

# 遥感植被双向反射光谱的理论研究 与应用展望\*

覃文汉

(国家计划委员会地理研究所)  
(中国科学院)

1991年6月28日收稿

## 摘 要

本文首先分析了传统的垂直测量方法在定量遥感中的局限性及多角度倾斜光谱在估算地物三维空间结构等方面的优越性。通过总结近年来国际上在植被双向反射领域所取得的主要成果,对计算植被双向反射系数的四类物理模型进行了简要评述。然后,从模式的选取、地物方向谱的结构及最佳的多角度资料的获取、观测波段的选择和模式的数学反演等方面出发,详细地讨论了利用上述理论模型实现植被结构参数的定量估算、再生资源的定量遥感的主要过程,以及使多角度遥感的潜在优势得以真正实现的可能途径。

**关键词** 多角度遥感 植被双向反射模式 地物参数反演

在遥感图像上,自然地表的表观亮度除取决于所测地物的几何形态特征和光谱性质外,在很大程度上还与入射光方向和观测方向有关。传统的遥感技术主要是以垂直观测的方式来获取地物光谱的,在假设目标物为漫反射体(即朗伯体)的基础上对资料进行解译和处理。虽然这种测量方法十分简便,并能成功地地区分不同的地物类型,但所得资料中反映地物结构的信息量却非常有限,仅局限于那些通过考虑入射光角度变化和对多光谱资料进行数学转换和组合(如常用的绿度指标和各种植被指数)所能获得的那一部分。由于在可见光的大部分范围内,不同结构的绿色植被之间、不同类型的土壤之间和岩石之间垂直光谱曲线具有明显的相似性,使得人们很难依据它们对同一类型地物进行更详细的区分和地表特征的鉴别,更谈不上定量地估算出地物的三维形态特征和结构参数,实现遥感的真正定量化<sup>[1]</sup>。

自70年代以来,许多研究表明,把地物目标作为漫反射体的假定与实际情况有较大差异,其反射分布必须要用双向反射分布函数(BRDF)来描述。另外,同垂直测量相比,非垂直的多角度测量对于估算地物(特别是植被)的结构特征具有很大的优越性<sup>[2]</sup>。Gerstl等对Landsat的MSS、TM及NOAA的AVHRR在可见光和近红外波段地物光谱的4种主要特征(即光谱组成、空间变化、角度分布和时间变化特征)就植被分类的有效性、大气影响的敏感性及从卫星上获取资料的可利用性等进行比较后得出<sup>[3]</sup>;仅仅基于前两种特征很难对不同种群的植被进行特征鉴别,虽然当仪器的光谱分辨率达到10nm时,其有效性有所改善。利用第4种特征(多时相光谱)能确定出植被类型和作物生育期,

\* 本文曾得到左大康先生的悉心指导,在此表示衷心的感谢。

但它需要在其整个生长期内进行连续观测。而只有第3种特征(即反射光谱的角度分布)只需单一时相的资料就能鉴别出不同的植被类型。这是因为多角度的光谱资料除与地物的组成成分有关外,更主要地取决于地物的几何形态和结构的分布。此后许多野外的地面实测资料也证明了这一点<sup>[4]</sup>。同时,植被光谱的角度分布特征中所常见的“热点”效应和“镜面反射”现象更是与植被的结构参数直接相关,多角度的卫星遥感资料将使地物特征辨别、植被分类等的精度得到大幅度的提高。遥感图像应用将从传统的判读、分类走向空间结构特征的反演。因此,NASA已考虑在90年代晚期实施多角度观测的星载遥感系统。

多角度的遥感地物光谱常被称为地物的双向反射光谱。目前在这个领域里实验研究(快速获取地物的BRDF资料),理论研究(建立辐射与地物相互作用的物理模型)和应用研究(模式反演,地物结构参数的估算等)是并驾齐驱的。本文中作者主要就植被下垫面对后两个方面在国际上的研究现状和发展趋势进行简要的回顾、评述与展望,以求能为我国在此领域的工作开展起到抛砖引玉的作用。

