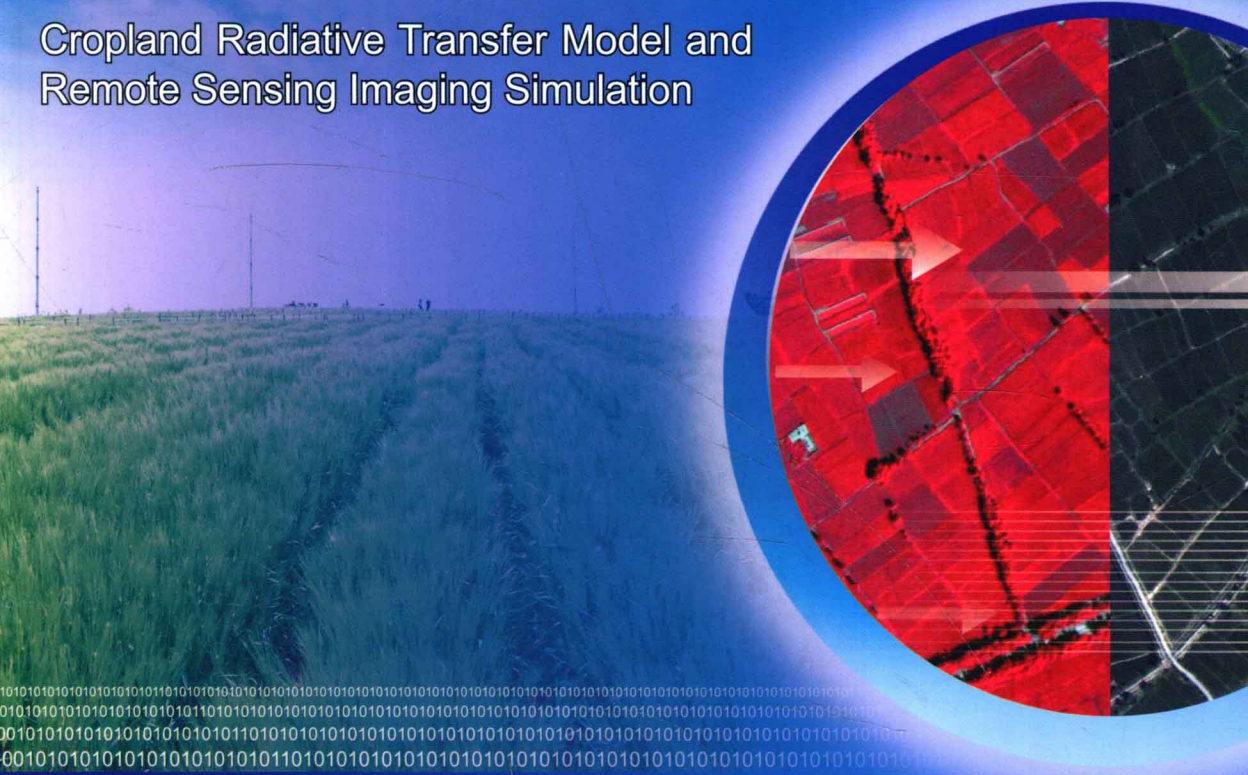




农田辐射传输机理与 遥感成像模拟

杨贵军 著

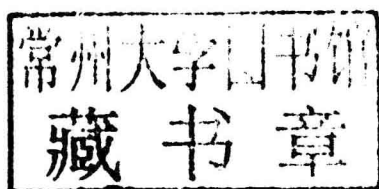
Cropland Radiative Transfer Model and
Remote Sensing Imaging Simulation



气象出版社
China Meteorological Press

农田辐射传输机理与遥感成像模拟

杨贵军 著



内 容 简 介

基于辐射传输机理模型的遥感成像模拟能够为遥感器载荷设计、性能测试提供有效参考;也为定量遥感算法和模型设计提供测试和验证数据;并且能够将模拟数据作为一种“新”补充数据,用以满足灾害应急监测、地表连续时空变化分析等科学研究与应用需求,弥补由于恶劣天气、重访周期长等因素造成的数据缺失;此外,农田辐射传输机理及遥感成像模拟为农业定量遥感深入研究和应用提供了直观的分析手段,促进了农田精准决策与管理,对粮食、环境安全和农业可持续发展具有十分重要的意义。本书主要论述了五个方面的内容:①农田辐射传输中作物生长发育与光温响应的原理基础;②农田地表场景辐射传输建模及模拟,包含土壤—叶片—冠层不同尺度辐射传输模型、作物不同生育期空间分布特征及可见光—热红外波段农田辐射传输模拟;③大气辐射传输解析建模及模拟,包括建立适合光学全谱段的辐射传输解析模型、邻近效应分析及大气辐射贡献模拟;④遥感器成像系统模拟,包括光学系统响应建模、几何构象过程模拟及光谱响应、噪声模拟;⑤基于农田地表—大气—传感器模拟环节建立全链路成像模拟系统的设计及模拟实例。

