

图书在版编目 (CIP) 数据

植被辐射传输理论与应用 / 李云梅著. —南京: 南京师范大学出版社, 2005. 11

(青年学者文丛)

ISBN 7-81101-385-1/Q · 5

I. 植... II. 李... III. 遥感—研究 IV. TP72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 136151 号

-
- | | |
|----------|---|
| 书 名 | 植被辐射传输理论与应用 |
| 作 者 | 李云梅 |
| 责任编辑 | 陈 多 庞 宏 |
| 出版发行 | 南京师范大学出版社 |
| 地 址 | 江苏省南京市宁海路 122 号(邮编:210097) |
| 电 话 | (025)83598077(传真) 893598412(营销部) 83598297(邮购部) |
| 网 址 | http://press.njnu.edu.cn |
| E — mail | nspzbb@njnu.edu.cn |
| 照 排 | 江苏兰斯印务发展有限公司 |
| 印 刷 | |
| 开 本 | 850×1168 1/32 |
| 印 张 | 8.25 |
| 字 数 | 205 千 |
| 版 次 | 2005 年 11 月第 1 版 2005 年 11 月第 1 次印刷 |
| 印 数 | 1 000 册 |
| 书 号 | ISBN 7-81101-385-1/Q · 5 |
| 定 价 | 15.00 元 |
-

南京师大版图书若有印装问题请与销售商调换

版权所有 侵犯必究

《随园文库》编委会

主任委员：宋永忠

副主任委员：沈 健 陈凌孚 陈章龙
笪佐领 闻玉银（常务）

委员：（按姓氏笔画排序）：

王小锡	王政红	叶浩生	朱晓进	孙文瑜
李 艺	李 浩	李吉均	李晓卿	张 杰
张锡然	沈 健	宋永忠	陈永高	陈凌孚
陈章龙	陆天虹	周开亚	范景中	闫国年
施国新	闻玉银	钟振振	夏锦文	祝智庭
顾渊彦	盛宇华	曹意强	黄克谅	笪佐领
蒋伏心	程晓樵	傅康生	鲁 洁	潘百齐

执行编委：王政红

总 序

公元 1998 年。21 世纪的钟声,已经在人们的心头敲响。

踩在新世纪的门坎上,我校领导立足于建设教学科研型的新型一流师范大学的高度,经多次研究决定,汇集本校历史上以及当今知名教授的学术著作,编辑出版《随园文库》;选择颇见功力的青年教学研究人员力作,编辑出版《青年学者文丛》;资助出版若干本校教师编写的优秀教材。这项举措,受到了全校广大师生的欢迎。为保证这三个系列图书的出版,由学校和校出版社共同出资,设立了“南京师范大学出版资助金”,成立了以校长为主任委员的“南京师范大学出版资助金管理委员会”,其职能机构为“南京师范大学出版资助金管理办公室”。同时,还专门成立了由数十位高水平专家学者组成的《随园文库》编辑委员会,以保证《随园文库》、《青年学者文丛》这两套丛书的学术质量。教材资助项目,则直接由出版资助金管理委员会把关。

《随园文库》所收学术著作,须是南京师范大学著名教授的代表性作品。南京师范大学的历史,可上溯至 1902 年由清末名臣张之洞奏请创办的“三江师范学堂”。百年沧桑,几度分合,时序交替,迭经变迁,这所学校终成南京乃至全国高等教育的重要发祥地之一,成为许多名校之宗。各校取其所取,彰其所彰。唯师范主脉,绵延而下,为今南京师范大学所承继。近百年间,多少学界巨子,讲坛精英,举师范薪火,耀群星而璀璨,传万姓以燎原。尤其是中华人民共和国成立以来,大江南北,教育事业空前发达起来。处

在江苏省师范教育龙头地位、在全国颇有影响的南京师范大学,越来越显示她巨大的作用和夺目的光彩。历史表明,要振兴教育,尤其是振兴高等教育,绝对要凭借一代又一代的名师硕儒,学术巨擘。否则,即使学校规模再大,也难免空头学府之讥。代表性学者的创造精神和他们的名家风范,对于文化的传播,对于科学的发展,对于学风的垂范,实在有无可估量的价值。出版他们的著作,虽然是求其学识品行于万一,但对于后学诸子,仍然弥足珍贵。

文库取名“随园”,盖因南京师范大学之老校区,是在原金陵女子文理学院的院址上扩而大之,其地在南京城内清凉山东,小仓山下,据考证乃清代文学家袁枚“随园”之故地。“随园”早湮灭难考,袁枚在此所著《随园诗话》却久传不衰。青年大学生们常喜以“随园学子”自称。昔日“随园”,亭台楼阁,堪称海内名园之最;今日校舍,雕梁画栋,享有“东方最美丽的校园”之誉。可见,“随园”二字,内含多少文化信息!以“随园”来命名这套文库,既发思古之幽情,又达传世之美意,更挟后学之襟怀,岂不善哉!