## 一、研究现状

在地物双向反射光谱的研究中,最基础的工作是建立计算地物BRDF的数学模型。对于植被下垫面,目前已经出现了许多物理模型,按其理论基础可归纳为4类:几何光学模型、混浊介质模型、混合模型和计算机模拟模型。下面就它们的目前发展状况逐一进行介绍。

### 1. 几何光学模型

这是以古老的几何光学原理为基础的经典模型。在此,假定植被是由具有已知几何形状和光学性质、并按一定方式排列的几何体所组成,通过分析这些几何体对光线的截获和遮阴及地表面的反射来确定植被的反射系数。几何光学模型的核心可简单地用以下两点加以概括:首先就是将植被的几何结构及空间分布模型化,常用的模型有圆锥体、圆柱体、椭圆体等,其排列方式可以是规则的、丛生的或随机的;其次,根据几何光学原理计算上述几何体在任一入射光方向和观测方向的组合下所形成的光斑区域和阴影区域的大小,利用它们各自已知的反射率求得整个植被下垫面的反射系数分布。

早期的几何模型将植被简化成圆锥体、平板或圆盘,分别考虑其光斑和阴影区域的作用。对于行播的大田作物,通常还考虑背景(土壤)的贡献及株高/行宽比等因素的影响<sup>[5]</sup>。

近几年来几何光学模型有了较大的发展。李小文和 Strahler 针对上述模型均假定几何体很小且可数,但有不能用于低密度、大个体的稀疏或其它非均匀群体的缺陷,直接用各种概率分布函数来模拟植被主要结构参数的空间分布,建立了森林的BRDF模式<sup>[6]</sup>。在考虑光线在植被中衰减的同时,利用群体平均透射理论计算出相互遮盖的非均匀群体的平均间隙率<sup>[7]</sup>。Jupp等在Li-Strahler模式的基础上考虑森林的层次结构(树冠、灌木,草地和土壤),建立了包括“热点”效应在内的椭球形树冠群体的多层几何光学模型<sup>[8]</sup>。

Strahler 等利用布尔模型建立了更一般的几何模式,它既能用于整个群体、又可用于单一树冠<sup>[9]</sup>。最近,李小文等对椭球形树冠通过在主平面上改进 Jupp 的“热点”模式及考虑树冠间相互遮阴的影响,使几何模式的精度又有所提高<sup>[10]</sup>。

同其它模型相比,几何光学模型更适合于处理非均匀的植被群体,特别是低密度、大个体的稀疏群体,如灌木林、稀疏森林、果园等,因此近几年来取得了较大进展。但是,现有的几何光学模型一般都是很费机时的。对于辐射在树冠中衰减的处理也过于简单,不考虑天空散射光和群体的多次散射作用,同时也不考虑植被-土壤系统的非朗伯辐射特性。这都使得几何光学模式的精度受到影响,尤其是在低太阳高度角(小于  $30^\circ$ )时,结果偏低,误差增大。

## 2. 混浊介质模型

此类模型起源于随机介质(即混浊介质)中的辐射传输方程,它在核物理、天文及大气物理的辐射传输研究中应用非常广泛。由于传输介质的不同,植被中辐射的传输过程远比上述情形复杂,因此在将此理论运用于植被群体之前首先必须对其结构作一定的假设。其中最基本的假设就是植被的各组分(叶、茎、花或穗等)为已知光学性质和取向小的吸收和散射体。群体被认为是由它们在水平方向按随机分布方式组成的平面平行层(Plane-Parallel layer)的集合,把叶面积指数(LAI)、叶角分布函数(LAD)等作为群体的基本结构参数来考虑群体结构对其垂直辐射场的影响。混浊介质模型是目前水平均匀群体中应用最广泛的模型。在目前众多的具体模式中按其来源又可分为以 KM(Kubelka-Munk)理论为基础的模型和以辐射传输方程为基础的模型。前者以 Suits 模式为代表,后者中最经典的模式是 Ross-Nilson 模式。

