中面元的多次散射影响。这一认识的理论基础是,当场景中两面元相隔一定距离的时候,它们之间的形

状因子可以小到忽略不计,因此它们之间的多次散射也就微乎其微,可以舍弃了。

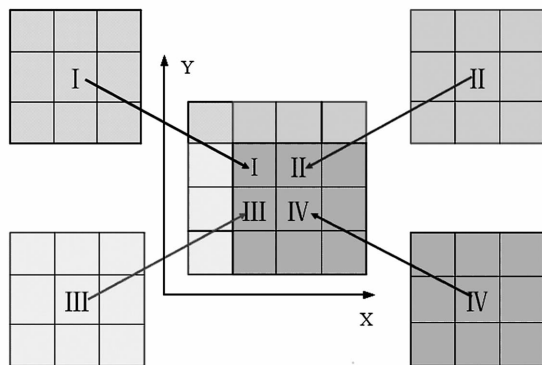


图 2 子场景的划分

Fig. 2 Schematic for dividing sub-scenario

3 LRGM 模型的敏感性分析

在崎岖山区,卫星传感器所探测的光信号受几个因素影响:一是由于大气、地形的影响导致地表所接收到的辐射能量的变化;二是地形改变了太阳、地表和卫星传感器三者所构成的相对观测几何而造成的方向性反射的变化;三是地形引起的多次散射的变化 [10]。所以,需要分析地形的影响。

虽然 LRGM 方法考虑了子场景之间的单次散射、多次散射的相互影响,但是由于人为的分割而造成场景之间能量传输的丢失是客观存在的。比如,对于多次散射部分,由于只考虑了八邻域对中心区域的影响,划分的子场景越多,单个场景的面积越小,剥离子场景外围对该中心区域的影响越严重,会导致结果不准确。我们假设不划分子场景而把所有多边形代入 RGM 模型进行计算是理论上最精确的,那么,在由于计算资源的限制必须划分子场景进行模拟的实际情况下,划分子场景个数越多,结果偏差可能也就越大。因此,应分析划分子场景的个数对模拟结果的影响。

本文所进行的敏感性分析包括地形影响分析和子场景划分个数影响分析两部分。模拟设计了 3 种典型的地形:平地、V 型山谷、A 型山丘,其中,V 型山谷和 A 型山丘采用 30° 倾角。每种地形再细分为 9 个子场景,16 个子场景,25 个子场景,36 个子场景,49 个子场景分别进行模拟。设置太阳天顶角 40° ,方位角 180° ,天空散射光占下行入射总辐射的比例是 20%,天空光剖分为均匀的 40 个人射角度。观测角度为沿太阳主平面方向,场景大小 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,随机生成树 50 棵。投影平面 $5\,000 \times 5\,000$ 像素。

整个场景的多边形个数为 189 950。场景的组分光谱参数取自长白山落叶松林区的测量的数据,而结构参数则使用 RAMI 提供的参数,具体设置如下。

表 1 场景的光学参数

Table 1 The spectral parameters used in scenario simulation

波段数	4				组分数	3			
反射率					透过率				
波长 (nm)	470.0	556.0	670.0	792.0	470.0	556.0	670.0	792.0	
叶片	0.0136	0.1837	0.0177	0.6245	0.0278	0.0379	0.0418	0.1000	
树干	0.03636	0.1144	0.1363	0.3454	0	0	0	0	
土壤	0.0401	0.0834	0.0686	0.2828	0	0	0	0	

单株树的结构参数设置如下:

表 2 单株树的结构参数

Table 2 Structure of single tree used in scenario simulation

	叶片面元边长	0.05 (m)
	单棵树 LAI	5.0
	场景 LAI	2.0358
	树冠高	12.0 (m)
	冠幅	3.60 (m)
	树干高	1.50 (m)
	树干横截面直径	0.30 (m)

