



大气环境卫星 遥感技术及其应用

王 桥 厉 青 等 著
陈良富 张美根 张兴赢



科学出版社

大气环境卫星遥感技术及其应用

王 桥 厉 青 陈良富 张美根 张兴赢 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了大气环境卫星遥感技术及其应用进展,对国内外大气环境遥感卫星的发展现状、气溶胶遥感技术和痕量气体遥感技术的发展现状及发展趋势进行了研究总结。主要讲述了大气环境卫星遥感基础、气溶胶及其颗粒污染物卫星遥感反演技术、污染气体/温室气体卫星遥感反演技术、生物质燃烧火点卫星遥感监测技术、基于空气质量模式的区域环境空气质量评价技术,并结合实际研究工作给出了区域大气环境卫星遥感软件系统及其应用案例。

本书可供环境遥感监测与管理专业人员参考,也可作为高等院校、科研院所的教学、科研参考用书及相关专业科技工作者的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

大气环境卫星遥感技术及其应用 / 王桥等著. —北京: 科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-030384-4

I. ①大… II. ①王… III. ①卫星遥感—应用—大气环境—研究
IV. ①X16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 029527 号

责任编辑: 周 炜 赵 冰 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 鑫联必升

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>

北京天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2011 年 6 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2011 年 6 月第一次印刷 印张: 19

印数: 1—1 500 字数: 431 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

目前我国在环境问题上面临着前所未有的挑战,其中大气污染问题已成为影响我国城市和区域可持续发展及环境外交的重要因素,全面掌握大气污染的区域分布情况及其变化规律对环境治理和规划尤为重要。我国面积辽阔,可是大气环境监测的常规业务基本还是依靠常规的地面监测,尚未形成天地一体化的监测体系,对区域、全球的大气环境质量的掌握程度仍处于较低水平。卫星遥感监测与基于地面设点的物理或化学分析测量的传统方法相比,具有宽覆盖、连续、动态等特点,在大气环境质量变化的连续性、空间性和趋势性监测方面具有明显优点。但是国内由于受遥感数据源和技术支撑条件的限制,大气环境遥感应用水平较低,特别是结合环境保护的大气环境卫星遥感监测工作还处于起步阶段。本书通过总结科技部“十一五”国家科技支撑计划项目“基于环境一号等国产卫星的环境遥感监测关键技术与软件研究”(国科发计[2009]87号)课题四“基于环境一号等国产卫星的区域环境空气遥感监测应用技术与软件研发”成果,旨在为环保系统及相关行业开展大气环境卫星遥感监测提供实用工具,以提升课题的应用价值,填补我国在大气环境卫星遥感专著方面的空白。

全书共分8章,第1章介绍大气环境卫星遥感技术及其应用进展,主要包括国内外大气环境遥感卫星及技术发展现状与趋势、大气环境卫星遥感应用现状及趋势;第2章介绍大气环境卫星遥感基础技术,主要包括电磁波与电磁波谱、太阳辐射与大气辐射、大气气溶胶和痕量气体的光学特性及野外典型地表反射光谱观测的原理与结果;第3章介绍大气环境卫星遥感监测应用,主要包括大气环境卫星遥感需求分析,大气环境卫星遥感监测应用目标与任务、应用产品方案及应用实施方案;第4章介绍气溶胶及其颗粒污染物卫星遥感反演技术,主要包括气溶胶及其颗粒污染物卫星遥感反演的基本原理,基于多源卫星数据的气溶胶光学厚度卫星遥感反演的算法原理、处理流程及算法验证,霾、颗粒物浓度的卫星遥感反演原理、处理流程及算法验证;第5章介绍污染气体/温室气体卫星遥感反演技术,主要包括基于FY-3A的臭氧总量及廓线卫星遥感反演、基于ENVISAT的二氧化氮卫星遥感反演、基于OMI的二氧化硫反演、基于ENVISAT的二氧化碳反演及基于SCIAM-ACHY的甲烷卫星遥感反演;第6章介绍生物质燃烧火点卫星遥感监测技术,主要包括生物质燃烧概述,火点遥感监测原理,基于MODIS、AVHRR、环境卫星红外相机的火点监测,秸秆焚烧监测方法及应用举例;第7章介绍基于空气质量模式的区域环境空气质量评价技术,主要包括环境空气质量模式发展概况,多尺度空气质量模式系统RAMS-CMAQ、模拟区域与模拟参数及模拟结果评估与分析;第8章介绍区域大气环境卫星遥感软件系统及其应用,主要包括区域环境空气质量遥感监测系统的构建、区域大气环境卫星遥感软件系统的应用示范。

全书由王桥担任主编。其中第1章由王桥、厉青、王中挺、周春艳、张丽娟、杨一鹏、魏斌等撰写;第2章由苏林、陶金花、李莘莘等撰写;第3章由王中挺、周春艳、张



丽娟、王子峰、毛慧琴等撰写；第4章由陈良富、贺宝华、王子峰、余超、李晓静、陈辉等撰写；第5章由张兴赢、王维和、黄富祥、李晓静、齐瑾、白文广、王刚等撰写；第6章由厉青、贺宝华、王子峰、段文举、黄陆雄等撰写；第7章由张美根、葛萃、韩霄、陶金花、毛慧琴等撰写；第8章由王中挺、周春艳、张丽娟、杨幸、万华伟、张峰等撰写。全书最后由厉青、王中挺、毛慧琴等统稿，王桥定稿。

