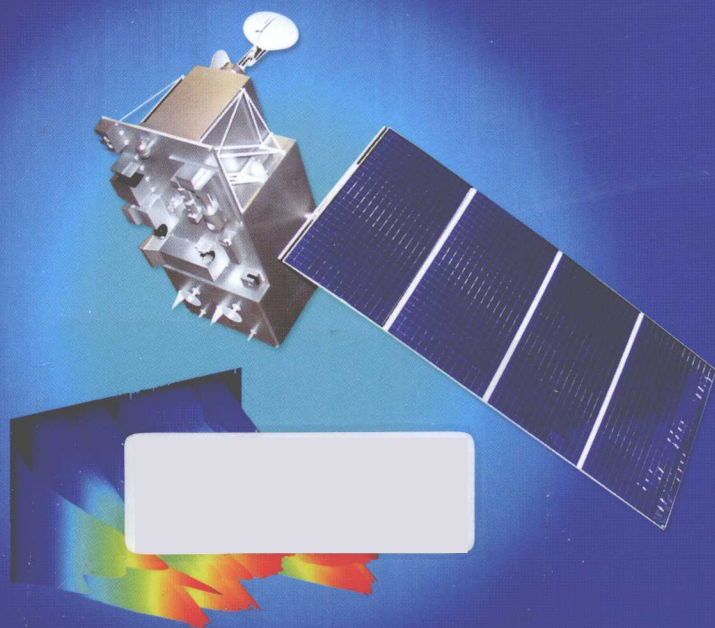




地球观测与导航技术丛书

# 卫星高光谱红外大气遥感 原理和应用

董超华 李俊 张鹏 等著



科学出版社



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

地球观测与导航技术丛书

# 卫星高光谱红外大气遥感 原理和应用

董超华 李俊 张鹏等 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是一本综合介绍红外大气辐射传输原理及其在卫星遥感中应用的专著,内容既包括红外大气辐射传输和卫星红外大气遥感的经典理论和方法,又吸收了近10年来卫星红外大气遥感的最新成果,特别是美国和欧洲的星载高光谱红外大气探测仪 AIRS 和 IASI 成功发射后,红外高光谱卫星资料在大气温湿度廓线、云、气溶胶和沙尘暴、主要温室气体遥感中的最新进展以及在数值天气预报模式中的同化、灾害天气分析、气候监测研究中应用的最新成果。本书注重取材新颖和学科发展前沿,尤其注重其实用价值。

本书可作为本科生和研究生(包括硕士生和博士生)以及从事卫星大气遥感的科技人员学习用书,也可供相关业务人员、工程技术人员和教学科研人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

卫星高光谱红外大气遥感原理和应用 / 董超华等著. —北京: 科学出版社, 2013. 3

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-036838-6

I. ①卫… II. ①董… III. ①红外光谱学—卫星遥感—大气遥感—研究 IV. ①P407.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 040075 号

责任编辑: 朱海燕 韦 沁 吕晨旭 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

**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>

**中国科学院印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年3月第一版 开本: 787×1092 1/16

2013年3月第一次印刷 印张: 17 1/2

字数: 390 000

**定价: 108.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 本书作者

董超华 李俊 张鹏 吴春强 漆成莉

姚志刚 吴雪宝 李博 郑婧 刘辉

陆其峰 马刚 白文广 蒋德明 张勇

# 《地球观测与导航技术丛书》编委会

## 顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀  
李小文 叶嘉安

## 主 编

李德仁

## 副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

## 编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军 陈 戈 陈晓玲 程鹏飞 房建成  
龚建华 顾行发 江碧涛 江 凯 景贵飞  
景 宁 李传荣 李加洪 李 京 李 明  
李增元 李志林 梁顺林 廖小罕 林 琿  
林 鹏 刘耀林 卢乃锰 孟 波 秦其明  
单 杰 施 闯 史文中 吴一戎 徐祥德  
许健民 尤 政 郁文贤 张继贤 张良培  
周国清 周启鸣

# 《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业与信息化部和科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划（863计划）将早期的信息获取与处理技术（308、103）主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”计划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为863计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示973和863主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加863计划地球观测与导航技术领域的项目、973相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009年10月

