

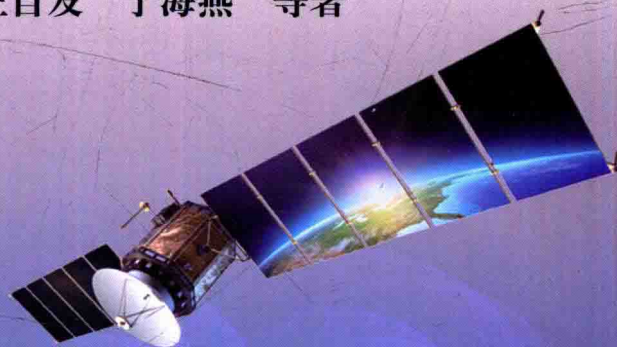
PM_{2.5} 卫星

遥感技术及其应用

PM_{2.5} MONITORING TECHNOLOGY AND
APPLICATION USING SATELLITE REMOTE SENSING

SATELLITE REMOTE SENSING

王桥 厉青 高健 王自发 于海燕 等著



中国环境出版社

PM_{2.5} 卫星遥感技术及其应用

王 桥 厉 青 高 健 王自发 于海燕 等 著

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

PM_{2.5} 卫星遥感技术及其应用/王桥等著. —北京: 中国环境出版社, 2017.10

ISBN 978-7-5111-2908-6

I. ①P… II. ①王… III. ①卫星遥感—应用—可吸入颗粒物—空气污染监测 IV. ①X831

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 220410 号

出 版 人 王新程
责任编辑 殷玉婷
责任校对 尹 芳
封面设计 彭 杉

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司印刷
经 销 各地新华书店
版 次 2017 年 10 月第 1 版
印 次 2017 年 10 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 19.25
字 数 450 千字
定 价 120.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

目前随着工业化与城市化进程的高速推进,我国大气污染形势严峻,呈现出煤烟型与氧化型污染共存、局地污染与区域污染相叠加、污染物之间相互耦合的复合型大气污染特征。我国政府高度重视大气环境污染的综合防治,《国务院关于落实科学发展观 加强环境保护的决定》提出要“建立先进的环境监测体系,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”,加强大气污染防治,特别是针对当前突出的 $PM_{2.5}$ 污染进行综合治理,是我国环境保护中长期科技发展的重要战略需求。准确获取大气颗粒物的时空分布、动态变化、来源及传输路径等信息,成为评估大气污染状况、制定科学防控政策的重要保障。遥感技术由于其宏观、快速、准确的显著特点可以用来弥补传统监测方法的缺陷,能够在不同尺度上反映 $PM_{2.5}$ 的宏观分布趋势、源汇分布和传输路径,既可以从宏观上获取大气环境状况,为环境保护部门提供决策依据,也可以快速跟踪和动态监测突发灰霾污染事件的发展,及时制定处理措施,减少污染造成的损失。近年来,卫星遥感被广泛用于大气气溶胶颗粒物监测,为颗粒物污染的全方位立体监测提供了重要的信息来源,在节约了大量人力、物力的前提下,与常规地面监测手段互为补充,对空气质量预报与相关政策的制定有着巨大的应用价值。

全书共分 6 章,由王桥、厉青担任主编。第 1 章介绍 $PM_{2.5}$ 卫星监测技术应用及其国内外研究进展,由王桥、厉青、陈辉、张玉环、马鹏飞、陈翠红、程斌等撰写完成;第 2 章介绍了我国中东部地区的 $PM_{2.5}$ 污染时空分布特征及分区方法技术,由高健、张岳肿、周春艳、陈辉等撰写完成;第 3 章介绍了 $PM_{2.5}$ 卫星遥感监测模型的关键参量订正技术,由王自发、杨婷、王中挺、唐家奎、李莘莘、毛慧琴、张玉环等撰写完成;第 4 章介绍了中东部地区的 $PM_{2.5}$ 高精度