《青年学者文丛》所收著作,多为本校 40 岁以下之青年学者的扛鼎之作。他们正负重登山,不上则下。为他们出书,无疑是提供一点促进的助力。他们的著作,也许不如《随园文库》那样圆润周至,精辟老辣,但是他们敢立一家之言,敢树独家之帜,在知识创新的呼声日甚一日的今天,正顺应着时代的方向,代表着学术昌盛的未来。他们是学校学术发展的希望之所在。新一代的学界巨子,将从他们中间走出来。如果说,南京师范大学在过去一个世纪里,曾经风光过,靠的是《随园文库》作者那一批精英;那么,要风光未来的一个世纪,靠的将是这一代青年和他们的承继者!

《随园文库》和《青年学者文丛》要通过多年才能臻于完成。现在采用的是逐年申报、逐步实施的办法。每年申报的选题,经《随园文库》编辑委员会认真评选、投票表决而确定。出版费用由南京师范大学出版资助金全额资助或部分资助。从筛选书稿,到编辑

校对、装帧设计,直至印刷包装,均严格按照出版精品的要求来对待,务求使其成为精品。这些书稿凝结着我校几代学者的心血汗水、聪明才智。《随园文库》的作者有的已经作古。为了确保这两套图书得以以精品的面貌问世,我们对书稿本身的要求是比较高的。为此,作者或者其亲友传人,在出版图书的过程中,付出了辛勤的劳动。在出版活动的各个环节,都有许多同志不辞辛劳、精益求精。谨此,我们一并表示衷心的感谢!

编辑出版这两套大规模的系列图书,我们尚缺乏经验。选题时间跨度较长,又涉及多种学科,有些书稿又需后人整理,客观上存在许多困难。我们一定通过自己不懈的努力,尽可能高质量地完成任务。但是,在编辑出版的过程中,肯定还会存在一些不足之处,祈请作者及读者海涵,并不吝赐教。

《随园文库》编辑委员会

前 言

植被冠层辐射传输在植被遥感、植被生态、陆面过程等研究领域中都占有重要地位。对植被冠层辐射传输的研究,一方面要从植被群丛的冠层结构和光学特性导出群丛中的辐射状况,从而对植被群丛内的辐射能量分布、光能利用以及温度分布有深入的认识;另一方面,也是更重要的,则是要根据遥感观测的反射辐射来推断如叶片数量、生物量以及植物生化参数含量等信息。这些信息,不仅可应用于植物生长监测和收获量的估算,而且对于全球生态环境的动态研究,也具有重要价值,如冠层叶面积指数不仅可用于生态系统净第一性生产力的估算,而且叶面积指数的大小对陆地表面蒸散有重要意义。正因为如此,冠层辐射传输才逐渐成为一项重要而引人入胜的研究课题。

常规的遥感,都是从垂直于冠层的方向进行观测的,然而,大量的研究表明,遥感传感器所观测到的冠层辐射亮度不仅与冠层的构成要素有关,而且与观测方向和太阳入射方向有密切的联系。正因为如此,植被冠层二向反射从 20 世纪 80 年代初开始,逐渐成为国际遥感界的热门研究课题。植被二向反射不仅与植被冠层构成要素的光谱特性和植被下垫面光谱特性有关,而且与植被冠层结构有密切联系。因此,从逆过程分析,通过对植被冠层二向反射辐射传输模型的反演,能够获得丰富的冠层结构信息,这就使得该领域的研究,对作物的长势监测和产量估算具有了特殊的意义。但是,国内在该领域的研究主要是李小文院士对森林冠层建立的

几何光学模型,而对水平均匀植被冠层的研究还很少见。我国的主要农作物如小麦、水稻等,都属于水平均匀植被冠层,通过对水平均匀冠层二向反射特性的研究,不仅能够促进植被冠层辐射传输理论的发展,而且,其研究成果对于利用遥感手段监测农作物长势和估算农作物产量,具有广泛的使用价值和应用前景。