所谓的 KM 理论就是用一个 5 参数 4 通量的微分方程组(也称 Duntley 方程组)来代替原始的辐射传输方程,以便求得辐射分布的解析表达式<sup>[11]</sup>。由于 KM 理论简单、实用,很快就被用于植被 BRDF 的研究。Suits 首次考虑 Duntley 方程组中各参数随太阳位置和观测方向的变化,以及群体的多层结构和“热点”效应,将植被的方向反射系数与其光谱性质和结构参数直接联系起来<sup>[12]</sup>。Suits 模式后来相继在许多大田作物群体中得到验证并被用于研究植被结构对不同波段反射辐射分布的影响。Verhoef 将平均透射理论引入 Suits 模式,提出了任意倾斜角叶子的散射(SAIL)模式,直接将反映植被群体结构的两个重要参数 LAI 和 LAD 与群体的 BRDF 紧密地联系起来<sup>[13]</sup>。由于上述 Duntley 方程组中的 5 个参数实质上是与介质散射相函数有关的复杂函数,一般情况下不为常数,必须实验确定。只有对各项同性的朗伯散射体,它才有解析解。因此,从理论上来说 SAIL 模式也只适用于各向同性的均匀群体。

Suits 模式和 SAIL 模式都是连续型的。与它们在原理上基本相同的离散模式是由 Idso & de Wit 首先提出的,并被作为许多更复杂、更精确的离散模式的基础<sup>[2]</sup>。另外, Walthall 等提出的计算均匀植被方向反射系数的半经验公式<sup>[14]</sup>为用少量次数的观测资料来推算全方位的方向反射分布,进而为利用合适的模式来反演植被结构参数提供了一条较简便的途径。

Ross & Nilson 通过建立原始的辐射传输方程中光学路径和散射相函数与群体结

构参数 (LAI, LAD) 和叶片散射相函数间的物理关系, 使它能直接用于模拟植被群体中的辐射传输过程<sup>[15]</sup>。对于植被遥感中常见的“热点”效应和镜面反射现象, Kuusk<sup>[16]</sup> 和 Vanderbilt 等<sup>[17]</sup> 分别进行了较深入的研究, 提出了相应的计算公式。最近 Nilson 等提出了包括群体“热点”效应和镜面反射的影响在内的、计算水平均匀群体 BRDF 的解析模式, 使辐射传输方程模式更趋完善<sup>[16, 18]</sup>。它们的结果表明: “热点”区域的大小主要取决于叶片的几何尺度, 而镜面反射所占的比重除与叶片表面蜡质层厚度有关外, 主要还取决于群体中叶片的角度分布方式。

随着计算机技术的迅速发展, 利用各种数值方法(如离散坐标化, 有限元法等)直接求解植被中参数化的一维或三维的辐射传输方程, 计算植被 BRDF 的工作越来越受到人们的重视<sup>[19]</sup>。从理论上来说, 数值方法能处理任何非均匀程度和非朗伯性质的群体。但由于受收敛速度和计算时间的限制, 在实际应用中其效果有时并不优于简单的解析方法。

目前的混浊介质模型通常不考虑非叶器官的作用以及植被各组分间的空间距离和非随机的分布现象, 因此它一般只适合于植被组分尺度与群体高度相比很小的群体(如生长盛期的大田作物)以及其它稠密、水平均匀的群体。另外, 如何有效地确定出叶片的散射相函数和考虑群体中非叶器官的作用, 以及更精确地处理群体的“热点”效应和多次散射作用也是今后混浊介质模型中值得深入探讨的问题。

### 3. 混合模型

顾名思义, 本模型是几何光学模型和混浊介质模型的综合。对群体的每一组分的处理类似于混浊介质模型, 被认为是光学性质已知的, 小的吸收和散射体, 而整个群体仍同几何模型一样, 被处理成具有一定几何形状和空间分布特征植株的集合, 从而克服了混浊介质模型中假定群体各组分随机分布的局限性。此类模型是通用模型, 也是最复杂的 BRDF 模型。