# 序 一

气象卫星在 20 世纪 60 年代出现后, 不几年就在气象业务中得到广泛应用, 那时最主要的是应用卫星拍摄和扫描得到的可见光和红外辐射云图, 由此得到全球范围的云层分布, 大开眼界, 一目了然。尤其是发现了中纬度带的螺旋云系, 它与大气环流和长波系统紧密联系; 发现了热带大规模复合云团和过赤道的云系, 它们与热带内辐合带和南北两半球相互作用及季风密切相关; 及台风和台风眼的云形结构, 等等。藉此大大提高了天气预报预警能力, 深得气象部门的倚重。不过, 那还只是看图像以知形势, 犹未能探究天气系统和天气现象的演变机理, 预报时限难以提高。

到了 70 年代, 已经明了利用卫星还可定量遥感如温度、水汽等大气变量(气象要素)以及辐射和大气中的一些气体或非气体成分的分布, 同时由于原始方程和包含有众多非绝热物理过程的大气环流模式的应用, 数值天气预报已成为一种主要的预报手段。稍后, 气候研究计划又设想作一个月至一年的短期气候预测。毫无疑问, 数值天气和气候预测需要有全面的观测资料作初始场, 人们期望气象卫星能够填补常规气象站网的严重不足, 提供较完整的初始场。但像气象卫星探测等所得的定量遥感资料则是必须实际标定和经过直接实际探测资料和在某种程度上可信的代替实测资料检验校准之后才能有效应用的, 从此科学界不能不将观测和模拟及预测结合起来, 二者相互促进, 相互融合, 催生了大气科学甚至是整个地球科学一个新的分支——资料融合和同化理论和应用, 它将各种资料, 包括常规定时定点的, 如台站和探空的直接观测、卫星和雷达等非常规的遥感观测以及如数值天气预报等的产品融合同化成一种较全面较可靠的资料, 同时还可以使图像和数值资料融合, 于是大气科学和气象业务就发展到当代的高科技水平。遥感(尤其是卫星遥感)和超级计算的模拟及预测就成为当代大气科学最重要也是最亮丽的两个支柱。今天, 若无卫星遥感资料的应用, 就不可能想象有可作直至 7 天的中期数值天气预报和作季度至一年的短期气候预测, 更不必说企图监测和估算长期的气候变化了。

应该指出, 卫星遥感获得的资料是这样超海量的多(尤其是现代有高分辨率光谱仪等的资料), 资料应用又是这样的迫切而急不可待, 而遥感理论和反演算法在实际应用上碰到的问题又非常复杂, 以致超海量资料能及时应用到实际天气和气候的分析和预测中去只是非常小的一部分, 而且即使应用了, 其理论和方法仍然有待提高, 新的应用领域也有待开拓——如对危险天气和相关灾害的监测、预报和预警等。凡此种种, 说明对已有成功应用的理论和方法作系统总结并对未来应用问题作开拓性前瞻性探索是十分必要的。可是, 到目前为止, 我们只看到美国国家海洋和大气管理局和美国国家航空航天局所属单位以及欧洲中期数值天气预报中心等单位的成功应用软件及刊物上发表的相应文章。也许是学者们忙于实际应用而未暇, 鄙人未看到有结合现代应用问题的较全面的系统性专著。可喜的是, 现在有了《卫星高光谱红外大气遥感原理和应用》一书的出

版，相信它对从事卫星大气遥感和数值天气预报等应用资料同化工作的广大读者将是十分有用的。

本书的一位作者董超华从 20 世纪 70 年代起，一直是我国研究气象卫星总体规划和定量反演问题的主要专家，另两位作者李俊和张鹏也熟知已有的理论和方法，李俊还是国际上最著名、最实用的几个气象卫星遥感反演软件包的主要研制骨干。他们近几年又致力于发展高分辨率光谱遥感的反演和资料应用，如有云、沙尘等气溶胶物质吸收和散射共存情况下的反演问题以及数值天气预报等的同化研究。本书既反映了国际上已有的成果，也包括了他们的大量最新研究成果，内容丰富、全面、新颖。特别是他们近几年的研究还紧密联系我国气象卫星高分辨率光谱资料的开发应用问题。无疑，这对提高我国卫星气象业务水平并使之与我国的数值天气气候预报业务结合是非常重要的。无论从数量上还是质量上说，今天在运行中的世界气象卫星行列中，中国占有相当重的分量，我国的遥感反演和应用的新进展，也将对国际同行大有裨益，大家共同推进世界的气象科学水平。

