



南京航空航天大学
研究生系列精品教材

卫星遥感与摄影测量

盛庆红 肖 晖 编著



科学出版社

南京航空航天大学研究生系列精品教材

卫星遥感与摄影测量

盛庆红 肖 晖 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本教材介绍了卫星遥感与摄影测量的基本理论和方法,卫星遥感与摄影测量的前沿发展内容,并结合国家自然科学基金“基于对偶四元数的高分辨率遥感影像几何定位研究”(41101441)、“Plücker 直线摄影测量的理论与方法”(41471381)及“基于多尺度路网的移动对象建模与索引”(41301512)的最新研究成果,增加了卫星遥感与摄影测量的前沿发展内容,其主要内容涉及卫星遥感对地观测数据获取原理,基于摄影测量理论的遥感成像几何模型建立方法,基于地表目标电磁辐射特性的遥感信息解译和目标识别算法及地球空间信息提取方法。全书共 12 章,主要内容包括卫星遥感辐射传输原理、卫星遥感平台、卫星遥感传感器、最小二乘平差、经典摄影测量、图像匹配、立体摄影测量基础、卫星遥感严格成像几何模型、卫星遥感通用成像几何模型、卫星遥感图像几何校正、卫星遥感图像增强、卫星遥感图像分类。

本教材可供遥感科学与技术、摄影测量、地球空间信息科学和卫星应用技术等相关专业本科高年级学生、研究生和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星遥感与摄影测量/盛庆红,肖晖编著. —北京:科学出版社,2015.4

ISBN 978-7-03-044080-8

I. ①卫… II. ①盛… ②肖 III. ①卫星遥感-教材 ②摄影测量-教材 IV. ①TP72 ②P23

中国版本图书馆 CIP 数据核子(2015)第 0/5464 号

责任编辑:潘斯斯 李 清 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:霍 兵 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 4 月第一次印刷 印张:20 1/2

字数:421 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

苏格拉底曾经说过：“人类必须站在足够远的地方，比如从遥远的星空看自己所处的这个世界，才能真正地了解地球究竟是什么样子的。”在两千多年之后，人类站在太空中，通过高空间、高光谱、多时相和全天候的遥感对地观测技术，第一次将自己赖以生存的星球作为一个整体来观测和研究，这对人类社会的可持续发展具有巨大的意义。卫星遥感与摄影测量 (satellite remote sensing and photogrammetry) 是在地球外层空间的各种平台上运用各种传感器获取地球表面的信息，通过数据的传输和处理，从而实现研究地球表面物体的形状、大小、位置、性质及其与环境的相互关系。它以地球科学和物理学为基础，随着航天技术、现代物理学、计算机技术、信息处理技术的提高，卫星遥感与摄影测量也得到了空前的发展。

在国家自然科学基金项目“基于对偶四元数的高分辨率遥感影像几何定位研究”(41101441)、“Plücker 直线摄影测量的理论与方法”(41471381)、南京航空航天大学研究生教材出版项目和南京晓庄学院教学研究课题的资助下，我们编写了本教材《卫星遥感与摄影测量》。本教材从卫星遥感和卫星摄影测量两个不同角度介绍提取基础空间信息的方法，不仅着重突出卫星遥感与摄影测量的基础知识和最新理论，还利用丰富的卫星遥感图像在相应章节配备与理论知识相关的实验，以期通过具体的实验项目，加强读者对相关理论的理解。本教材共分 4 篇：卫星遥感基础、摄影测量基础、卫星摄影测量、卫星遥感图像目标识别。各章节通过对卫星遥感与摄影测量的关键科学问题进行关联，卫星遥感对地观测数据获取系统，包括卫星遥感平台和卫星遥感传感器；论述卫星遥感对地观测数据预处理系统，重点研究利用摄影测量理论的遥感成像几何模型建立方法；通过研究地表目标的电磁辐射特性，进行遥感信息解译和目标识别，最终提取出地球空间信息。