早期的混合模型常以行播的大田作物为其主要的研究对象。它们的共同点是在各自均匀群体模式的基础上引入行模型参数进行订正。通常采用长方体(及其集合)、椭圆体等几何模型来描述行中植被的分布形状。通过变化行模型参数还能模拟植被在不同生育期内的群体结构变化, 计算出植被覆盖率<sup>[2]</sup>。

对于一般的非均匀群体, Norman 等及 Kimes 等分别提出了各自的通用模式 (BIGAR 模式和 3-D 模式), 适用于具有任意给定曲面形状、以任意方式分布的植被。BIGAR 模式的核心是首先计算给定群体的间隙率, 然后以间隙率相等为基础得到等价的均匀群体, 再用 Cupid 模式计算出相应的 BRDF<sup>[20]</sup>。3-D 模式的出发点就是将植被在三维空间内划分成有限个单位尺度的立方体, 将初始辐射场(群体顶部入射辐射)按其入射时的天顶角和方位角离散化。此模式的独到之处在于将前一个立方体散射或透射的辐射按其出射方向作为它所进入的下一个立方体的第二个辐射源, 并且考虑多次散射作用。这样就将所有立方体的辐射场有机地联系起来, 从而得到了整个群体中的辐射分布<sup>[21]</sup>。

由于 BIGAR 模式和 3-D 模式的计算量非常大, Goel 等针对大多数大田作物为行播作物的特点, 将其前面的行模式进行扩展, 提出了一个较简单的三维模式 (TRIM)<sup>[2]</sup>。他们将行播大田中的作物群体分解成数量一定、面积为株距×行宽的长方体, 每个长方体中

植株的垂直投影廓线可用椭圆函数来描述,通过变化其中的参数可以模拟出不同生长阶段植被覆盖率的变化。显然,TRIM 不能用于随机或丛生分布的植被群体。

从理论上来说,混合模型适用于任何非均匀程度的植被。但是上述混合模型除了它们各自特有的局限性外,还有两个共同的缺陷:(1)没有完整地考虑土壤和植被各组分非朗伯反射特征;(2)在模式中考虑群体的“热点”效应。这也是今后混合模型需要进一步完善的地方之一。

#### 4. 计算机模拟模型

前面所讨论的三类模型在处理植被结构时通常不能同时考虑植被各组分的尺度大小、空间距离和非随机的分布特征。这显然不能完整地反映出自然植被的真实特征。计算机模拟模型能比它们更灵活、更详细、更真实地处理上述非均匀群体问题,因此近 20 年来逐渐得到广泛的应用和发展。计算机模拟模型的核心就是蒙特卡洛 (Monte Carlo) 方法。它是一种在计算机上模拟给定分布函数的随机变量之统计特征的数学方法。

将计算机模拟方法运用于植被辐射传输研究已有近 30 年的历史。最近, Ross 等用此方法系统地研究了植被结构和光照条件对群体 BRDF 的影响<sup>[22]</sup>。在对作物群体的研究中,他们首先用各种数学函数模拟群体的几何结构,然后假设群体顶部初始直接入射光具有单位“重量”,天空散射光的“重量”等于其角分布强度 (SKYL)。当辐射与叶片、茎干、土壤等目标发生作用时,其重量的变化主要取决于入射角,目标物的反射率、透射率和散射相函数等要素。通过给定恰当的临界常数,在具体模拟过程中只考虑那些在进入仪器视场角之前其“重量”大于该临界值的辐射。这样就克服了以往的计算机模拟模型中追踪每一个光量子从“生”到“死”的全过程,致使模拟效率较低的缺陷。苏联学者的工作详细地反映了叶片的形状、大小及叶间距离、叶角分布特征、植被高度及土壤反射率等对植被 BRDF 的形状,特别是群体“热点”效应和镜面反射的影响,许多结论对今后植被遥感资料的精确解译、参数反演等工作的开展都具有较好的参考价值。