卫星遥感反演方法, 由陈辉、吕宁、唐家奎、唐晓、陈翠红等撰写完成; 第 5 章介绍了中东部地区 PM_{2.5} 遥感监测系统研发和业务应用示范成果, 由张丽娟、马鹏飞、陈辉、于海燕、张自力、陶金花、夏石明等撰写完成; 第 6 章介绍了 PM_{2.5} 卫星遥感分区监测技术与规范研究方法, 由毛慧琴、厉青、陈辉、马鹏飞、张丽娟等撰写完成。全书由厉青、王中挺、陈辉、张丽娟、毛慧琴、周春艳、张玉环、陈翠红、马鹏飞统稿, 王桥、厉青定稿。

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! 同时对参加环保公益行业科研专项“我国中东部地区 PM_{2.5} 遥感监测关键技术及业务化运行方法研究”项目的合作及参与单位, 包括中国环境科学研究院、中国科学院大气物理研究所、浙江省环境监测中心、中国科学院遥感与数字地球研究所、中国科学院地理科学与资源研究所以及中国科学院大学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 PM_{2.5} 卫星遥感监测技术在我国尚处于起步和发展阶段, 本书所涉及的很多内容都属于初次探索, 不足之处恳请专家和广大读者批评指正。

编 者

2016 年 5 月于北京

目 录

第 1 章 国内外 PM _{2.5} 卫星遥感监测技术研究进展	1
1.1 PM _{2.5} 介绍	1
1.1.1 基本情况	1
1.1.2 PM _{2.5} 形成机理与来源	2
1.1.3 PM _{2.5} 监测	3
1.2 PM _{2.5} 监测卫星及传感器发展现状	4
1.2.1 国外 PM _{2.5} 卫星及传感器发展现状	4
1.2.2 国内 PM _{2.5} 卫星及传感器发展现状	12
1.3 国内外 PM _{2.5} 卫星遥感监测技术及应用现状	20
1.3.1 国内外 PM _{2.5} 卫星遥感监测技术	20
1.3.2 国内外 PM _{2.5} 卫星遥感业务应用监测现状	26
1.4 PM _{2.5} 卫星遥感监测技术及应用发展趋势	27
1.4.1 PM _{2.5} 卫星遥感监测手段发展趋势	27
1.4.2 PM _{2.5} 卫星遥感监测方法发展趋势	29
1.4.3 PM _{2.5} 卫星遥感监测内容发展趋势	30
1.4.4 PM _{2.5} 卫星遥感监测应用发展趋势	31
参考文献	31
第 2 章 PM _{2.5} 区域时空分布特征分析及面向区域 PM _{2.5} 卫星监测的分区方法研究	36
2.1 概述	36
2.2 PM _{2.5} 区域分布特征分析	36
2.2.1 PM _{2.5} 区域分布情况	36
2.2.2 典型地区 PM _{2.5} 强化观测	39
2.3 分区技术研究	62
2.3.1 技术路线	62
2.3.2 聚类分区方法	63
2.3.3 EOF 分区方法	66
2.3.4 SVD 分区方法	78

参考文献	84
第3章 PM _{2.5} 卫星遥感监测关键参量获取技术研究	86
3.1 概述	86
3.2 PM _{2.5} 卫星监测关键参量获取方法	86
3.2.1 基于暗目标法从 GF-1 星 WFV 数据反演 AOD	86
3.2.2 基于可见光波段反射率比值统计关系从 MODIS 数据反演 AOD	95
3.2.3 基于 MODIS 地表反射率产品从 HJ-1 星 CCD 数据反演 AOD	113
3.2.4 基于深蓝算法从 HJ-1 星 CCD 数据反演 AOD	130
3.2.5 基于多时相协同方法从 MODIS 数据反演 AOD	139
3.2.6 基于 BRDF 和大气化学模式从 MODIS 数据反演 AOD	146
3.2.7 气溶胶光学厚度实时反馈订正方法	155
3.2.8 PM _{2.5} 垂直订正、湿度订正关键参数的高精度模拟方法研究	162
参考文献	172
第4章 PM _{2.5} 卫星遥感反演方法研究	176
4.1 概述	176
4.2 PM _{2.5} 高精度卫星反演方法	176
4.2.1 基于 AOD 时空动态订正的 PM _{2.5} 卫星遥感反演方法	176
4.2.2 基于地理加权回归的 PM _{2.5} 卫星遥感反演方法	187
4.2.3 基于随机森林的 PM _{2.5} 卫星遥感反演方法	195
4.2.4 基于支持向量机的 PM _{2.5} 卫星遥感反演方法	204
4.2.5 基于人工神经网络的 PM _{2.5} 卫星遥感反演方法	211
4.2.6 基于 EOF 分区的 PM _{2.5} 卫星遥感反演方法	219
参考文献	225
第5章 PM _{2.5} 卫星遥感监测系统研发及应用示范	228
5.1 概述	228
5.2 PM _{2.5} 遥感监测业务运行方案	228
5.2.1 PM _{2.5} 卫星遥感监测系统业务运行流程	228
5.2.2 PM _{2.5} 遥感监测业务产品方案	228
5.3 PM _{2.5} 卫星遥感监测系统研发	231
5.3.1 系统总体结构与运行环境	231
5.3.2 系统功能结构	234
5.3.3 数据库设计	247
5.4 PM _{2.5} 卫星遥感监测系统应用示范	271

