

# BRDF 模型及其反演研究的现状及展望

刘 佳, 范文义

(东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:**介绍了二向性反射的物理模型及半经验模型在理论研究中的新进展,并分析了各个模型的优缺点,为模型选择提供了依据;同时对模型反演的策略和方法及最新研究进展进行了概述。在此基础上,对实验研究、理论研究以及应用研究中存在的主要问题及目前的一些解决方案进行了分析,并讨论了遥感反演研究的未来发展方向。

**关 键 词:**遥感反演;BRDF 模型;反演策略及方法;二向反射

**中图分类号:**TP 79;O 43 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-0323(2008)01-0104-07

## 1 引 言

地球表面物体对太阳短波辐射的反射和散射是属于非朗伯体性质的,即地物与电磁波的相互作用并非是各向同性,而是具有明显的方向性。人们早已观察到这种现象,在 20 世纪 70 年代, Nicodemus 提出了二向反射分布函数(BRDF)的精确定义,然而直到 20 世纪 80 年代其产生机理的研究才受到重视。BRDF 模型的研究也是在近 20 多年来取得了长足的进展,出现了各种不同复杂程度、各具特色和优势的模型。

大量事实证明,在地表物体中,植被的二向反射特性尤为显著。多年来,以植被为地面目标,研究植被的结构特征与植被表面的二向反射分布特征之间的关系,建立起的数学物理模型,已经形成研究体系。这些模型即为 BRDF 模型,模型的建立是反演的先决条件,反演却更具应用价值,也是遥感从定性走向定量的必然发展结果。定量遥感不仅要进行遥感机理与各种模型的研究,还要进行各种模型反演策略和方法的研究。

## 2 BRDF 模型的研究

到目前为止,建立起来的理论模型有数百种之多,因计算 BRDF 的角度不同而形成了不同的流派,大体上分为经验统计模型、物理模型和半经验模型 3 类。经验统计模型简单、适用性强,适于物理机

理不清的情况,本文不对此进行介绍。半经验模型综合了经验模型与物理模型的优点,模型参数虽然是经验参数,但具有一定的物理意义。物理模型研究得最为深入,理论基础完善,代表着 BRDF 模型研究的主流方向,其模型参数具有明确的物理意义,并对光与地表物体的作用机理进行了数学描述,主要有辐射传输模型、几何光学模型、混合模型和计算机模拟模型 4 类。

### 2.1 物理模型

#### 2.1.1 辐射传输模型

辐射传输模型的理论基础和核心是辐射传输方程,它把植被冠层近似分解为无限大的水平均匀的薄层,通过引入光学路径和散射相函数的概念,来求解辐射传输方程,推算辐射与冠层相互作用,由此解释辐射在冠层中的传输机理,进而得到冠层及下垫面对入射辐射的吸收、透过和反射的方向、分布和光谱特性。辐射传输模型的优点在于,能考虑多次散射作用,对均匀植被尤其在红外和微波波段较重要;其缺点是其三维空间微分方程过于复杂,通常只能得到数值解<sup>[1]</sup>,并且没有很好地考虑在树叶水平上的 BRDF 各向异性<sup>[2]</sup>。因此它适用于连续植被冠层的反射状况,如垄状特征不明显的作物或处于生长期的作物、大面积生长茂盛的草地等,而对复杂的不连续的植被冠层,如森林等是不适用的<sup>[3]</sup>。所以在遥感像元尺度上,辐射传输理论很难解释地球陆

