



基于环境一号卫星的 生态环境遥感监测

王桥 魏斌 王昌佐 张峰 等著



科学出版社
www.sciencep.com

基于环境一号卫星的生态环境遥感监测

王 桥 魏 斌 王昌佐 张 峰等 著

- 原国防科工委“环境一号小卫星星座应用关键技术研究”
(科工计[2004]186号)
- 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)

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

环境与灾害监测预报小卫星星座（简称环境一号卫星）是国家为加强环境管理、提升防灾减灾能力批准建设的卫星及应用系统工程。本书介绍了环境一号卫星工程总体和环境遥感应用与研究进展，对环境一号卫星平台、载荷和技术特征、数据质量及处理方法进行了介绍分析，围绕环境遥感应用系统建设，重点介绍了环境一号卫星在水环境、大气环境和生态遥感监测与评价中的应用方法和范例，以及环境遥感应用系统建设的标准规范、系统设计与开发等内容。

本书适合于环境遥感监测与管理专业人员使用，也可作为高等院校、科研院所的教学、科研及应用的参考用书，以及环境遥感监测评价技术人员的培训教材。

图书在版编目（CIP）数据

基于环境一号卫星的生态环境遥感监测/王桥等著. —北京：科学出版社，2010.4

ISBN 978-7-03-027067-2

I. ①基… II. ①王… III. ①卫星遥感—应用—环境监测 IV. ①X83

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 048489 号

责任编辑：周 炜 王志欣 赵 冰 / 责任校对：宋玲玲

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>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年4月第一版 开本：787×1092 1/16

2010年4月第一次印刷 印张：48

印数：1—1 000 字数：1 116 000

定价：300.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

本书参编作者

(以姓氏笔画为序)

万华伟	王 桥	王中挺	王文杰	王昌佐
厉 青	申文明	刘晓曼	孙中平	朱 利
许全文	吴传庆	张 峰	张永军	张丽娟
李 营	李 静	杨一鹏	杨丙丰	杨海军
周春艳	罗海江	姚延娟	游代安	熊文成
魏 斌	魏彦昌			

序

温家宝总理在第六次全国环境保护大会上明确提出“要建立先进的环境监测预警体系，全面反映环境质量状况和趋势，准确预警各类环境突发事件”。如何利用各种先进技术手段提高环境监测的能力和水平正成为我国环境监测工作面临的重要任务和挑战。环境遥感具有大范围、快速、连续、动态、可视、大信息量等特点，作为先进的环境监测预警体系基础性的新型支撑技术，在我国环境监测中具有重大的应用价值。为此，原国家环境保护总局自1998年就与国家减灾委员会联合提出了建立“环境与灾害监测预报小卫星星座系统（简称环境一号卫星）”项目方案，旨在将卫星遥感技术全面引入我国环境监测工作，实现对全国生态环境状况及其变化趋势的天-地一体化的动态监测，2002年项目方案得到国家正式批准。经过十多年持续不断的努力，我国首颗环境卫星终于在2008年成功发射。

随着环境一号卫星系统的建设，迫切需要解决卫星在应用和运行过程中遇到的各种关键技术问题。环境保护部审时度势，适时启动了“环境一号卫星环境应用系统工程及其关键技术研究”项目，对卫星数据处理、环境参数反演、应用模型研发、业务系统开发等方面进行了全面的研究，系统构建了包括技术标准与规范体系、模型与技术方法体系、软件平台与支撑系统体系、产品生产与分发体系、业务示范与运行体系在内的完整的环境一号卫星应用技术体系，并围绕环境保护重点工作开展了大量业务应用示范。2009年7月，该项目成果通过了环境保护部组织的“环境一号卫星环境应用系统及其关键技术研究”项目成果鉴定会的鉴定，专家鉴定意见为“该项成果填补了我国环境卫星应用系统研发、运行及其关键技术研究的空白，达到了国际先进水平”。为了使项目成果得到更好的推广和应用，项目组将主要成果总结出来，汇编成册，以供大家参考。

该项目是在环境保护部党组的高度重视和精心组织下完成的，各有关部门自始至终对项目开展给予了悉心的指导和有力的支持，项目组全体人员付出了辛勤的劳动，成果来之不易。今后要进一步加大对环境卫星系统发展和环境遥感关键技术研究的力度，在研究成果的应用上狠下工夫，加快天-地一体化环境监测预警体系建设的步伐，争取借助卫星遥感使环境监测迈上新台阶，为推动环境保护工作发生历史性转变、探索和实践环境保护新道路作出新的更大的贡献。