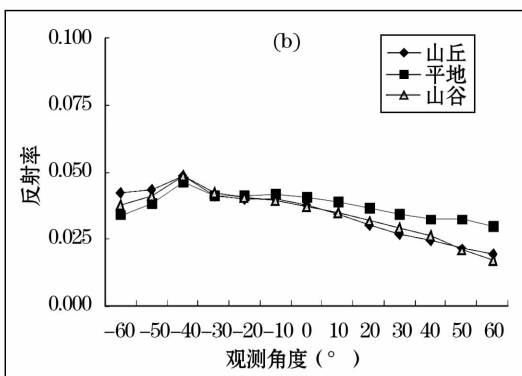
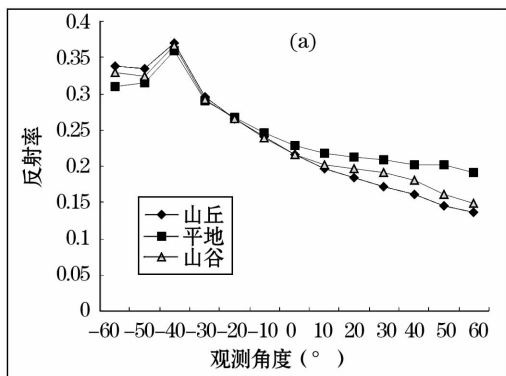


图 3 地形对二向反射分布函数的影响

Fig. 3 The influence of terrain to large scale BRDF

(a) 近红外波段; (b) 红光波段

(a) NIR band; (b) RED band

BRDF 的贡献大于多次散射,因此,二向反射率强弱依次为山丘,山谷,平地;在前向观测时,平地较其它两种地形,由于不受地形遮挡的影响,叶片反射率贡献较大,而叶片与树干组分反射率与透过率高于土壤的反射率与透过率,因此值较高,山谷次之,而山丘由于存在地形的遮挡,反射率值最低。

首先基于高程数据生成虚拟地表,并根据表 2 所给的结构参数生成虚拟植被,然后将虚拟地表与虚拟植被合成即可得到虚拟场景。场景合成就是把一棵棵树“栽”到指定地表坐标。在获取栽种地点后,程序计算出该点高程,根据坐标平移公式,计算出多边形的新坐标,写入文件。这样结束所有多边形的平移后,就完成了虚拟场景的生成工作。

3.1 地形对二向反射分布函数的影响

在这个分析中,我们假定原有 RGM 模型是理论完备的,划分子场景会引起模拟的误差。因为 RGM 模型不能处理整个场景,所以我们以最少的子场景划分(4 个子场景)计算的 BRDF 曲线为基准分析地形对 BRDF 的影响。

从图 3 可以看出,地形对 BRDF 是有影响的。主要表现在后向观测方向的增强作用和前向观测方向的减弱作用。

近红外波段,在后向观测方向,山丘的反射率值最高,山谷次之,平地最低,天顶角越大,差异越大,但最大不超过 0.029;而在前向,平地的反射率值最高,山谷次之,山丘最低,同理,观测天顶角越大,差异越明显,在天顶角 60°时达到了最大 0.056。

分析认为:后向观测时,面元接受太阳及天空的单次散射强弱依次为:山丘,山谷,平地,单次散射对

可以看出,近红外波段的反射率值高于红光波段,这主要是植被多次散射造成的。

与近红外波段相似,红光波段后向山丘反射率高于山谷和平地。前向平地反射率明显高于山丘和山谷。究其原因,主要是因为后向山丘地形较山谷与平地,接受太阳直射光较多,因此值较高,而前向,