计算机模拟方法在此领域的应用是多方面的。它能同时真实地考虑植被各组分的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、外辐射场的统计特征,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成效的。但是此方法目前还存在两大缺陷,最基本的不足就是为了获得较好的计算精度必须进行大数量的试验和重复,且结果的收敛速度也较慢(与试验次数平方根之倒数同量级),因而十分费机时。此外,在用遥感资料估算植被结构参数时,计算机模拟方法的适用性也常常受到群体结构变量数目的限制,这是我们应用计算机模拟模型时值得注意的问题。

总的来说,每一类型的模型都有其各自的特点和合适的应用对象与范围,因而都有各自不可取代的存在价值而共同得到发展。但是目前的研究动态表明,各类模型相互渗透,取长补短,模式综合化的趋势越来越明显。虽然现有的模型都从不同的角度或多或少地考虑了植被各组分和土壤的非朗伯散射特性、“热点”效应及群体的各种非随机空间分布等,但至今还没有任何一个模式完整地考虑了自然植被上述所有的真实特征,这就是今后

植被 BRDF 模型研究所要解决的主要问题。另外,为了更有效地利用多角度、多时相的航空或卫星遥感资料,建立比较简单的、考虑大气散射和时间参量在内的 BRDF 模型也是非常必要的。

## 二、应用展望

遥感能否成功地应用于全球植被监测和管理主要取决于它在确定植被类型、生长期以及估算各种生态参数等方面的能力。作为遥感技术的理论开拓和应用研究的一部分,研究植被 BRDF 的目的不仅是如何建立一些精确地描述辐射与植被相互作用过程的数学模型,更重要的是如何依据这些模型和多角度的遥感资料反演出在许多领域中都很有价值的植被结构参数和生物量,有效地进行植被生长模拟、动态监测和类型区分。要实现这个目标,所遇到的第一个问题就是模型的选择。通常,模型越精确往往就越复杂。虽然目前计算机 CPU 的速度完全能满足高精度综合模型的要求,但反演这种复杂模型需要较多的辅助输入参数和较长的机时。相反,简单的解析模型虽然适用范围窄些,精度低些,但却能在微机上快速地实现植被反射系数的计算和参数的反演<sup>[2]</sup>。因此,根据不同的研究对象、现有的计算手段和研究目的,在模型的精度和复杂性与反演的难易性方面进行适当的权衡就显得十分必要。具体来说,几何模型较适合于森林(特别是稀疏森林)等自然植被和生长前期的作物群体,而混浊介质模型对于水平均匀的植被群体精度较高。混合模型从理论上来说适合于任何类型的群体,但目前通用型的混合模型(如 BIGAR 和 3-D 模式)是十分费机时的。从遥感应用的角度来看,简单、实用的通用解析模型的建立将是解决上述矛盾的有效方法之一。

其次, BRDF 是分布在上半球  $2\pi$  空间上的连续函数,如何能用最少次数的观测资料反演出尽量多的结构参数也是目前普遍关心的一个问题。因为不是每一个方向的反射光谱都具有相同的反演价值。在一定的太阳方向下往往是植被 BRDF 的某一特定子集与植被结构的某个或某些主要特征参数的关系最密切, Gerstl 等称这种对应关系为地物结构的方向谱。总的来说,主平面(即入射光平面)和主锥面(沿入射角而方位从 0 变化到  $2\pi$  所形成的锥面)的反射光谱所包含的植被结构的信息最丰富。即使在上述两个子集中,某一特定区域的反射光谱可能又与某一个或几个植被结构参数联系最紧密(当然这也与具体的植被类型有关)。弄清楚地物结构方向谱的上述特征将为我们最有效、最经济地获得最有价值的多角度光谱资料奠定基础。目前常用的较为简单、直观的方法就是对 BRDF 模式中各参数进行敏感性分析,寻找各主要特征参数的敏感区域<sup>[23]</sup>。另一种有效方法就是蒙特卡洛法,它能直接模拟植被的每一结构参数及其他因素对 BRDF 的影响,从而较准确地找到其合适的子集。Ross 等用此方法模拟的结果表明,在“热点”区域, BRDF 的形状主要取决于群体中叶片的大小。垂直方向的反射系数则相对来说对土壤反射特征和单株植物的几何形状较敏感。而在与“热点”对称区域  $45^\circ$  观测角附近,反射系数主要与叶子的光学性质和叶面积指数的大小有关。当观测角为群体的平均叶角时,其 BRDF 随叶角方差的增大而明显增大。同时,在“热点”区域主平面与主锥面交界的两个观测方向,镜面反射的影响最显著<sup>[22]</sup>。虽然上述结论还有待于在野外用实测资料进行验