本书可供从事定量遥感基础研究、农业信息技术及遥感应用研究方面的科研、教学人员和研究生参考,也可作为遥感和地理信息系统、气象及农林学校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

农田辐射传输机理与遥感成像模拟/杨贵军著. —北京:气象出版社,2012.11
ISBN 978-7-5029-5613-4

I. ①农… II. ①杨… III. ①农田-遥感成像 IV. ①S127

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 258884 号

Nongtian Fushe Chuanshu Jili yu Yaogan Chengxiang Moni

农田辐射传输机理与遥感成像模拟

杨贵军 著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:姜 昊 蔺学东

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京京华虎彩印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:506 千字

版 次:2012 年 11 月第 1 版

定 价:56.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:汪勤模

责任技编:吴庭芳

印 张:19.75

印 次:2012 年 11 月第 1 次印刷

前言

在未来国际及我国的对地观测计划中,先进的高光谱、高分辨率、多角度光学遥感器层出不穷,它们将在人类认识地球甚至宇宙空间中扮演十分重要的角色。遥感成像模拟作为遥感器前期载荷论证及遥感应用模型开发的关键环节,可以用来论证新型遥感器对地观测能力和技术可行性,同时也可以为优化遥感器载荷配置和数据获取方案提供有力支持。此外,由于现有在轨光学遥感器难以同时兼顾高空间分辨率和高时间分辨率,加之受天气等成像条件影响较大,导致不能获取有效遥感数据,无法满足灾害应急监测、地表连续时空变化分析等科学研究与应用需求。因此,如何基于现有遥感数据,并结合地学、电磁波理论、遥感科学及计算机技术、农学知识,模拟生成连续时空分布、光谱波段丰富的“新”遥感数据,在一定程度上弥补了遥感数据的缺失或不足问题,这一新技术已经引起遥感学家的广泛重视。

作者在中国科学院遥感应用研究所辐射传输研究室攻读博士研究生学位期间,有幸参与了中国科学院知识创新工程重要方向项目——“航天遥感图像仿真模拟关键技术研究”(KZCX2-YW-303)及全国陆地观测卫星数据处理和服务设施建设项目——HJ-1A/1B CCD, HJ-1B IRMSS 数据模拟软件包(GXTC-0707087),主要参与并负责光学波段的成像模拟工作,开展了地物辐射特性研究、大气传输模型研究、遥感器模型研究,并建立了全链路的(地表—大气—传感器)正向遥感成像模拟方法和模拟遥感图像几何、辐射方面评价和分析的方法,参与开发了航天遥感图像仿真模拟系统,实现了基于遥感器设计参数、地球环境背景和大气状况的可见光—红外波段航天遥感图像的模拟。2008年以来,作者在后续科研工作期间通过承担国家自然科学基金项目“农田系统的土壤—叶片—冠层—大气辐射传输耦合模型研究及图像模拟(40901173)”和“作物组分氮素田间成像光谱探测机理与升尺度建模研究”(41071228)、“基于同化策略的地表温度多模式降尺度方法及其不确定性研究”(41271345)及国家“863”课题“光谱探测与辐射传输模型结合的作物信息获取研究”(2007AA10Z201)、国家“973”课题“生态环境定量遥感综合试验与示范——黑河流域作物生长过程观测与应用示范(2007CB714401-2)”和“作物氮素养分垂直分布成像光谱诊断机理研究”(2011CB311806)及北京市优秀人才培养资助项目“作物氮素近地多平台成像高光谱探测尺度转换研究”(2012D002020000007)、北京市自然科学基金项目“北京山区森林 LAI 多源遥感与多尺度模型联合定量反演(4102021)”、北京市农林科学院科技创新能力建设专项“北京全覆盖多尺度遥感数据库建设”(KJCX201104012)、中国科学院遥

感应用研究所遥感科学国家重点实验室开放基金项目“作物氮素近地多平台成像高光谱探测与升尺度模研究”(OFSLRSS201109)等科研项目,对农田辐射传输模型与成像模拟方法进行了补充和完善,并依据建立的作物冠层关键参数时空变化模型,实现了空间、时间及光谱多维遥感数据模拟,为开展农田参数反演及模型验证提供了有效数据。