环境保护部部长 

2009年9月于北京

前 言

环境保护是我国的基本国策，是构建和谐社会的重要组成部分，关系到国家现代化建设的全局和中华民族的长远发展。环境监测是环境保护工作的基础，也是生态环境保护与管理工作的基本依据。长期以来，我国的环境监测手段还基本停留在常规阶段，已经无法满足国家生态环境监测管理新形势的需要，而随着空间技术的发展，大尺度、快速、海量信息的遥感技术已成为生态环境监测中一种重要的技术手段。遥感技术可实现从空中对地表环境的大面积、同步、连续监测，突破了以往地面环境监测的局限性，从根本上改变了传统环境监测的模式，卫星遥感技术与地面常规监测协同，构成先进的天-地一体化监测体系，全方位地提高了环境监测的能力和效率。在环境保护工作力度不断加大的过程中，卫星遥感技术在环境保护领域中应用的必要性和迫切性也越来越突出，发展我国专门用于环境监测的卫星系统已成为共识。为此早在 1998 年原国家环境保护总局就与国家减灾委员会共同提出了“环境与灾害监测预报小卫星星座系统”项目方案；2000 年向国务院上报了“关于环境与灾害监测预报小卫星星座的立项报告”；同年，原国防科学技术工业委员会（简称国防科工委）将“环境与灾害监测预报小卫星星座”列入民用航天“十五”计划和后十年规划思路中，并纳为《中国航天白皮书》民用卫星发展重点，且正式将“环境与灾害监测预报小卫星星座”命名为“环境一号卫星”（代号 HJ-1）；2002 年国务院正式同意“环境与灾害监测预报小卫星星座”立项；2003 年，原国防科工委、国家发展和改革委员会、财政部下发了《关于批准环境与灾害监测预报小卫星星座立项的通知》；2007 年《环境与灾害监测预报小卫星星座环境应用系统工程可行性研究报告》得到了国家发展和改革委员会的正式批复；2008 年 9 月，环境一号 A、B 星在太原卫星发射中心由长征二号丙运载火箭搭载成功发射；2009 年 3 月，国防科工委组织举行了卫星在轨交付仪式，正式将环境一号 A、B 卫星交付环境保护部和民政部两家业主使用。围绕环境一号卫星系统及环境应用系统的论证、建设和应用，国家环境保护总局在 1998 年提出建设环境一号卫星系统建议的同时，也启动了“环境一号卫星环境应用系统工程及其关键技术研究”这一具有综合性和集成性的重大科研项目，系统地开展了环境一号卫星系统需求分析、环境应用系统建设可行性研究、卫星应用数据标准研究、卫星图像处理与信息提取关键技术研究、基于环境一号卫星的大气环境遥感监测、水环境遥感监测和生态遥感监测关键技术研究、卫星应用技术流程和数据产品方案研究、卫星应用系统设计与开发、卫星应用业务示范研究、后续卫星论证等研究，攻克了一批急需的环境卫星遥感应用关键技术，形成了一套实用的环境遥感监测技术标准和技术规范，建立了一体化运行的环境一号卫星环境应用系统，完成了一系列重大业务应用示范。为了促进环境一号卫星和卫星遥感技术在环境保护领域中的应用，将历经 11 年科技攻关所完成的“环境一号卫星环境应用系统工程及其关键技术研究”成果整理成册，以期为环境保护及相关领域的工作人员和环境遥



感技术人员提供参考。

本书共分为9章，第1章为绪论；第2章为环境卫星遥感监测需求分析；第3章为环境一号卫星系统；第4章为环境一号卫星图像处理；第5章为基于环境一号卫星的地表水环境遥感监测方法；第6章为基于环境一号卫星的环境空气遥感监测方法；第7章为基于环境一号卫星的生态环境遥感监测方法；第8章为环境一号卫星数据标准与规范；第9章为环境一号卫星环境应用系统。

全书总编由王桥担任。其中第1~3章由王桥撰写；第4章由熊文成等撰写；第5章由吴传庆、朱利、姚延娟、张永军等撰写；第6章由厉青、王中挺、周春艳、张丽娟等撰写；第7章中基于环境一号卫星的土地生态分区、重要生态功能区遥感监测及应用实例由张峰等撰写，土地生态自动分类相关内容由申文明等撰写，土地生态分类系统相关内容由王文杰、罗海江等撰写，基于环境一号卫星的区域生态环境灾害遥感监测、生态建设区遥感监测、土壤退化遥感监测及应用实例相关内容由王昌佐、魏彦昌撰写，基于环境一号卫星的生态参数提取、大型工程与区域开发遥感监测、全球变化遥感监测及应用实例相关内容由万华伟、姚延娟等撰写，基于环境一号卫星的全国生态环境遥感监测、城市生态遥感监测及应用实例相关内容由李静、杨丙丰等撰写，基于环境一号卫星的生态交错带遥感监测及应用实例相关内容由刘晓曼等撰写；第8章由申文明撰写；第9章中环境一号卫星环境应用系统总体设计与开发相关内容主要由魏斌撰写，环境一号卫星环境应用系统实现及应用举例相关内容由游代安撰写，环境一号卫星数据库及数据管理与数据服务系统相关内容由申文明撰写，环境一号卫星环境应用系统集成、计算机支撑系统及应用实例相关内容由孙中平撰写；本书资料处理等工作主要由杨一鹏、杨海军、张永军、杨丙丰、李营等承担；全书最后由王桥、王昌佐统稿，王桥定稿。

本书为重大综合性研究项目“环境一号卫星环境应用系统工程及其关键技术研究”的主要成果展示。由原国防科工委“环境一号小卫星星座应用关键技术研究”（科工计[2004]186号）、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）、国家发改委“环境与灾害监测预报小卫星星座环境应用系统工程”（发改高技[2007]2989号）等项目资助。