证,但它基本上为我们依据不同研究目的选取不同 BRDF 子集来进行特定参数的反演提供了一些基本信息。

另外,波段的选择也很重要。在多光谱资料中,不同波段的反射光谱所包含的信息量是不同的,并且随植被的生长阶段而变化。例如在植被遥感中常用的红光和近红外波段(相当于 TM 的 3, 4 两波段),由于植被各组分对红光的吸收率很高,反射、透射较小,加之群体内部的多次散射作用,此波段的反射辐射主要来自最上层的植冠,其饱和叶面积指数较低(通常不超过 3,大于此值时 BRDF 基本上不随 LAI 的增加而变化)。因此只有在作物的生长前期(因为土壤的红光反射率与植被的差异较大)红光的 BRDF 资料才适合于参数反演。而对于近红外波段,情况恰好相反,其饱和 LAI 较高(通常达到 6)。在作物的生长盛期此波段的 BRDF 资料较适合于估算群体总的叶面积指数和生物量<sup>[23]</sup>。除此之外,利用多光谱资料有效的数学组合取代单一波段的反射光谱来反演所需生态参数也是值得我们重视的一条研究途径。

在 BRDF 研究付诸应用的过程中,最后一环就是地物参数的估算,也即模式的数学反演。从理论上来说虽然目前在最优化原理、非线性规划和多目标决策等领域已有许多成熟的理论来解决复杂的目标函数的优化问题,但是由于 BRDF 模型的特殊性和复杂性,至今还没有一套完善的方法来处理任意的 BRDF 模型。实际上目前所有的反演过程和精度均取决于具体的模式和所用的反演方法。Geol 等在此领域进行了大量的工作。他们系统地讨论了 BRDF 模型的可反演性、敏感性及反演的参数数目与观测的重复次数和误差水平间的依赖关系<sup>[24,2]</sup>。依据 TRIM 和 SAIL 模式及 BRDF 的实测资料,利用最小二乘法原理,他们较成功地反演出几种农作物在不同生育期的 LAI 和 LAD,并进行了误差估算。其最后结果表明:通常情况下不可能反演出模型中所有的参数,只有当某些相对不太重要的参数(如 SAIL 模式中植物叶子的平均反射系数、吸收系数和土壤反射系数等)为已知时,才能较准确地估算出其他重要的结构参数。李小文等利用蒙特卡洛方法对其所提出的几何模式进行反演,较好地估算出模拟的 SPOT、MSS 影像中树木的平均半径和高度,以及单位像元中的树木密度<sup>[6]</sup>。Nilson 等用与 Goel 基本相似的方法在微机对其均匀群体的解析模型进行了反演<sup>[16]</sup>。Antyufeev 等探讨了用简单的牛顿法反演其 Monte Carlo 模式中主要结构参数的可行性及精确度<sup>[25]</sup>。

然而,上述 Geol 等的结论大都是基于他们所用的模式和反演方法得出的。根据非线性规划理论,所要反演的参数数目与目标函数的个数无必然联系。只是在实际观测中仪器误差和观测的随机性使得重复次数太少的资料往往缺乏代表性,其反演结果的稳定性也较差,使得反演结果依赖于测量的重复次数。至于所需的最低重复次数(即反演结果不再随重复次数的增加而变化)是一个十分复杂的问题(影响因素很多,除模式的数学特征外还有场地的均匀性,仪器精度及观测方法等。Geol 曾指出最低不少于 8 次<sup>[21]</sup>),还有待于今后更深入地探索。在反演过程中经常遇到的另一个问题就是复杂、综合、高精度的模式(特别是数值模式)不仅需要大、中型计算机的支持,而且反演结果并不一定理想。相反,某些相对简单的解析模式却能较好地反演出某些重要参数。这个问题曾在前面详细讨论过。这里要强调的是除了针对不同的研究对象建立具有一定精度水平的各种解析模式外,依据具体的地物结构方向谱通过选取不同的太阳/观测方向资料的组合来反演不同

