

李小文 王锦地 著

# 植被光学遥感模型与 植被结构参数化

科学出版社

# 植被光学遥感模型与 植被结构参数化

李小文 王锦地 著

科学出版社

1995

(京)新登字 092 号

## 内 容 简 介

植被与光辐射之间的相互作用,是遥感研究的基础课题,它对作物估产、环境监测等都具有十分重要的意义。本书主要介绍了近 20 年来为描述植被与光辐射间相互作用机理的主要数学模型,重点介绍了几何光学模型和辐射传输模型及其一体化综合模型的研究进展,同时也简介了植被结构参数的测量方法。

本书可为从事植被遥感、植被生态研究、地理和植被下垫面研究的科研人员阅读使用,对农林管理、环境监测等部门的科技人员也有参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

植被光学遥感模型与植被结构参数化/李小文,王锦地著,一北京:科学出版社,1995.12

ISBN 7-03-005017-7/P·867

I. 植… II. ①李… ②王… III. ①作物-植被-遥感图象-光学模型  
②作物-植被-结构参数-测量方法 N. ①S315②TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 16161 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

洛神计算机公司排版

新世纪印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1995 年 12 月第一版 开本:787×1092 1/16

1995 年 12 月第一次印刷 印张:8

印数:1—754 字数:167 000

定价:28.00 元

## 序

以李小文博士为首的青年研究集体,其中大部分成员在中国科学院遥感应用研究所从事基础性研究工作,同时又得到美国斯特拉纳(Alan H. Strahler)教授的指导,他们长期合作,亲密无间,硕果累累。他们大量的观测、实验工作是在国内与中国学者共同进行,而更多的理论分析工作则是在波士顿大学遥感中心合作完成的。他们陆续发表了一系列有关树冠方向谱几何光学模型的精辟论著,为国际上同行广泛引用和称誉,称为李-斯双向反射分布函数(BRDF)数学模型。他们的工作突破了仅仅侧重光谱传输模型的传统,独树一帜,开拓了几何光学模型在遥感定量分析中实用化的新领域。特别是1988年李小文博士对不连续植被间隙率(gap-frequency)及其影响因素的多种分析模型。离散冠状植物层的几何光学双向反射模型的概念设计,在几何光学的宏观构架中,引入了微观的散射过程,简洁地描述了植被宏观结构对光辐射与植被相互作用的基本特征,从而把本来光在植被中的衰减、散射过程的数学表达,在很多应用方面提高到能够满足定量分析精度要求的新水平,取得了遥感信息机理研究方面一次新的飞跃。

植被空间结构的复杂性和多样性,尤其是树木、灌丛等不连续植被,其叶、茎等基本散射单元远大于光的波长,长期以来,借用大气散射的微分方程是远不足以描述的。70年代以来,国内外学者前仆后继,不懈努力,各有创见,建树颇多。而今李-斯模型着重于辐射传输模型与几何光学模型相互接近的探索,独领风骚,并非一朝一夕之功。

天赋颖慧、善于观察自然现象、领悟自然法则的人才,不可多得;而执着追求、锲而不舍、深入堂奥、脱颖而出者,更是凤毛麟角,难能可贵。李小文博士早在1986年学成归国,就在成都林业科学院的大力支持下,为大熊猫保护区箭竹生态的遥感监测,从地形与植被的航空像片分析着手,深入白龙江深山密林,勘察地面实况,于1990年荣获劳力士(Rolex)雄心壮志奖;他和他的研究集体从实践中得到了更宽阔的启迪,其研究计划也得到了社会的认可与支持。1991年中国国家自然科学基金委员会给予资助,斯特拉纳教授受聘为中国科学院遥感应用研究所名誉教授。这支年轻有为的研究集体,再接再厉,奋斗拼搏,年复一年,坚持在中国科学院遥感应用研究所和长春净月潭开放实验室等遥感实验基地,利用第一流的太阳模拟设备和实验场精密观测数据;今后还将在三峡库区进行生物量的评估工作,进行更深层次的遥感信息传输机理研究。在他们的精辟论著中,对解释遥感观测中的“热点效应”和植被反射的方向性变量,得到了国内外同行的高度评价与广泛引用;在EOS陆地BRDF产品方案评选中,被选为地表起伏像元和不连续植被像元的最适用模型;1994年获中国科学院自然科学一等奖。该项研究成为立足本国、放眼世界的国际合作研究的成功范例,这是当之无愧的。

《植被光学遥感模型与植被结构参数化》一书,是李小文和王锦地教授共同编著的一部系统性专著。书中对近20年来前人有关描述植被与光辐射之间的相互作用的机理的主要数学模型,例如爱沙尼亚学派罗斯(Ross)、尼尔逊(Nilson)等的贡献和演进作出了比较

全面的客观评述;对他们研究集体的实验成果,特别是以李-斯模型为核心的理论内涵和研究方法,给予深入浅出的介绍。这是作者以中文发表的最新专著。也可以说,这是他们向祖国人民和科技界的初步汇报。祝愿这支年轻有为的队伍乘风破浪,笑傲江湖,来日方长,自立于世界民族之林,继续攀登遥感信息科学领域的理论高峰。