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！同时也对参加“环境一号卫星环境应用系统工程及其关键技术研究”项目的合作单位的技术人员表示衷心的感谢！中国科学院遥感应用研究所、中国科学院地理科学与资源研究所、南京师范大学、中国资源卫星应用中心、航天东方红卫星有限公司、中国科学院对地观测与数字地球科学中心、中国航天科技集团公司第五研究院503所、中国科学院大气物理研究所、中国环境监测总站、江苏省环境监测中心站、北京市环境监测中心站、新疆环境监测中心站、辽宁省环境监测中心站、重庆市环境监测中心站、四川省环境监测中心站、云南省环境监测中心站、内蒙古环境监测中心站、舟山海洋生态环境监测站等合作单位为本书的编写提供了大量的帮助。特别感谢环境保护部科技标准司赵英民司长、刘志全副司长、高吉喜副司长、禹军处长、王泽林处长；环境保护部环境监测司魏山峰司长、刘舒生处长；国家发展改革委员会

高新技术司任志武副司长、肖晶副调研员；国家国防科技工业局孙家栋院士、王希季院士、郭宝柱总师、赵文波主任、李国平处长、高军副处长；中国环境监测总站魏复盛院士、罗毅站长、李国刚副站长；中国环境科学研究院孟伟院士、刘鸿亮院士、任阵海院士、郑丙辉副院长；中国航天科技集团公司李明副院长、代守伦总裁；航天东方红卫星有限公司葛玉君总经理、白照广总师、张润宁总师、沈中副总师、王肇宇副总师；中国科学院遥感应用研究所童庆禧院士、李小文院士、顾兴发所长、王晋年副所长、陈良富研究员、尹球研究员、苏林研究员、余涛研究员、柳钦火研究员、陶金花副研究员、许华副研究员；南京师范大学闻国年教授、黄家柱教授、李云梅教授、韦玉春教授、吕恒副教授；中国科学院对地观测与数字地球科学中心张兵副主任、李俊生副研究员；中国科学院地理科学与资源研究所孙九林院士、刘纪远所长、庄大方主任、江东研究员、徐新良研究员；中国资源卫星应用中心郭建宁主任、于晋副主任、闵祥军副主任；国家减灾中心方志勇副主任、范一大总工、杨思全高工；中国航天科技集团第五研究院 503 所李季林副所长、徐京主任、李玲芝研究员；中国科学院大气物理研究所张美根研究员；国家卫星气象中心张兴赢研究员、王维和研究员、黄富祥研究员；吉威数源信息技术有限公司张杨总裁、刘海军副总经理、王卫京高工；太极计算机股份有限公司吕灏总经理；华迪计算机有限公司杨海峰总经理、徐军总工、王宇翔高工等。他们为环境一号卫星及应用系统的建设、应用及相关研究作出了不可缺少的重要贡献。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。

由于环境卫星遥感在我国尚处于起步阶段，本书所涉及的内容不少都属初次探索，不足之处在所难免，恳请专家学者和读者批评指正。

作 者

2009 年 11 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 环境遥感及其进展	1
1.2 环境一号卫星及其环境应用系统工程	7
1.3 基于环境一号卫星的环境遥感关键技术研究	9
第 2 章 环境卫星遥感监测需求分析	15
2.1 概述	15
2.2 环境遥感监测业务需求	15
2.3 环境遥感监测技术需求	17
2.4 现阶段环境卫星系统建设需求	18
2.5 环境卫星系统发展需求	23
2.6 环境卫星应用系统建设需求	24
第 3 章 环境一号卫星系统	28
3.1 研制背景	28
3.2 环境一号卫星系统总体	28
3.3 环境一号卫星有效载荷	34
3.4 环境一号 A、B 星各有效载荷绝对辐射定标	41
3.5 环境一号卫星数据格式与基本参数	46
3.6 环境一号卫星数据质量分析	60
3.7 环境一号卫星应用特征分析	68
第 4 章 环境一号卫星图像处理	84
4.1 环境一号卫星图像处理总体流程	84
4.2 环境一号卫星辐射定标与辐射校正	85
4.3 环境一号卫星影像几何校正	89
4.4 环境一号卫星影像镶嵌	92
4.5 环境一号卫星影像融合	94
4.6 环境一号卫星影像云检测与薄云去除	97
4.7 环境一号卫星影像变化检测	101
4.8 环境一号卫星影像分类	103
4.9 环境一号卫星影像其他处理	110
4.10 环境一号卫星专题图制作	111