山丘地形阴面的受遮挡,值较低。

无论近红外波段还是红光波段,在热点方向的反射率值出现最大,但3种地形条件下结果相近,这说明地形在热点方向对反射率影响不大。

3.2 子场景个数对反射率分布的影响

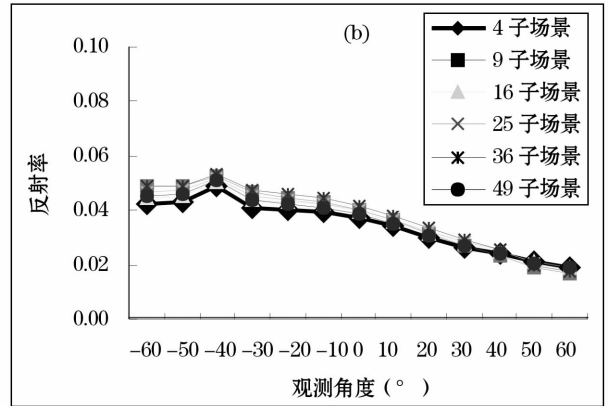
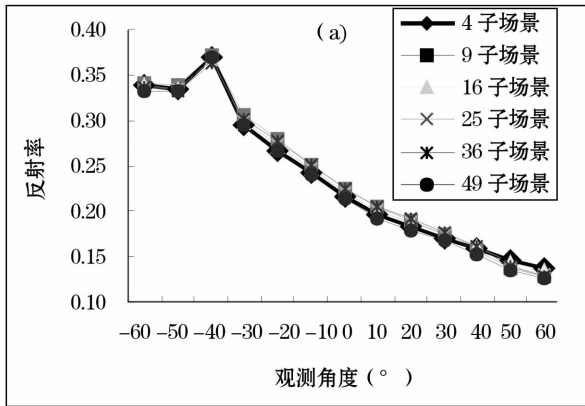


图4 山丘子场景个数对反射率分布函数的影响

Fig. 4 The influence of number of sub-scenario to simulated large scale BRDF

(a) 近红外波段; (b) 红光波段

(a) NIR band; (b) RED band

热点效应明显, BRDF 呈丘状分布。随着观测天顶角增大, 土壤的贡献减小, 叶片的贡献增大, 而土壤的反射率与透过率低于叶片与树干组分反射率与透过率, 因此, BRDF 随观测天顶角的增大迅速减小。

可以看出, 红光波段, 后向观测值, 分4个子场景的反射率值最低。这是因为地形的影响, 分4个子场景时, 子场景面积最大, 但由于山丘地形的遮挡, 子场景之间的相互作用反而越弱, 多次散射相对其它划分方法要低, 八邻域对中心场景的影响是使结果值偏低。

在山谷地形, 在近红外波段, 整个观测区域, 尤其是前向30°以后, 分4个子场景的反射率值最高。原因亦可以理解为地形的影响, 在山谷地形, 整个场景均受太阳直射光及天空散射光照射, 子场景划分越少, 单个子场景的面积就越大, 它作为邻近场景, 对中心场景的影响就越大。同时, 随着观测天顶角增大, 叶片的贡献增大, 土壤的贡献减小, 而叶片与树干组分反射率与透过率高于土壤的反射率与透过率, 导致邻近场景对中心场景的正的影响更为显著, 因此分4个子场景的 BRDF 值高。

而在山谷地形的红光波段, 前向30°以后, 分4个子场景的反射率值最低, 原因是叶片的反射率低于土壤的反射率, 随着观测天顶角增大, 叶片的贡献

增大, 导致邻近场景对中心场景的负的影响更为显著, 因此分4个子场景的 BRDF 值低。

图5显示了对3种地形, 相对于分4个子场景, 其它划分方法与之平均误差趋势图。可以看出, 随着分子场景个数的增加, 误差总的趋势是上升的。

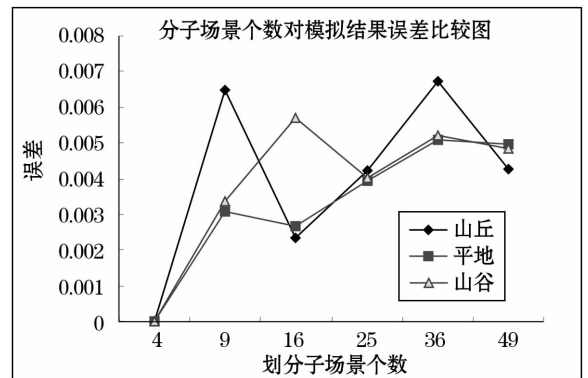


图5 不同划分子场景个数相对分4个子场景的平均误差趋势图

Fig. 5 The average simulation error when using different number of sub-scenarios

平地误差曲线上升较为平缓, 而在山丘地形的趋势线中, 分9个子场景的误差明显偏高, 其原因应是, 在划分9个子场景时, 会出现整个阳坡作为一个

子场景,整个阴坡作为一个子场景,它们相互割裂开来,子场景之间的影响最小,因此误差大。而在划分为16个子场景时,会出现阳坡,阴坡各占一半的子场景,此时,子场景间的相互影响可以较全面地反映出来,因此误差小。