地表面大量以表面散射为主并呈现出非均匀的复杂结构这一现象。

由于要求解这样的方程需要有确定的相位函数和边界条件,所以为了求得辐射传输方程的解,Kubelka-Munk 提出了针对水平均匀介质的四通量理论,即所谓 KM 理论。即用向上和向下的漫散射光通量以及向上和向下的太阳直射光通量这 4 个通量及其参数来近似辐射传输方程。由此发展了很多有其自身适应条件的近似解法,包括以二通量 KM 理论为基础的 Allen-Richardson 模型、以三通量 KM 理论为基础的 Suits 和 SAIL 等模型。其中较经典的 SAIL 模型是对 Suits 模型的发展,假定冠层中的叶片倾向符合随机分布,叶片倾角符合某种特定分布,较好地反映了水平均匀植被的叶面积指数与叶倾角分布对 BRDF 变化趋势的影响<sup>[4,5]</sup>。但是由于 SAIL 模型是以 KM 理论为基础的,所以并没有考虑 BRDF 的热点效应。Kuusk<sup>[6,7]</sup>建立了光线入射方向与观察方向孔隙率间的相关概率模型,解决了 BRDF 热点效应问题。并且 Kuusk<sup>[8]</sup>将一次散射的核引入 SAIL 模型,构造了一个新的模型,从而提高了 Nilson-Kuusk 模型的反演速率。Jupp<sup>[9]</sup>将几何光学模型中的相互遮阴概念引入辐射传输模型,进而讨论了连续植被热点效应的规律问题。Jupp 与 Qin<sup>[10]</sup>得出了将叶片形状假设为长方形和圆柱形时的热点影响。Bach<sup>[11]</sup>等以 SAIL 模型为基础,将叶片层分成枯叶、嫩叶两层考虑热点效应大小,从而提出了 GeoSAIL 模型,该模型还包括一个描述土壤表层水分对土壤光谱影响的子模型。Verhoef 与 Bach<sup>[12]</sup>对 GeoSAIL 模型进行改进提出 4SAIL2 模型,并将其与改进的 Hapke 土壤 BRDF 模型、PROSPECT 模型构成 SLC 综合模型,成功模拟高光谱多角度观测数据。刘强<sup>[13]</sup>等在可见光波段的冠层模型 SAIL 模型中添加热发射项,将其改造成热红外波段模型,因其在计算多次散射方面有优势,适于做更高层次的热红外模型的一个基本组件,与偏重几何光学的模型结合使用。

### 2.1.2 几何光学模型

几何光学模型主要考虑地物的宏观几何结构,把地物假定为具有已知几何形状和光学性质、按一定方式排列的几何体。根据几何光学原理,分析几何体对入射光线的截获和遮阴以及地表的反射来确定植被冠层的方向反射<sup>[1]</sup>。该模型基于“景合成模型”,引入了光照植被、阴影植被、光照地面和阴影地面 4 个分量的概念,根据该 4 个参数在不同光照和

观测条件下的几何光学关系建立二向反射分布模型。几何光学模型主要考虑了地物散射与大气散射的主要差别,具有简单明晰的特点,适用于处理不连续植被(如灌木林、稀疏森林、针叶林、果园)及粗糙地表等辐射传输模型难以适用的地物。其缺点是未考虑多次散射对构成“阴影区”地物反射强度的影响,也没有考虑植被—土壤系统的非朗伯辐射性质,以及对群体结构假设的局限性等,因而在植被趋于连续,阴影区与非阴影区之间反差较小时,不如带几何光学修正的辐射传输模型严密<sup>[1]</sup>。尤其在太阳高度角较小(小于 30°)时计算结果偏低,误差较大<sup>[14]</sup>。

1986 年,Jupp、Walker、Penridge 和田国良在早期李-Strahler 模型的基础上,用椭球模拟植被冠层,建立了多冠层的几何光学模型,将传感器接收到的遥感信号分别表达为 9 个分量的面积加权和<sup>[15]</sup>。后期的李-Strahler 模型接收了这些改进,并为了使模型能适用于浓密的林地,李小文<sup>[16]</sup>等进一步提出了考虑树冠相互阴影效应的 GOMS 模型,使之成为几何光学模型中最具代表性的模型。GOMS 模型描述的是树冠这一尺度的实体,共有 8 个参数,其中 4 个为结构参数,分别反映垂直方向上的树冠覆盖度、树冠形态参数、树冠离地高度参数和树冠高度分布离散程度,另外 4 个为光谱组分参数,分别为给定入照条件下地面、树冠和阴影地面、阴影树冠的亮度。实际应用中,将 4 个光谱组分参数视为已知值或测量值很不方便,故设法把它们与叶面反射率、土壤表面反射率、叶面积指数等联系起来,即为进一步研究光谱组分参数化问题<sup>[1]</sup>。相比于平坦的地表,植被更容易生长在有坡度的地表上,此时,由于入射角与坡面的相互影响,BRDF 发生形状扭曲,Schaa<sup>[17]</sup>等构建了存在地形因素影响的几何光学模型。陈镜明教授<sup>[18]</sup>提出四尺度几何光学模型,即为在二尺度几何光学模型李-Strahler 模型的基础上加入大于树冠尺度和树冠内部不均一结构这两种尺度的模型,充分考虑了树冠间的排斥性和树冠尺度以下的实体(如分枝、花、果、叶、穗等)的分布特征对 BRDF 的影响。Qi<sup>[19]</sup>等尝试将统计模型和光学模型结合起来,较好的估算了 LAI,提供了将不同模型相结合反演地表参数的思路。