4.11	环境一号卫星图像处理举例	111
第5章	基于环境一号卫星的地表水环境遥感监测方法	125
5.1	概述	125
5.2	基于环境一号卫星的地表水环境遥感地面实验	132
5.3	主要水质遥感监测指标光谱特征分析	144
5.4	基于环境一号卫星的地表水环境遥感监测指标体系	159
5.5	基于环境一号卫星的地表水环境遥感监测方法研究	166
5.6	基于环境一号卫星的地表水环境遥感生物光学模型	255
5.7	环境一号卫星地表水环境遥感数据产品	264
第6章	基于环境一号卫星的环境空气遥感监测方法	269
6.1	概述	269
6.2	环境空气遥感光谱特征分析	272
6.3	环境空气遥感监测地面光谱特性测量与数据处理	277
6.4	基于环境一号卫星的环境空气遥感监测指标体系	292
6.5	基于环境一号卫星的环境空气遥感监测总体技术方案	300
6.6	基于环境一号卫星的环境空气遥感监测方法研究	304
6.7	环境一号卫星环境空气遥感监测数据产品	376
第7章	基于环境一号卫星的生态环境遥感监测方法	391
7.1	概述	391
7.2	基于环境一号卫星的生态环境遥感监测总体方案	395
7.3	土地生态分类	398
7.4	基于环境一号卫星的生态遥感参数定量提取方法	416
7.5	基于环境一号卫星的全国生态质量遥感监测与评价	451
7.6	基于环境一号卫星的生态交错带遥感监测与评价	461
7.7	基于环境一号卫星的城市生态遥感监测与评价	471
7.8	基于环境一号卫星的国家级自然保护区遥感监测与评价	481
7.9	基于环境一号卫星的大型工程与区域开发遥感监测与评价	496
7.10	基于环境一号卫星的生态建设区遥感监测与评价	516
7.11	基于环境一号卫星的重要生态服务功能区遥感监测与评价	534
7.12	基于环境一号卫星的区域生态环境灾害遥感监测与评价	558
7.13	基于环境一号卫星的土壤退化遥感监测与评价	572
7.14	基于环境一号卫星的全球变化遥感监测与评价方法	580
7.15	环境一号卫星生态环境遥感监测数据产品	588
第8章	环境一号卫星数据标准与规范	605
8.1	概述	605
8.2	环境遥感应用数据标准规范	607
8.3	环境遥感应用数据产品规范	624
8.4	环境一号卫星数据库技术规范	627

第9章 环境一号卫星环境应用系统	636
9.1 概述	636
9.2 环境应用系统总体概况	636
9.3 业务运行管理分系统	646
9.4 数据管理与用户服务分系统	653
9.5 图像处理与专题产品生产分系统	663
9.6 地表水环境遥感应用分系统	678
9.7 环境空气遥感应用分系统	693
9.8 生态遥感应用分系统	705
9.9 计算机支撑分系统	722
参考文献	736

第 1 章 绪 论

1.1 环境遥感及其进展

1.1.1 环境遥感

环境遥感是指利用卫星平台上的光学、微波和电子光学遥感仪器从高空接收被测环境物体反射或辐射的电磁波信息，并加工处理成能识别和揭示环境现象物理属性、形状特征和动态变化信息的科学技术。其主要任务是利用卫星遥感手段提供全球或局部地区的环境遥感图像，从而获取地球各种环境要素的定量信息数据。“环境遥感”一词于 1962 年开始在国际科技文献中出现。1964 年，美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）、国家科学院和海军海洋局联合发起举行“空间地理学”的专题讨论会，讨论如何从空间研究地球环境，提出一个以地球为目标的空间观测规划；1964 年 10 月，一架装有微波辐射仪、摄影测量照相机、多光谱照相机、紫外照相机、红外扫描仪、多普勒雷达等遥感仪器的遥感飞机投入使用；1967 年，在美国国家航空航天局主持下制订地球资源和环境观测计划，并制成“地球资源技术卫星（后改称陆地卫星）”；1972 年，美国发射了首颗地球资源技术卫星 ERST-1 (Landsat-1)。之后环境遥感技术得到了不断的发展，卫星所携带的遥感仪器种类越来越多，波段覆盖了紫外、可见光、红外、微波波段，地面分辨率由千米级发展到米级，波谱分辨率由几百纳米发展到几个纳米。随着环境遥感技术的发展，逐渐出现了对大气、陆地、海洋环境及其动态变化进行监测的环境卫星系列。环境卫星的飞行轨道一般有两种：一种是近极地太阳同步圆形轨道，轨道尽可能靠近极地并呈圆形，能保证在同一地方时经过观测点上空，以便具有相同的照明条件和足够的太阳辐射能量，较好地获得全球环境图像；另一种是地球同步圆形轨道，卫星在地球赤道平面内沿圆形轨道运行，运行方向和地球自转方向相同，绕地球一周时间为 24h，与地球自转同步。这种卫星相对静止在地球赤道上空的一个点上，对大面积地球环境进行连续监测。环境卫星对环境污染的监测可做到大面积同步，每隔一定时段对地面重复成像，进行连续监测，掌握环境污染的动态变化，预报污染发展趋势。随着全球性环境问题的日益突出，环境卫星遥感已受到国际上的高度重视，美国、法国、日本等发达国家已发射了各种环境卫星，对地球环境进行全面观测。目前环境遥感技术的进展主要体现在大型水体环境遥感、区域大气环境遥感和宏观生态环境遥感三大方面上。

大型水体环境遥感始于 20 世纪 70 年代海洋水色卫星的发射，1978 年美国国家航空航天局发射了雨云-7 号 (Nimbus-7) 卫星，装载了海岸带水色扫描仪 (CZCS)，每 36h 的观