中国科学院院士  
中国科学技术协会原副主席



2012 年 12 月



# 序 二

从卫星平台进行高光谱分辨率红外大气遥感探测，是现代全球数值天气预报、大气环境及气候系统监测等多个领域的需求推动和航天高技术进步发展的一个奇迹！

世界气象组织（WMO）全球综合观测系统发展的纲领性文件“全球观测系统 2025 年发展展望（GOS VISION 2025）”中，对超高光谱分辨率大气探测提出了明确的发展要求。具体如下：世界气象组织全球观测系统必须持续提高能力和保持业务的连续性，以维持至少 6 个业务地球静止轨道（GEO）卫星或互为补充，这 6 颗卫星间距最好不超过经度 70 度，并且每颗卫星至少配备：

- (1) 一个可见光/红外成像仪；
- (2) 一个超光谱红外大气垂直探测仪；
- (3) 一个闪电成像仪。

低地球轨道（LEO）卫星使命应包括至少 3 颗业务太阳同步极轨卫星（穿越赤道时间大约在本地时间 13：30，17：30 和 21：30，以达到最佳的全球覆盖率）。这些轨道平台每个应至少配备：

- (1) 一个超光谱红外大气垂直探测仪；
- (2) 一个微波探测仪；
- (3) 一个高分辨率的多光谱可见光/红外成像仪；
- (4) 一个微波成像仪。

和传统的滤光片式红外大气垂直探测仪器相比较，在地球静止轨道和近极地太阳同步轨道上开展以迈克尔逊干涉技术为主流的超高光谱分辨率红外大气探测，具有两个优点：①大气探测的光谱通道数量极大增加（如 IASI 具有 8461 个通道）；②光谱分辨能力的极大增强（IASI 比 HIRS 的光谱分辨能力增加了两个量级），进而可以获取高垂直分辨率、高精度的大气温度、湿度廓线以及云量、云顶温度信息。此外，高光谱分辨率足以分辨某些重要的大气温室和痕量气体的吸收带，进而可以实现臭氧总量、一氧化碳、甲烷和二氧化碳柱总量的全球探测。

目前欧洲气象卫星应用组织（EUMETSAT）和美国（NASA，NOAA）已经实现了在近极地轨道气象卫星平台上进行超光谱红外大气垂直探测业务能力，中国风云三号气象卫星系列正在研发具有类似能力的超光谱红外大气垂直探测仪器。2012 年 5 月世界气象组织在美国亚利桑那召开的第五次各种观测系统对数值天气预报影响评估会议上，许多数值天气预报中心的报告表明：和全球其他气象观测系统相比，超光谱红外大气垂直探测系统在对全球数值天气预报的改进方面，其作用名列首位，效果显著。


高光谱分辨率红外大气遥感的业务运行，也为气候监测和预测提供了新的机遇。业务气象卫星具有长期业务运行的计划性和全球的协调性，未来的全球高光谱分辨率大气垂直探测星座系统，将提供全球覆盖的大气温度、湿度、云参数、气溶胶、温室与痕量

气体、全球辐射收支等综合产品。这些高光谱分辨率红外大气遥感仪器都具有高精度的在轨定标系统，为数据的绝对精准和长期稳定性提供了技术保障。美国（NASA，NOAA）和欧洲气象卫星应用组织已经开始系统地存档晴空的高光谱红外大气探测数据，供未来全球气候分析和研究使用。相信这些新一代的高光谱分辨率红外大气遥感系统将为全球气候监测、预测和服务提供新的、具有长期业务连续性的高质量数据源和产品。支持世界气象组织发起的全球气候服务框架（global framework for climate services）。

目前欧洲气象卫星应用组织已经决定在其第三代静止气象卫星上配置地球静止轨道上的超光谱红外大气垂直探测仪器。据论证，在地球静止轨道上进行超光谱红外大气垂直探测，可以探测快速变化的中尺度天气系统特征（温度场、湿度场、海面 and 陆地表面温度、云量和云顶温度等），可以实现高精度和高频次的区域大气化学成分探测和实时监测。其数据和产品同化到区域数值天气预报模式中，可以极大地提高区域极端天气和环境事件的预警预报能力。