总的来说,随着子场景个数的增多,误差有增大的趋势,但子场景数越多,规律越不明显,但误差最大不超过0.007,是可以接受的。因此分子场景的方法进行大尺度场景的计算机模拟是可行的。

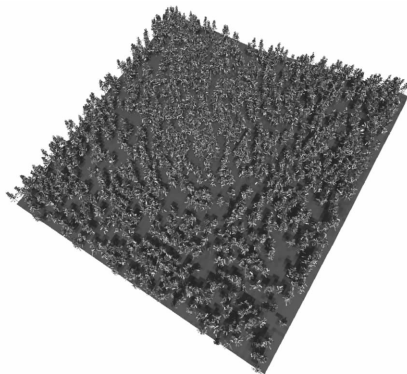
4 LRGM 模型应用于遥感像元尺度模拟

4.1 试验区概况

黑河流域遥感—地面观测同步试验由3个试验,包括寒区水文试验、森林水文试验和干旱区水文



(a)



(b)

图6 大野口超级样地场景

Fig.6 Scenario of Dayekou super square

(a) 场景照片; (b) 场景的计算机模拟图像

(a) real photo of the scene; (b) computer simulated picture

4.2 数据的获取及处理

在“黑河联合遥感试验”期间,获取了多种尺度的遥感图像数据,以及各种配套的实验测量数据,本文基于ASTER影像进行大场景遥感辐射特性的计算机模拟与验证,用到的各种数据及处理简介如下:

(1) 用于验证的遥感影像选取2008年6月4日覆盖超级样地的ASTER反射率产品。选取556 nm、661 nm、807 nm 3个波段,空间分辨率为15 m。重采样得到10 m分辨率的影像,则样地对应10×10像元。从影像中提取相应参数用于模拟。具体为:太阳天顶角20°,太阳方位角139°,沿太阳主平面观测,观测天顶角与试验所取角度一致(-60°~60°)。

(2) 模拟采用的结构参数:LAI使用大野口试验区LAI数据,选取2008年6月5~10日,使用LAI-2000及TRAC在超级样地区域测量的平均值

试验,以及一个集成研究,即模拟平台和数据平台建设组成^[11]。森林水文试验区为黑河上游地区的大野口流域,是一个独立水系,大野口水库以上的汇水面积为69 km²,主要树种为青海云杉。大野口观测试验基地在该流域内的排露沟子流域布设了气象和水文观测系统及大量水文和植被样地。排露沟试验区(100°17'E,38°24'N)海拔2 600~3 800 m,流域面积2.94 km²,年平均气温0.7℃,年平均降水量435.5 mm。森林水文观测选择排露沟子流域为加密观测区。

本文所选实验区为大野口超级样地,样方大小100 m×100 m,平均海拔2 845 m,中心点为100°15'00"E,38°31'59"N,该区属青海云杉成熟林,共有树木1 453棵。图6为生成的虚拟场景。

3.09。树高等结构参数使用大野口流域森林超级样地调查数据,统计样方内的1 453棵树,得到平均树高9.5 m,平均枝下高3.7 m,平均胸径14 cm,平均冠幅3.32 m。

(3) 模拟采用的光谱参数:使用大野口林地光谱测量结果数据集,选取2008年6月10日积分球测量的光谱数据,下垫面使用苔藓的光谱测量值。详见表3。

(4) 模拟采用的DEM数据:采用大野口超级样地全站仪测量数据,通过读取每棵树的三维坐标,得到固定点位的高程值,以此生成DEM图像。

(5) 模拟中采用的其它参数如太阳及观测角度等均结合遥感影像设置。

4.3 结果分析

为便于比较,将模拟的超级样地分成64个子场

景,每个子场景 30 m × 30 m 大小。同时,将从 ASTER 影像得到的 10 × 10 个像元,以 3 × 3 个像元为模板,按行列顺序平移。每次取对应 9 个像元的平均值,赋给中间像元,即进行八邻域处理。也得到 8 × 8 个反射率值。