本书共分为7章,第1章介绍遥感科学技术与遥感成像模拟的国内外研究进展情况;第2章介绍影响农田下垫面辐射传输过程的物候、种植管理因素及影响植被冠层光谱、温度变化的光合作用与农田小气候过程;第3章重点阐述叶片、土壤及冠层辐射传输模型扩展改进及作物冠层尺度辐射传输过程模拟途径;第4章分别介绍了可见—近红外谱段大气辐射传输建模及全谱段大气辐射传输解析模型,并对邻近效应及大气辐射贡献各分量进行了定量分析;第5章介绍了光学遥感器几何构像及光电系统响应等过程的综合模拟方法;第6章介绍了农田、大气及遥感器观测几何等参数的获取方法;第7章简要介绍了遥感成像模拟系统的系统设计和应用实例。

本书作者都是直接参与相关课题研究的专家和技术骨干,其中,第1章由王纪华、赵春江、杨贵军等编写;第2章由黄文江、宋晓宇、黄华国、顾晓鹤等编写;第3章由杨贵军、杜永明、李丽、赵峰等编写;第4章由杨贵军、历华、刘三超等编写;第5章由杨贵军、方莉、葛亮等编写;第6章由杨贵军、徐新刚、李存军、常红、潘立刚、马志宏等编写;第7章由杨贵军、沈占峰、杨小冬、董燕生、杨浩等编写;全书由杨贵军、龙慧灵、石月婵、廖钦洪、付元元等统稿,柳钦火、刘强、肖青、辛晓洲等审校定稿。多位博士后和研究生直接参与了书中部分研究工作并为本书的出版付出了心血,他们是:陈升、历华、张阳、陈敏、冯海宽、李先、王伟、邢著荣、刘镞源、张竞成、张东彦、董莹莹等。

气象出版社编辑姜昊老师为本书的出版付出了辛勤的劳动,并提出了许多建设性的意见和建议;参与课题研究的其他老师和同学们也为本书的出版作出了重要贡献,在此一并表示衷心感谢。

基于遥感机理的成像模拟研究涉及众多遥感科学前沿问题,属于地学、农学及遥感科学、计算机技术的交叉学科领域,由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请读者和同行专家批评指正。

杨贵军

2012年2月于北京

目 录

前 言

第 1 章

遥感科学技术与成像模拟	(1)
1.1 研究背景及意义	(3)
1.2 遥感基本理论与概念	(4)
1.3 辐射传输基础	(13)
1.4 遥感成像模拟研究进展	(16)
参考文献	(22)

第 2 章

作物生长发育过程及其光温响应	(25)
2.1 农田种植及物候	(27)
2.2 作物生长过程及模拟	(49)
2.3 植物光合作用及 PAR	(62)
2.4 农田小气候模型及温度模拟	(71)
参考文献	(82)

第 3 章

植被冠层辐射传输与成像模拟	(85)
3.1 土壤光谱及辐射特性	(87)
3.2 叶片光谱及辐射特性	(105)
3.3 植被冠层光谱及辐射特性	(115)
参考文献	(133)

第 4 章

大气辐射传输过程及遥感模拟	(137)
4.1 大气的组成与物理特性	(139)
4.2 大气辐射传输基础	(148)
4.3 太阳短波谱段大气辐射传输模拟	(156)
4.4 热红外大气辐射传输模拟	(166)
参考文献	(203)

第 5 章

光学遥感器成像模拟	(205)
5.1 遥感器与遥感平台	(207)
5.2 遥感器几何构像模拟	(212)
5.3 成像系统光电响应模拟	(223)

	参考文献	(241)
第 6 章	遥感成像模拟参数获取	(243)
	6.1 观测几何参数获取	(245)
	6.2 关键大气参数获取	(252)
	6.3 关键地表参数获取	(255)
	参考文献	(285)
第 7 章	遥感成像模拟系统与实例	(287)
	7.1 系统体系结构设计	(289)
	7.2 系统主要技术方案	(292)
	7.3 利用机载数据模拟 Landsat7/ETM+ 遥感数据	(299)
	7.4 HJ-1A/1B CCD、HJ-1B IRMSS 成像模拟实验	(303)
	参考文献	(310)

第 1 章

遥感科学技术与成像模拟

1.1 研究背景及意义

随着定量遥感理论与技术发展,国内外学者更加关注利用先进的对地观测技术获取深层次的地表参数,通过不断挖掘遥感观测的角度、光谱及空间特性,发展新型传感器载荷获取多维遥感数据(多角度、高光谱、多时相、高分辨率)来克服地表参数反演过程中存在的“病态”问题,提高地表参数的反演精度。所以,传感器多维数据模拟一直是传感器研制和遥感物理建模、反演领域众多学者的研究热点之一。虽然近年来的研究取得了许多重要成果,但依然有许多重要问题尚未解决(李小文等 1995,梁顺林 2009)。核心问题之一是如何利用获得的地表信息,并耦合遥感物理相关模型,模拟包含土壤、叶片、冠层和大气光学响应在内的多维遥感数据,同时对辐射传输过程中关键参数的敏感性进行分析,实现“定量化模拟,定量化评价”。