本书作者长期从事气象卫星遥感，是气象卫星大气垂直探测领域业务和研究的优秀科学家。他们撰写的这本书，集基本原理、理论和科学算法以及应用为一体，具有很强的可读性与实用性，对于从事科研、教育和多领域应用的广大科技人员来说，都是一本高质量的参考专著。

在未来 3~5 年内，世界气象卫星系统将面临着向以高光谱分辨率大气垂直探测技术和业务系统为主的新一代气象业务卫星转变的关键时期。目前世界气象组织空间计划正在和国际气象卫星协调组织（CGMS）合作，推动和鼓励全球气象卫星业主为新一代业务气象卫星的到来开展大规模的教育和培训。本书的出版和世界气象组织教育培训计划要求不谋而合！也为世界气象组织成员国提供了一本极佳的高光谱分辨率大气垂直探测的高层次培训教材。



世界气象组织空间计划 主任  
世界气象组织综合观测与信息系系统司 司长

# 前 言

气象卫星发展到今天，已有 50 多年的历史，星上主要观测系统之一——卫星大气垂直探测系统经历了多个发展阶段，从初期仅有少数几个红外宽波段通道、低空间分辨率观测，逐步发展到红外、微波仪器同平台跨卫星轨道扫描和较高空间分辨率观测；星载红外仪器也由滤光片分光发展到干涉或光栅分光，极大地提高了光谱分辨率（10 倍之多），探测通道数目提高了 100 倍，为我们研究地球大气辐射特性、反演地表和大气参数提供了丰富的信息。卫星高光谱分辨率红外大气垂直探测替代传统红外宽波段大气探测技术成为主流方向。

2002 年美国国家航空航天局（NASA）地球观测系统（EOS）卫星之一的 Aqua 成功发射，标志着红外高光谱分辨率大气垂直探测系统新纪元的开始，Aqua 携带的大气红外探测器 AIRS 有 2378 个红外通道，具有很强的大气温湿度廓线、气体成分、地表特性和云等参数的遥感能力，在全球数值天气预报、气候变化和预测、环境监测等领域发挥了巨大的作用，产生了极大的社会和经济效益。高光谱红外大气探测资料和微波探测资料及其他观测资料一起在全球数值天气预报改进中起到了关键作用。正是由于同化了卫星观测资料，全球短期和中期数值天气预报时效在南半球提高了 3 天，北半球提高了 1 天。而就单一仪器（观测系统）而言，AIRS 在全球数值预报改进中起到的作用最大。欧洲气象卫星应用组织也于 2006 年 10 月 19 日发射了极地轨道业务卫星系列的首颗星——MetOp-A，其上装载的 IASI 仪器和 AIRS 一样具有很强的大气垂直探测能力。美国新一代遥感卫星 Suomi NPP 也在 2011 年 10 月 28 日成功发射，标志着美国新一代业务极轨气象卫星系列的开始，其上的高光谱大气探测器 CrIS 将取代 AIRS 继续在数值天气预报和气候研究方面发挥重要作用。

中国也正在研发高光谱红外大气探测系统，风云三号极地轨道业务星和新一代静止轨道卫星风云四号都将装载类似 AIRS、IASI 和 CrIS 这样的大气探测器。红外高光谱资料应用研究在我国才刚刚起步，高光谱资料在中国数值天气预报业务和气候变化研究中有广阔的应用前景，业务和科研单位对红外高光谱大气探测资料的应用有着很强的需求。红外高光谱遥感的原理是什么？观测资料包含哪些有用的信息？如何提取这些信息？如何应用？在红外高光谱遥感应用方面，目前国内尚缺乏一本系统阐述红外高光谱大气探测原理、地球物理参数反演方法和应用方面的参考文献。我们基于多年在红外高光谱探测方面的工作，结合国外一些最新进展，将红外高光谱大气遥感探测原理、辐射传输计算、反演方法和资料应用等整理成一本较为完整的参考著作。

我国的科研工作者很早就开展了大气红外遥感和反演理论研究，以曾庆存研究员为代表的中国科学家早在 20 世纪 70 年代就系统地研究了大气红外遥感的基本理论和方法。曾院士在他的著作《大气红外遥测原理》一书中，指出了反演水汽和反演温度的本质区别，即用于温度反演的“有效辐射层”概念不适用于反演水汽，从而提出了遥感和