陳述彭

1995年国庆节

## 前 言

美国原计划于 1998 年发射地球观测系统卫星(EOS),其目的在于开创一个多角度遥感的新时代,但由于经费削减,EOS 计划不断缩小。另一方面,日本和法国合作,试图捷足先登,拟于 1996 年将地球反射偏振与方向测量仪(POLDER)送上天。这样,星载多角度遥感的实现反而可能早一些,虽然其规模远不如 EOS 的原设计那样宏伟。

我国科学家较早就认识到多角度遥感的重要性,作为多角度遥感理论基础的二向性反射(BRDF)研究,早在 80 年代就在长春光学机械研究所得到的重视,并在 80 年代中期建成了太阳能模拟实验室,能进行 BRDF 的室内测量,其规模在世界各国是罕见的。本书作者所在的国家自然科学基金课题组也早在 1988 年就用常规航空像片的重叠部分作了多角度遥感的尝试,并提出了用广角镜头获取 BRDF 的设想,这与法国的 POLDER 广角成像概念的提出基本同时。大约在同期中国科学院地理研究所于禹城试验站也进行了长期的 BRDF 野外观测,但只是在国家自然科学基金委员会增大了对 BRDF 研究的资助强度之后,我们才开始逐步形成了一支配套、协作的 BRDF 研究队伍。本书中提及的我们自己的工作,只是这个研究集体在国家自然科学基金委员会支持下取得成果的一部分,这些成果是和课题组其他成员的共同努力分不开的。我们借此谨向课题组全体同志,尤其是协调课题国内工作的朱启疆、朱重光教授以及与我们长期合作的斯特拉纳教授表示由衷的感谢。

本书的写作是在王锦地的督促之下开始和完成的。她除了撰写第三、六章之外,还为本书出版付出了大量的时间。本书初稿完成后,我国三位到波士顿大学从事 BRDF 研究的博士生给了作者热情的鼓励,这也多少增强了我将本书付样出版的信心。

李小文

1995 年 6 月 25 日于波士顿

# 目 录

序	
前 言	
第一章 绪 论 .....	( 1 )
一、反射方向性特征的数学描述 .....	( 3 )
二、植被遥感与植被反射模型的关系 .....	( 5 )
第二章 有关植被反射模型的一些基本概念 .....	( 9 )
一、太阳直射光及漫散射天空光 .....	( 9 )
二、植被组分的光谱特性 .....	(11)
三、植被结构 .....	(14)
四、土壤散射 .....	(16)
第三章 辐射传输模型 .....	(18)
一、辐射传输方程 .....	(18)
二、以 KM 理论为基础的解析模型 .....	(26)
三、离散模型 .....	(33)
四、辐射传输方程的算法解 .....	(40)
五、辐射传输模型向几何光学模型的逼近:3D RT 模型 .....	(57)
第四章 几何光学模型 .....	(64)
一、早期的植被几何光学模型 .....	(64)
二、植被遥感几何光学模型 .....	(65)
三、几何光学模型向辐射传输模型的逼近:GO-RT 混合模型 .....	(74)
第五章 计算机模拟模型 .....	(87)
一、蒙特卡洛方法 .....	(87)
二、结构真实模型 .....	(88)
第六章 植被结构参数化 .....	(91)
一、水平均匀植被结构参数化 .....	(91)
二、不连续植被结构参数化 .....	(95)
三、不连续植被结构的间接测量 .....	(97)
第七章 植被遥感模型的反演 .....	(103)
一、模型成功反演的要素 .....	(103)
二、植被遥感模型程序反演的基本原理 .....	(105)
三、模型反演方案实例 .....	(106)
参考文献 .....	(112)

# 第一章 绪 论

植被与光辐射的相互作用对于人类及其生存环境是极其重要的,这不仅由于植被的光合作用提供了人类食物的基础,而且这种相互作用影响气候、水、气、碳等的各种循环,是全球变化的重要一环。近年来,人们致力于全球尺度的资源探测和环境问题的系统研究,迫切要求遥感提供大范围的植被状况及其动态变化的数据。遥感是近年来人们谈论较多的一个新词汇,然而究竟什么是遥感,这个问题却很难回答。顾名思义,遥感泛指非接触、远距离的探测,这就几乎包括了从望远镜观察、X光胸透、地震波探矿,到军事侦察等多个不同的领域。事实上我们所说的遥感有特定的意义,就是用电磁波作为信息载体,从遥感车、塔台、飞机到外层空间不同高度的平台上,探测大地表面(包括水体、植被及大气)的状况及其动态变化。

不同的自然现象有不同的最佳观测距离和尺度,并不一定是距离越近越好,观测越细微越好。18世纪英国斯威夫特用一个例子形象地说明这一点。他假定从非常近的距离,用很高的分辨率来看一个美女。观察者在这位美女的脸上从一个毛孔细察到另一个毛孔,辛苦观测的结果和整体的“美”全不相干。我国古代学者更早几百年也认识到了这个观察尺度和距离的问题。他们以庐山为例:在山里实地积累的大量观察,“远近高低各不同”,对认识庐山的全貌却很少有所帮助。这并不是否定系统的高精度的实地观测,而是说明需要适当的距离和比例尺,才能有效、完整地观察。