根据我国民用航天专项科研“十一五”规划,我国将在继续完成原有遥感科研及卫星项目基础上,开展综合对地观测系统的研制,包括风云三号卫星、风云四号卫星、海洋动力卫星、中巴地球资源卫星和新一代资源卫星、环境减灾小卫星星座等。面对如此庞大的遥感计划,当我国遥感界已经对“应用为导向”达成共识的时候,一个十分突出的问题摆在我们面前:传感器研制单位对未来研制的传感器参数缺乏系统的论证,对获取的遥感数据缺乏深层次认识;卫星应用单位为了及时有效利用卫星数据,必须事先开展数据处理和应用模型研发工作,但苦于没有相关模拟数据。另外,面对获取的大量地表观测数据和遥感数据,如何解决多源数据在遥感应用中的转换、融合及协同,成为数据有效集成与同化的关键,而多维数据模拟为其提供了一条新途径。

基于地表—大气辐射传输模型模拟多维遥感数据,是指在地表观测数据支持下,利用遥感物理模型刻画出与真实辐射传输过程最佳一致的模拟结果,目前还存在以下问题:

1) 现有模型虽然考虑了土壤—叶片—冠层遥感物理特性,但不适合作物生长期内多个关键生育期的连续模拟,通常是针对不同时期选择不同模型进行模拟。例如针对我国大范围种植的冬小麦,由于作物生长导致的植株结构和生化参数都发生明显变化,也导致作物空间分布发生显著变化,因此,需要建立统一的模拟模型,实现多时相数据模拟。

2) 现有模拟方法主要关注地表辐射传输过程,未能与大气辐射传输模型及传感器模型实现紧密耦合,未将大气邻近效应、传感器成像方式及通道响应综合考虑,无法把地表辐射转换为大气层顶或传感器输出值。所以,这样就不能将多维模拟数据真正用于前期的传感器载荷论证、遥感应用模型开发及异源遥感数据转换,降低了模拟方法的实用性和有效性。

3) 现有多维数据模拟方法均是在不同程度上对正向辐射传输过程进行了研究,并未就模拟模型输入与模拟输出结果之间的内在联系进行定量分析和评价,无法实现多维数

据模拟的信息传递环路闭合,导致无法在实际应用过程中发挥作用。例如在模拟多角度数据及高光谱数据时,分析输入参数误差对哪些角度和波段最敏感,以及他们之间的定量关系,反之,在确定模拟数据的误差后,对模型输入参数及精度指标有何要求。

针对上述科学问题,以农田(土壤—叶片—冠层)辐射传输模型为基础,利用大量田间观测数据及星—机—地同步观测数据,将相关模型进行扩展与改进后,建立作物连续生长期辐射传输模拟模型,然后与大气、传感器辐射传输模型进行耦合,建立一体化的多维数据模拟模型,实现多时相、多角度、高光谱及高分辨率遥感数据模拟(杨贵军等 2009, 2010a, 2010b)。在此基础上开展模拟数据的质量和精度评价研究,利用获取的农田信息对模型输入参数的敏感性和误差传递进行定量化分析。该研究不仅具有十分突出的科学创新研究价值,预期研究成果对我国发展新型载荷传感器前期论证及降低研制风险具有重要参考价值;为开发新的定量遥感模型提供了高质量的分析与验证数据,满足了地表参数定量遥感反演及多源数据融合、同化及尺度转换等研究需求;同时,为农业定量遥感深入研究和应用提供了直观的分析手段,促进了农田精准决策与管理,对粮食、环境安全和农业可持续发展具有十分重要的意义。

1.2 遥感基本理论与概念

1.2.1 遥感的定义

遥感(remote sensing),其字面直接含义为“遥而感知”,是通过不接触被探测目标,利用传感器获取目标数据,通过对数据进行分析,获取被探测目标、区域和现象的有用信息(李德仁等 2008)。遥感技术充分利用物体的电磁波特性,即“一切物体,由于其种类及环境条件不同,而具有反射或辐射不同波长的电磁波的特性”。当电磁波在介质中传输时,会与介质发生相互作用而改变特性,通过观测分析遥感所获取的电磁波特性,可以识别目标及目标物存在的环境。

遥感平台(platform),在遥感中搭载遥感仪器的工具称为遥感平台或载体,它既是遥感仪器赖以工作的场所,又是遥感中“遥”字的具体表现(李小文等 2008)。平台的运行特征及其姿态稳定状况直接影响遥感仪器的性能和遥感资料的质量。目前,遥感平台按垂直地面高度大致可以分为航空、航天与地面遥感平台,主要载体包括高架车、汽艇、飞机、火箭和卫星等。