的参数(而不是一次反演模式中的所有结构参数)是至关重要的。

植被双向反射光谱的研究是当今植被遥感中一个非常活跃的领域,它深远的理论价值和广阔的应用前景已逐渐被越来越多的科学家们所认识。由于它是一个复杂的知识综合体,难度非常大。从研究途径来说它包括物理模型的建立、光谱资料的获取、参数的数学反演及遥感的实时应用等一系列环节。而每一环节均是一个专门的知识领域,牵涉到光学、植物形态和植物生态学、遥感技术、非线性规划理论和计算机应用等众多学科的知识。虽然对植被中辐射传输过程的研究已有较长的历史,并取得了许多有应用价值的成果,但是就植被双向反射的总体研究来说至今还未有成熟的理论出现,更谈不上完成上述一系列的研究过程而真正付诸于实用。这无疑需要各个领域科学家们的共同努力,使得目前迅速发展的遥感技术尽快踏上新的台阶,进入一个真正的定量时代。

### 参 考 文 献

- [1] Goel, N. S. and N. E. Reynolds, Bidirectional reflectance and its relationship to vegetation characteristics, *Int. J. Remote Sens.*, 10, 107—132, 1989.
- [2] Goel, N. S., Models of vegetation canopy reflectances and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data, *Remote Sens. Reviews*, 4, 1—213, 1988.
- [3] Gerstl, S. A. W. and C. Simmer, Radiation physics and modeling for off-nadir satellite sensing of non-Lambertian surfaces, *Remote Sens. Environ.*, 20, 1—29, 1986.
- [4] Ranson, K. J., L. L. Biehl and M. E. Bauer, Variation in spectral response of Soybeans with respect to illumination, view and canopy geometry, *Int. J. Remote Sens.*, 6, 1827—1842, 1985.
- [5] Jackson, R. D. *et al.*, Plant canopy information extraction from composite scene reflectance of row crops, *Appl. Opt.*, 18, 3775—3782, 1979.
- [6] Li, X. and A. H. Strahler, Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-24, 906—919, 1986.
- [7] Li, X. and A. H. Strahler, Modeling the gap probability of a discontinuous vegetation canopy, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-26, 161—170, 1988.
- [8] Jupp, D. L. B., J. Walker and L. K. Penridge, Interpretation of vegetation structure in Landsat MSS imagery: a case study in disturbed semi-arid Eucalyptus woodland, Part 2. model-based analysis, *J. Environ. Mgt.*, 23, 35—57, 1986.
- [9] Strahler, A. H. and D. L. B. Jupp, Modeling bidirectional reflectance of forests and woodlands using Boolean models and geometric optics, *Remote Sens. Environ.*, 34, 153—166, 1990.
- [10] Li, X. and A. H. Strahler, Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete-crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-30, 276—292, 1992.
- [11] Ishimaru, A., Wave propagation and scattering in random media. Vol. 1, single scattering and transport theory, New York, Academic Press, 1978.
- [12] Suits, G. H., The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy, *Remote Sens. Environ.*, 2, 117—125, 1972.
- [13] Verhoef, W., Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model, *Remote Sens. Environ.*, 16, 125—141, 1984.
- [14] Walthall, C. L. *et al.*, Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces, *Appl. Opt.*, 24, 383—387, 1985.
- [15] Ross, J., The radiation regime and architecture of plant stands, Dr. W. Junk Publishers, The Hague-Boston-London, 1981.
- [16] Nilson, T. and A. Kuusk, A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion, *Remote Sens. Environ.*, 27, 157—167, 1989.
- [17] Vanderbilt, V. C. and L. Grant, Plant canopy specular reflectance model, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-23, 722—730, 1985.
- [18] Marshak, A. L., The effect of the hot spot on the transport equation in plant canopies, *J. Quant. Spectrosc.*