本书主要由盛庆红和肖晖编写。特此致谢课题组成员费利佳、柳建锋、陈姝文、邵飒、王青、张斌等研究生，是大家的共同努力才促成了本书的顺利出版！西南大学徐丽华副教授对全书进行审阅，在此致以诚挚的感谢。本书在编写中参考了大量国内外公开出版的教材、研究论文和资料，在此，对书中所引用的相关文献的作者一并表示衷心的感谢。特别感谢国家自然科学基金、南京航空航天大学研究生教材出版项目和南京晓庄学院教学研究课题的大力资助。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请读者不吝指正。

盛庆红

2014 年 12 月于南京明故宫

引 言

图 0-1 为从卫星上拍摄到的我国地表的概况图，可以发现我国大部分土地都是赤裸裸的黄色。图 0-2 为被《美国国家地理》杂志评为世界上 5 片“最后的净土”之一的梅里雪山的地表细节图，可以清晰地看到皑皑白雪以及地表植物。图 0-3 为 SPOT6 获取的波拉波拉岛图像，天然的礁湖造就了波拉波拉岛特殊的海景，水晶般的海水呈现出耀眼的蓝色和青绿色。

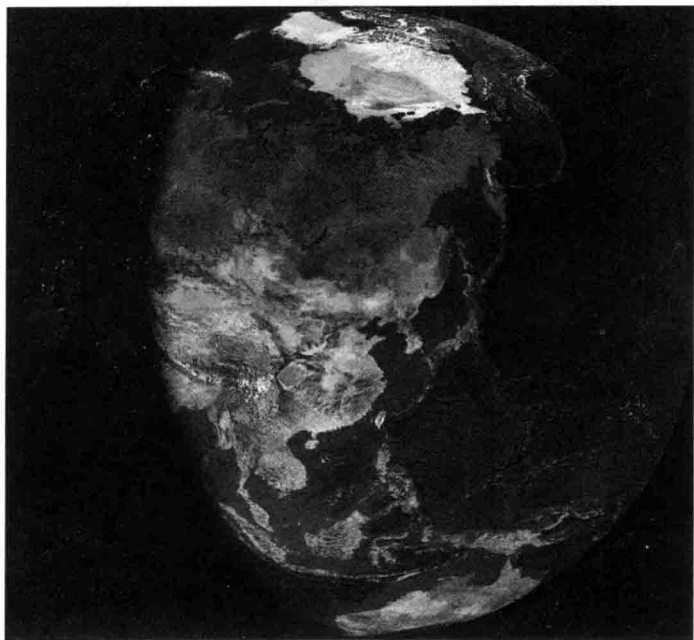