本书所介绍的成果首先是在环境保护部领导的高度重视和各相关部门的指导帮助下取得的，也是在国家有关科研项目的有力支撑下取得的，在此对环境保护部及各有关部门领导、国家相关部门对此项工作的大力支持表示衷心的感谢！同时对参加科技部“十一五”国家科技支撑计划项目“基于环境一号等国产卫星的环境遥感监测关键技术与软件研究”（国科发计〔2009〕87号）课题四“基于环境一号等国产卫星的区域环境空气遥感监测应用技术与软件研发”项目的合作单位，包括中国科学院遥感应用研究所、中国科学院大气物理研究所、国家卫星气象中心的技术人员表示衷心的感谢！此外，本书的编写还参考了大量国内外专家学者的研究成果，这里一并表示衷心的感谢！

由于大气环境卫星遥感在我国尚处于起步阶段，本书所涉及的很多内容都属于初次探索，不足之处恳请专家学者和读者批评指正。

作 者

2010年12月

目 录

前言

第 1 章 大气环境卫星遥感技术及其应用进展	1
1.1 大气环境卫星及传感器发展现状	1
1.1.1 国外大气环境卫星及传感器发展现状	1
1.1.2 国内大气环境卫星及传感器发展现状	7
1.2 大气环境卫星遥感技术发展现状	17
1.2.1 国外大气环境卫星遥感技术发展现状	17
1.2.2 国内大气环境卫星遥感技术发展现状	24
1.3 大气环境遥感的应用现状及趋势分析	25
1.3.1 大气环境遥感应用现状	25
1.3.2 大气环境遥感发展趋势分析	29
参考文献	31
第 2 章 大气环境卫星遥感基础	44
2.1 电磁波与电磁波谱	44
2.1.1 电磁波	44
2.1.2 电磁辐射	45
2.1.3 电磁波谱	45
2.1.4 电磁辐射的传播	47
2.1.5 电磁辐射的测量与度量单位	47
2.1.6 辐射的基本定律	48
2.2 太阳辐射及大气辐射	50
2.2.1 太阳常数	50
2.2.2 天文辐射	51
2.2.3 天文辐射的时空变化特点	51
2.2.4 地面辐射	52
2.2.5 太阳照射	52
2.2.6 太阳辐射光谱	53
2.2.7 辐射强度	54
2.2.8 大气逆辐射	54
2.2.9 有效辐射	54



2.2.10	地面温度与地面辐射	54
2.2.11	太阳辐射能量作用	55
2.2.12	大气的吸收与散射	55
2.2.13	大气折射和透射	57
2.3	大气气溶胶的光学特性	58
2.3.1	大气气溶胶	58
2.3.2	气溶胶的特性	58
2.4	大气痕量气体的光学特性	59
2.4.1	大气痕量气体	59
2.4.2	痕量气体的光学特性	60
2.5	大气辐射传输及模型	61
2.5.1	大气辐射传输	61
2.5.2	大气辐射传输模型	61
2.6	大气观测实验	64
2.6.1	太阳分光光度计观测原理与野外实验	64
2.6.2	多轴 DOAS 测量系统及野外实验	65
2.6.3	北京地区大气观测超级站	69
2.6.4	野外光谱测量实验	71
	参考文献	75
第3章	大气环境卫星遥感监测应用	76
3.1	大气环境卫星遥感需求分析	76
3.2	大气环境卫星遥感监测应用目标与任务	79
3.2.1	大气环境卫星遥感监测应用目标	79
3.2.2	大气环境卫星遥感监测应用任务	79
3.2.3	主要技术难点和问题	82
3.3	大气环境卫星遥感监测应用产品方案	83
3.3.1	专题产品	83
3.3.2	应用产品	89
3.4	大气环境卫星遥感监测应用实施方案	90
3.4.1	系统业务流	90
3.4.2	系统数据流	91
3.4.3	大气环境卫星遥感监测应用实施技术路线	92
	参考文献	105
第4章	气溶胶及其颗粒污染物卫星遥感反演技术	106
4.1	气溶胶及其颗粒污染物卫星遥感基本原理	106
4.1.1	陆地气溶胶光学遥感原理	106
4.1.2	大气颗粒污染物遥感基本原理	108