尽管人们早就认识到这种最佳观测距离的必要性,甚至幻想从外层空间来取得大地与海洋的图像(“遥望齐州九点烟,一泓海水杯中泻”)。只是在遥感技术在本世纪60年代蓬勃崛起之后,人类才真正实现了从微观到宏观、从静态到动态对大地进行观测这一飞跃,实现了对很多大规模自然现象的预测和预报,开始了人类认识自己生存环境的新纪元。正因为如此,在本书中我们主要不是一般性地讨论光与植被的相互作用,而是着重在航天遥感像元这一尺度上讨论这种相互作用的机理。这一尺度问题在讨论不同模型的长处和不足时,是需要读者特别留意的。

70年代以来,卫星遥感主要采取垂直观测方式,以获得地表二维信息,对获取的数据则基于地面目标漫反射的假定,作一些简单校正后,利用地面目标的光谱特性作有监督或无监督的最大似然率分类,或经验判读。这些在遥感技术发展的初期是合理的,也取得了很大的成功。随着遥感技术的发展及其面临的各种新的要求,人们越来越迫切需要弄清植被与光辐射之间相互作用的机理。例如,尽管卫星云图已经很直观地显示了各种气团的运动趋势,但中、长期的天气预报准确性仍然很不令人满意。其主要原因之一就是在大气动力学模型中,需要知道大气下垫面的反照率(影响地面和大气温度)和粗糙度(影响气流运动)。而目前的遥感手段只能提供个别方向上的反射率,把它当作半球反照率,对植被结构也只能提供非常有限的信息。这样,天气中长期预报很难准确,气团的运动常常会突然偏离模型预计的运动方向和速度。又如二氧化碳的温室效应,是全球变化研究中的关键问题



之一;大气中二氧化碳的增加是否会使全球温度升高,导致海平面上涨,淹没我们宝贵的长江口三角洲和珠江口三角洲,这是大家关心而必须未雨绸缪的大事。然而,由于全球尺度上植被的光合作用情况及其随二氧化碳的增加和气温的升高引起的变化及对大气的组成和温度的反馈无法定量,只能是公说公有理,婆说婆有理,难以得出令人信服的一致结论。从国家建设的角度来说,全国农田面积和使用情况的调查,粮食产量的预估,“三北”防护林工程进展的监测,长江上三江水源涵养林的破坏情况的调查,沙漠化与草场载畜量的变化,长江三峡工程库区生态环境变化的动态监测,都需要遥感技术提供及时、准确的数据。在更小范围上,例如大熊猫栖息地林下箭竹生长的调查,小流域融雪径流的预报,果粮间作生产潜力的估算与方案设计,……,一直到智能武器自动寻找目标时林木干扰之排除,种种一切,无不需要我们对植被与光的相互作用有透彻的理解。正因为如此,20年来,各国科学家为此已作了大量工作,建立了近百种不同的数学模型。一般说来,模型可分为统计模型和物理模型两种。统计模型一般是描述性的,对观测到的数据作经验性的统计描述,或者进行相关分析,不解答为什么有这样的相关或统计结果这类问题。物理模型则通常试图找出产生观测数据的原因。

统计模型的主要优点是简单,适用性强,通常只包含3—6个参数。在地面实况不清或遥感信号产生机理过于复杂的情况下,统计模型是一种很好的工具来暂时回避困难,留待以后继续研究。但是随着地面知识的积累和遥感观测波段数的增加,统计模型的这一优势减弱。例如三参数的Walthall模型(Walthall, et al., 1985)在用于单波段时是很有吸引力的,但当波段数增加到7,由于不同波段的参数之间没有逻辑关系,参数总数就增加到21。而此时一个用5个结构参数,7个波段土壤反射率的物理模型,参数总数仅12。

为了综合统计与物理模型的优点,也可以开发“半经验模型”。这种模型也通常使用很少的参数,但多少使这些参数具有一些机理性的意义,例如采用“Ross表层核”(Ross, 1981)等。这也许是一个有应用前景的折衷。

本书主要侧重于物理模型,非特别提及,文中的模型或数学模型均指研究植被与光(包括可见光波段和近红外波段)相互作用的物理模型。

同其它一般意义上的模型一样,植被反射模型试图找出影响植被反射特征的主要因素,并建立两者之间的数学关系。这就难以避免要简化一些非主要因素的影响,对它们的性质、数值作一些合理的假定甚至完全忽略。由于植物的多样性和植被结构的复杂性,也由于植被反射模型研究对象的空间尺度变化大,可以从几微米到上百公里,在某一尺度上某种植被影响反射的主要因素,在另一尺度上或对另一种植被,则可能可以完全忽略不计。本书将不讨论单片叶表面及其内部散射这一微观尺度,和基于地表起伏及植被类型多样而形成混合像元这一宏观尺度上植被反射的形成机理,而着重在像元大小从数米到上千米这一尺度上单一类型植被反射的机理研究。此外,本书所提及的光或电磁波仅指植被遥感中常用的可见光和近红外波段,同时植被对光反射的极化与相干也不在讨论范围之内。