由于 ASTER 影像近似垂直下视,因此将模拟得到的每个子场景垂直角度观测的反射率值提取出来,得到 64 条曲线分别代表 64 个像元在 3 个波段的反射率值。统计其平均值和最大最小值,结果如图 7 所示。

表 3 场景的光谱参数

Table 3 Spectral parameters of Dayekou super square scenario

波段数	4				组分数	3			
	反射率				透过率				
波长 (nm)	470	556	661	807	470	556.0	661.0	807.0	
针叶	0.0766	0.1564	0.08011	0.7041	0.0026	0.0090	0.0032	0.2860	
树皮	0.1310	0.1758	0.2060	0.2478	0	0	0	0	
苔藓	0.0395	0.1000	0.0700	0.2000	0	0	0	0	

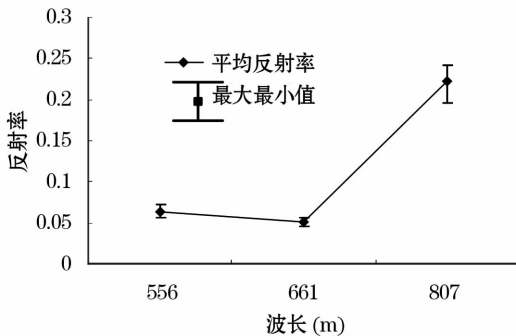


图 7 模拟得到 3 个波段像元反射率图

Fig. 7 The simulated directional reflectance of pixels in three bands

从图 7 可以看出,绿光波段(556 nm)反射率值略高于红光波段(661 nm),而到近红外波段有显著的上升。由于场景中植被较为茂密,叶子内部叶绿素 a、b 以 450 nm 和 640 ~ 680 nm 为中心有 2 个强烈的吸收带,所以出现了 556 nm 附近的反射峰。近红外波段反射率很高,叶子对太阳辐射的吸收可以忽略,散射作用占据了主导地位。这是植被所独有的波谱特征^[12]。

图 8 给出了 RGM 模拟与 ASTER 影像光谱的比较。图中 X 代表波长 556 nm 时 LRGM 模拟结果与遥感影像的对应像元的散点图,▲代表波长 661 nm 时 LRGM 模拟结果与遥感影像的相应像元的散点

图,◆代表波长 807 nm 时 LRGM 模拟结果与遥感影像的相应像元的散点图,3 个波段平均绝对误差不超过 0.0382。近似线性相关。

由于 RGM 模型所生成场景的基本单元是多边形,虽然在模拟中使用矩形来近似替代针叶,但与实际情况还是有一定的差别,这是造成误差原因之一,再者,超级样地的地面为苔藓与土壤的混合,而模拟使用的下垫面光谱是苔藓光谱,也可能带来误差,此外,ASTER 遥感影像在大气校正等过程中可能存在误差,以及模型本身的不完善,造成了模拟光谱与影像光谱存在一定的差别。