图 0-1 我国地表

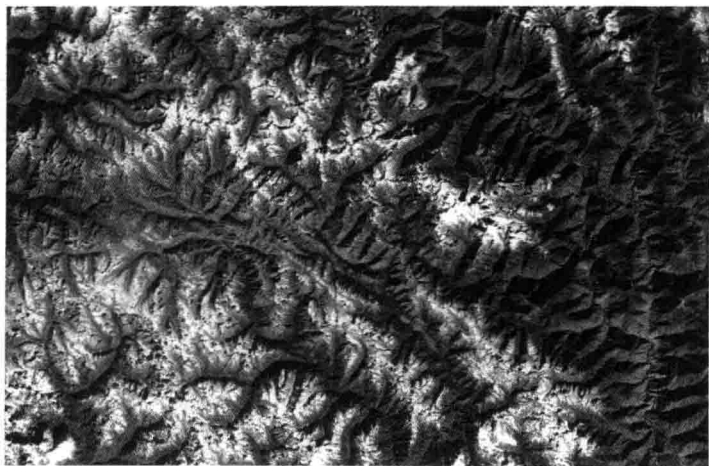


图 0-2 梅里雪山

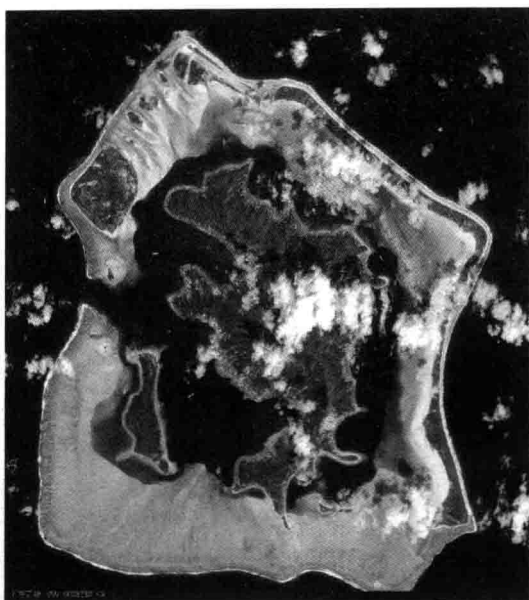


图 0-3 波拉波拉岛

卫星遥感与摄影测量获得地表信息的过程如图 0-4 所示，在距离地表几百公里甚至上千公里的卫星平台上，使用光学或电子光学仪器传感器接受地表目标反射或发射的电磁辐射信息，再传送到地面接收系统，从辐射和几何等信息的预处理，到地球空间信息和地表定量制图，最终成为国家决策者、资源和环境管理者等所需要的巨大信息源泉。

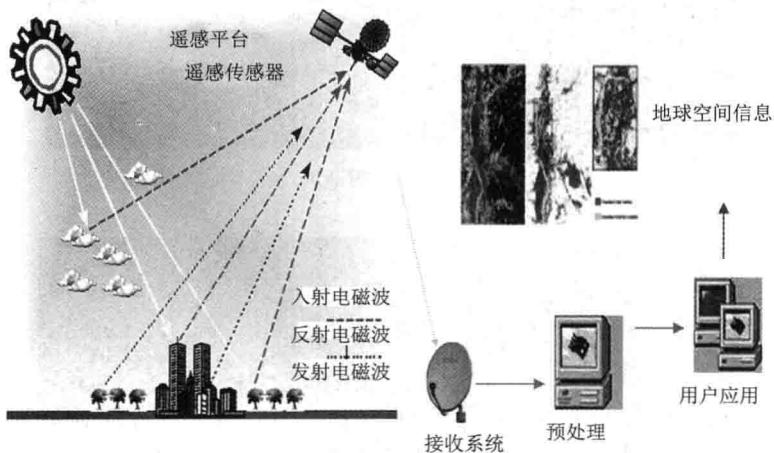


图 0-4 卫星遥感与摄影测量系统

本教材的各章节通过对卫星遥感与摄影测量的关键科学问题的介绍进行关联，如图 0-5 所示。介绍卫星遥感对地观测数据获取系统，包括卫星遥感平台和卫星遥感传感器；论述卫星遥感对地观测数据预处理系统，重点研究利用摄影测量理论的遥感成像几何模型建立方法；通过研究地表目标的电磁辐射特性，进行遥感信息解译和目标识别，最终提取出地球空间信息。