测面覆盖全球海洋面积达 95%；20 世纪的最后 5 年，美国、日本、印度、韩国等竞相发射海洋水色卫星，这些卫星上装载的传感器有美国的 CZCS、SeaWiFS、TERRA-MODIS、AQUA-MODIS、MISR，欧洲太空局的 MERIS，法国的 POLDER，德国和印度的 MOS、OCM，日本的 OCTS、GLI，韩国的 OSMI，阿根廷的 MMRS 等，能够连续、长期而且快速地观测海洋环境状况，从所得图像上可识别出浮游生物富集区、赤潮、海上油污、海洋表面水温、洋流移动、各种由自然和人为原因造成的混浊流、倾倒的垃圾污物、河口地区及沿海地带的环境特征等，监测指标包括叶绿素 a、悬浮物、水温等。其中具有代表性的是 1997 年美国发射的 SeaStar 海洋观测卫星，其主要传感器为 SeaWiFS（海洋观测宽视场传感器），可用于确定海洋浮游生物繁殖的空间和时间分布、全球尺度上的海洋浮游生物生产力规模和变化情况探测、海洋在全球碳循环和其他生物化学循环中作用的量化分析、河流滋养海洋结果调查、全球海洋光学特性数据、叶绿素数据获取等。除 SeaWiFS、MODIS、MERIS 和 GLI 等中等分辨率成像光谱仪外，其他海洋水色卫星的空间分辨率普遍偏低，通常还使用空间分辨率较高的陆地卫星系列，如美国的 Landsat/MSS/TM 系列，NOAA/AVHRR 系列，法国 SPOT/HRV 系列，欧洲太空局的 ENVISAT/MERIS，日本的 ADEOS/GLI，印度的 IRS/OCM 系列等卫星，还有高光谱卫星，如美国的 EO-1/HYPERION、EOS-TERRA&AQUA/MODIS、ENVISAT/MERIS 等，它们都被用于实际水环境的遥感监测。我国从 1988 年起先后发射了 FY1A、FY1B、FY1C、FY1D 等气象卫星，其辐射计都配置有专用海洋水色遥感通道；我国台湾省于 1999 年发射了 ROCSAT-1 号卫星，安装了专用海洋水色成像仪 OCI。2001 年我国发射了专门的海洋水色卫星 HY1A，卫星上安装了两个海洋可见光传感器：海洋水色水温扫描仪 COCTS 和海岸带成像仪 CZI。

在区域大气环境遥感方面，由于卫星遥感监测大气环境污染的优势，利用卫星遥感监测大气环境的技术得到了较快的发展，自 20 世纪 70 年代开始到现在，欧美等发达国家在使用卫星遥感技术监测大气气溶胶、颗粒物（TSP、PM₁₀）与沙尘暴、臭氧（O₃）、二氧化硫（SO₂）、二氧化氮（NO₂）、二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）等方面取得了显著进展，其中对大气气溶胶、臭氧、沙尘暴等的监测已经基本达到业务化应用程度。经过多年的努力，国际上已发展了大量用于大气环境监测的卫星传感器，主要有美国的 NOAA/AVHRR、EOS-TERRA、AQUA/MODIS、TERRA/MOPITT，欧洲太空局的 ENVISAT/SCIAMACHY、ERS-2/GOME、METOP-1/GOME-2，日本的 ADEOS-2/TOMS&TOVS 等。其中用于探测气溶胶光学厚度的有装载于 EOS-TERRA 和 EOS-AQUA 平台上的 MODIS 传感器、ERBS 平台上的 SAGE-2 传感器，此外还有 GOES、TOMS 等传感器；用于探测臭氧的有装载于 NASA 的 TOMS 传感器、装载于 NOAA 上的 TOVS 传感器、装载于 ERS-2 上的 GOME 传感器、装载于 METOP-1 上的 GOME-2 传感器等；用于探测二氧化碳和甲烷的有装载于 EOS-TERRA 上的 MOPITT 传感器；用于探测二氧化硫、二氧化氮等气体的有 SCIAMACHY 传感器等。其中美国的 TERRA 卫星上携带的对流层污染测量传感器 MOPITT 可以实现对研究区域上空某一高度一氧化碳的浓度分布和由于物质燃烧释放的一氧化碳浓度分布的探测；美国的 TERRA 和 AQUA 卫星上携带的 MODIS 传感器、OrbView-2 卫星上的 SeaWiFS 传感器可以实现对大气污染事件的监测，如对由于烟雾、霾、火灾、沙尘、火山喷发等引起的污染现象的监测；TERRA 卫星上的 MISR 传感器可以实现对大气雾和霾、大气颗粒物的监测；CERES 传感器可实现对大气气溶胶的辐射影响效应的监测；ASTER 可以实现对