4.2 基于 MODIS 数据气溶胶光学厚度卫星遥感反演	108
4.2.1 原理与处理流程	108
4.2.2 算法验证	110
4.3 基于 CBERS-02B 数据气溶胶光学厚度卫星遥感反演	111
4.3.1 原理	111
4.3.2 处理流程	112
4.3.3 算法验证	114
4.4 基于 HJ-CCD 数据气溶胶光学厚度卫星遥感反演	115
4.4.1 原理	115
4.4.2 处理流程	115
4.4.3 算法验证	116
4.5 基于 FY-3A 的陆上气溶胶光学厚度卫星遥感反演	118
4.5.1 原理	118
4.5.2 处理流程	119
4.5.3 算法验证	123
4.6 基于 MODIS 及 HJ-1 的亮目标气溶胶光学厚度卫星遥感反演	124
4.6.1 原理	124
4.6.2 反演流程	126
4.6.3 算法验证	126
4.7 霾光学厚度卫星遥感反演	129
4.7.1 原理	129
4.7.2 处理流程	129
4.7.3 算法验证	130
4.8 颗粒物浓度卫星遥感反演	131
4.8.1 原理	131
4.8.2 处理流程	133
4.8.3 算法验证	133
参考文献	136
第 5 章 污染气体/温室气体卫星遥感反演技术	139
5.1 基于 FY-3A 的臭氧总量卫星遥感反演	139
5.1.1 FY-3/TOU 臭氧总量反演计算方法	139
5.1.2 误差分析	142
5.2 基于 FY-3A 的臭氧廓线卫星遥感反演	143
5.2.1 基本原理	143
5.2.2 正演计算模型和方法	144
5.2.3 反演计算的模型算法与步骤	146
5.2.4 误差分析	153
5.3 基于 ENVISAT 的二氧化氮卫星遥感反演	154



5.3.1	基本原理	155
5.3.2	计算方法	156
5.3.3	误差分析	161
5.4	基于 AURA 的 SO_2 卫星遥感反演	162
5.4.1	基本原理	162
5.4.2	计算方法	163
5.4.3	误差分析	165
5.5	基于 ENVISAT 的 CO_2 卫星遥感反演	166
5.5.1	基本原理	166
5.5.2	资料处理方法	167
5.5.3	误差分析	169
5.6	甲烷卫星遥感反演	169
5.6.1	基于最大似然法的甲烷反演方法及其误差分析	169
5.6.2	WFM-DOAS 法及其误差分析	170
	参考文献	171
第 6 章	生物质燃烧火点卫星遥感监测技术	174
6.1	生物质燃烧概述	174
6.2	火点遥感监测原理	174
6.3	基于 MODIS 数据的火点监测	175
6.3.1	云检测及水体像元识别	176
6.3.2	潜在火点提取	176
6.3.3	基于背景辐射信息火点的提取	177
6.4	基于 AVHRR 数据的火点监测	177
6.4.1	卫星数据预处理	178
6.4.2	潜在火点提取	178
6.4.3	真实火点提取	178
6.5	基于环境一号卫星红外相机的火点监测	179
6.5.1	云检测及卫星扫描角订正	179
6.5.2	火点识别阈值确定	179
6.5.3	耀斑点干扰的去除	180
6.6	秸秆焚烧监测方法	180
6.6.1	数据提取	180
6.6.2	固定火点去除	180
6.6.3	重复点剔除	180
6.6.4	其他固定火源的去除	181
6.7	应用举例	181
	参考文献	186



第7章 基于空气质量模式的区域环境空气质量评价技术	187
7.1 环境空气质量模式发展概况	187
7.2 多尺度空气质量模式系统 RAMS-CMAQ	189
7.3 模拟区域与模式参数	195
7.4 RAMS-CMAQ 模拟结果评估与分析	198
7.4.1 NO ₂ 浓度时空分布与季节变化特征	198
7.4.2 沙尘暴天气过程个例模拟分析	204
7.4.3 气溶胶浓度空间分布与季节变化特征分析	210
7.5 空气质量预报	230
参考文献	234
第8章 区域大气环境卫星遥感软件系统及其应用	238
8.1 区域环境空气质量遥感监测系统构建	238
8.1.1 系统体系结构	238
8.1.2 功能模块设计	239
8.1.3 技术路线	241
8.1.4 系统界面举例	245
8.2 区域大气环境卫星遥感软件系统应用示范	254
8.2.1 2009 年夏季秸秆焚烧监测应用示范结果	254
8.2.2 2010 年春季沙尘监测应用示范结果	261
8.2.3 2008 ~ 2009 年气溶胶监测应用示范	265
8.2.4 2010 年 7 ~ 9 月珠江三角洲霾综合监测应用示范	272
8.2.5 2008 ~ 2009 年 NO ₂ 应用示范	274
8.2.6 空气质量评价应用示范	281

第1章 大气环境卫星遥感技术 及其应用进展

1.1 大气环境卫星及传感器发展现状

1.1.1 国外大气环境卫星及传感器发展现状

1. 早期大气环境卫星及传感器发展情况

最早用于气溶胶光学厚度反演的卫星传感器是 AVHRR (advanced very high resolution radiometer), 它是一个 5 通道的交叉轨道扫描辐射计, 1978 年开始搭载于美国国家海洋大气局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的极轨卫星上飞行; 自 1981 年以来, NOAA 下午星上的 AVHRR 被用于海洋上空气溶胶光学厚度业务反演。另一个长期用于探测气溶胶特性的传感器是 TOMS (total ozone mapping spectrometer), 最初搭载在 1978 年发射的 Nimbus-7 卫星上, 并被广泛用于臭氧总量的遥感。1979 年 NOAA 系列卫星开始搭载 SBUV (solar backscatter ultraviolet instrument) 传感器, 可连续监测臭氧廓线。