### 2.1.3 混合模型

随着理论模型研究的不断深入,人们将几何光学模型和辐射传输模型在不同尺度上的优势结合起来,使各模型的分类界限日趋模糊,在一定意义上,新型的理论模型都是一种混合模型,除了考虑问题

的角度和解决问题的方法不同以外,大部分的模型具有结构的相似性和结果的可互换性。这些混合模型大体上可分为两类,即一类是辐射传输模型通过引入冠层的三维结构特征而向几何光学模型的逼近,如 Kimes 的 3DRT 模型、Goel-Grier 的 TRIM 模型等;另一类是几何光学模型通过考虑植被冠层内的多次散射而向辐射传输模型的逼近,如李-Strahler 提出的几何光学与辐射传输一体化综合模型。

3DRT 模型是将植被冠层在三维空间内划分成有限个单位尺度的立方体,对入射辐射按入射时的天顶角和方位角离散化,该模型的最大特点是将前一个立方体的辐射按其出射方向作为它进入下一个立方体的第二辐射源,同时还要考虑多次散射作用,从而将所有立方体的辐射场有机的联系起来,得到整个群体中的辐射分布。该模型适用于水平均匀植被如自然草原和不连续植被如行栽作物、森林冠层<sup>[1]</sup>。

李-Strahler 提出的几何光学与辐射传输一体化综合模型,即 GORT 混合模型是混合模型中的另一个经典模型,在该模型中,类似几何光学模型,群体被认为是具有一定几何形状和空间分布特征的植株集合,植株的每一组分又按辐射传输模型处理成光学性质已知的吸收和散射体,并且考虑群体的多次散射作用。这两者通过间隙率模型联系起来<sup>[20]</sup>。倪文革<sup>[21]</sup>等将土壤模型引入 GORT 混合模型,使其成为具有非朗伯体背景的模式。GORT 混合模型是通用模型,不仅可以用于稀疏群体,对密闭群体也同样适用。

#### 2.1.4 计算机模拟模型

计算机模拟模型的理论核心蒙特卡洛方法,应用计算机模拟给定分布函数,是一种具有统计特征的数学方法。随着计算机计算能力和图形图像处理能力的不断提高,计算机模拟模型开始从纯蒙特卡洛方法向“结构真实模型”发展。计算机模拟模型可以通过改变植被结构来估算不同结构特征对 BRDF 的影响。除此之外,在一定程度上,还可以作为验证其他模型的工具。但是结构设计不足、难于理解和反演成为计算机模拟模型的最大不足<sup>[1]</sup>。

黄健熙<sup>[22,23]</sup>等在 VC++6.0 环境下编程,在准确描述光子在植被冠层中碰撞、散射的随机过程基础上,采用蒙特卡罗方法实现了对森林冠层 BRDF 的模拟,并用实测数据验证,证实该方法与实测数据较吻合。谢东辉<sup>[24]</sup>等应用基于真实结构场景的辐

射度模型(RGM)计算了玉米场景的二向性反射率因子,并证实其用于植被冠层光辐射分布模拟的可行性。

#### 2.2 半经验模型

半经验模型抓住了影响 BRDF 的主要因子,广泛应用于批量处理数据的算法中,其代表 Ambrals 核驱动模型对于地表的二向反射特征是由一定物理意义的核的线性组合来拟和,该模型的参数为各向均匀散射核、体散射核、几何光学散射核权重的结合,反映地表散射的 3 种主要类型。Ambrals 算法通过线性回归,反演出拟合数据最优的 3 种核的权重,然后通过核的外推求出任意光线入射角和观测角的二向反射。

核驱动模型利用最小二乘法选择最佳的核,但在小样本情况下,反演结果很不稳定,利用信息反演理论并考虑模型、测量误差等影响因素,高峰<sup>[25]</sup>等提出了最小方差反演准则,反演结果更可靠并较少依赖多角度观测数据的方位。在 Ambrals 的新一代算法版本中,针对 RossThick-LiSparseR 核组合向大天顶角外推时反射率为负的情况,用杨华<sup>[26]</sup>等提出的新几何光学核——LiTransit(李氏过渡核)取代 LiSparseR 核。李静<sup>[27]</sup>等应用多项式表达模型这一半经验模型实现了多角度覆盖率反演,并设计实验证明其反演精度很高。