火灾、烟雾、火山喷发、大型火电站的监测；TRMM 卫星的可见光和红外扫描仪（VIRS）传感器也可以对由火灾形成的烟雾进行监测。

在宏观生态环境遥感方面，遥感技术已成为国际生态环境领域中最为主流的技术之一，并得到了广泛的应用，且在土地利用/土地覆盖分类、生物物理参数信息提取（如植被指数、叶面积指数、蒸散量、初级生产力、地表反照率、陆地表面温度等）、生态环境质量动态监测和评价、宏观生态系统状况调查和评估等方面已经取得了长足的进展。目前，生态环境卫星遥感监测常用的卫星主要有美国的 Landsat/TM 系列、法国的 SPOT 系列、美国的 EOS 系列、日本的 ADEOS 系列、印度的 IRS 系列、中巴资源卫星 CBERS 系列及美国的 EO-1/ALI 高光谱卫星等。Landsat-7 于 1999 年发射，其传感器中设置的 15m 分辨率的全光谱段和 60m 分辨率的热红外波段，可广泛用于水穿透、叶绿素吸收、测深、植被类型区分、比较绿反射、健康植被的峰值、植物活力估计、湿度含量、氢氧离子吸收、植物热应力、薄云穿透等探测。SPOT-4 于 1998 年发射，主要传感器有用于陆地、海洋、植被和冰雪探测的 HRVIR（高分辨可见光和红外传感器）及用于植物水分、植物状况等探测的植被探测器。EOS 是美国对全球陆地、海洋和大气进行综合观测的大型遥感卫星系统，主要传感器有用于土地使用状况、植被、地质和土壤特性、地形地貌、地表温度、发射率和反射率、海洋温度和冰川特性等探测的 ASTER（先进星载热发射及反射辐射计）；用于气象与海面温度变化的关系、大气、云吸收、太阳能的加热过程和地表反照率对气候的影响的定量研究的 CERES（云与地球辐射能量系统）；用于全球生态和物理过程、陆地和海洋表面温度、反照率、海洋水色（沉积物和浮游植物）、沙漠化、植被、雪和冰覆盖、洋流、云层特征和气溶胶等探测的 MODIS（中分辨率成像光谱仪）；用于云、气溶胶和地表的反射辐射特性的 9 种不同角度地球图像获取的 MISR（多角成像光谱辐射计）；用于对流层中一氧化碳和甲烷的测量的 MOPITT（对流层污染测量仪）；用于大气湿度和水汽、陆地和海面温度、云分布及其光谱特征和大气的长波辐射测量的 AIRS/AMSU/MHS（大气红外探测器/先进微波探测装置/微波湿度探测器）；用于陆地和海上降水率、海面温度、海面粗糙度、海面上空云量和大气的总水汽含量、雪和冰盖及土壤湿度和植被特性测量的 MIMR（多频成像微波辐射计）；用于海洋水色和海洋生产率测量的 SeaWiFS；用于平流层和对流层中的气溶胶、水汽、臭氧、二氧化碳、一氧化碳、二氧化氮等的全球剖面数据测量的 SAGE-III（平流层气溶胶气体实验-III）；用于海洋潮汐、海洋重力场、波高、海面风速测量的 ALT（高度计）；用于冰川和冰层形状、海冰粗糙度、雪盖、云高和大气悬浮微粒的大小测量的 GLRS-A（地球科学激光测距系统-高度计）；用于全球测地、大气温度和重力波等数据获取的 GGI（GPS 地球科学仪）；用于不冻海面上风向和风速测量的 STIK-SCAT（饱和散射计）；用于地表至平流层底层气体三维剖面数据测量、对流层中臭氧及其化学反应物数据获取的 TES（对流层发射光谱计）；用于全球温度、水汽、平流层和对流层中化学成分的高垂直分辨率和高水平分辨率数据测量的 HIRDLS（高分辨率动态分层探测仪）。日本的 ADEOS-2 于 2002 年发射，主要用于陆地、海洋和大气过程的全球观测，主要传感器有用于海洋水色与海洋温度测量、海洋与大气的相互作用及环境状态观测的 OCTS（海洋水色与温度扫描仪）；用于陆地、海岸带、沙漠化、热带雨林破坏、土地利用、资源开发探测的 AVNIR（先进的可见光/红外辐射仪）；用于全球海面海风和风向测量的 NSCAT（美国散射计）；用于臭氧和二氧化硫的浓度和分布观测的 TOMS（总臭氧测



绘光谱仪)；用于大气反射的太阳辐射双向性和极化、对流层的气溶胶、海洋水色、地表和地球辐射收支等探测的 POLDER (地球反射的极化和方向性探测仪)；用于温室效应气体(甲烷、一氧化二氮)的浓度分布、地球辐射收支、大气温度廓线、地表温度和云的物理特性等探测的 IMG (温室效应气体干涉监测仪)；用于高纬度地区临边大气微量成分(臭氧、水汽、二氧化碳、甲烷、二氧化氮、一氧化二氮、硝酸)、气溶胶、大气密度和温度的垂直廓线测量的 ILAS (改进型临边大气分光计)；用于臭氧、碳氟化合物、一氧化氮等测量的 RIS (空间后向反射仪)。

1.1.2 环境遥感应应用

环境遥感应应用主要指利用环境遥感技术进行的各种生态环境监测、分析、评估、预警，以及各种环境遥感数据产品的加工、生产、分发和利用。随着国际性环境问题的日益突出，环境遥感应应用的重要性也越来越明显，世界上任何一个掌握卫星遥感技术的国家都无一例外地把环境遥感应应用作为其卫星应用的重点来对待。由此，不但促进了环境遥感技术的发展，而且也促进了环境遥感应应用理论与方法的实用化。目前环境遥感应应用及其进展主要体现在地表水体环境遥感应应用、区域大气环境遥感应应用和宏观生态环境遥感应应用三大方面上。