2. 近期大气环境卫星及传感器发展情况

20 世纪 90 年代以来, 越来越多搭载于不同卫星上的大气探测传感器相继升空, 为气溶胶和痕量气体等环境空气监测提供了丰富数据源。

1995 年欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 发射的 ERS-2 卫星上搭载了一种新型多角度传感器 ATSR-2 (along track scanning radiometer-2), 其主要目的是准确测定海面温度。由于具有与 AVHRR 相似的通道, 并可以从两个不同角度进行观测, ATSR-2 也可用于气溶胶反演。1996 年日本发射了第一颗 ADEOS 卫星, 星上搭载的法国的 POLDER (polarization and directionality of the earth's reflectances) 和由美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 提供的 OCTS (ocean color and temperature scanner), 可用于气溶胶反演; 另外, ADEOS 卫星搭载的 IMG (interferometric monitor for greenhouse gases) 传感器, 是第一个高分辨率近红外对流层探测仪, 能够同时反演多种痕量气体含量, CO 和 HNO_3 是其中较受关注的反演指标。但 ADEOS 卫星运行不到 1 年, 于 1997 年 6 月由于卫星太阳能电池板的电力供应中断, 停止了收集和传输数据。1997 年, 由 NASA 和 ORBIMAGE 公司共同研制的 SeaWiFS (sea-viewing wide field-of-view sensor) 传感器发射升空, 其目的是获得全球海洋水色数据供全世界渔民使用, 可基于地物表面反射



的蓝波段弱信号反演气溶胶。还有一些其他的传感器被用来反演气溶胶。ICESat (ice, cloud, and land elevation satellite) 上的 GLAS (geoscience laser altimeter system) 雷达被设计用来测量冰面海拔, 但是现在也被用来反演气溶胶垂直廓线 (Spinhirne et al., 2005)。最新一代地球静止卫星 GOES 上搭载的 Imager 传感器, 也被用于反演气溶胶, 其空间分辨率为 $4\text{km} \times 4\text{km}$, 时间频率是 30min (Knapp et al., 2002, 2005)。2009 年 1 月, 日本成功地发射卫星 GOSAT (global greenhouse gas observation satellite), 用于探测 CO_2 、 CH_4 的全球分布。NASA 研制的 OCO (orbiting carbon observatory) 是第一颗专门用来探测大气 CO_2 浓度的卫星 (Crisp et al., 2004), 但其在 2009 年 2 月发射失败。

大气环境卫星提供的丰富数据源使得卫星环境遥感的应用领域越来越广, 覆盖了环境保护的诸多方面。卫星观测的独特优势包括: 覆盖范围广、实时、连续、分辨率高; 可以采集到常规观测手段无法获得的重要参数; 可以用来观测大气中气溶胶和微量气体的长期变化趋势及其源和汇; 观测云和其他要素的分布; 观测大气中的动力和热力过程信息。目前, 国外可用于大气环境遥感的卫星及传感器见表 1.1.1。

表 1.1.1 国外用于大气环境观测的主要卫星及传感器

传感器	卫星平台	观测日期 (年)	星下点分辨率/ ($\text{km} \times \text{km}$)	穿轨时间 ^b	全球覆盖 /d ^c	光谱范围 / μm	独立自由度 ^a					气溶胶 光学 厚度
							NO_2	HCHO	SO_2	CO	O_3	
GOME-1	ERS-2	1995 ~ 2003	320×40	10:30D	3	0.23 ~ 0.79	1	1	1		0.5 ~ 1.5	
MOPITT	TERRA	1999 ~	22×22	10:30D	3.5	$3^d \lambda$ 2.3 ~ 4.7				0.5 ~ 2		
MISR	TERRA	1999 ~	18×18^e	10:30D	7	$4^d \lambda$ 0.45 ~ 0.87						1
MODIS	TERRA	1999 ~	10×10^e	10:30D	2	$36^d \lambda$						1
	AQUA	2002 ~		1:30A		0.41 ~ 14.2						
AIRS	AQUA	2002 ~	14×14	1:30A	1	3.7 ~ 16			1	0.5 ~ 1.5		
SCIAMACHY	ENVISAT	2002 ~	60×30	10:30D	6	0.23 ~ 2.3	1	1	1	1	0.5 ~ 1.5	
OMI	AURA	2004 ~	24×13	1:45A	1	0.27 ~ 0.50	1	1	1		0.5 ~ 1.5	1
TES	AURA	2004 ~	8×5	1:45A	—	3.3 ~ 15.4				0.5 ~ 1.5	1 ~ 2	
						$9^d \lambda$						
POLDER	PARASOL	2004 ~	18×16	1:30A	1	0.44 ~ 1.0						1
CALIOP	CALIPSO	2006 ~	40×40	1:30A	—	0.53, 1.06						>30
GOME-2	MetOP	2006 ~	80×40	9:30D	1	0.24 ~ 0.79	1	1	1		0.5 ~ 1.5	
IASI	MetOP	2006 ~	12×12	9:30D	0.5	3.6 ~ 15.5				0.5 ~ 1.5	1 ~ 2	

a. 每个传感器在对流层探测的独立自由度 (independence degrees of freedom) 数量, 描述了对流层垂直廓线反演可获取独立信息的程度。

b. 发生在上午和下午的过境时间, 降轨为 D, 升轨为 A。

c. 晴空条件下的值, 云会阻碍反演。

d. 离散波长的数目。

e. 在 $250\text{m} \sim 1.1\text{km}$ 分辨率下获得的 MISR 和 MODIS 辐射亮度, 依赖于通道。这里指的是标准的气溶胶业务产品。