在这一尺度上的植被遥感模型研究,目前总的趋势是辐射传输(RT)模型和几何光学(GO)模型的相互接近。源于混浊介质中电磁波散射机理的RT方程具有数学的严密性,在大气、等离子体的物理研究中有广泛的应用。然而植被空间结构的复杂性给RT方程的应用带来一些本质的困难。例如,RT方程要求散射微粒均匀分布在一个可以当作无穷小

的体积之内或一个很薄的水平层中,这个要求在大气中是不难近似满足的。但即使是水平均匀植被有时也很难近似满足这一基本要求。又如 RT 方程通常要求微粒的散射特性可以用相函数来描述,这对大气中的分子和微粒而言是自然的,但在植被中,叶面和其他组分的散射已不能用 Rayleigh 或 Mie 散射来描述,本身已具有几何光学的反射特征。在这一尺度上的问题,从 RT 模型引入植被反射模型的初期就已得到了重视,如 Suits 模型(Suits, 1972)、Nilson(1971)、Kuusk(1985)等,但只是到了不久前,才有了给定三维空间的参量分布和边界条件,应用 RT 理论来进行不连续植被反射机理研究的尝试,如 Kimes 的 3-D 模型(Kimes, 1982)、Goel 的 TRIM(Goel, 1987)等。

与 RT 模型从微体积元到离散植被的路子刚好相反,GO 模型开始于较大尺度上的宏观现象,例如树冠投下阴影这样简单的事实。通过几何光学,计算视场中阴影面积和承照面积或它们的统计量,来解释遥感信号,具有简单明晰的优点。然而为了解释承照面积阴影的亮度,GO 模型不得不走上了从不透明实体模型,到带间隙的模型,到多次散射这样一个从宏观到微观的历程,如李-Strahler 的间隙率模型(Li and Strahler, 1988)和 GO-RT 混合模型(Li and Strahler, 1995)。

除了 GO 模型和 RT 模型的相互逼近之外,近年来异军突起的是所谓“结构真实模型”(ARM)。这类模型利用计算机日新月异的计算能力和图像、图形处理能力,首先产生逼真的植被结构,然后追踪计算遥感信号的产生过程。这类模型的最大优点在于逼真,理论上可以模拟任何植被结构,显示出其反射,例如 Goel 的 DIANA 模型(Goel, 1992);但其最大的缺点也许是过于逼真,缺乏不同情况下对次要因素的简化和统计化,因而植被结构的设置繁杂;目前还不能取代 GO 模型或 RT 模型,但仍不失为验证其他模型或探索新的解析近似的极有前景的工具。

本书将在第三、四、五章较详细介绍上述三类主要模型,第二章将简单介绍与它们有关的一些基本概念。本章的其余部分先介绍反射方向性的数学描述和植被反射模型在植被遥感中的作用。

## 一、反射方向性特征的数学描述

理想光滑表面的反射是镜面反射,理想粗糙表面的反射是漫反射(朗伯反射)。在大气中,气体分子和气溶胶的尺寸与光波长接近,因而其特殊的前向散射(即沿原入射方向)、后向散射(即与原入射方向逆行)和漫反射特性可以用微粒的“相函数”(即只是入射方向与反射方向夹角的函数)来描述。当我们从上方观察植被时,常常近似认为其反射包含漫反射、后向反射(这时称为热点),有时也包含一个镜面反射分量。但用这些理想反射的组合已不能精确描述植被反射的方向性,因而必须引入“二向性反射”的概念。

为了叙述方便,在不明确区分叶片反射和透射的时候,我们将沿用大气中粒子散射的概念。同时,无论大气还是植被,散射几乎无例外地是电磁波波长的函数,由于这已为人们所熟知,我们将把这作为一个约定而不显式表达出来。

二向性反射是自然界中物体表面反射的基本宏观现象,即反射不仅具有方向性,这种方向性还依赖于入射的方向而异。人们早已观察到这种现象,从而发展了二向反射比、二向反射比因子等不同概念。但直到 70 年代初 Nicodemus(1977)才给出了二向性反射分布

函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)迄今最完善的定义,即

$$\text{BRDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL(\Omega_r)}{dE(\Omega_i)} \quad (1.1)$$

单位为  $1/\text{sr}$ (球面度 $^{-1}$ )。

从这个严格定义的 BRDF,可以推演出不同情况下常用的其它量,如二向反射比等等。这个定义看来形式很简单,但理解和使用均很困难。式中  $\theta_i$ (天顶角)和  $\phi_i$ (方位角)确定入射方向, $\theta_r$ 和  $\phi_r$ 描述某一反射方向, $\Omega_i$ 和  $\Omega_r$ 相应表示在反射和入射方向上的两个非常小的(微分)立体角, $dE(\Omega_i)$ 表示在一个微分面积元  $dA$ (为叙述方便计,假定水平放置)之上,由于  $\Omega_i$ 这个微分立体角内辐照度  $L(\Omega_i)$ 的增量所引致的  $dA$ 上辐亮度的增量。 $dL(\Omega_r)$ 则是由于增量  $dE(\Omega_i)$ 引起的  $\Omega_r$ 方向上辐照度的增量,参见图 1.1。