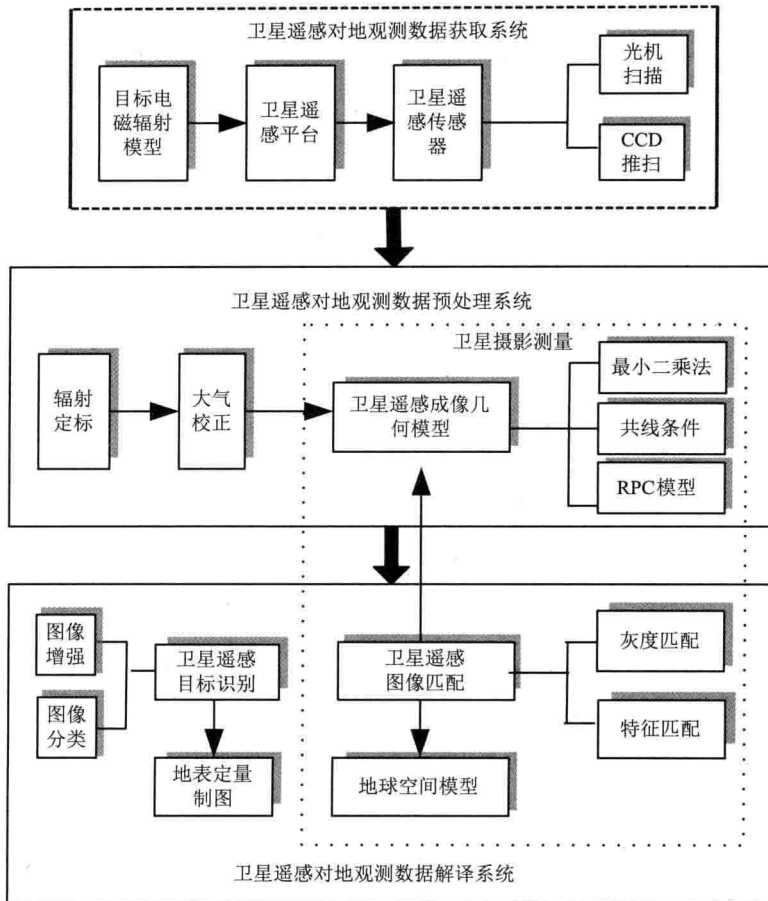


图 0-5 本书的结构

目 录

前言
引言

第一篇 卫星遥感基础

第 1 章 卫星遥感辐射传输原理	1
1.1 电磁辐射	1
1.2 太阳辐射	3
1.3 大气校正	10
1.4 地球辐射	18
1.5 地物的反射辐射	22
1.6 辐射定标和辐射校正	35
思考题	36
第 2 章 卫星遥感平台	38
2.1 卫星遥感平台特点	38
2.2 卫星遥感图像分辨率	42
2.3 Landsat 系列卫星	47
2.4 SPOT 系列卫星	52
2.5 资源三号测绘卫星	56
2.6 GeoEye 系列卫星	58
2.7 高光谱类卫星	61
思考题	64
第 3 章 卫星遥感传感器	66
3.1 光机扫描	66
3.2 CCD 推扫	71
思考题	74
参考文献	75

第二篇 摄影测量基础

第 4 章 最小二乘平差	77
4.1 平差函数模型	77
4.2 函数模型的线性化	79

4.3	最小二乘参数估计	80
4.4	间接平差的最小二乘估计	82
4.5	间接平差精度评定	84
	思考题	86
第5章	经典摄影测量	88
5.1	遥感图像几何特征	88
5.2	坐标系统	90
5.3	内外方位元素	93
5.4	坐标变换	94
5.5	共线条件方程	98
5.6	空间后方交会	103
5.7	Plücker 共线条件方程	116
	思考题	123
第6章	图像匹配	124
6.1	立体视觉	124
6.2	图像匹配约束条件	128
6.3	基于相关的匹配	132
6.4	基于特征的匹配	152
	思考题	165
第7章	立体摄影测量基础	166
7.1	空间前方交会	166
7.2	相对定向	170
7.3	绝对定向	181
7.4	光束法区域网平差	194
	思考题	206
	参考文献	208

第三篇 卫星摄影测量

第8章	卫星遥感严格成像几何模型	211
8.1	空间坐标系统	211
8.2	基于共线条件方程的严格成像几何模型	214
8.3	基于仿射变换的严格成像几何模型	219
	思考题	225
第9章	卫星遥感通用成像几何模型	226
9.1	基于一般多项式的通用传感器模型	226
9.2	基于直接线性变换的通用成像几何模型	227
9.3	基于有理函数的通用成像几何模型	228
9.4	严格与通用成像几何模型比较	236

思考题·····	238
第 10 章 卫星遥感图像几何校正·····	239
10.1 几何校正过程·····	239
10.2 重采样·····	240
10.3 几何校正实验·····	245
思考题·····	250
参考文献·····	251

第四篇 卫星遥感图像目标识别

第 11 章 卫星遥感图像增强·····	253
11.1 对比度增强·····	253
11.2 IHS 融合增强·····	263
思考题·····	273
第 12 章 卫星遥感图像分类·····	274
12.1 分类标志·····	274
12.2 分类原理·····	284
12.3 非监督分类·····	289
12.4 监督分类·····	294
12.5 基于 LIDAR 点云和图像融合的分类·····	299
12.6 基于纹理的变化监测·····	305
思考题·····	315
参考文献·····	316

第一篇 卫星遥感基础

本篇以卫星遥感科学与技术的基础知识和相关最新研究进展关联各章节的内容，主要介绍卫星遥感辐射传输原理、卫星遥感平台和卫星遥感传感器。

第1章 卫星遥感辐射传输原理

卫星遥感是利用电磁波获取物体信息的技术，电磁波的存在是获取卫星遥感图像的物理前提，电磁辐射是卫星传感器与远距离地球目标联系的纽带。本章主要介绍卫星遥感的电磁辐射原理、太阳辐射、地球辐射和地物的反射辐射。