资料来源: 根据 Martin (2008), 有修改。

下面介绍其中几种主要卫星平台及大气环境遥感传感器。



3. ERS-2/GOME-1

1995 年 4 月 21 日发射的 ERS-2 卫星搭载有 GOME-1 (global ozone monitoring experiment) 传感器 (European Space Agency, 1995), 其主要任务是对对流层和平流层内的 O_3 、 NO_2 、 SO_2 等痕量气体进行全球监测, 反演方法是基于差分光学吸收光谱 (differential optical absorption spectrum, DOAS) 技术, 同时还可获取气溶胶、云顶高度和云顶反射等信息。ERS-2 卫星的轨道高 771 ~ 797km, 倾角 98.5° , 降交点的地方太阳时间为 10:30am, 轨道周期为 100.5min。GOME-1 具有 4 个高光谱观测通道, 覆盖 240 ~ 790nm 的光谱范围, 光谱分辨率为 0.17 ~ 0.33nm; 同时为了去除观测信号中的偏振影响, GOME-1 还具有 3 个偏振测量通道 (polarization measurement devices, PMDs), 其通道设置见表 1.1.2。

表 1.1.2 GOME-1 通道设计参数

高光谱观测通道	光谱范围/nm	光谱分辨率/nm
1	237 ~ 315	0.20
2	312 ~ 405	0.17
3	397 ~ 609	0.29
4	576 ~ 793	0.33
偏振测量通道 (PMDs)	光谱范围/nm	通道类型
PMD1	295 ~ 397	宽带
PMD2	397 ~ 580	宽带
PMD3	580 ~ 745	宽带

4. ENVISAT/SCIAMACHY

SCIAMACHY (scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography) 是欧洲空间局 2002 年 3 月 1 日发射的大型环境监测卫星 ENVISAT-1 上搭载的 10 大载荷之一 (Bovensmann et al., 1999), 由德国航空航天中心 (DLR)、荷兰航空航天规划局 (NIVR) 及比利时空间物理研究所 (BIRA-IASB) 联合出资设计。SCIAMACHY 能够在较宽的光谱范围内对大气中的多种气体、云团及灰尘粒子进行监测, 采用差分吸收光谱技术, 探测出太阳光谱的紫外、可见光和近红外区域被地球多种大气成分吸收造成的“指纹”信息。SCIAMACHY 轨道扫描幅宽为 960km, 有 8 个通道, 波长覆盖范围为 240 ~ 2380nm, 光谱分辨率为 0.2 ~ 1.5nm, 其谱段设置参数见表 1.1.3。SCIAMACHY 的首要任务是对全球对流层和平流层的痕量气体进行测量, 观测所用波段包括 240 ~ 1700nm 和 2000 ~ 2400nm。

表 1.1.3 SCIAMACHY 通道参数表

通道	光谱范围/nm	光谱分辨率/nm
1	240 ~ 314	0.24
2	309 ~ 405	0.26
3	394 ~ 620	0.44
4	604 ~ 905	0.48
5	785 ~ 1050	0.54
6	1000 ~ 1750	1.48
7	1940 ~ 2040	0.22
8	2265 ~ 2380	0.26



SCIAMACHY 与 GOME 相比,主要进行了以下三个方面的改进。一是把光谱覆盖范围扩大到近红外波段,这使其可以观测 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体和 CO 。二是 SCIAMACHY 有三种观测几何模式:天底(星下)模式、临边模式和掩星模式(图 1.1.1),使其可以直接观测平流层廓线,从而实现对对流层柱总量的反演。三是 SCIAMACHY 比 GOME 空间分辨率高:GOME 标准像元模式(SSM)扫描幅宽为 960km,像元分辨率为 $40\text{km} \times 320\text{km}$,其窄带模式(NSM)扫描幅宽为 240km,像元分辨率为 $40\text{km} \times 80\text{km}$;而 SCIAMACHY 的扫描幅宽为 960km,典型像元分辨率为 $30\text{km} \times 60\text{km}$,相比于 GOME 其空间分辨能力有较大提高。SCIAMACHY 的轨道周期约 100min,轨道高度为 799.8km,在其标准观测模式——临边/天底交替模式下,在赤道地区 6d 可以完成对整个地球的监测,若只任选其中一种做单一模式观测,在赤道地区 3d 就可以覆盖全球。SCIAMACHY 像素点重覆周期为 35d。