反演水汽的“最佳信息层”理论和方法，改正了当时国际上业务反演水汽算法中的错误，为发展大气红外遥感方法和促进观测资料应用做出了重要的贡献。

尽管大气温湿度廓线遥感和反演已取得很大成功，但云的存在仍是一个主要问题。科学家们为大气反演探索了最佳的光谱波段和各种数学解决技术以消除云的影响。本书在处理云方面也做了较为详尽的阐述。本书大部分内容取材于作者多年的工作，其中有云时红外高光谱辐射计算方法（第2章），红外高光谱云检测和云辐射订正（第4章），红外高光谱垂直分辨率研究（第5章），反演方法研究和试验（第6和第7章），气溶胶、沙尘、红外地表发射率反演（第8章），高光谱资料区域数值模式同化研究（第9章），高光谱资料在天气预警中的应用研究（第10章）以及高光谱红外资料在气候研究中的初步应用（第11章），以上是作者近几年的最新研究进展。本书有些内容至今尚未发表，如有云时辐射传输计算和线性化处理、有云时大气温湿度参数反演等。作者期待本书能推动卫星高光谱大气探测资料的应用，更好地发挥我国新一代气象卫星的应用效益。

我国最先研究卫星红外大气遥感理论和反演方法的曾庆存院士为本书写序使我们深感荣幸，曾先生还对本书的撰写工作给予了细致的指导。感谢世界气象组织（WMO）空间计划主任、综合观测与信息系统司司长张文建博士从全球观测系统和应用的高度为本书写序。许健民院士、石广玉院士、李泽椿院士、徐祥德院士、毛节泰教授、邱康睦研究员、方宗义研究员等非常关注和支持本书的出版，尤其是在本书撰写过程中提出的宝贵意见和建议，使我们受益匪浅。感谢国家卫星气象中心主任杨军研究员、风云三号卫星应用系统总指挥卢乃锰研究员和风云二号卫星应用系统总指挥魏彩英研究员对本书出版的热诚帮助与大力支持。感谢中国气象局数值预报中心张华研究员为本书提供研究结果（图9.16至图9.18）。本书还得到了国家卫星气象中心齐瑾和郭杨，以及山东省气象局张磊等的帮助，在此一并致谢。

限于作者水平，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2013年2月

# 目 录

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

序一

序二

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 大气垂直探测技术的发展	1
1.3 高光谱大气探测技术的发展	5
1.4 气象卫星遥感的反演和应用问题	9
参考文献	12
第 2 章 大气红外辐射传输和遥感理论	14
2.1 引言	14
2.2 大气气体的红外吸收光谱	14
2.3 气溶胶和云的光学特性	19
2.4 大气红外辐射传输方程	29
2.5 红外大气遥感方程及其线性化计算方法	35
参考文献	39
第 3 章 高光谱红外定标及辐射校正应用	41
3.1 引言	41
3.2 在轨定标	41
3.3 高光谱资料的辐射校正应用	50
参考文献	55
第 4 章 红外高光谱云检测和云辐射订正方法	56
4.1 引言	56
4.2 视场云检测	56
4.3 晴空通道检测	57
4.4 云视场辐射订正	60
参考文献	75
第 5 章 最佳信息层及垂直分辨率	78
5.1 引言	78
5.2 信息容量和自由度	78
5.3 垂直分辨率	79