新一代遥感传感器如高光谱和多角度遥感传感器的发射和使用,在为植被辐射传输相关领域的研究提供更多、更高质量的数据的同时,也对植被遥感的基础理论研究提出了更高的要求,只有系统、深入地研究植被冠层的辐射传输原理,建立有效、实用的模拟模型,才能保证遥感反演的精度。

本书是在作者的博士论文和博士后期间研究工作的基础上充实整理而成。在研究工作中,作者深深感到国内相关内容的研究文献、参考资料匮乏,给研究工作带来了很大困难,这也非常不利于该重要课题领域研究的深入开展。因此,作者将几年的研究成果整理成书,希望能够抛砖引玉,促进国内在该领域研究的深入开展,并给从事遥感基础理论、植被遥感等领域研究的人员提供一些帮助。书中介绍了与植被辐射传输有关的一些基本概念,以及从叶片尺度到冠层尺度的辐射传输理论和模型,并结合田间实测数据,用椭圆分布函数模型模拟了水稻冠层叶倾角分布,用 PROSPECT 模型模拟了水稻叶片反射率,用 FICR(Kuusk, 1995)模型模拟了水稻冠层二向反射率,进而对水稻叶片叶绿素、水稻叶面积指数等参数的反演进行了讨论,全书最后部分,介绍了集成的水平均匀植被光谱模拟系统。

在此书稿完成之际,要特别感谢我的博士生导师王人潮先生和博士后学术联系导师倪绍祥先生,两位先生孜孜不倦的求学精神、严肃认真的治学态度和积极的进取精神,将永远激励着我不断努力。感谢王秀珍博士、沈掌泉博士、申广荣博士、黄敬峰博士、唐延林博士、吴曙雯博士在实验中的大力支持和帮助,正是由于他们

的帮助,实验才得以顺利进行并取得了大量、详实的数据。在此,还要将最诚挚的感谢送给所有关心和帮助过我的老师和同学,正是由于多年来,我一直处于一个乐观、积极、向上的环境里,才有了本书的问世。还要特别感谢南京师范大学学术委员会和南京师范大学出版社,他们的支持和资助,为本书提供了面世的机会。

书中不妥之处,敬请指正。

李云梅

2005.5.10

目 录

第一章 绪论	(1)
一、植被辐射传输研究的意义和研究进展	(1)
二、研究内容和方法介绍	(7)
参考文献	(12)
第二章 植被冠层辐射传输的基本概念	(17)
一、辐射的基本概念	(17)
二、辐射过程	(24)
三、辐射传输方程	(30)
四、太阳辐射	(38)
五、地物的反射辐射	(45)
六、辐射传输理论应用于植被冠层	(52)
参考文献	(55)
第三章 植被冠层结构及其模拟	(57)
一、冠层结构参数	(57)
二、叶倾角分布函数、 X_L -指数、 G -函数和消光系数	(61)
三、冠层元素的空间散布模型	(71)
参考文献	(76)

第四章 单张叶片的辐射传输	(78)
一、绿色植物叶片的光谱特性	(78)
二、单张叶片的辐射传输模拟模型	(83)
三、水稻叶片反射率模拟	(99)
参考文献	(109)
第五章 植被冠层的辐射传输	(111)
一、叶层散射理论	(111)
二、植被冠层辐射传输	(116)
三、冠层辐射传输方程的数值解法	(120)
四、近似解方法	(131)
五、水稻冠层反射率的一般规律及其模拟	(150)
参考文献	(197)
第六章 模型反演	(202)
一、植被辐射传输模型反演的理论	(202)
二、水稻辐射传输模型反演的实践	(205)
参考文献	(213)
第七章 水平均匀植被光谱模拟系统集成	(215)
一、系统设计	(215)
二、系统的运行	(216)
附录	(224)
一、水稻叶片反射率实测值	(224)
二、水稻冠层二向反射率实测值	(232)
三、水稻冠层垂直反射率实测值	(241)