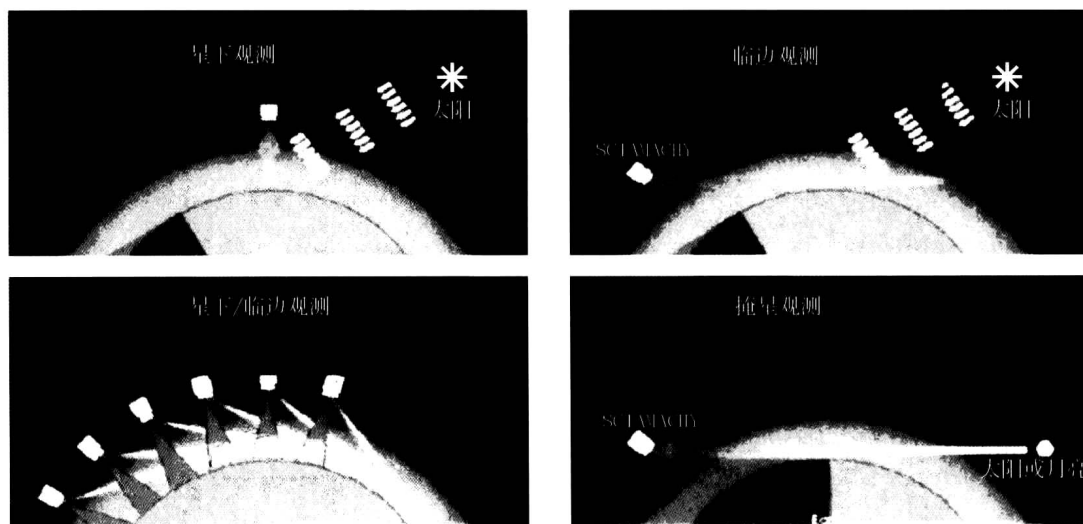


图 1.1.1 SCIAMACHY 观测模式 (Bovensmann et al., 1999)

SCIAMACHY 的对流层痕量气体反演算法和不确定性与 GOME-1 大体相似,可以得到的痕量气体产品包括 O_3 、 O_2 、 O_4 、 H_2CO 、 SO_2 、 BrO 、 OCIO 、 ClO 、 NO 、 NO_2 、 NO_3 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O ,其增加的红外波段观测可以实现对 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等气体的反演。

5. TERRA/(MOPITT, MODIS, MISR)

1999 年 11 月 NASA 发射的 TERRA 卫星极大地增强了卫星遥感对对流层污染物的探测能力。TERRA 上搭载的 MOPITT (measurements of pollution in the troposphere) 传感器,其星下点像元分辨率为 $22\text{km} \times 22\text{km}$,扫描宽度为 640km,能够探测对流层中的 CH_4 及 CO 含量 (Drummond et al., 1996)。MOPITT 反演 CO 含量的准确度和精度为 10% (Edwards et al., 2003),而其反演 CO 垂直廓线的信号自由度 (degrees of freedom for signal, DFS) 为 0.5 ~ 2。MOPITT 的反演结果已经得到了广泛的验证 (Emmons et al., 2004, 2007),准确度和精度在很多地区都能在上述范围内。

MISR (Diner et al., 1998) 和 MODIS (Barnes et al., 1998) 能够以较高的分辨率提供气



溶胶的含量和特性等信息。MISR 仪器包括 9 个推扫式相机, 角度变化范围为 $-70^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 每一个相机有四个线阵列电荷耦合器件 (CCDs), 覆盖的光谱波段的中心波长分别是 446nm、558nm、672nm 和 867nm, 波段宽度是 20 ~ 40nm, 共有 36 个通道 (9 个相机 $\times$ 4 个通道)。MISR 的 9 个相机分别指向不同角度, 包括 1 个天底观测、4 个前向观测角和 4 个后向观测角。MISR 在局地观测模式下, 其天底观测的像元空间分辨率为 250m, 其他角度观测的像元空间分辨率为 275m。而 MISR 在全球观测模式下, 像元空间分辨率最大会降到 1km 左右。MISR 使用地表亮度的空间变化来区分地表和大气的贡献, 特点是能反演诸如沙漠等亮地表的气溶胶光学厚度 (Martonchik et al., 2004)。其反演结果可提供气溶胶谱分布、单次散射反照率和球面度等信息 (Kahn et al., 1997, 2001; Kalashnikova et al., 2006; Chen et al., 2008)。AERONET 的地面测量验证表明, MISR 的气溶胶反演精度为 0.05% ~ 20%。

MODIS 有 36 个通道及成熟的星上定标器, 仪器视场达到 $\pm 55^{\circ}$, 幅宽为 2230km, 它是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器, 电磁波谱范围覆盖了可见、近红外、红外等通道, 为反演气溶胶和地表特征提供了丰富的信息。MODIS 数据星下点的地面分辨率分别为 1000m、500m、250m, 在对地观测过程中, 每秒可同时获得 6.1Mb 来自大气、海洋和陆地表面信息, 可用于天气预报、洪水、火灾、干旱、雪暴、沙暴、海冰等自然灾害监测, 以及环境监测、土地利用、农业区划和国土资源调查。Kaufman 等 (1997) 最早介绍了基于暗目标法由 MODIS 数据反演陆地上空气溶胶的应用。经 AERONET (aerosol robotic network) 地基观测数据的验证, MODIS 陆地上空气溶胶光学厚度的反演精度为 $0.05 \pm 15\% \tau$ (Chu et al., 2002; Ichoku et al., 2005; Remer et al., 2005), 而沙漠和沿海地区的误差较大 (Abdou et al., 2005)。