### 3 模型反演研究

前向模型是成功反演的基础和手段,遥感的本质就是通过遥感原始数据和观测数据来反演地表各种有价值的参数信息,例如地表反照率、植被的结构参数 LAI 等。李小文等认为,一个模型能否反演,除与模型本身的特点有关外,还取决于观测值的信息量和类型,以及地面实况下观测值对地表未知参数的敏感性<sup>[1]</sup>。通常,模型反演即为根据方向性观测数据,对应独立的模型参数,使计算的方向反射数据与观测数据拟合最好,拟合效果由代价函数来判断。然而由于精确的模型需要较多的参数,但是涉及的参数过多,反而不利于模型的反演,所以大多数的模型很难找到或根本不存在其反函数的表达式,需要计算机进行迭代来完成反演过程。传统的遥感反演将观测数据量大于待反演的模型参数量作为反演的先决条件,应用最小二乘法进行迭代计算。该方法适合解决观测数据量远大于模型参数量的问题,然而实际反演时,观测数据的信息量通常是不足的,许多反演问题本质上是“病态”的,于是学者们提

出了一些反演的策略和技巧。

### 3.1 先验知识的引入

在模型反演之前,各物理参数的信息就可以从各种不同的途径获得,作为先验知识很自然的引入到反演中去。李小文等将这些由参数的物理性质决定的先验知识称为“硬边界”,并仿照参数物理限制“越界罚点”的办法,用参数的平均期望和不确定性构造了参数的“软边界”,用作搜索最小均方误差的加权,取得了较好的效果<sup>[28]</sup>。在遥感模型反演中,先验知识就由硬边界和软边界构成。

贝叶斯学派认为应充分利用已存在的先验知识。而且 Bayes 反演特别适用于通过遥感手段来积累对地观测的知识,原因是它只根据观测数据提供的信息量来修正先验知识<sup>[29]</sup>。在 Bayes 反演中,当测量误差、建模误差和先验知识都服从高斯分布时,对参数的最大似然估计可以通过最大化后验概率密度或最小化代价函数得到,然而遥感中的观测数据和物理参数都是有界的,所以闫广建<sup>[30]</sup>等对反演中的代价函数作了改进,使其对于大的反演偏差很敏感,抗干扰的能力很强。

Tarantola 认为先验知识是参数空间与数据空间的联合概率密度分布。在参数空间应用先验知识,可以计算反演结果的置信度。李小文用在反演新英格兰地区的 AVHRR 数据的实验中所有失败反演的参数与 73 组先验数据反演得到的参数进行对比,发现所有失败的反演,其反演得到的参数都落在先验数据构成的最概然区域之外。而在数据空间应用先验知识,可以检测和平滑噪声。应用参数空间的先验知识,可以求出特定采样方向的先验参考数据,把判断为噪声大的数据与相同采样方向的先验参考数据求平均值,即可达到平滑噪声的目的<sup>[31]</sup>。

鉴于多波段的观测会给反演引入更多的未知光谱参数,闫广建<sup>[32]</sup>等对利用这种先验知识做出尝试,即根据绿色植被反射光谱的特点,将植被反射光谱曲线的相对位置关系作为先验知识应用到植被结构的反演中,分别在绿光、红光和近红外波段重构光谱参数,利用波段差值和比值描述光谱先验知识进而反演树冠结构参数,提高了抗噪声能力,使引入先验知识后的结果更接近测量值。

随着遥感事业不断向前发展,我国的研究人员

建立了中国典型地物的波谱数据库,虽然现在还不是很完善,而且农作物数据较多,但对遥感反演提供了很好的先验知识,对提高反演精度意义很大。

### 3.2 分阶段目标决策

大量的事实证明参数的敏感程度对反演成败有着十分重要的影响,但是用所有方向采样上 BRDF 值对某一参数的敏感程度的平方和来定义敏感性,很难应用于反演目标决策,因此李小文、高峰<sup>[28,33]</sup>等提出了参数的不确定性和敏感性矩阵(USM)。