第一章 绪 论

一、植被辐射传输研究的意义和研究进展

1. 植被辐射传输研究的意义

植被与太阳辐射能的相互作用,是人类及其环境赖以生存的基础。太阳辐射能量为植被群丛(Plant Stand)不断地与周围生态环境进行物质、能量交换提供了重要保证。首先,植物绿色器官只有在太阳辐射的照射下才能进行光合作用。太阳辐射中高达28%的能量,被用于光合作用和储存在高能有机化合物中(Rabinowith,1951);其次,太阳辐射能是植被群丛与土壤、大气间进行热量、水分和其他物质交换的能量来源。植物吸收的太阳辐射的70%以上转化为热而被用作蒸腾和与周围空气进行对流热交换的能量,这些交换决定着叶片和植物其他部分的温度(蒙特恩,1985)。因此,植被群丛内的辐射状况对植物生长和发育有着十分重要的作用。对植被冠层(Canopy)内辐射传输(Radiation Transformation)的研究,一方面是要从植被群丛的冠层结构和光学性质(Optical Property)导出群丛中的辐射状况,另一方面则是要根据遥感观测的反射辐射来推断如叶片数量、生物量以及植物生化参数含量等信息。这些信息,不仅可应用于植物生长监测和收获量估算,而且对于全球生态环境的动态研究,也具有重要价值,如冠层叶面积指数不仅可用于生态系统净第一性生产力的估

算,而且叶面积指数的大小对陆地表面蒸散有重要意义。这正反两方面问题的重要应用价值,使植被冠层辐射传输成为学术界一项重要的研究课题。

正是由于人们渴望透彻理解和表达植被辐射传输过程的强烈愿望,使得科学家们经过几十年的努力,建立了上百种数学模型,用于描述和模拟光辐射在植物群丛中的传播。植被冠层辐射传输理论是在研究辐射在平行平面大气的浑浊介质中的传输机理的基础上发展起来的。它以研究辐射在冠层中薄层或单元中的传输过程为基础,通过对辐射传输方程求解,推算辐射与冠层的相互作用,由此解释辐射在冠层中的传输机理,并进而得到冠层及其下垫面对入射辐射的吸收、透过和反射的光谱特性;反之,通过遥感观测的植被冠层反射辐射信息,又可利用辐射传输方程反演冠层信息如叶面积指数、密度、叶绿素含量等。由于构成植被冠层的组分如叶、茎、花、穗、枝杆等,与大气辐射研究中的介质微粒如空气分子、气溶胶等有着本质的差异,因此,对植被的辐射传输理论的研究有其自身的特点,从散射单元的尺寸描述,到散射单元的散射特性和光的传播方式(如散射相函数)等,都有其特定的表达方式和参数变量。

特别应该注意的是,植被冠层对入射光的反射通常都是各向异性的(Anisotropy),即反射的强度在各个方向不同,如在遥感图像上,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。正因为如此,科学家们从 20 世纪 70 年代初开始研究植被的二向反射特性(植被反射率随观测角和入射角的不同而变化的特性)。研究表明,从垂直角度观测的反射率与从非垂直角度观测到的二向反射率具有显著差别(李小文等,1991;牛铮,1997;Kimes,1985b,1993;Kuusk,1991);并且,不同植被的二向反射特性不同,即使是同一种植被,在不同的生长时期,其二向反射率也不同,

而且作为植被下垫面的土壤也有很明显的二向反射特性(Hapke, 1981)。这些都表明植被二向反射特性与观测角和入射角、植被冠层结构(如:冠层厚度、冠层叶角分布、叶的形态结构和空间分布)、植被冠层构成要素的光谱特性和植被下垫面特性之间有密切的联系。对植被二向反射特性的研究,正是希望通过对植被冠层反射率进行多角度的观测,掌握植被冠层反射率随观测角和入射角的变化规律。通过建立植被二向反射模型,模拟光在植被冠层内的传输过程,掌握植被冠层二向反射率与冠层厚度、冠层叶角分布、叶的形态结构和空间分布以及植被下垫面特性之间的关系。并通过模型反演,获得丰富的冠层结构信息,从而可通过非破坏性手段,实现对地表植被的监测。正因为如此,植被二向反射的研究得到了植被遥感学界的广泛重视,从20世纪80年代中期开始逐渐成为遥感界的热门研究领域之一。