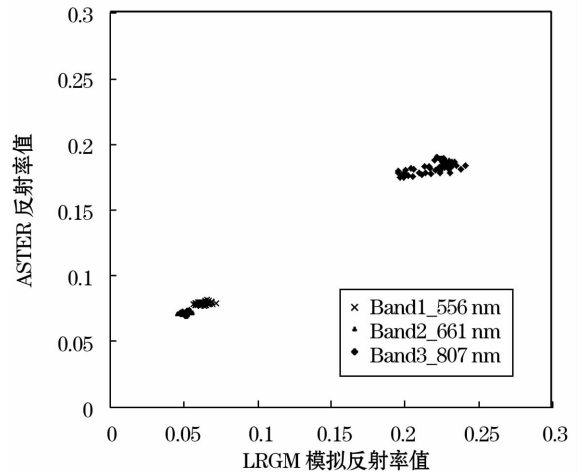


图 8 RGM 模拟与 ASTER 影像光谱比较图

Fig. 8 Comparison of ASTER image spectra to LRGM simulated spectra

5 结论及讨论

大尺度 RGM 通过将整个大场景划分为若干子场景,分别模拟计算,不仅解决了以往 RGM 模型不能计算大场景的难题,而且节省了时间。

划分子场景进行模拟时考虑了子场景间相互作用和能量交换,讨论子场景的划分方法,分析 LRGM 模型的敏感性具有重要的意义。本文选择几种典型情况进行了敏感性分析,结果表明子场景划分足够大的情况下,分子场景进行模拟可以代替整个大场景直接模拟,子场景的个数对模拟结果影响不大,这对后面的模拟应用具有一定的指导意义。

通过黑河实验区卫星遥感尺度大场景辐射特性的模拟,验证结果表面 LRGM 可以应用于复杂山区遥感像元尺度地表二向性反射特性的模拟。但由于黑河大野口森林超级样地的虚拟场景中树木的位置是随机生成的,没有把每颗树的地理坐标信息输入

到模拟模型中,树木的结构参数是通过统计平均得到的,没有考虑树木之间的差异,给模拟结果也带来一定的误差。

对于更为复杂的自然地表情况,特别是复杂地形与混合像元并存的情况,如何实现大场景地表辐射特性的计算机模拟还有待进一步研究。

致谢: 本文的完成与参与黑河试验的测量人员的辛勤劳动是密不可分的,在此,向所有参加黑河试验的老师和同学们表示最诚挚的谢意,尤其感谢宋金玲、付卓、王锦地等老师提供的大野口试验区 LAI 处理结果数据集以及大野口林地光谱测量预处理数据集,感谢陈尔学、过志峰等老师提供的大野口流域森林超级样地调查数据和大野口超级样地全站仪测量数据。

参考文献 (References):

- [1] Peter R J. North, Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 946-956.
- [2] 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.
- [3] Goel Narendra S, Ivan Rozehnal, Richard L. Thompson, A computer graphics based model for scattering from objects of arbitrary shapes in the optical region [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 36: 73-104.
- [4] Goel Narendra S, Qin Wenhan. Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and FPAR: A computer simulation [J]. *Remote Sensing Reviews*,

- 1994, 10: 309-347.
- [5] Qin Wenhan, Gerstl Si A W. 3-D scene modeling of semidesert vegetation cover and its radiation regime [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74: 145-162.
- [6] Chen Min. Large Scale Computer Simulation of Forest Scene in Complex Terrain [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2007. [陈敏. 复杂地形条件下大尺度森林场景的计算机模拟 [D]. 北京: 北京师范大学, 2007.]
- [7] Huang Huaguo, Chen Min, Zhang Yang, *et al.* A realistic structure model for large scale forest radiosity simulation (TRES-SIP-2008-0048) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009 (in press.)
- [8] Xie Donghui. Study on Computer Simulation Model and its Applications [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2005. [谢东辉. 计算机模拟模型的研究与应用 [J]. 北京: 北京师范大学, 2005.]
- [9] Dozier J, Frew J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(5): 963-969.
- [10] Duan Sibao, Yan Guangjian, Mu Xihan, *et al.* DEM based remotely sensed imagery topographic correction method in mountainous areas [J]. *Geography and Geo-information Science*, 2007, 23(6): 18-22. [段四波, 阎广建, 穆西哈, 等. 基于 DEM 的山区遥感影像地形校正方法 [J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(6): 18-22.]
- [11] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, *et al.* Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe basin: Scientific objectives and experiment design [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 897-914. [李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 897-914.]
- [12] Xu Xiru. Remote Sensing Physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 28-29. [徐希孺. 遥感物理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 28-29.]