1.1 电磁辐射

根据麦克斯韦电磁场理论，变化的电场能够在它周围引起变化的磁场，这一变化的磁场又在较远的区域内引起新的变化电场，并在更远的区域内引起新的变化磁场(王蕾等, 2001)。这种变化的电场和磁场交替产生，以有限的速度由近及远在空间内传播的过程称为电磁波。简单地说，在空间传播着的交变电磁场，即电磁波(杨显清等, 2003)。它在真空中的传播速度约为 $30 \times 10^4 \text{ km/s}$ 。按照波长或频率的大小，依次排列制成的图表称为电磁波谱，如表 1-1 所示。

表 1-1 电磁波谱

波段		波长	遥感传感器
无线电波	长波	大于 3000m	—
	中波和短波	10~3000m	
	超短波	1~10m	
	微波	1mm~1m	
红外波段	超远红外	15~1000 μm	—
	远红外	6~15 μm	TM6
	中红外	3~6 μm	NOAA 的 AVHRR
	近红外	0.76~3 μm	SPOT 的 HRV; TM5; TM7
可见光	红	0.62~0.76 μm	TM1-4; SPOT 的 HRV
	橙	0.59~0.62 μm	
	黄	0.56~0.59 μm	
	绿	0.50~0.56 μm	
	青	0.47~0.50 μm	
	蓝	0.43~0.47 μm	
紫	0.38~0.43 μm		

波段	波长	遥感传感器
紫外线	$10^{-3} \sim 3.8 \times 10^{-1} \mu\text{m}$	
X 射线	$10^{-6} \sim 10^{-3} \mu\text{m}$	—
γ 射线	小于 $10^{-6} \mu\text{m}$	—

由电磁波谱表可见,电磁波的波长范围非常宽,无线电波波长是 γ 射线波长的 10^{22} 倍以上。卫星遥感采用的电磁波波段一般从紫外到微波波段。卫星遥感传感器可以通过探测或感测不同波段电磁波谱的发射、反射辐射能量信息而成像,如图 1-1 所示。



(a) Radarsat



(b) TM



(c) SPOT

图 1-1 卫星遥感传感器获取的图像

1.2 太阳辐射

1.2.1 黑体辐射定律

如果一个物体对于任何波长的电磁辐射都全部吸收, 则这个物体是绝对黑体(孔祥生等, 2012)。当电磁波入射到一个不透明的物体上时, 在物体上只出现对电磁波的吸收现象和反射现象, 根据能量守恒定律, 这一物体的光谱吸收系数 $\alpha(\lambda, T)$ 与光谱反射系数 $\rho(\lambda, T)$ 之和恒等于 1。实际上, 一般物体的温度不同或入射电磁波的波长不同, 都会导致不同的吸收和反射, 而绝对黑体则是吸收率 $\alpha(\lambda, T) \equiv 1$, 反射率 $\rho(\lambda, T) \equiv 0$, 与物体的温度和电磁波波长无关。与之相反的绝对白体则能反射所有的入射光, 即反射率 $\rho(\lambda, T) \equiv 1$, 吸收率 $\alpha(\lambda, T) \equiv 0$, 同样与温度和波长无关。恒星、太阳辐射和黑色烟煤是最接近黑体辐射的辐射源。

1900 年 12 月 14 日, 普朗克在德国物理学会上用量子论的概念推导出了黑体辐射定律, 该定律表明了黑体辐射通量密度与其温度和辐射波长的关系, 并在论证过程中提出能量子概念和常数 h , 成为此后微观物理学中最基本的概念和极为重要的普适量。

普朗克黑体辐射定律如下

$$W_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} \quad (1-1)$$

式中, W_{λ} 为分谱辐射通量密度, 单位是 $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$; λ 为波长, 单位是 μm ; h 为普朗克常数 ($6.6256 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$); c 为光速 ($3 \times 10^{10} \text{cm/s}$); k 为玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$); T 为热力学温度, 单位是 K。