2. 植被辐射传输模型的研究进展

植被辐射传输模型通常可分为两大类,即物理模型和经验模型。经验模型建立在大量观测数据基础之上,为了准确描述冠层反射受光照条件、观测方向等因素的影响,需要观测大量的模拟试验,并且,所建立的模型参数受观测状况的限制,难以推广应用;物理模型通过对光与植被冠层各组分的相互作用机理的分析,模拟光在植被群丛中的散射、吸收等,建立辐射传输模型,因而可以推广应用于不同植被冠层,有许多冠层辐射传输模型还可进行反演(Goel,等,1988)。

此外,Roujean(1992)、Rahman(1993a,1993b)等提出的半经验模型,在由物理模型导出的近似模型中,加入了经试验观测所确定的权重系数,以调节地表植被在不同观测方向的反射率。李小文等(2000a,2000b)对新几何光学核进行验证,并反演反照率,取得了较好的效果。

植被冠层辐射传输的物理模型大致可分为辐射传输模型、3D模型、几何光学模型和计算机模拟模型。

(1) 辐射传输模型

辐射传输模型主要针对水平均匀植被冠层。对于辐射传输模型的求解,大致有两类方法,一类是数值解,另一类是近似解。数值解中比较有代表性的有 Idso-deWit 模型 (Idso 等, 1970)、Cooper-Smith-Pitts 模型 (Cooper 等, 1982)、Goudriaan 模型 (Goudriaan, 1977) 等;近似解模型的计算速度比数值解快,并且由于对模型参数的简化,使得模型易于反演,因此,在光学遥感特别是植物监测中有广阔的应用前景。比较有代表性的近似解模型有 2 流模型 (Suits, 1972; Verheef, 1984)、4 流模型 (Liang 等, 1994)、N-K 模型 (Nilson 等, 1989)、FICR (Kuusk, 1995) 模型等。

(2) 3D 模型

植被辐射传输模型中,通常假定水平维上植被分布是均一的 [即假定散射介质的统计特征与其水平方向的 (x, y) 坐标无关,辐射传输过程仅与垂直方向的坐标 z 有关],这在一定程度上可以简化辐射传输方程的求解方法。但是,由于植被冠层本身复杂多样的三维特征,时常难以满足一维模型的限定条件。如森林冠层中,冠层之间存在大量的开放空间,行栽农作物的行间空隙以及农作物生长初期植株间较大的间隙,等等。在 3D 模型中,植被冠层用三维直角坐标表示,并把冠层划分成以三维坐标标定的体积单元,从而将冠层的几何结构描述引入模型。因而,更接近真实情况。比较有代表性的如 Kimes 模型和 Nilson-Peterson 模型。

① Kimes (1982, 1985a) 的 3D RT 模型

模型中,冠层结构以直角坐标系中单位边长的立方体积元作为基本单元,每个单元中包含若干与单元的构成有关的信息,模型将相函数作为叶面方向分布、叶面透过和反射的函数,并考虑了土壤表面的非朗伯散射特征。该模型可预示冠层上方的方向反射,

冠层内吸收辐射通量密度的空间分布,以及视场中特定位置的单元的方向性光谱辐射。

② Nilson-Peterson(1991)模型

确切地说,该模型是一个混合模型,它包含了几何光学模型和辐射传输模型。模型将辐射场分为四个部分,即光照树冠、光照地面植被、阴影树冠和阴影地面植被,并将辐射场分为单次散射与多次散射,单次散射考虑到地面上植被分布的不均一性,但多次散射仍然假定均一分布。类似的模型还用于植物行的不均一性分布,如 Goel-Grier 的 Trim 模型(Goel 等,1988)。

(3) 几何光学模型

几何光学模型假定地面物体由一系列不同几何形状的要素构成,如植被树冠可假定为锥体、椭球体或球体,树杆(或树枝)可假定为圆柱体。根据这些要素的大小和空间分布,计算出在特定太阳和传感器的几何观测条件下,物体的日照和阴影比例值,遥感的像元值由这些不同的比例值组合而成。不同模型在假设条件和处理方法上有很大差异。几个比较典型的植被模型包括:Norman-Welles(1985)模型、Li-Stralher(1985,1986,1992)模型、Strahler-Jupp(1990)模型、Chen-Leblanc(1997)模型等。

(4) 计算机模拟模型

这类模型假定地表场景物体的大小、分布在计算机中详细地得到表征。并将每个物体再进一步地分解为一系列均一的多边体。常用的方法有:Radiosity 法(Goel, 1991; Borel 等, 1991)、Monte-Carlo 或光线跟踪法(North, 1996; Lewis 等, 1998, 1992)。