Sensitivity Analysis of Large Scale Radiosity-Graphics Model and the Application on the Forest of Qilian Mountain

ZHANG Yang, LIU Qinhuo, HUANG Huaguo, LIU Qiang

(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)

Abstract: Radiosity-Graphics Model (RGM) is mainly used to compute the Bi-directional reflectance distribution function (BRDF), which is suitable for small-scale scenes such as farmland, lawn or homogeneous forest. Large Scale RGM (LRGM) can be applied to simulate large-scale forest scene over complex topographic surfaces based on scene-dividing method. It can also save computing time. In this paper, sensitivity analysis of LRGM was carried out firstly, concerning different terrain conditions and different sub scene numbers. The results illustrate:

①BRDF is influenced by terrain, in back observation direction the terrain can strengthen the BRDF. In forward observation direction the terrain can weaken the BRDF; ②The sub scene number is not so sensitive to the BRDF. For example, the deviation is no more than 0.007; Secondly, Dayekou forest region in the Heihe River Basin was chosen as our study area, and the data including DEM, tree structure parameters and component spectral were used to simulate the BRDF of the scene by LRGM model. Then, the LRGM simulation result was validated with the ASTER data. The mean absolute error is no more than 0.0382. The result indicates that the LRGM can simulate the BRDF on a large scale well.

Key words: Large scale Radiosity-Graphics Model; BRDF; Forest scene; Sensitivity analysis.

地磁变化由洋流引发?

经过了400多年的探讨,目前人类仍不能确定到底是什么形成了地球的磁场。尽管磁气圈是人类与致命太阳风(太阳风由带电粒子形成,带电粒子由电子和质子组成)的唯一缓冲区,但是由于磁场的起源不明,磁气圈的形成也没有定论。现在,新研究提出了关于磁场和地球本身结构背后的问题。

这篇新的、有争议的文章发表在《新物理学报》上(New Journal of Physics,由英国物理学会和德国物理学会于1998年共同创办,是全面评审,全方面收集物理学各个领域杰出研究论文的网刊)。20世纪,人们认为地磁和磁气圈是导电流体围绕地核旋转的结果,现在这项新的研究将很大程度上改变地球物理学家的这种观点。

美国西北大学工程与应用科学学院的Gregory Ryskin教授将磁流体力学方程组应用于海洋咸水(具有导电性),进而否定了上述长期存在的观点,他发现地球磁场的长期变化可能由大洋环流引起。

计算确认了Ryskin的观点,同时其也存在时间和空间上的相关性——海洋和磁层缓冲区存在整体性关系。研究人员记录了北大西洋的洋流密度变化,Ryskin发现这些变化与地球磁场长期变化率的突变(地磁急变)密切相关。

《新物理学报》的高级发行人Tim Smith表示,这篇文章是有争议的,其无疑将引起激烈的争论,有可能遭到一些地磁学组织的强烈反对。作者也承认,无论如何其研究结果都是一个有力证据,但是仍然需要进一步的研究来探索洋流和地磁长期变化间的可能联系。

在20世纪20年代早期,爱因斯坦提出了认识地球磁气圈的巨大挑战。后来不久,地球磁场便被认为是导电流体在地球深部运动的结果,随即提出了著名的地磁发电机理论。

20世纪下半叶,发电机理论(描述旋转、对流、导电的流体通过怎样一种过程来维持地球磁场)被用于解释地球外核中的熔融铁如何形成磁气圈。

该文章同时还对地核的结构提出了质疑。通常在教科书中都有着相似的图片,它们描述了地核处高温、高导电性的流体,但是这些图片却来自于人类的假想,现在很可能被证明无效。因为地核处的流体无法被测量或观测,所以有关磁气圈变化的理论曾被广泛应用,以说明地核处存在这样一些流体。

虽然Ryskin的研究只关注地球磁场的长期变化,但是他指出,如果磁场的长期变化由洋流引起,那么发电机理论将受到巨大质疑:没有其他证据能够证明地核有流体流动。

美国密歇根理工大学的大气物理学教授Raymond Shaw表示,如果Ryskin文章中的观点是有效的,那么其很可能使现有的、占统治地位的地磁理论崩溃,所以毫无疑问其必将遭到很多人的强烈反对。

参考文献(References):

- [1] The Earth's magnetic field remains a charged mystery. http://www.iop.org/News/news_35352.html.
- [2] Secular variation of the Earth's magnetic field; induced by the ocean flow? <http://www.iop.org/EJ/abstract/1367-2630/11/6/063015/>.

(赵纪东编译)