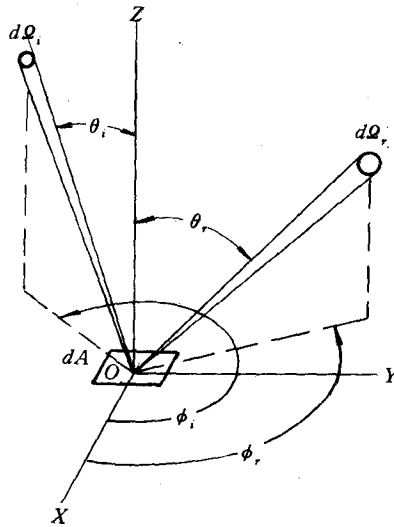


图 1.1 BRDF 中的参量图示

Nicodemus 的严格定义在实用中的一个主要困难之一是它基于微分面积元,而  $\Omega_r$ 是由这一点向上辐射的立体角。在遥感实际中,传感器更接近于一个点(几十到几百微米),而传感器的视场角(FOV)是一个向下的立体角,覆盖地面数米到数公里一个像元。当然从数学上讲,仍然可以对像元进行分割,把传感器接收的信号作为这些微分亚像元在传感器上产生的立体角的辐亮度的积分,但这样过于繁琐,对实际应用和弄清遥感信号机理并没有什么帮助。因此,作者与 Strahler(Li and Strahler, 1986)在 1986 年定义 BRDF 为:

$$\text{BRDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \lim_{\substack{\Omega_i \rightarrow 0 \\ \Omega_r \rightarrow 0}} \frac{1}{\pi} \text{DRF} \quad (1.2)$$

这里 DRF 是在给定入射光和传感器等因素不变的情况下,传感器接收到的信号(辐照度)与假定该像元为一理想漫反射标准参考板时传感器接收到的信号之比。这里  $1/\pi$  是使 DRF 在数量上和单位上与 BRDF 一致的因子。在实际运用中,常常没有必要多这一次运算而使结果与习惯熟悉的反射率有一个  $\pi$  倍的差别,这时有人称之为二向性反射因子(BDRF)。由于这样定义的 BDRF 与 BRDF 并无实质上的差别,除在具体比较数值时外,本书中统称为 BRDF。

即使不考虑产生机理和波长, BRDF 本身就是两个方向的函数, 而空间的每一方向需要两个变量( $\theta$  和  $\phi$ ) 来表征, 因而给 BRDF 的图示带来一些困难。通常人们对给定的波长和太阳方位把 BRDF 图示为  $\theta$  和  $\phi$  这两个变量的函数。图 1.2 是坡面上森林 BRDF 的图示。左边一列为可见光(红)波段, 右边一列为近红外波段, 坡度均为  $30^\circ$ , 但坡向从上到下分别为朝北、朝东和朝南。太阳方位为  $\theta_s = 31^\circ$ ,  $\phi_s = 339^\circ$ (东南隅), 可从图中热点位置识别。粗黑线标出太阳入射方向与天顶方向所决定的平面(称为主平面, 后同)与 BRDF 曲面的截线。自变量坐标平面每一点( $x, y$ ) 为相应观察(反射)方向单位矢量在图 1.1 中 XY 平面上的投影。这是目前比较常见的图示方法。但也有例外, 如 Goel 习惯用  $\theta_r$  和  $\phi_r$  作 XY 平面的两轴。另一些作者仅图示主平面上的 BRDF(参见图 2.3); 或沿方向角拉数条剖面, 以参数方式标注  $\phi$ (如 Jupp 等)。

## 二、植被遥感与植被反射模型的关系

当太阳光照射在植被上, 一部分被吸收, 其余向四面八方散射, 其光谱、方向性和强度因植被而异。人们用星载传感器可以测量到这种反射在一个或几个方向上的强度。遥感能否量化则依赖于能否根据这有限数量的测量, 获得植被的有关信息。这就要求对植被及环境因素与辐射的相互关系有彻底的了解。

为此, 植被反射(CR)模型起着十分关键的作用。CR 模型提供了植被本身特性和它的反射模式间的逻辑和数量关系, 从而人们可从遥感信息推演植被特性。

整个植被遥感系统可看作由如下子系统组成:

a. 辐射源。包括太阳和天空散射, 用  $\{a\}$  表示这些特性和参数集合, 它们包括谱密度( $I_\lambda$ ) 和方向( $\theta_s, \phi_s$ ), 其中  $\lambda$  是波长,  $\theta_s$  和  $\phi_s$  分别表示天顶角和方位角。

b. 大气。用  $\{b\}$  表示参数集合, 它们包括空气微尘、水蒸气、臭氧等的空间密度分布和本身因波长而异的吸收和反射特性。

c. 植被,  $\{c\}$  表示其特性和参数, 它们包括植被组分(叶、茎、干等)的光学参数(反射和透射)、结构参数(几何形状和植株密度)及环境参数, 例如温度、相对湿度、风速及降雨量等。一般说来这些参数都可能随波长、时间和空间位置而变。

d. 地面或土壤。用集合  $\{d\}$  表示其参数和特性, 例如反射、吸收、表面粗糙度、表面结构及所含水分等。

e. 检测器。用  $\{e\}$  表示其特性, 如频率响应、孔径、校准、位置及观察方向(天顶角  $\theta_r$  及方位角  $\phi_r$ ) 等。