- Radiat. Transfer*, 42, 615—630, 1989.
- [19] Myneni, R. B., J. Ross and G. Asrar, A review on the theory of photon transport in leaf canopies in slab geometry, *Agric. Forest Meteorol.*, 45, 1—165, 1989.
- [20] Norman, J. M. and J. M. Welles, Contrasts among bidirectional reflectances of leaves, canopies, and soils, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-23, 659—668, 1985.
- [21] Kimes, D. S. and J. A. Kirchner, Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes, *Appl. Opt.*, 21, 4119—4129, 1982.
- [22] Ross, J. and A. Marshak, The influence of leaf orientation and the specular component of leaf reflectance on the canopy bidirectional reflectance *Remote Sens. Environ.*, 27, 251—260, 1989.
- [23] Kuusk, A. and T. Nilson, The reflectance of shortwave radiation from multilayer plant canopies, *Acad. Sci. Estonian SSR Sect. Phys. Astron., Preprint A-1*, Tallinn, 1989.
- [24] Goel, N. S. and R. L. Thompson, Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. V. estimation of leaf area index and average leaf angle using measured canopy reflectance, *Remote Sens. Environ.*, 16, 69—86, 1984.
- [25] Antyufeev, V. S. and A. L. Marshak, Inversion of Monte Carlo model for estimating vegetation canopy parameters, *Remote Sens. Environ.*, 33, 201—209, 1990.

## A REVIEW ON STUDIES OF BIDIRECTIONAL REFLECTANCE OF VEGETATION CANOPIES

Qin Wenhan

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences and State Planning Commission of the People's Republic of China)

### Abstract

Most of the radiation measurements in traditional remote sensing above natural surfaces such as soils or vegetation canopies, consisted of only nadir reflectance factors. Although such nadir measurements have the advantage of simplicity, the amount of information that can be inferred about the surface is limited mainly to that obtainable from wavelength discrimination and sun incidence angle changes. The result of recent studies suggests that multiple view angle may be used to great advantage in estimating the structure and characteristics of vegetation. This advantage of off-nadir measurements is only beginning to be understood.

The major achievements made in this area have been summarized in this paper, and the vegetation canopy reflectance models are reviewed according to the following four categories: geometrical optical models, turbid medium models, hybrid models and computer simulation method. The geometrical models are those that based on geometrical optical theory and the description of canopy/crown contours by some common geometrical patterns like cylinders, spheres, cones and ellipsoids etc. These models are generally applicable to inhomogeneous plant canopies, especially to the sparse canopies. The turbid medium models are developed from the solution of the radiation transfer equation in turbid medium through specifying the canopy elements by small absorbing and scattering particles (plates, discs) with finite size and given spatial orientation and optical properties, and randomly distributed in horizontal layers. This kind of models are prevalently used for the dense, horizontally uniform plant stands (crops, grasses). The hybrid models, which are deduced from the combination of the above two kind

of models, can represent homogeneous as well in homogeneous canopies. Therefore, hybrid models are expected to have much wider ranges of application. The last kind—computer simulation method can realistically simulate the radiation interaction processes within canopies, and their dependence on various canopy structural parameters.

For practical purposes, however, a certain balance between model precision and its computational efficiency is needed since precise models/methods are, as a rule, computationally tedious. It is suggested from the foregoing discussions that comprehensive analytical models may be most useful for extracting the vegetation structural parameters from the canopy reflectance spectrum. Based on the investigation of characteristics of scene directional reflectance spectrum, selection of wavebands being used and inversion of BRDF models, the main processes to quantitatively retrieve plant architectural parameters are deeply discussed. Finally, the approaches to bring the potential advantages of off-nadir observations into effect are described.

**Key words** Multiangle remote sensing Vegetation canopy reflectance models Target characteristics retrieval