通过普朗克黑体辐射定律可以得到不同温度和波长下的黑体辐射波谱曲线,如图 1-2 所示。

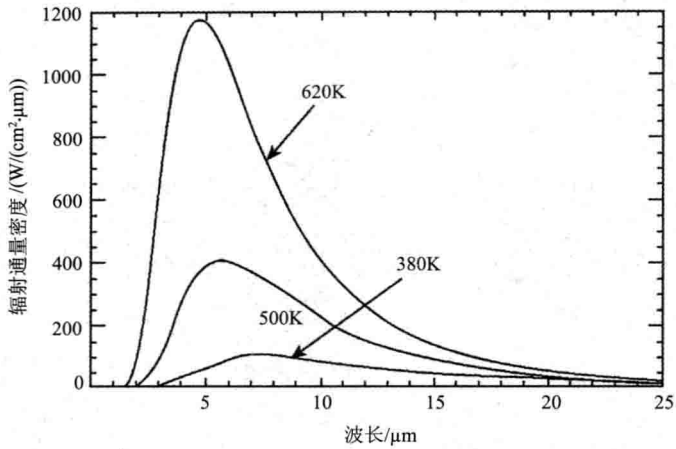


图 1-2 黑体辐射波谱曲线

从图中可以看出,温度越高,辐射能量越大,且总辐射能量随温度增加迅速增加(温度四次方成正比)。温度微小的变化,引起辐射能量很大的变化,这是热红外卫星遥感传感器测定温度和探测目标理论基础,典型的热红外遥感传感器如表 1-2 所示。辐射能量随波长连续变化,每条曲线只有一个最大值,且随着温度的升高,最大值所对应的波长向短波方向移动,这是选择热红外卫星遥感传感器最佳波段的依据,如图 1-3 所示是 2011 年 12 月 16 日中国辽宁省辽东湾 MODIS 卫星遥感图像(曾辰等, 2013)。

表 1-2 典型的热红外遥感传感器

传感器	波段	光谱范围/ μm	主要算法
AVHRR/NOAA	3,4,5	3.55~3.93	分裂窗算法 TISI 算法
		10.30~11.30	
		11.50~12.50	
ETM+/Landsat 7	6	10.4~12.5	单波段算法
MODIS/EOS	20,22,23,29,31,32,33	3.66~3.84	分裂窗算法 昼/夜算法
		3.929~3.989	
		4.02~4.08	
		8.4~8.7	
		10.78~11.28	
		11.77~12.77	
ASTER/EOS	10,11,12,13,14	13.185~13.485	TES 算法
		8.125~8.475	
		8.475~8.825	
		8.925~9.275	
		10.25~10.95	
		10.95~11.65	

续表

传感器	波段	光谱范围/ μm	主要算法
AATSR/ENVISAT	6,7	中心波长: 10.85&12.0 波段宽度: 0.9&1.0	分裂窗算法
ABI/GOES-R	14,15	中心波长: 11.2&12.3	分裂窗算法
SEVIRI/MSG	9,10	中心波长: 10.8,12.0	分裂窗算法
IRMSS/CBRES	9	10.4~12.5	单波段算法
IRS/HJ-1	4	10.5~12.5	单波段算法
S-VISSR/FY-2	IR1,IR2	10.3~11.3 11.5~12.5	分裂窗算法
VIRR/FY-3	3,4,5	3.55~3.93 10.3~11.3 11.5~12.5	分裂窗算法 TISI 算法
MERSI/FY-3	5	中心波长: 11.25	单波段算法