在 USM 的基础上就可以较客观地制定反演策略,首先从参数集中选取最敏感、最不确定的参数,简单固定其它参数,再选用最敏感的样本来反演,得到待反演参数子集后,重新计算 USM,选出下一组最敏感、最不确定的参数,进行下一阶段反演。高峰<sup>①</sup>、闫广建<sup>②</sup>等以参数的不确定性与敏感性矩阵为基础采用 SAIL 模型和 GOMS 模型对多阶段反演策略进行了研究。杨华、王锦以及 Susaki<sup>[34~36]</sup>等从基于 USM 的信息矩阵、未确知有理数、盲数、参数鲁棒性估计等方面进行了反演理论和方法的研究,取得了较好的效果。赵祥<sup>[37]</sup>等以这些研究为基础,针对地表观测数据与模型模拟数据存在一定程度的差异或误差情况,以 SAIL 模型为例,构建最小中值平方(LMS)代价函数,分阶段的对模型参数鲁棒的反演,使参数反演精度得到提高。

### 3.3 最优化方法的应用

由于遥感模型的反演参数具有明确的物理含义和边界,因此遥感模型反演一般属于约束最优化方法。一些具有较强前向模拟能力的模型,例如 GOMS 模型属于非线性模型,不但形式复杂,而且很难求其反函数的解析表达式。以遗传算法为代表的随机搜索算法逐渐受到人们的重视,唐世浩<sup>[38]</sup>等采用遗传算法对 GOMS 进行反演,并针对传统遗传算法的不足进行了改进,通过与逐步二次规划法的比较,证实将遗传算法收敛于全局最优解的概率大与逐步二次规划法收敛速度快的优点相结合,可以取得较为理想的效果。庄家礼<sup>[39]</sup>等应用遗传算法反演组分温度,为基于热红外方向性辐射模型反演组分温度提供了新的方法。

模拟退火算法是新兴的现代优化方法之一,是由 Kirkpatrick 等提出的一种基于 Monte Carlo 迭

① 高峰. 植被冠层多角度遥感反演研究. 北京:北京师范大学资源与环境学系,1997.

② 闫广建. 地表遥感要素反演研究. 北京:中国科学院遥感应用研究所,1999.

代求解法的启发式随机搜索算法,已应用到各门学科中解决非线性系统中的优化问题,但很少应用到植被参数反演方面。黄春林<sup>[40]</sup>等 SAIL 模型为正向模型,基于模拟退火算法进行植被参数的反演,证明模拟退火算法能够跳出局部最优,得到全局最优解,并且能够得到高精度的叶面积指数和叶绿素含量,但是该方法比较复杂,运算时间较长,一般认为在全局收敛性上不如遗传算法。

启发式优化算法的另一个代表神经网络算法在描述和表征自然界存在的非线性本质的形态现象中具有其他学科难以比拟的优势。人工神经网络已经成功地应用于遥感参量反演,Abuelgasim<sup>[41]</sup>等用神经网络进行冠层方向反射的前向何反演模型研究,并成功对密度、高度、形状等结构参数进行反演。申广荣<sup>[42]</sup>尝试采用水稻大田试验的实测光谱数据,综合考虑现有的作物双向反射物理模型,发展基于神经网络的水稻双向反射的前向和反演模型。

使用最优化算法寻找全局最优解的不足之处为反演完毕不能给出先验知识的后验分布。然而先验知识的后验分布可以作为下一次反演的先验知识,并且获取的后验分布可针对不同地物比较选择不同遥感模型进而提高反演精度降低反演结果的不确定性,使先验知识的后验分布具有积极意义。秦军<sup>[43]</sup>等将大气和海洋模型数据同化中使用的集合卡曼滤波方法与遥感前向 BRDF 模型结合,取得了较好的结果。

## 4 结 语

随着美国 EOS 计划中星载多角度传感器的成功发射,多角度遥感成为全球遥感基础研究的热点。在该领域中,获取地物二向反射光谱资料的实验研究、建立辐射和地物相互作用物理模型的理论研究以及模式反演、地物结构参数估算的应用研究均受到遥感学者的关注,积累了大量的学术成果。同时新型遥感技术的迅速发展,如热红外遥感、微波遥感、紫外波段和激光荧光遥感等,为遥感技术在地表参数反演以及分析参数在空间上的分布等方面带来了新的思路和巨大的发展空间。将模型的发展与计算机技术相结合,建立专业知识库,实现模型应用的实用化与业务化。科学的进步与遥感技术的发展,为遥感反演走向实用化提供了很好的契机,使其更好的服务于生产和生活。当然,现阶段的研究还有一些不足之处,可以从以下几个方面来完善:

(1)模型的改进。通过对现有模型的不断改进,

使模型尽可能的模拟各个参数的作用,从而尽可能准确的完成反演。可以尝试将物理模型与统计模型相结合来反演地表参数,或者将遥感模型与其他学科模型(例如生物模型)耦合来扩大反演的适用范围,建立一种新的快速、精确、适用性广、可反演的物理模型。