整个系统可简述如下: 太阳光射入大气, 被大气中的微粒散射或反射一部分, 另一部分穿过大气层, 并被植被及地面反射, 这些散射和反射再次穿过大气层由检测器测得。在植被内和植被与地面间还发生多次散射, 这通常也是 CR 模型需要考虑的问题。植被与大气之间, 也会发生相互反射, 常可忽略不计, 但有时也可能相当强, 如古诗“柳絮飞来片片红”所描述的, 正是太阳光穿透大气后经植被反射再穿越大气, 被大气中悬浮物散射到达观察者的全部过程, 以及由此产生的谱密度的变化, 因而包含了  $\{a\}$  到  $\{e\}$  的全部要素。人们通常认为柳絮似飘雪, 是白的, 为什么诗人用“片片红”来描述柳絮呢? 原来诗人在观察“夕阳方照桃花坞”。读者可从这一形象描述构思出很多遥感教科书上有关这一系统的附



图。

用集合 $\{R\}$ 表示检测器收到的辐射信号,它随大气、植被、地面的波长、时间和空间特性而变化,一般说来

$$R=f(a,b,c,d,e) \quad (1.3)$$

函数 $f$ 反映了产生 $\{R\}$ 的辐射转换过程,给定系统参数 $\{a-e\}$ 和 $f$ ,即可算出 $\{R\}$ ,这称为CR的前向模型。

人们也可以定义或导出一个函数或算法 $g$ ,从测量到的 $\{R\}$ 推出植被参数 $\{c\}$ ,即

$$\{c\}=g(R,a,b,d,e) \quad (1.4)$$

这就是反演问题。在某些情况下,所有的系统参数 $(a,b,d,e)$ 都假设为或可测或已知,而在某些情况下,一些参数必须由反射数据估计。

通常,前向模型的建立是反演的先决条件,而反演很明显有更实际的应用价值,但难度更大,有时甚至不可能。

由于问题的复杂性,我们可以把问题分解简化。例如专门单独处理 $\{e\}$ 的影响(辐射校正)、单独处理 $\{b\}$ 的影响(大气校正)。有了辐射校正和大气校正,我们就假定只考虑真正入射到植被上表面的入照 $\{\hat{a}\}$ 和从植被向传感器方向 $\{\hat{e}\}$ 反射出来的光 $\{\hat{R}\}$ 之间的关系,也就是说

$$\hat{R}=\hat{f}(\hat{a},c,d,\hat{e}) \quad (1.5)$$

及

$$c=\hat{g}(\hat{a},d,\hat{R},\hat{e}) \quad (1.6)$$

严格地说,这样的分解是不精确的,例如精确的大气校正需要知道大气下垫面反射的方向性,以作为求解微分方程的边界条件,否则只能假定下垫面是朗伯体。而我们正是要为非朗伯的反射体建模。为了解决这一矛盾,已有一些努力把大气和植被耦合在一起,直接求(1.3)式和(1.4)式中的 $f$ 或 $g$ 。

本书将主要致力于介绍(1.5)式所表示的前向模型,并着眼于它的反演。

图1.3表示一个前向CR模型的输入/输出关系。图1.4表示一个可直接反演模型。

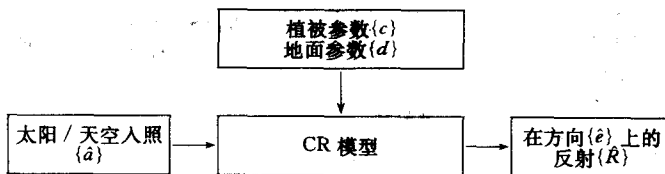


图 1.3 前向冠层反射模型的输入/输出关系框图

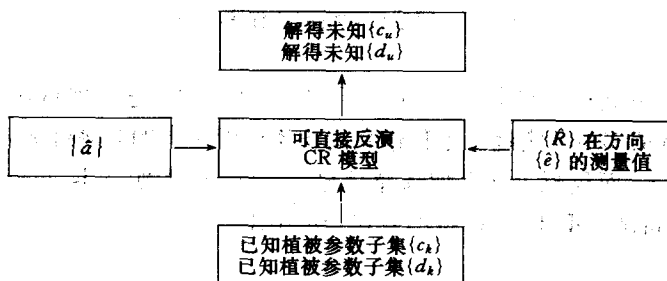


图 1.4 可直接反演模型图示

已知植被参数子集,包括我们对给定植被事前已有知识,例如我们已经知道叶面的反射/透射特性、植被对地表覆盖的大致情况,例如森林、农田等,以及由这些已有知识推出的合理假定,例如假定 $\{d_i\}$ 为朗伯体等等。

把植被和地表参数这样分为“已知”和“待求”两个子集在模型反演中常常是必要的,因为 $\{R\}$ 的数量通常极其有限,而 $\{c\}$ 和 $\{d\}$ 的数量可以极其庞大。而这样做也是可能的,因为人们对地表的观察已经有了相当的数据和知识的积累。