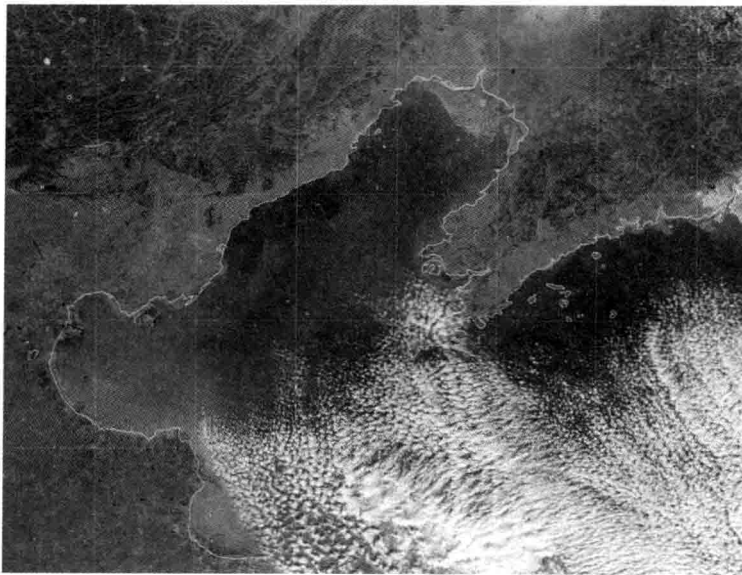


图 1-3 2011 年 12 月 16 日中国辽宁省辽东湾 MODIS 卫星遥感图像

1.2.2 太阳辐射光谱

能量通过三种方式进行传播: 传导、对流和辐射。传导和对流都需要一定的分子作为媒介, 在真空中不能进行传播。太阳距离地球十分遥远, 两者之间除了地球的大气层和太阳的蒙气圈外, 其余大都是真空。因此太阳热能不可能靠传导和对流的形式传递到地球, 唯一的方式只有辐射。通过辐射, 太阳不断地给地球输送能量, 是地球上生物活动能量的主要源泉(李申生, 2003)。太阳辐射还有其他重要作用, 如伴随纬度高低地面接收辐射能的差异造成冷暖气团的南北交流, 形成大气环流(查良松, 1996); 地面随着接收太阳辐射的能量的增多而升温, 促进了大气的垂直运动, 形成对流天气(廖玉芳等, 2006); 此外云雾雨雪的形成, 同样

需要大气环流，因此对太阳辐射的研究非常重要。

太阳辐射能量随着波长的分布称为太阳辐射光谱，如图 1-4 所示。太阳辐射的波长范围虽然很广，但是在波长极长和极短的部分，能量很小，绝大部分能量集中在波长为 250~2500nm 的范围，大约占太阳总辐射量的 99%。其中可见光波长区占 50%；红外波长区占 44%左右；紫外波长区占 6%，其中辐射峰值的波长在 480nm 左右，在可见光区域。

对卫星遥感而言，主要利用紫外、可见光和红外等稳定辐射，因而太阳的活动对卫星遥感的影响可以忽略。

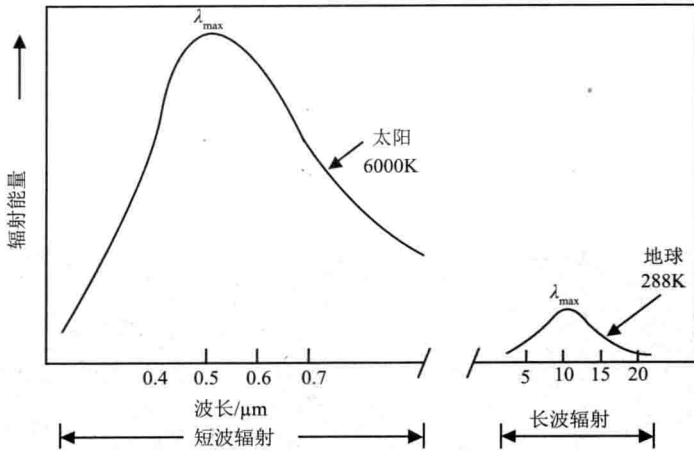


图 1-4 太阳和地球辐射光谱曲线

1.2.3 太阳辐射的削弱

由于地球外大气圈的存在，太阳辐射在通过大气层到达地面的过程中总会受到一定程度的削弱。在卫星遥感系统中，大气对太阳辐射的削弱作用，是连接地表信息与卫星遥感传感器接收信号的纽带，是影响利用卫星遥感图像获取地表信息的重要因素。

1. 大气的组成

大气是由多种混合组成的气体及悬浮其中的液态和固态杂质所组成，大气中除去水汽和杂质的空气称为干洁空气(王明星, 1999)。地球表面大气主要由氧、氮和几种惰性气体组成，约占空气总量的 99.9%。除二氧化碳和臭氧外，其他组成在对流层是稳定的。水蒸气和二氧化碳受地区、季节和气象条件的影响而有所变化，在通常情况下，大气中水蒸气的含量为 0~4%，二氧化碳的含量为 0.033%，如表 1-3 所示。