(2)模型的验证。BRDF 模型的精度和适用性,都要求实际地面目标的多角度 BRDF 观测数据和空间结构参数的测量数据来进行验证并作为发展的依据,这就为获取地物二向反射光谱资料的实验研究提出了要求。目前,各种二向反射数据库已经或正在建立。

(3)尺度问题。用地面测量点的数据来验证几米到几公里空间分辨率像元尺度的遥感反演结果,这样的实验方法还需要进一步的研究。而且多数模型大都缺乏对尺度问题的明确表达,还需要对尺度机理进行深入的研究,并将其引入到模型中去。

(4)先验知识的利用。先验知识的积累是一个长期的过程,而且先验知识的准确程度对反演结果也有很大的影响,应该针对不同地物分别产生先验知识,这又依赖于地面实验研究的发展,特别是典型地物标准波谱知识库的建立。还要充分利用图像本身提供信息提取先验知识。

(5)反演的策略和算法问题。对于复杂模型,反演可以考虑遗传算法、神经网络等智能处理技术;引入各种现代非线性科学进行反演研究以提高反演精度;研究未确知数学有效用于多阶段反演的方法;建立反演结果稳定性与不确定性评估机制。

(6)多信息源的融合。利用多角度数据与高光谱数据、多波段数据的结合反演地表参量,有助于提高反演精度。另外,针对反演算法的优缺点,实现多信息源、多反演算法的融合。

## 参考文献:

- [1] Li X W, Wang J D. Plant Photon Remote Sensing Model and Parameterizing of Plant Structure[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] Qin W, Liang S. Plane Parallel Canopy Radiation Transfer Modeling and Applications: Recent Advances and Future Directions[J]. Remote Sensing Review, 2000, 18: 281-305.
- [3] Zhao Y S. Principle and Methodology of Remote Sensing Application and Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003. [赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [4] Suits G H. The Calculation of the Directional Reflectance of Vegetative Canopy[J]. Remote Sensing of Environ., 1971, 2:

- 117-125.
- [5] Chance J E, Cantu J M. A Study of Plant Canopy Reflectance Models[R]. Unpublished Report, Pan American University, 1975;62.
  - [6] Kuusk A E. The Hotspot of a Uniform Vegetation Cover[J]. *Earth Res. from Space*, 1983, 4: 90-99.
  - [7] Kuusk A E. The Hotspot Effect in Plant Canopy Reflectance [A]. *Photon-vegetation Interactions: Applications in Optical Remote Sensing and Plant Physiology*[C]. New York: Springer-Verlag, 1991.
  - [8] Kuusk A E. A Fast Invertible Canopy Reflectance Model[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1995, 51: 342-350.
  - [9] Jupp D, Strahler A. A Hotspot Model for Leaf Canopies[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1991, 38: 193-210.
  - [10] Qin W H, Jupp D L B. An Analytical and Computationally Efficient Reflectance Model for Leaf Canopies[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 66: 31-64.
  - [11] Verhoef W, Bach H. Simulation of Hyperspectral and Directional Radiance Images Using Coupled Biophysical and Atmospheric Radiative Transfer Models[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87: 23-41.
  - [12] Verhoef W, Bach H. Couple Soil-leaf-canopy and Atmosphere Radiative Transfer Modeling to Simulate Hyperspectral Multi-angular Surface Reflectance and TOA Radiance Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 10: 1-17.
  - [13] Liu Q, Chen L F, Liu Q H, *et al.* A Radiation Transfer Model to Predict Canopy Radiation in Thermal Infrared Band[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(3): 161-167. [刘强, 陈良富, 柳钦火, 等. 作物冠层的热红外辐射传输模型[J]. *遥感学报*, 2003, 7(3): 161-167.]
  - [14] Zhang R H, Qin H W. Collection of Bidirectional Reflectance Spectrum of Main Crops in North China[M]. Beijing: Science Press, 1991. [张仁华, 覃汉文. 中国北方主要农作物双向反射光谱数据集[M]. 北京: 科学出版社, 1991.]
  - [15] Walker J, Jupp D L H, Penridge L K, *et al.* Interpretation of Vegetation Structure in Landsat MSS Imagery: A Case Study in Disturbed Semi-arid Eucalypt Woodlands. Part 1. Field Data Analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 1986, 23: 19-33.
  - [16] Li X W, Strahler A H. Geometric-optical Bidirectional Reflectance Modeling of The discrete Crown Vegetation Canopy: Effect of Crown Shape and Mutual Shadowing [J]. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1992, 30(2): 276-292.
  - [17] Schaaf G B, Li X W, Strahler A H. Topographic Effects on Bidirectional and Hemispherical Reflectances Calculated with a Geometric-optical Canopy Model[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1994, 32: 1186-1193.
  - [18] Chen J M, Leblanc S G. A Four-scale Bi-directional Reflectance Model Based on Canopy Architecture[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, 35: 1316-1337.
  - [19] Qi J, Kerr Y H, Moran M S, *et al.* Leaf Area Index Estimates Using Remotely Sensed Data and BRDF Models in a Semiarid Region[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 73: 18-30.
  - [20] Li X W, Wang J D, Strahler A H. A Hybrid Geometric Optical-Radiative Transfer Approach for Modeling Light Absorption and Albedo of Discontinuous Canopies[J]. *Science in China (Series B)*, 1994, 24(8): 828-836. [李小文, 王锦地, Strahler A H. 不连续植被及其下地面对光辐射的吸收与反照率模型[J]. *中国科学(B辑)*, 1994, 24(8): 828-836.]
  - [21] Ni W, Li X. A Coupled Vegetation-soil Bidirectional Reflectance Model for a Semiarid Landscape[J]. *Remote Sens. Environ.*, 2000, 74: 113-12.
  - [22] Huang J X, Wu B F, Zeng Y, *et al.* Forest Canopy BRDF Simulation Using Monte Carlo Method[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(6): 1671-1676. [黄健熙, 吴炳方, 曾源, 等. 基于蒙特卡罗方法的森林冠层 BRDF 模拟[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(6): 1671-1676.]
  - [23] Huang J X, Wu B F, Tian Y C, *et al.* Crop Canopy BRDF Simulation and Analysis Using Monte Carlo Method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(6): 1-6. [黄健熙, 吴炳方, 田亦陈, 等. 作物冠层 BRDF 的 Monte Carlo 模拟与分析[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 1-6.]
  - [24] Xie D H, Sun R, Zhu Q J, *et al.* Reflectance Distribution of Corn Canopies Simulated with Radiosity-graphics Combined Model[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 317-323. [谢东辉, 孙睿, 朱启疆, 等. 利用辐射度模型模拟玉米冠层辐射分布[J]. *作物学报*, 2006, 32(3): 317-323.]
  - [25] Gao F, Strahler A H, Xia Z G, *et al.* New Approach for Remote Sensing Inversion Using Kernel-Driven BRDF Model [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(12): 1315-1318. [高峰, Strahler A H, Xia Z G, 等. “核”驱动 BRDF 模型反演新途径[J]. *科学通报*, 1998, 43(12): 1315-1318.]
  - [26] Yang H, Li X W, Gao F. An Algorithm for the Retrieval of Albedo from Space Using New GO Kernel-Driven BRDF Model[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(4): 246-251. [杨华, 李小文, 高峰. 新几何光学核驱动 BRDF 模型反演地表反照率的算法[J]. *遥感学报*, 2002, 6(4): 246-251.]
  - [27] Li J, Liu Q, Liu Q H, *et al.* Validation of Polynomial Expression Model and Inversion of Crop Cover Rate[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 812-819. [李静, 刘强, 柳钦火, 等. 基于多项式表达模型的多角度覆盖率反演研究[J]. *遥感学报*, 2006, 10(5): 812-819.]
  - [28] Li X W, Gao F, Wang J D. Uncertainty and Sensitivity Matrix of Parameters in Inversion of Physical BRDF Model[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(1): 1-10. [李小文, 高峰, 王锦地. 遥感反演参数的不确定性与敏感性矩阵[J]. *遥感学报*, 1997, 1(1): 1-10.]
  - [29] Li X W, Wang J D, Hu B X, *et al.* The Application of Prior Knowledge in Remote Sensing Retrieval[J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(1): 67-72. [李小文, 王锦地, 胡宝新, 等. 先验知识在遥感反演中的作用[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(1): 67-72.]
  - [30] Tang S H, Zhu Q J, Yan G J. Theories and Methods of Ter-