在地表水环境遥感应应用方面，已从最初单纯的水域识别逐渐发展到对水质指标进行遥感监测、制图和预测。随着对物质光谱特征研究的深入、算法的改进及传感器技术的不断进步，遥感监测水质从定性发展到定量，通常监测的水质指标包括悬浮物含量、水体透明度、叶绿素 a 浓度、溶解性有机物、水中入射与出射光的垂直衰减系数及一些综合污染指标(如营养状态指数等)。总的来看，《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)规定的 24 个水质指标基本项目中，只有部分指标可以用遥感技术监测，研究和应用中比较成熟的是水体中悬浮物质和叶绿素 a 浓度的提取。内陆水体中与浮游植物、悬浮物、CDOM 等三类污染物物质相关的可遥感监测的水质指标大致有叶绿素 a (Chl-a)、悬浮物(SS)、CDOM、水温、混浊度、透明度(SD)、总有机碳(TOC)、溶解性有机碳(DOC)、溶解氧(DO)、化学耗氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD₅)、总氮(TN)、总磷(TP)等，在这些指标中，除了部分指标(如 Chl-a、SS、水温等)可以通过光谱特征进行直接遥感分析外，其他指标较难找到独立的光谱特征，需要利用不同物质之间的相关关系，通过相关方法进行间接遥感分析。早期水环境遥感主要集中在 I 类水体(最为典型的是大洋开阔水体)水色、水体温度和海洋浮游植物的监测，经过二十多年的研究，采用遥感数据、同步地面水质谱波测量数据、实验室水质分析数据进行统计分析，建立大量的经验和半经验水质反演模型。例如，Lathrop 等对美国密歇根湖和格林湾的水环境进行了一系列的遥感研究，估测了包括 Chl-a 浓度、悬浮物浓度、透明度等在内的多项指标，取得了较理想的结果；Lillesand 等发现美国明尼苏达湖的 Landsat TM 卫星数据与营养状况指数有良好的相关关系，并得出了可以通过遥感数据评价湖泊营养状况的结论；王建平等利用 Landsat TM 影像建立了湖泊水色反演的人工神经网络模型，反演了鄱阳湖中的悬浮物、COD_{Mn}、溶解氧、总磷、总氮和叶绿素浓度；中国环境科学研究院、上海物理所、北京大学等利用美国陆地卫星 TM 数据分别在滇池、太湖对其富营养化状况进行了监测研究，建

立了叶绿素分布的遥感监测经验模型；李旭文利用 TM 数据和同期水质监测资料，建立了苏州河水水质遥感回归反演模型，得到苏州地区水质空间分布；平仲良以渤海湾西北部海河、永定河河口的陆地卫星数据作主成分分析，以显示不同的污染等级；王学军通过 TM 和实测数据建立回归模型进行太湖水质遥感监测；Li 等分析了广东河口海岸带污水中不同 COD 和油含量的光谱特征。

在区域大气环境遥感应用方面，针对上述监测不同气体的各种传感器，国际上已发展了大气污染中不同指标的遥感监测算法，例如，对于气溶胶光学厚度反演有用于 AVHRR 传感器及用于 GOES、Meteosat 等静止气象卫星可见光通道的单通道法；用于 MODIS、MERIS 等传感器的多通道法；用于 POLDER、MISR 等传感器的多角度多通道法；用于 POLDER 传感器的极化方法；用于 TM、MODIS 等传感器的浓密植被法、对比算法等；臭氧监测的算法有用于 OMI、GOME 传感器的 DOAS 算法，针对 TOMS 传感器的 TOMS V8 算法等；甲烷监测的算法有用于 MOPITT 传感器的最大似然法等。我国大气环境遥感监测技术应用开展较晚，尤其是微量气体的探测，现在仅仅是开展了一些探索性的工作，监测方法往往是以地面采样的分析结果作为参照量，与遥感图像相结合进行相关分析。例如，进行津渤环境遥感试验时，曾利用遥感图像上呈现的树冠影像的色调和大小差异，圈定了二氧化硫和酸气、氟化氢等典型污染场。对于气溶胶的遥感探测，我国的科研工作者做了大量的工作。气溶胶粒子对入射辐射的散射和吸收作用可以使入射辐射的性质和强度发生变化，通过测量入射辐射的变化可以反演气溶胶粒子特性。气溶胶遥感主要分地基遥感和卫星遥感两部分。目前国内开展的地基遥感方法主要有太阳直接辐射的宽带分光辐射遥感、多波段光度计遥感、天空散射亮度分布遥感、全波段太阳直接辐射遥感、华盖计遥感及激光雷达遥感等。我国科学家从 20 世纪 80 年代中期开始开展卫星遥感气溶胶的工作，1986 年赵柏林等利用 NOAA-AVHRR 资料，进行了遥感海上大气气溶胶的研究；周明煜等利用 NOAA-AVHRR 资料遥感了 1993 年 4 月北京、天津上空沙尘暴特性；刘莉利用 GMS-5 可见光通道研究了遥感湖面上空气溶胶光学厚度的方法及其可行性；韩志刚利用 ADEOS 上辐射偏振探测器的资料进行了遥感草地上空气溶胶的实验研究；邓孺孺等从基本地物划分出发，建立了基于地表模型的气溶胶光学厚度反演算法；仲波等针对稀疏植被区域，探索了新的气溶胶光学厚度反演算法。总的来说，我国的科研工作者已对卫星遥感大气环境进行了有益的探索，但相对于国际上在这个领域的研究工作来说，我们还需要加大研究力度，发挥卫星遥感的优势，此外还要注意利用新的探测器（如 POLDER、OMI 等）来研究大气环境。