表 1-3 大气的主要组成成分

稳定成分		变化成分	
成分	体积分数/%	成分	体积分数/%
N ₂	78.084	H ₂ O	0.04
O ₂	20.948	O ₃	12×10 ⁻⁴
Ar	0.934	SO ₂	0.001×10 ⁻⁴
CO ₂	0.033	NO ₂	0.001×10 ⁻⁴

续表

稳定成分		变化成分	
成分	体积分数/%	成分	体积分数/%
Ne	18.18×10^{-4}	NH ₃	0.001×10^{-4}
He	5.24×10^{-4}	NO	0.0005×10^{-4}
Kr	1.14×10^{-4}	H ₂ S	0.00005×10^{-4}
Xe	0.089×10^{-4}	硝酸蒸气	痕量
H ₂	0.5×10^{-4}		
CH ₄	1.5×10^{-4}		
N ₂ O	0.27×10^{-4}		
CO	0.19×10^{-4}		

2. 大气对太阳辐射的吸收作用

在紫外、红外与微波区，太阳辐射穿过大气层时，大气分子对电磁波的某些波段有吸收作用。吸收作用使辐射能量转变为分子的内能，从而引起这些波段太阳辐射强度的衰减，甚至某些波段的电磁波完全不能通过大气。因此在太阳辐射到达地面时，形成了电磁波的某些缺失带。引起大气吸收的主要成分是氧气、臭氧、水、二氧化碳等，它们吸收电磁辐射的主要波段有以下几种。

氧气对微波中 0.253cm 和 0.5cm 处有吸收现象。

臭氧主要吸收 0.3 μ m 以下的紫外区的电磁波，另外 9.6 μ m 处有弱吸收；4.75 μ m 和 14 μ m 处的吸收更弱，已不明显。

水蒸气主要吸收带在 0.70~1.95 μ m，最强处为 1.38 μ m 和 1.87 μ m；在 2.5~3.0 μ m，2.7 μ m 处最强；在 4.9~8.7 μ m，6.3 μ m 处吸收最强；15 μ m~1mm 的超远红外区，以及微波中 0.164cm 和 1.348cm 处。

二氧化碳主要吸收带为 2.60~2.80 μ m，其中吸收峰为 2.70 μ m；4.10~4.45 μ m 吸收峰在 4.3 μ m 处；9.10~10.9 μ m 吸收峰为 10.0 μ m；12.9~17.1 μ m 吸收峰为 14.4 μ m，全在红外区。

在 15 μ m 以下的红外、可见光和紫外区，臭氧、水、二氧化碳对太阳辐射的吸收程度可见图 1-5。另外，像甲烷、氧化氮，工业集中区附近的高浓度一氧化碳、氨气、硫化氢、氧化硫等都具有吸收电磁波的作用，但吸收率很低，可略而不计。至于大气中其他成分的气体，由于都是对称分子，无极性，所以对电磁波不存在吸收。

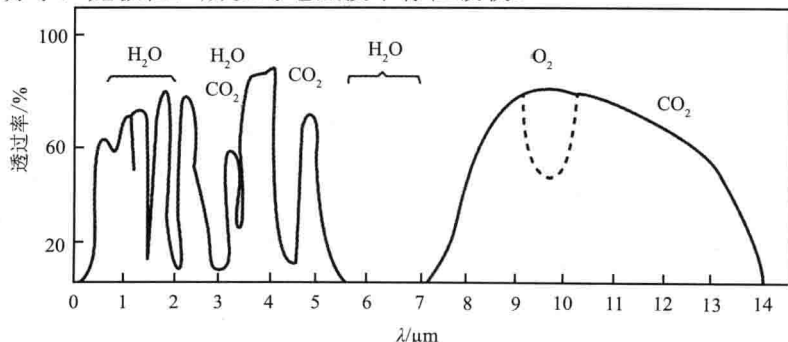


图 1-5 波长小于 15 μ m 的大气透视率图

3. 大气对太阳辐射的散射作用

在可见光波段范围内，大气分子吸收的影响很小，主要是散射引起衰减。电磁波在传播