正确的选择“待求”参数是成功反演的关键一步。选择的的原则是:待求参数必须是不确定性最大的,同时在给定其它“已知”参数的情况下,模型对“待求”参数必须是敏感的。即:

$$\frac{\partial f}{\partial c_u} \gg 0 \quad (1.7)$$

这里请注意“给定其它‘已知’参数”这一句话。因为同一模型对同一参数在不同条件下的敏感度可能有天壤之别。例如任何模型对 $\{d\}$ 的敏感程度随植被覆盖的增加而减小,因而用某一模型以 $\{d\}$ 为待求参数在一个植被稀疏的地方,可能成功反演。而如果同样方式应用于一个具有很高叶面指数的地方,通常会得出非常荒谬的结果。同时参数的“不确定性”也是随时间、知识的积累而变化的。

很多CR模型不能直接反演。图1.5表示用程序方法反演的基本方式,详见第七章。很明显,在这种情况下,反演的成功与否,更大程度上依赖于正确选定待求子集。选择待求子集时,还必须注意到参数 $\{c\}$ 大体上可分为两类:材料(波谱)参数和植被结构参数。而观察值 $\{R\}$ 可以分为:多光谱、多方位、多时相和综合指数(如NDVI、绿度、纹理等),它们分别载有不同的有关材料波谱和植被结构的信息。因而待求子集中参数的类型必须与观察值的类型相适应。

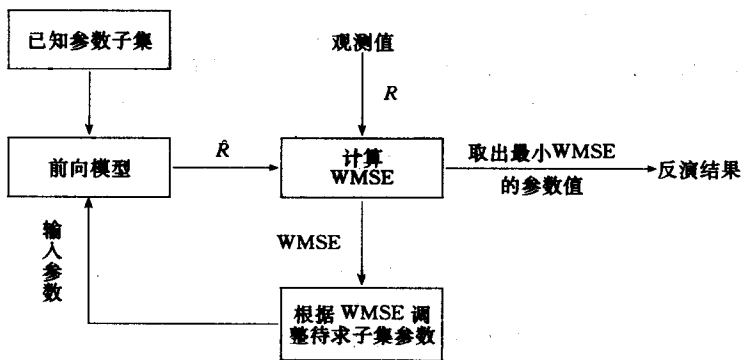


图 1.5 冠层反射模型的程序反演法

总之,植被定量遥感是非常复杂,也富于挑战性的问题,它不但依赖下一章要论述的一般性知识,而且依赖对特定地区各种信息的积累。但本书的其余部分,将不讨论这种随时间而变化的关系,而仅限于在获取遥感信号 $R$ 的特定时刻,方程1.5和1.6所包含的因果关系。而时间这个重要变量,将不显式表示出来。

## 第二章 有关植被反射模型的一些基本概念

### 一、太阳直射光及漫散射天空光

照射在植被上的太阳光由两部分组成：一是未被大气吸收或散射的光(也称直射光)；二是在穿过大气过程中被散射的光(也称天空光或漫射光)。天空光的强度(用 SKYL 表示)取决于大气条件(特别是微尘和水蒸气分子)及电磁波的波长,如可见光波段(VIS)(400—700nm)比近红外波段(NIR)(800—1 100nm)强得多。当大气能见度高、日光强烈时,SKYL 大约 10%；而在阴天,SKYL 可高于 90%。直射光的方向用太阳的天顶角  $\theta$  和方位角  $\phi$  表示；而漫射则表示为角度的分布函数。人们已推导出精密的大气散射模型来了解太阳光照与大气的不同特性的相互关系。讨论这些模型超出本书范围,有兴趣的读者可参考 Dickinson (1983)的论文,它简洁地描述了影响太阳光穿透大气层的各种因素。注意多数作者在使用 SKYL 时,是指天空光相对大小,占到达地表总辐射的份额,但也有少数作者习惯于用来表示天空光对直射光的相对大小。植被的地面遥感测量一般选晴天,在可见光与近红外波段进行,SKYL 大约是 10—15%。大多数 CR 模型还假设漫射光各向同性,且 SKYL 的因素是给定的。然而,对航空遥感,尤其是对航天遥感来说,遥感信号的大气校正常常是难以回避的问题。

大气校正,即从式(1.3)中的测量值  $R$  估算式(1.5)中的  $\hat{R}$ ,简单说来就是求解如下方程:

$$R(\hat{e}) = P(a, b, \hat{e}) + T(b, \hat{e}) \cdot \hat{R}(\hat{e}) + \sum_{xy} \int S_{xy}(e', b, \hat{e}) \cdot R_{xy}(e') de' \quad (2.1)$$

这里用  $\hat{e}$  表示传感器的方向和视场(FOV)。 $R(\hat{e})$ 是传感器观测的信号,我们略去其它自变量以突出它就是观测值,不管其如何产生。 $P(a, b, \hat{e})$ 是给定入照和大气条件 $\{a, b\}$ 时入射阳光向  $\hat{e}$  方向的路径散射,与  $\hat{R}$  无关。 $\hat{R}(\hat{e})$ 是 FOV 中地表(即像元)向上的反射,这里  $\hat{e}$  标明只考虑其向  $\hat{e}$  方向的反射, $T(b, \hat{e})$ 是给定大气条件下从地表到传感器的衰减系数。 $\hat{R}_{xy}(e')$ 是地面某一像元  $xy$  向  $e'$  方向的反射,而  $S_{xy}(e', b, \hat{e})$ 是  $R_{xy}(e')$ 从  $e'$  方向进入大气后散射向传感器的传输系数,积分是因为  $\hat{R}_{xy}$ 向各方向散射,而求和是对所有有干系的邻近像元,参见图 2.1。如果我们只有一个方向上的观测值,顶多只能减去  $P(a, b, \hat{e})$ 之后,再假定像元和邻近像元均为朗伯反射,把  $S_{xy}$ 处理成点散布函数求逆。当  $R$  有多个方向观测值时,如何进行大气校正,则是一个全新的问题。