5.4	误差分析	84
5.5	通道优化	87
	参考文献	90
<b>第6章</b>	<b>大气温湿度廓线反演方法——统计法</b>	92
6.1	引言	92
6.2	特征向量反演方法	93
6.3	大气参数反演示例	99
6.4	小结与讨论	102
	参考文献	103
<b>第7章</b>	<b>大气温湿度廓线反演方法——物理法</b>	105
7.1	引言	105
7.2	目标函数	105
7.3	求解方法	107
7.4	辐射传输方程线性化	109
7.5	物理反演精度的改进	113
7.6	应用实例	115
7.7	讨论	117
	参考文献	118
<b>第8章</b>	<b>其他参数的反演方法</b>	121
8.1	引言	121
8.2	地表比辐射率反演	121
8.3	沙尘气溶胶参数反演	127
8.4	云参数反演	136
8.5	主要温室气体的反演方法	151
	参考文献	164
<b>第9章</b>	<b>高光谱红外遥感在数值天气预报中的应用</b>	168
9.1	引言	168
9.2	同化方法	168
9.3	高光谱资料的通道选择	174
9.4	高光谱资料的质量控制	176
9.5	高光谱资料的偏差订正	177
9.6	云区资料的使用	179
9.7	高光谱红外遥感在全球模式中的同化应用	180
9.8	高光谱红外遥感在区域模式中的同化应用	196
	参考文献	213
<b>第10章</b>	<b>高光谱红外资料在天气预警中的应用</b>	218
10.1	引言	218
10.2	IHOP 风暴事件预警试验	221
10.3	美国中西部带状中尺度对流风暴预警	223

10.4	美国南达科他州强冰雹预警 .....	225
10.5	中国舟曲泥石流致灾暴雨预警 .....	227
10.6	讨论 .....	228
	参考文献 .....	228
<b>第 11 章</b>	<b>高光谱红外资料在气候研究中的初步应用</b> .....	<b>231</b>
11.1	引言 .....	231
11.2	对流频发和气候变暖 .....	233
11.3	温室气体遥感及在气候研究中的应用 .....	237
11.4	热带太平洋温度的年代际变化和太阳活动周期 .....	251
	参考文献 .....	253
	缩略语及中英文全称 .....	257

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

数值天气预报的准确性依赖丰富的观测资料、超强的计算机系统、先进的数值模式和资料同化技术。对于观测资料而言，人类所处的地球有 70% 以上是海洋、高山、沙漠和极冰覆盖，常规观测难以实现，使得大气探测资料严重缺乏。即使是常规探测资料较密集的地区，也很难满足中小尺度天气预报对观测资料时空密度的要求。另外，地基大气其他成分的观测资料严重匮乏，如大气臭氧、沙尘、甲烷、二氧化硫、一氧化碳等，更无法实现全球观测。美国科学家 King (1956) 最先提出利用卫星观测红外辐射进而反演大气温度的概念。1959 年 Kaplan 发现不同光谱段的辐射来自不同大气层，可以反演不同高度上的大气温度。基于这些理念，美国开始了气象卫星计划，并于 1960 年 4 月 1 日成功发射世界上第一颗气象卫星，取名泰罗斯一号 (TIROS-1)，开启了从太空观测地球大气的历史新纪元。迄今为止，已有百余颗气象卫星进入太空，卫星的研制也由美国一家发展到中国、日本、俄罗斯、印度等多个国家和欧洲气象卫星应用组织。随着卫星大气探测技术的发展，遥感反演理论、反演方法和同化应用技术等也在不断地发展，并期望利用航天科技、电脑通信，以及大气辐射学和现代数学相结合的综合手段，回答人类迫切希望解决的重大问题。这些问题包括：全球异常天气过程、全球气候演变、全球辐射能量收支和水循环、全球海洋状态及其与大气圈、陆地圈和生物圈的相互作用效应，以及全球温室效应和大气微量气体变化等全球性变化。本章的重点是讨论卫星大气探测技术的发展、遥感反演和应用等问题。

## 1.2 大气垂直探测技术的发展

### 1.2.1 传统卫星大气垂直探测技术发展

在卫星上进行三维大气温度、湿度等探测，主要基于光谱通道选择。选择大气透明光谱区（如大气窗区和吸收带两翼）可获得自然表面辐射特性，包括对云层的观测；在大气吸收带选择若干个光谱通道，可获得大气状态或成分的三维垂直结构。例如，选择大气混合比稳定的二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 红外吸收带探测大气的温度廓线；选择水汽 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 红外吸收带探测大气的湿度廓线。由于大气垂直探测的复杂性，大气探测类仪器载入卫星平台要晚于成像类仪器 10 年，而实现真正的业务运行和应用又推后接近 10 年时间。

世界上第一个探测类仪器——光栅分光仪，也称红外辐射分光仪 (SIRS-A)，于 1969 年 4 月载于美国雨云-3 号试验天气卫星 (NIMBUS-3)。SIRS-A 在  $15\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  吸收