Radiosity 法根据多边形的关系(相对定向、空间位置等)建立起多重辐射通量方程,一旦确定光源及传感器的几何位置,便解出多维方程组,进而确定出像元值。

Monte-Carlo 或光线跟踪法,“发射”若干光子进入场景,跟踪每粒光子及模拟它与场景中每个物体的相互作用,根据进出场景

的粒子数来计算场景在不同方向的反射率。

计算机模拟模型可以逼真地模拟地表辐射场景,然而,它目前还不能取代辐射传输模型或几何光学模型,这是由于计算机模拟模型的结构设置太烦琐,地表场景的构成需要大量的实测资料,模型过于庞大、复杂,而且难于反演。

此外,科学家们还提出了许多包含大气和植被冠层的辐射传输模型。这些模型既考虑了植被冠层的散射特性,同时又考虑了大气的散射特性,可用于模拟特定区域范围内大气下界植被冠层的方向性反射,也可用于分析冠层和大气参数对在大气顶部所测量的反照率信息的影响,因而特别适用于星载遥感传感器的信息分析。比较有代表性的模型有 Myneni 等(1993)的模型、ARVI 模型(Kaufman 等,1992)、Liang-Strahler(1993a,1993b,1994)模型、Rahman 等(1993a,1993b)的模型等。

近十多年来,许多发达国家竞相研制发射具有多角度观测能力的机载、星载传感器,ASAS(Advanced Solid-state Array Sensor)于 20 世纪 90 年代初开始成功飞行,实现了 7 个方向的观测;机载 POLDER(Polarization and Directionality of Earth's Reflectance)采用大视场角($FAV > 90^\circ$)的 CCD 面阵成像技术实现多角度遥感,并于 1996 年搭载于日本 ADEOS(Advanced Earth Observing System)卫星首次获取了星载多角度遥感数据;法国—欧共体于 1998 年发射的 SPOT-4 卫星上搭载的 VGT(Vegetation)可实现对全球植被的多角度探测;1999 年底美国 EOS(Earth Observing System)的 Terra 卫星携带的 MODIS(Moderate Imaging Scanner)、MISR(Multiangle Imaging Spectroradiometer)、ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)等新型传感器,使得多角度遥感探测的波段范围更宽、波谱分辨率更高。随着新一代遥感传感器的相继升空,人们必将获得更多具有更高空间分辨率和光谱

分辨率的遥感信息,从而为遥感反演地面参数信息提供更多更有价值的遥感数据,植被辐射传输理论及模型反演也将得到更进一步的发展。

二、研究内容和方法介绍

1. 研究内容

本书中的内容主要限于可见光和近红外波段以及水平均匀植被冠层的辐射传输模型。第一章绪论介绍了植被辐射传输研究的意义和辐射传输模型研究进展,并介绍了本书的研究方法和主要内容;第二章介绍了与植被辐射传输有关的基本概念,包括辐射的基本概念、辐射过程、辐射传输方程、太阳辐射和地物的反射辐射,还介绍了将辐射传输方程应用于植被冠层时,冠层元素的参数化方法;第三章介绍了植被冠层结构及其模拟,冠层高度、叶面积指数和叶面积密度的概念,介绍了叶倾角分布函数和 X_L 指数的概念,以及由叶倾角分布函数和 X_L 指数表达的 G -函数、消光系数的概念,还介绍了冠层元素的空间散布模型,并以水稻田间试验为例,对其叶倾角分布、 G -函数和消光系数进行了模拟计算;第四章介绍了单张叶片的辐射传输理论和模型,绿色植物叶片的光谱特性,介绍了单张叶片的辐射传输模拟模型,包括 LEAFMOD 模型、PROSPECT 模型和 LIBERTY 模型,对水稻叶片反射特性及其模拟进行了讨论;第五章介绍植被冠层的辐射传输理论、叶层散射理论,植被冠层辐射传输理论及方程的近似和简化以及边界条件等,介绍了辐射传输方程的近似解法,包括多次连续散射法、高斯迭代法、离散纵标法、相加或加倍法,介绍了近似解方法,包括 Suits 模型、SAIL 模型和 FICR 模型,还介绍了水稻冠层反射率的一般规律及其模拟;第六章介绍了辐射传输模型反演的原理和方法,并以水稻为例,介绍了用优化函数法反演水稻叶片叶绿素含量以及用