6. AQUA/AIRS

AIRS (atmospheric infrared sounder) 搭载在 NASA 的 AQUA 卫星上, 于 2002 年发射升空, 可用于反演 CO 、 CH_4 和 CO_2 等气体的柱总量和垂直廓线。AIRS 是一个穿轨扫描光栅光谱仪, 它覆盖 3.7 ~ $16\mu\text{m}$ 的光谱范围, 2378 个通道, 星下点分辨率 13.5km, 垂直分辨率 1km (Aumann et al., 2003)。AIRS 基于 4.7 μm 波段的信息反演 CO , 反演生成的 CO 垂直廓线具有 0.5 ~ 1.5DFS (McMillan et al., 2005)。在海洋上空, AIRS 反演的 CO 相对于 MOPITT 的 CO 结果有一个正向偏差, 为 15 ~ 20ppbv (Warner et al., 2007)。另外, 还可利用 AIRS 对火山活动产生的 SO_2 进行监测 (Carn et al., 2005; Prata et al., 2007)。

7. AURA/(OMI, TES)

2007 年 4 月 15 日 NASA 发射的 AURA 卫星搭载了 4 个大气探测专用载荷: OMI (ozone monitoring instrument)、MLS (microwave limb sounder)、HIRDLS (high resolution dynamics limb sounder) 和 TES (tropospheric emission spectrometer)。其中, OMI (Levelt et al., 2002) 由芬兰和 NASA 合作研制, 是继 GOME 和 SCIAMACHY 后的新一代大气成分探测传感器, 轨道扫描幅宽为 2600km, 空间分辨率是 13km $\times$ 24km, 1d 可覆盖一次全球。OMI 有 3 个通道, 覆盖的光谱范围是 270 ~ 500nm, 光谱分辨率为 0.5nm (表 1.1.4)。OMI 的仪器主要有三大部分: 光学部件 (OA)、电子部件 (ELU) 和界面适配模块 (IAM), 可以逐日、直接地获得全球低层大气中 O_3 、 NO_2 、 SO_2 、 HCHO 、 BrO 、 OCIO 等影



响空气质量的污染物含量，以及气溶胶紫外指数和云识别产品等。OMI 能够以较高的空间及时间分辨率获取大气污染的空间分布和动态变化，为深入研究污染物的远距离输送及其复杂性提供有益的支持。特别是 OMI 提供的 O_3 数据，不仅有助于大气污染的全球监测，而且为研究影响平流层臭氧及气候变化的物理、化学过程提供了新的认识途径，从而更好地了解平流层 O_3 与大气热力结构及气候变化的相互影响机制。而在对流层痕量气体的反演方面，OMI 的算法和不确定性与 GOME-1 及 SCIAMACHY 相似。另外，OMI 还能提供气溶胶消光和散射等方面的信息 (Torres et al., 2007)。

表 1.1.4 OMI 通道参数表

通道	光谱范围/nm	光谱分辨率/nm	光谱采样距离/(nm/pixel)
UV-1	270 ~ 314	0.42	0.32
UV-2	306 ~ 380	0.45	0.15
VIS	350 ~ 500	0.63	0.21

TES 是一个傅里叶变换红外成像光谱仪，在临边观测和天底（星下点）观测模式下其光谱分辨率分别高达 0.025cm^{-1} 和 0.1cm^{-1} ，并且覆盖很宽的光谱范围 ($650 \sim 3050\text{cm}^{-1}$) (Beer et al., 2001)。TES 在天底观测模式下其空间分辨率为 0.53km （沿轨） $\times 5.3\text{km}$ （穿轨），视场大小为 8.5km （沿轨） $\times 5.3\text{km}$ （穿轨）；而在临边观测模式下，TES 可对距地面 $0 \sim 33\text{km}$ 高度的垂直大气进行观测，水平分辨率为 23km ，垂直分辨率为 2.3km 。TES 使用光学估计的方法反演对流层 O_3 和 CO。TES 反演 CO 垂直廓线的 DFS 为 $0.5 \sim 1.5$ ；在无云条件下，TES 反演 O_3 廓线的垂直分辨率约为 6km 。TES 对于对流层底部和顶部的 O_3 探测十分敏感，但对边界层内的 O_3 敏感度会降低。

8. PARASOL/POLDER

2004 年，搭载 POLDER 的小卫星 PARASOL 发射升空，并加入“A-Train”观测计划 (Lier et al., 2008)。POLDER 传感器包括一个面阵 CCD 相机、宽视场远心光学系统及一个转轮式的多通道滤光装置，能够测量从蓝波段 ($0.443\mu\text{m}$) 到近红外波段 ($1.020\mu\text{m}$) 的 9 个光谱通道，不同通道的波段宽度为 $20 \sim 40\text{nm}$ 。POLDER 的偏振通道设在 $0.490\mu\text{m}$ 、 $0.670\mu\text{m}$ 和 $0.865\mu\text{m}$ ，能够获取多个偏振方向的地表及大气信息。该传感器可以从多个角度观测地面目标，沿轨视场达 $\pm 51^\circ$ ，穿轨视场为 $\pm 43^\circ$ 。POLDER 基于偏振辐射亮度反演陆地上空的气溶胶光学及物理特性 (Deuzé et al., 2001)，所用算法对气溶胶细粒子比较敏感。