传感器(remote sensor),指在遥感过程中,收集、记录和传送遥感信息的装置,它是遥感的核心,“感”字的体现。目前应用的传感器主要包括摄影机、摄像机、扫描仪、雷达、光谱辐射计等。平台和传感器代表着遥感技术的水平。

1.2.2 电磁波与电磁波谱

光波、热辐射波、微波等是由于粒子的能级跃迁而造成的电磁振动在空间的传播，它们统称为电磁波。电磁波是自然界中以“场”的形式存在的一种物质。在经典物理理论中，麦克斯韦的电磁场理论把光波与电磁波统一起来。20 世纪刚开始，爱因斯坦的狭义相对论和普朗克的量子假说的提出，使近代物理学迅速地发展，并从本质上揭示了电磁波的内在规律(赵英时 2003，徐希孺 2005)。

电磁波具有波粒二象性，当光在传播时表现为波动性，当光和其他物质发生相互作用时表现为粒子性。波动性是通过光的干涉和衍射表现出来；而粒子性则可以由原子结构及原子光谱、分子结构及分子光谱和晶体结构及其光谱，从本质上得以体现。虽然电磁波理论的发展先于遥感技术，但对地物电磁波特性的研究则是随着遥感技术的深入发展和应用而逐渐拓展的。

电磁波的产生有多种方式：电磁振荡、晶体或分子的热运动、电子能级跃迁、原子核的振动与转动、原子核内的能级跃迁等，产生的电磁波波长变化范围也很大，其遥感应用特征也各不相同(童庆禧 等 2006)，详见表 1.1。

表 1.1 各电磁波谱段的产生方式及遥感应用特征

产生方式	波段		波长	遥感应用特征
原子核内部的相互作用	γ 射线		<0.03 nm	来自太阳的 γ 辐射完全被上层大气所吸收，不能为遥感利用，来自放射性矿物的 γ 辐射作为一种探矿手段可被低空飞机探测到
层内电子的离子化	X 射线		0.03~3 nm	进入的辐射全被大气所吸收，遥感中未用
外层电子的离子化	紫外线		0.003~0.38 μm	波长小于 0.3 μm 的太阳紫外辐射完全为上层大气中的臭氧所吸收
	摄影紫外		0.3~0.38 μm	穿过大气层，用胶片和光电探测器可检出，但是大气散射严重
外层电子的激励	可见光	紫	0.38~0.43 μm	用照相机、电视摄影机和光电扫描仪等均可检测，包括在 0.5 μm 附近的地球反射比峰值
		蓝	0.43~0.47 μm	
		青	0.47~0.50 μm	
		绿	0.50~0.56 μm	
		黄	0.56~0.59 μm	
		橙	0.59~0.62 μm	
		红	0.62~0.76 μm	

续表

产生方式	波段		波长	遥感应用特征
分子振动，晶格振动	红外线	近红外 (反射红外)	$0.76\sim3\ \mu\text{m}$	这是初次反射的太阳辐射， $0.7\sim1.4\ \mu\text{m}$ 的辐射用红外胶片检测，称之为摄影红外辐射
		中红外 (热红外)	$3\sim5\ \mu\text{m}$	这是热区中的主要大气窗口，是一个宽波段内的总辐射，用这些波长成像需要使用光学—机械扫描器(红外辐射计)
		远红外 (热红外)	$8\sim14\ \mu\text{m}$	
分子旋转和反转，电子自转与磁场的相互作用	微波		$0.1\sim100\ \text{cm}$	这些较长的波长能穿透云和雾，可用于全天候成像。其下可细分为毫米波、厘米波和分米波。而且都是无线电波的一种
核自转与磁场的相互作用	无线电波 工业用电		$100\sim106\ \text{cm}$ $>106\ \text{cm}$	用于无线电通讯，分超短波、短波、中波、长波

从电磁波谱中可以看出，波长最长的是无线电波，其次是微波、红外线、可见光和紫外线，再次就是 X 射线，最短是 γ 射线。它们的波长或频率之所以不同，是因为产生它们的波源和方式不同造成的。无线电波由电磁振荡器发射，红外线、可见光、紫外线由分子、原子、电子核等粒子在改变运动状态或发生能级跃迁时产生的。随着对地物的电磁波特性的研究，遥感也在寻求探测各种地物的最佳波段。因此，继可见光后，红外波段(包括近、中、远红外)、紫外波段、微波都作为探测地物的波段应用于传感器的研制。其中可见光主要用于获取地物反射特性，红外波段则多用来探测地物的热辐射特性，紫外波段多用于监测气体污染及水体的油污染，而微波则具有更好的穿透能力，获取地物后向散射特性，同时具有全天候的工作能力，在某种程度上弥补了可见光、红外遥感仪器的不足。