在宏观生态环境遥感应用方面，利用多源遥感信息进行土地生态分类，并在此基础上进行区域生态环境监测与评价是遥感技术在生态监测中最为基本的应用。20 世纪 80 年代以来，美国国家环境保护局就联合多个部门开展了多尺度土地覆盖遥感调查，建立了以 Landsat TM/ETM⁺ 为信息源的国家级一、二级分类的土地覆盖数据库，并实现以 5 年左右为周期的动态更新。与此同时，美国国家环境保护局还启动了环境监测与评估计划，通过监测不同时间、空间尺度上的生态资源来预测国家生态资源开发与管理中的未来风险，并对国家生态资源的现状与趋势进行评估，其中与美国地质勘探局合作开展的区域景观生态监测项目以美国陆地资源卫星为主要数据源，通过对不同生态区域构建多时相、地理时空信息融合的土地利用/土地覆盖自动提取模型，实现了国家层次的景观生态分类与建库工



作,取得了较好的效果。通过环境监测与评估计划的实施对美国境内的森林、草原、水环境、农业、湿地等各种生态资源的现状、变化与趋势进行了全面评估,探求了环境变化与人为压力、自然干扰之间的潜在关系;美国科学界还组织大批科学家对美国农田、森林、草地、淡水、海洋与海岸带、城区等6类生态系统进行了全面评估,并于2003年正式发布了第一份美国“国家生态系统状况报告”,内容包括系统规模、物理与化学状况、生物组成、人类利用等方面,并绘制成空间分布图或随时间变化的趋势图,该报告为引导政府和公众对生态系统的认识发挥了巨大作用,标志着美国对生态系统状况的评估已进入规范化阶段;在区域生态遥感监测日常运行中,美国地质勘探局、美国农业部等部门合作开展的GAP项目,也是利用多分辨率、多时相遥感信息进行区域生物多样性规划、恢复与保护的成功案例。该计划利用不同尺度的卫星遥感数据对植被、土地覆盖进行分类,以掌握不同植被类型的分布及景观状况,在此基础上调查保护对象的分布、影响因子并形成空间制图,并建立地理信息系统数据层,对土地管理者、所有者及政策进行评估,评价物种保护区域、物种分布及区域土地管理之间的关系,评估物种多样性保护长期趋势;澳大利亚环境部制定了国家环境状况的核心指标,于1996~2006年发布了三份综合评估报告,实现了国家生态状况评估的规范化。此外,联合国于2001年6月启动了千年生态系统评估项目,其主评估报告在2005年发布,该项研究以生态系统与人类福祉为核心,首次在全球尺度上系统、全面地揭示了各类生态系统的现状和变化趋势、未来变化的情景和应采取的对策,在国际社会产生了重要影响。我国生态环境遥感监测技术起步相对较晚,但在土地利用/土地覆盖分类、生态环境质量动态监测和评价、大尺度生态系统状况评估、生物物理参数信息提取等方面基本跟上了国际发展的步伐。早在20世纪90年代初,中国科学院就开展了京津唐地区生态环境遥感综合应用示范研究;另具代表性的工作是1994~1996年全国沙漠、戈壁及沙化土地现状进行调查,使用了1993年和1994年216景TM卫星影像和81景MSS卫星影像,并在合成的1:10万和1:20万彩色影像图上进行了沙漠化要素调绘和现场验证。首次系统、全面地采用遥感技术进行生态环境监测与评估工作始于1999~2002年国家环境保护总局开展的对中国西部地区和中东部地区生态环境现状的调查,它通过采用美国的Landsat/TM系列、法国的SPOT/HRV系列、中巴资源卫星CBERS系列等多源遥感数据进行土地生态分类、水土流失监测,以景观生态学的方法进行生态系统健康评估,并在一些典型的生态区/流域开展了区域生态评估与脆弱性分析,取得了较好的成效。另外,津渤环境遥感试验、天津市、酒泉市、昆明市的多级多时相城市遥感监测、大兴安岭森林面积和蓄积量估算等工作也具有一定的代表性。

1.1.3 发展趋势

目前在轨运行的和正在计划发展的国内外卫星传感器所能提供数据的空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率越来越高,空间分辨率已从千米级发展到亚米级(如2007年9月发射的世界观察-1商用卫星的空间分辨率已达0.45m;2008年发射的地球之眼-1卫星的空间分辨率已达0.41m;美国已经颁发了0.25m空间分辨率的商业卫星许可证);重复观测频率从月周期发展到几小时;光谱波段跨越了可见光、红外和微波,光谱分辨率从多波段发展到高光谱、超光谱,分辨率已达纳米级;遥感数据获取技术正迅速走向实时化、精