9. CALIPSO/CALIOP

2006 年 4 月，CALIOP (cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization) 搭载在 CALIPSO 卫星上发射升空。CALIOP 利用激光雷达进行天底观测，在探测大气气溶胶和云方面具有明显优势，所得数据主要用于反演气溶胶和云的垂直分布及其光学和物理性质 (Winker et al., 2003)。CALIOP 利用二极管泵浦 Nd: YAG 激光器发射波长分别为 532nm 和 1064nm 的线偏振激光脉冲，其大气后向散射信号则由一个直径 1m 的望远镜收集，并被 1 个 1064nm 通道和 2 个 532nm 的线偏振通道接收。基于激光雷达后向散射信号的大小和光谱



变化, CALIOP 能够区分云和气溶胶 (liu et al., 2004)。CALIOP 可基于消光后向散射比 (extinction-backscatter ratio, 也称 lidar ratio) 反演气溶胶的消光廓线, 垂直分辨率为 120 ~ 360m; 同时, 它能够识别出光学厚度为 0.01 气溶胶层 (McGill et al., 2007)。

10. MetOP/(GOME-2, IASI)

MetOP 是欧洲第一个业务化气象应用的极轨卫星, 于 2006 年 10 月发射, 其主要载荷 GOME-2 和 IASI (infrared atmospheric sounding interferometer) 专门用于观测对流层痕量气体。其中, GOME-2 是一个星下点扫描光谱仪, 其覆盖的光谱范围为 240 ~ 790nm, 对应的光谱分辨率为 0.26 ~ 0.51nm。与其上一代传感器 GOME-1 相比, GOME-2 性能进一步增强, 地表分辨率为 40km × 80km。GOME-2 反演的对流层痕量气体与 GOME-1、SCIAMACHY 及 OMI 大致相同。

作为 MetOP 卫星上最先进的传感器, IASI 是一个包含 Michelson 干涉仪和综合成像系统的傅里叶变换光谱仪, 用于测量地球发射的热红外能量。该传感器覆盖 $645 \sim 2760\text{cm}^{-1}$ ($3.4 \sim 15.5\mu\text{m}$) 的整个热红外谱段, 光谱分辨率高达 0.5cm^{-1} , 且具有很高的辐射测量精度。IASI 进行穿轨扫描的视场角达 $\pm 48.5^\circ$, 扫描幅宽约为 2200km, 每 12h 即可覆盖全球。在这一宽大的视场中, IASI 采用 4 个圆形像元 (每个像元在星下点的直径为 12km) 组成的 2×2 矩阵进行采样观测, 每个观测采样点的大小约为 $50\text{km} \times 50\text{km}$, 一个扫描带包括 30 个等间隔的采样点 (星下点两侧各 15 个)。Turquety 等 (2004) 描述了基于 IASI 数据利用非线性人工神经网络技术反演对流层 O_3 和 CO 的方法; Wespes 等 (2007) 则使用 IASI 数据进行了 CH_4 的反演研究。

1.1.2 国内大气环境卫星及传感器发展现状

20 世纪 80 年代以来, 我国的卫星及传感器研制水平也得到了迅速发展。1988 年、1990 年、1999 年和 2002 年, 我国先后发射了 4 颗第一代极轨气象卫星, 即风云一号 (FY-1) A、B、C 和 D 卫星; 1997 年、2000 年、2004 年和 2006 年又先后发射了四颗静止轨道气象卫星, 即风云二号 (FY-2) A、B、C、D 卫星, 与风云一号卫星共同组成了中国气象卫星业务监测系统; 2008 年 5 月, 风云三号 (FY-3) A 星也成功发射。1999 年 10 月 14 日, 成功发射了中巴地球资源一号卫星 (CBERS-01), 星上搭载了五波段 CCD 相机、四波段红外多光谱扫描仪 (IRMSS)、双波段宽视场成像仪 (WFI); 2003 年 10 月 21 日 CBERS-02 星发射升空; 2007 年 9 月 19 日, CBERS-02B 星发射升空, 除搭载有 CCD 相机和 WFI 成像仪外, 还有高分辨率相机 (HR)。2002 年 5 月, 我国成功发射海洋一号卫星 (HY-1), 星上有效载荷包括 CCD 成像仪和海洋水色扫描仪; 目前, 海洋二号卫星的研制工作已经启动。我国逐步形成了气象、海洋及资源三大遥感系列卫星, 在气溶胶监测方面发挥了重要作用。2008 年 9 月, 我国首次发射了用于环境与灾害监测的 HJ-1A、HJ-1B 两颗卫星, HJ-1 星携带了宽覆盖多波段 CCD 相机和高光谱相机, HJ-1B 星携带了宽覆盖多波段 CCD 相机和红外相机, 这两颗卫星为大气环境监测提供了另一重要卫星遥感数据源。目前, 国内用于大气环境监测的在轨卫星主要有环境一号卫星和 FY-3A 星。