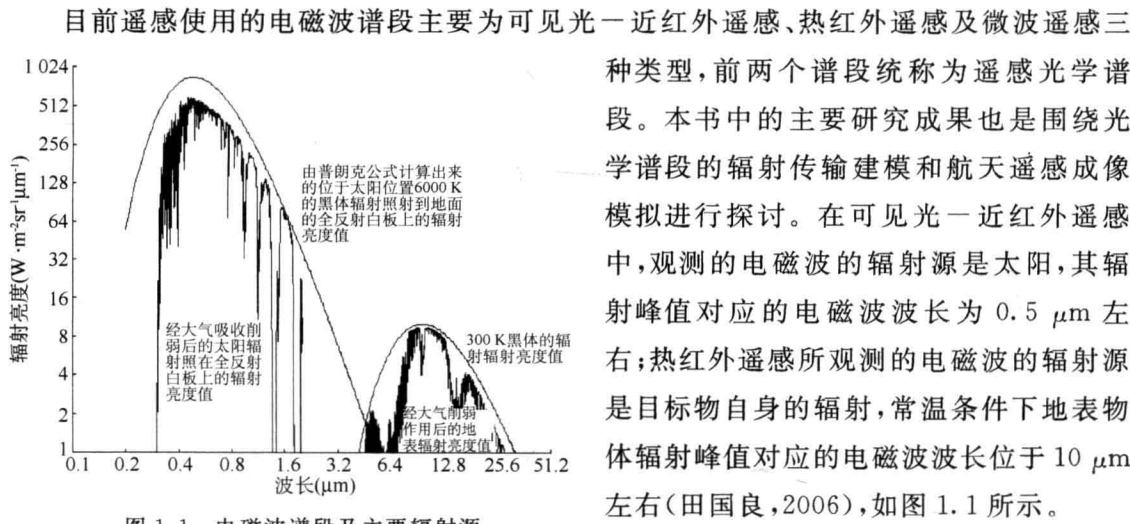


图 1.1 电磁波谱段及主要辐射源

1.2.3 辐射度基本参数

1) 立体角(solid angle)

辐射场的方向性可以利用立体角来描述,它是二维空间角度测量的扩展。立体角的定义为,球半径为 r 的球面被一个圆锥所截取的球面表面积与球半径的平方的比,符号为 Ω ,单位为球面度(sr),无量纲。

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (1.1)$$

式中: A 是与球半径垂直的某小面元的面积; r 是中心与球面上面元的距离,即球半径。球心对全球面所张立体角为 $\Omega = 4\pi$ 。立体角经常用极坐标下的天顶角 (θ) 和方位角 (φ) 来表示。一个立体角的微分可以用公式表示为:

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \frac{(rd\theta)(r\sin\theta d\varphi)}{r^2} = \sin\theta d\theta d\varphi = d\mu d\varphi \quad (1.2)$$

式中: $\mu = \cos\theta$, 天顶角 θ 的取值范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$, 当 $[0^\circ, 90^\circ]$ (即 $0 \leq \mu \leq 1$) 时代表向上半球, $[90^\circ, 180^\circ]$ (即 $-1 \leq \mu \leq 0$) 时代表向下半球。方位角 φ 取值范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$ (廖国男 2004)。如图 1.2 所示。

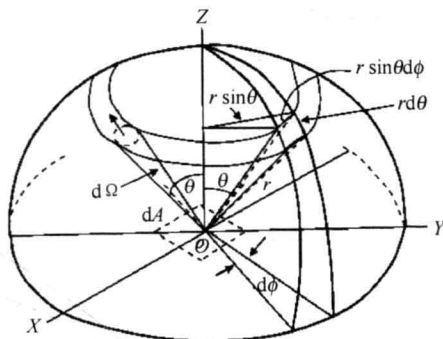


图 1.2 极坐标中的立体角示意图

2) 辐射能量(radiant energy)

以电磁波形式向外传送的能量,常用 Q 表示,单位为焦(J)。

3) 辐射通量(radiant flux)

在单位时间内通过某一表面的辐射能量,称为通过该面积的辐射通量,符号 ϕ ,单位为瓦(W),即焦/秒(J/s),表达式为:

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.3)$$

4) 辐射出射度(radiant exitance)

指面辐射源在单位时间、单位面积上辐射出的辐射能量,即单位面积上发出的辐射能量,常用 M 表示,单位为瓦/米²(W/m²):

$$M = \frac{d\phi}{dA} \quad (1.4)$$

5) 辐射照度(irradiance)

简称辐照度,指面辐射源在单位时间内,物体从单位面积上接收的辐射能量,即照射到物体单位面积上的辐射通量,符号 E ,单位为瓦/米²(W/m²),表达式为:

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (1.5)$$

6) 辐射强度(radiant intensity)

指点辐射源在某一方向上的单位立体角所发出的辐射通量。符号 I , 单位为 W/sr :

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (1.6)$$

7) 辐射亮度(radiance)

简称辐亮度, 是面状辐射源在单位立体角、单位时间内、在某一垂直于辐射方向单位面积上辐射出的辐射能量, 即辐射源在单位投影面积上、单位立体角内的辐射通量, 一般用 L 表示, 单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。

$$L = \frac{d^2\phi}{d\omega \cdot dA \cos\theta} \quad (1.7)$$

1.2.4 地物双向性反射及反照率

物体对电磁波的反射可分为三种形式: 1) 镜面反射, 即入射能量全部或几乎全部按相反方向反射, 反射角等于入射角的反射; 2) 漫反射, 即以入射能量为中心, 在整个半球空间内向四周各向同性的反射。一个完全的漫射体称为朗伯体, 朗伯体是一个理想化的表面; 3) 方向反射, 它是介于朗伯表面和完全的“镜面”之间的非朗伯表面, 其反射各向异性, 是具有明显的方向性的反射(赵英时 2003, 李小文等 2008, 梁顺林 2009)。

为了描述地表方向性反射率, Nicodemus(1977) 给出了地表双向反射率分布函数 BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)来描述地表反射特性:

$$BRDF(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL(\Omega_r)}{dE(\Omega_i)} = \frac{dL(\theta_r, \phi_r)}{dE(\theta_i, \phi_i)} \quad (1.8)$$

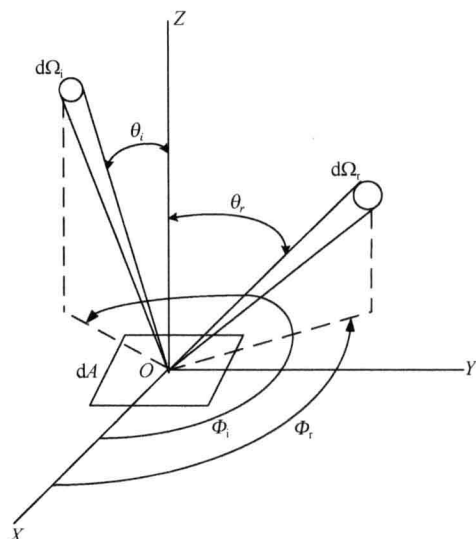


图 1.3 地物双向性反射示意图

式中: θ_i 表示入射辐射天顶角; ϕ_i 表示入射辐射方位角; θ_r 表示反射辐射天顶角; ϕ_r 表示反射辐射方位角; Ω_i, Ω_r 分布表示在入射和反射方向上的两个微小立体角; $dE(\Omega_i)$ 表示在一个微小面积元 dA 上, 特定入射光 (θ_i, ϕ_i) 的辐照度, 单位为 W/m^2 ; $dL(\Omega_r)$ 表示在一个微小面积元 dA' 上, 特定反射光 (θ_r, ϕ_r) 的辐亮度, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。图 1.3 给出了双向反射示意图。

为了研究地表短波能量平衡和其他应用, 我们需要计算地表反照率(albedo), 反照率为地表向各个方向反射的全部光通量与入射光通量的比值。根据不同反照率的定义, 存在多种反照率的

形式。双向反射函数对于观测方向在半球空间的积分可以得到直入扇出反照率(Schaepman-Strub *et al.* 2006),即方向一半球反照率(黑半球反照率)。若天空晴朗无云,方向一半球反照率可近似为地表的真实反照率,是太阳天顶角的函数(Li *et al.* 1992, Verhoef *et al.* 2003):

$$R_b(\theta_s, \phi_s, \lambda) = \int_{2\pi} \rho_b(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) \cos\theta_v \sin\theta_v d\theta d\phi \quad (1.9)$$

在光线入射方向的半球空间积分得到了扇入扇出反照率,也称双半球反照率(白半球反照率):

$$R_w = 2 \int_0^1 R_b(\theta_s, \phi_s, \lambda) \cos\theta_s \sin\theta_s d\theta_s d\phi \quad (1.10)$$

1.2.5 地物热红外辐射特性

1) 比辐射率

黑体是理想化了的物体,而真实物体并非黑体。它的辐射出射度小于同温下黑体的辐射出射度,因而引出了“比辐射率(emissivity)”的概念。比辐射率被定义为物体的辐射出射度 $M_s(T, \lambda)$ 与同温度、同波长下黑体辐射出射度 $M_B(T, \lambda)$ 的比值,又称为发射率(无量纲):

$$\epsilon(T, \lambda) = \frac{M_s(T, \lambda)}{M_B(T, \lambda)} \quad (1.11)$$

根据基尔霍夫定律,可推出 $\epsilon(T, \lambda) = \alpha(T, \lambda)$, 即物体的比辐射率等于物体的吸收率($\alpha(T, \lambda)$),也就是说,一个物体吸收辐射的能力越强,那么它向外辐射能量的能力也越强。