- restrial Parameter Extraction from Remote Sensing[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2001, 37(2):266-273. [唐世浩, 朱启疆, 闫广建. 遥感地表参量反演的理论和方法[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2001, 37(2):266-273.]
- [31] Li X W, Wang J F, Wang J D, *et al.* Multi-angle and Thermal Infrared Remote Sensing of the Earth[M]. Beijing: Science Press, 2001. [李小文, 汪骏发, 王锦地, 等. 多角度与热红外对地遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [32] Yan G J, Wu J, Wang J D, *et al.* Spectral Prior Knowledge and Its Use in the Remote Sensing Based Inversion of Vegetation Structure[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(1):1-6. [闫广建, 吴均, 王锦地, 等. 光谱先验知识在植被结构遥感反演中的应用[J]. 遥感学报, 2002, 6(1):1-6.]
- [33] Gao F, Li X W, Xia Z G. Multi-angle Inversion with Multi-stage Based on Acknowledge[J]. Science in China(Series D), 1998, 28(4):346-350. [高峰, 李小文, 夏宗国. 基于知识的分阶段不确定性多角度遥感反演[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(4):346-350.]
- [34] Susaki J, Hara K, Kajiware K, *et al.* Robust Estimation of BRDF Model Parameters[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89:63-71.
- [35] Wang J D, Yan G J, Wang C Z. A Mathematical Approach on Uncertain Information Process in Remote Sensing Inversion[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(3):214-219. [王锦地, 闫广建, 王昌佐. 遥感反演中不确定性信息处理的一种数字方法[J]. 遥感学报, 2004, 8(3):214-219.]
- [36] Yang H, Xu W L. Information Stream and Its Control in the Inversion of Quantitative Remote Sensing Regularization of Inversion[J]. Science in China(Series D), 2003, 33(8):799-808. [杨华, 许王莉. 定量遥感正则化反演中的信息流及其控制[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(8):799-808.]
- [37] Zhao X, Liu S H, Tang Y M, *et al.* Studying on Multi-stage Robust Estimation of BRDF Model Parameters[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(6):901-909. [赵祥, 刘素红, 唐义闵, 等. BRDF模型参数分阶段鲁棒性反演方法[J]. 遥感学报, 2006, 10(6):901-909.]
- [38] Tang S H, Zhu Q J, Li X W, *et al.* A Modified Genetic Algorithm and Its Capacity to Invert GOMS Model[J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(5):327-333. [唐世浩, 朱启疆, 李小文, 等. 遗传算法及其在 GOMS 模型反演中的应用效果分析[J]. 遥感学报, 2001, 5(5):327-333.]
- [39] Zhuang J L, Chen L F, Xu X R. Retrieval of Component Temperature of Continuous Vegetation Using Genetic Algorithm[J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(1):1-7. [庄家礼, 陈良富, 徐希孺. 用遗传算法反演连续植被的组分温度[J]. 遥感学报, 2001, 5(1):1-7.]
- [40] Huang C L, Li X, Lu L. A Simulated Annealing Algorithm for Retrieval of Vegetation Parameter from Optical Remote Sensing Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(4):271-276. [黄春林, 李新, 卢玲. 基于模拟退火算法的植被参数遥感反演[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(4):271-276.]
- [41] Abuelgasim A A, Gopal S, Strahler A H, *et al.* Forward and Inverse Modeling of Canopy Directional Reflectance Using a Neural Network[J]. Int. J. Remote Sensing, 1998, 19(3):453-471.
- [42] Shen G R, Wang R C. Study on Bi-directional Reflectance Model of Rice Using a Artificial Neural Network[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(4):252-258. [申广荣, 王人潮. 基于神经网络的水稻双向反射模型研究[J]. 遥感学报, 2002, 6(4):252-258.]
- [43] Qin J, Yan G J, Liu S M, *et al.* Application of Set Karman Filtering in Remote Sensing Inversion for Surface Parameters[J]. Science in China(Series D), 2005, 35(8):790-798. [秦军, 闫广建, 刘绍民, 等. 集合卡曼滤波在遥感反演地表参数中的应用[J]. 中国科学(D辑), 2005, 35(8):790-798.]

## Review on BRDF Model and the Inversion Strategy

LIU Jia, FAN Wen-yi

(Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** The paper introduces the latest progress of the bidirectional reflectance semi-empirical model and physical model in theoretical research and analyses the advantages and disadvantages of each model. Meanwhile, summarized the current development of the model inversion strategy and method. Furthermore, discussed the existing problems and the solutions in laboratory, theory as well as in applications.

**Key words:** Remote sensing inversion; BRDF model; Inversion strategy and method; Bidirectional reflectance