带选择 8 个红外谱段, 星下点分辨率 250km, 用于探测大气温度廓线。虽然 SIRS-A 资料的垂直分辨率低, 瞬时观测视域很大, 大约 90% 以上的测值受到云的干扰, 但仍给当时的天气分析/预报业务带来了改进效果。1970~1978 年, 先后在多颗雨云卫星(极地轨道)上进行了一系列大气温湿廓线探测仪器的飞行试验。与此同时, 威斯康星大学的 Suomi 教授提出在地球静止轨道卫星上进行三维大气探测。1980 年美国静止业务卫星 GOES-4 开始携带滤光片式大气探测仪 VAS (VISSR atmospheric sounder), 实现了从赤道上空三万多千米高空对地球大气的三维高频次探测。VAS 有 12 个通道位于 CO<sub>2</sub> 红外长、短波吸收带, 星下点分辨率 14km, 用于大气温、湿廓线探测; 一个 0.94 $\mu$ m 可见光通道用于对视场中是否有云的检测。静止轨道对同一地理区域的高频次探测, 使它成为观测与对流相关联的大气温、湿度的短期精细尺度特征的一种富有潜力的有效工具。由于卫星是自旋稳定, 仪器对地凝视观测时间非常有限, 难以获得高信噪比和更高空间分辨率的大气探测。有限的垂直分辨率也妨碍其对对流风暴环境场相关联的大气温、湿度的强突发性垂直变化的侦测。

为了提高数值天气预报精度, 大气探测已成为各国发展气象卫星的主要推动力。大气探测技术的发展不仅实现了由星下点定点观测到跨轨扫描的宽幅观测, 而且实现了由试验向业务应用的转变。仪器的光谱分辨率、空间分辨率和辐射分辨率也有不同程度的提高。表 1.1 概括了美国探测地球大气的不同类型辐射计的演化以及中国新一代极轨气象卫星风云三号 (FY-3A/B) 携带的大气探测仪器的主要特征。可以看出, 红外仪器从 1969 年雨云-3 的中光谱分辨率和低空间分辨率干涉计和光栅光谱仪, 到 NOAA、FY-3 极轨气象卫星及 GOES 地球静止气象卫星上工作的较高空间分辨率和较低光谱分辨率的滤光片辐射计的演变情况。为了进一步认识大气探测技术的发展过程, 下面以极轨业务气象卫星为例, 分析大气探测系统三个主要发展阶段的探测能力。

第一阶段 (1972~1978 年) 滤光片飞轮辐射计 VTPR (vertical temperature profile radiometer) /ITOS 卫星系列, 其技术指标同 SIRS-A, 仅能获得星下点晴空天气时的大气温度垂直分布, 反演误差约 3K (RMSE, 均方根误差)。

第二阶段 (1978~1998 年) TIROS 业务垂直探测器 TOVS (TIROS operational vertical sounder)。它装载于 TIROS-N/NOAA-6~14 系列卫星, 由较高空间分辨率红外辐射探测器 HIRS (high resolution infrared radiation sounder)、微波探测器 MSU (microwave sounding unit) 和平流层探测器 SSU (stratospheric sounding unit) 3 个功能各异的仪器组成 (Smith *et al.*, 1979), 共 27 个光谱通道, 跨轨扫描。其中, HIRS/2 有 19 个红外通道, 覆盖 15 $\mu$ m 二氧化碳红外长波吸收带、4.3 $\mu$ m 二氧化碳红外短波吸收带和 6.7 $\mu$ m 水汽吸收带, 一个可见光通道 (0.47 $\mu$ m), 光谱分辨率 3~60cm<sup>-1</sup>, 星下点分辨率 17km。MSU 有 4 个谱通道, 位于 5mm 氧吸收带, 星下点分辨率 103km; SSU 采用选择吸收技术, 调压确定三个谱通道特性, 星下点分辨率 147km, 用于获取平流层大气温度信息。

以 HIRS/2 为主探测器组成的 TOVS 探测系统, 性能较第一代 VTPR 有显著提高。水汽、短波红外及平流层探测通道的增加, 使该系统具有了水汽探测能力, 并提高了对流层底层和平流层温度探测精度 (Chahine, 1972; Smith *et al.*, 1991); 微波具有对云的穿透性, 提高了云区大气温度探测能力。TOVS 系统使云层破裂空隙和无云大气的