比辐射率是波长的函数,同时也是温度的弱函数,除了金属以外,比辐射率可以认为与温度无关(徐希孺, 2005)。根据比辐射率随波长变化的规律,可把物体分为黑体、灰体、选择性辐射体。满足 $\epsilon_\lambda \equiv 1$ 的物体称为黑体,严格地说,自然界中不存在黑体,但可通过一些方法,例如建造黑体腔的方法得到近似人工黑体,比辐射率小于 1 的物体称为灰体。灰体是重要的概念,有些辐射源,如喷气机尾喷管、人体、大地及天空在一定的光谱区间内都可视为灰体,有些地物,如水体、植被在一定波长范围内,也可近似认为是灰体;比辐射率随波长变化而变化的物体称为选择性辐射体,真实地物一般都属于此类。图 1.4 为黑体、灰体,以及其他典型地物的比辐射率曲线。

2) 温度的含义

温度是物理学中一个重要的概念,它反映了物体内部分子运动平均动能的大小。在遥感科学中,根据研究对象的不同,温度有其特定的含义(Norman *et al.* 1995, 张仁华 2009)。遥感中的温度概念主要包含以下内容:

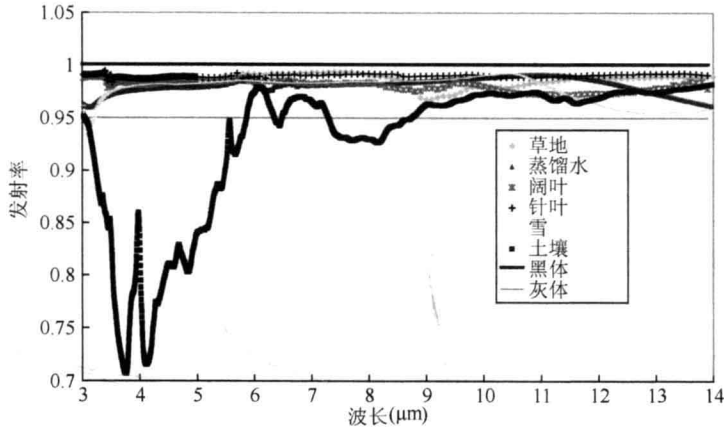


图 1.4 典型地物的比辐射率曲线

(1) 热力学温度(thermodynamic temperature)或动力学温度

热力学温度是宏观意义的,一个系统的热力学平衡条件由可以通过各亚系统中熵对能量的最大化来获取,当整个系统中熵对能量的微分不变时,各子系统就达到了平衡。动力学温度(kinetic temperature)是热力学温度在统计学上的解释,它是微观尺度上粒子平均动能的表征,某些情况下的动力学温度还必须考虑旋转动能(田国良 2006)。遥感科学中,热力学温度和动力学温度一般是等效的,都是指物体表面的真实温度,可以利用精度非常高、接触面很小的温度计与目标接触而测量得到。

(2) 辐射温度(radiometric temperature)

普朗克定律描述了黑体表面辐射能量与波长和温度的关系,自然物体的热辐射与辐射率之比一般小于 1,其辐射可用同一温度下的黑体辐射与比辐射率的乘积来表示,这样定义的辐射温度 T 是与波长相关的。由于自然物体表面的热辐射常常是各向异性的,且发射率是方向的函数,因此辐射温度也有方向性的(Norman *et al.* 1995)。传感器接收的能量不仅地表发射有关,还包含大气上行辐射和地表反射下行辐射,因此辐射温度受地表双向反射特性影响。

(3) 亮度温度(brightness temperature)

亮度温度的定义为:当一个物体的辐射亮度与某一黑体的辐射亮度相等时,该黑体的物理温度就被称为该物体的亮度温度。因此,亮度温度具有温度的量纲;但本质上是一个辐射值,是能量的概念,而不是温度含义。对于某一方向测量的传感器而言,亮度温度是具有方向性的,某一个波段范围内的辐射计观测的辐射还需考虑波段响应函数。

(4) 表皮温度(skin temperature)

在给定的波长范围内,电磁波穿透介质的能力是与波长相关的,而电磁波穿透的那一层的温度就是表皮温度。由于表皮温度是目标表面薄层温度的综合,因此,不同波段的表皮温度存在较大差异,热红外波段电磁波的穿透深度在微米量级,而微波电磁波的穿透深