由于美国“地球观测系统”(EOS)的多角度成像光谱仪(MISR)将能为每一像元提供 9 个不同方向的观测,MISR 科学家小组已提出了相应的大气校正方案(Diner, 1993, 未定稿)。目前的方案是一种迭代算法,即首先计算:

$$\hat{R}^{(0)}(\hat{e}) = \frac{R(\hat{e}) - P(a, b, \hat{e})}{T(b, \hat{e}) + S(b, \hat{e})} \quad (2.2)$$



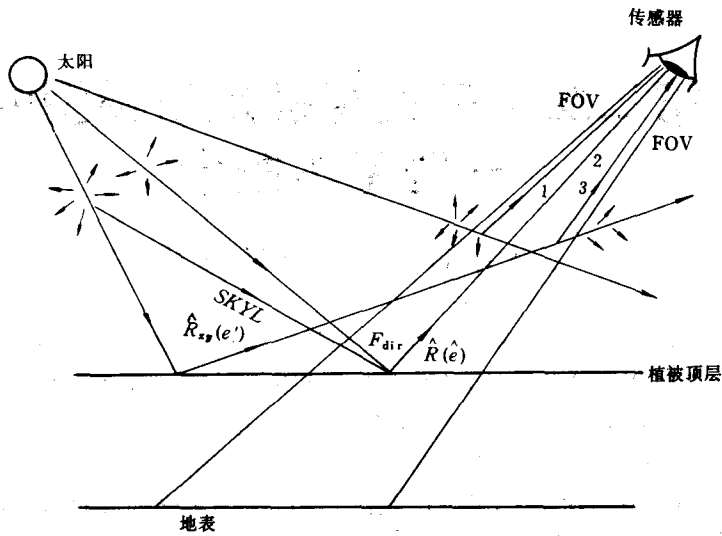


图 2.1 大气校正式 2.1 示意图

到达传感器的三项分别为：①入射阳光的路径散射  $P(\alpha, b, \hat{e})$ ；②  $T(b, \hat{e}) \cdot \hat{R}(\hat{e})$ ；③  $S_{xy}(e', b, \hat{e}) \cdot \hat{R}_{xy}(e')$ ，这一项包括 FOV 确定的像元本身向其它方向的反射，再经大气散射后到达传感器，像元越大，其相对重要性也越大。

其中  $\bar{S}(b, \hat{e})$  是  $S(e', b, \hat{e})$  对  $e'$  取平均，不考虑邻近像元的影响。从得到的  $R^{(0)}(\hat{e})$ ，再假定到达地表的总辐射与像元无关，即可得到方向反射的初步估计值。再从 9 个这样的方向估计值插值到半球。然后重新计算到达地表的漫散射天空光，从而开始迭代。在这个方案中，由于到达地表的辐射分布，地表向上的反射  $\hat{R}$  都是迭代计算的，因而产品中直接包括了像元的 BRDF。

与此同时，EOS 的“中分辨率成像光谱仪”MODIS 的大气校正则有一个更简单的方案。到达地表的总辐射被近似为  $\frac{F_{dir} + SKYL}{1 - \alpha \cdot \rho_a}$ ；这里  $F_{dir}$  和 SKYL 为不考虑地表反射时的直射光和天空光， $\alpha$  是待求的像元反射率（平均角反射）， $\rho_a$  是大气底部对向上辐射的反射率。

MODIS 方案进一步假定像元对 SKYL 的反射率也是  $\alpha$ ，像元对  $F_{dir}$  向除传感器方向之外任何方向的反射也是  $\alpha$ 。从而只有  $F_{dir}$  向传感器方向的反射有一个不同于  $\alpha$  的方向性反射率。在这个方向反射与  $\alpha$  之比为已知的情况下再对遥感信号进行以像元 BRDF 为基础的大气校正。

但是 MODIS 的 BRDF 产品是从朗伯假定为基础大气校正后的信号取得的，这就出现一个逻辑问题。为了验证这个方案的可行性，作者等进行了模拟实验。实验结果表明仅用观察方向与  $\alpha$  之比按此流程 BRDF 为基础的纠正的效果很差。但在用朗伯假定为基础的大气校正的信号拟合 BRDF 之后，用三参数（太阳→半球反射率，太阳→观察方向反射率，半球→观测方向反射率）的 BRDF 为基础的大气纠正则可相当逼真地恢复真实 BRDF。Vermote 本人也得到了类似的结果。（模拟中所用的气溶胶光学厚度从 0.15 到 0.5）。

从以上两例可以看出，大气校正是与植被遥感和遥感模型密切相关但非常复杂的另