5.4.1	京津冀地区 $PM_{2.5}$ 遥感监测应用示范	271
5.4.2	浙江省 $PM_{2.5}$ 遥感监测应用示范	278
第 6 章	$PM_{2.5}$ 卫星遥感分区监测技术规范研究	288
6.1	标准制订的必要性分析	288
6.1.1	环境形势的变化对标准提出新的要求	288
6.1.2	相关环保标准和环保工作的需要	288
6.2	国内外相关标准情况的调研	289
6.2.1	气溶胶光学厚度 (AOD) 反演方法及产品调研	289
6.2.2	卫星反演 AOD 与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关模型	290
6.3	标准制订的基本原则和技术路线	291
6.3.1	标准制订的基本原则	291
6.3.2	标准制订的技术路线和一般处理流程	292
6.3.3	标准制定过程中的技术难点及解决途径	293
	参考文献	293
	附件: $PM_{2.5}$ 卫星遥感分区监测方法规范 (初稿)	294

第 1 章 国内外 PM_{2.5} 卫星遥感监测技术研究进展

1.1 PM_{2.5} 介绍

1.1.1 基本情况

(1) 定义

PM 英文全称是 Particulate Matter, 译为颗粒物。PM_{2.5} 是指悬浮在空气中空气动力学当量直径小于或等于 2.5 μm 的颗粒物, 也称为细颗粒物。形象地说, 它的直径不到人头发丝粗细的 1/20, 虽然 PM_{2.5} 只是地球大气成分中含量很少的组分, 但它对人体健康和空气质量等都有重要影响。相比较粗的大气颗粒物, PM_{2.5} 粒径小、活性强, 易附带有毒、有害物质, 而且在大气中的停留时间长, 因而对人体健康和大气环境质量的影响更大。

2013 年 2 月, 全国科学技术名词审定委员会将 PM_{2.5} 的中文名称命名为细颗粒物, 它是颗粒物的一个组成部分。颗粒物按照粒径大小可分为:

- 1) 总悬浮颗粒物 (TSP): 空气动力学等效直径小于或等于 100 μm 的颗粒物。
- 2) 可吸入颗粒物 (PM₁₀): 空气动力学等效直径小于或等于 10 μm 的颗粒物。
- 3) 细颗粒物 (PM_{2.5}): 空气动力学等效直径小于或等于 2.5 μm 的颗粒物。
- 4) 超细颗粒物 (UFP): 空气动力学等效直径小于或等于 0.1 μm 的颗粒物。
- 5) 纳米颗粒物: 指空气动力学等效直径在几纳米到几十纳米的粒子。

(2) 影响与危害

1) 对人体健康的影响

细颗粒物不易被阻挡, 相对于粗颗粒物, 其表面积更大, 吸附的有害物质更多, 这些携带有害物质的细颗粒物被人体吸入后将直接进入支气管, 影响肺部的气体交换, 对呼吸系统和心血管系统造成伤害, 引发哮喘、支气管炎和心血管病等方面的疾病。

欧盟国家中, PM_{2.5} 导致人们的平均寿命减少 8.6 个月。世界卫生组织在 2005 年版《空气质量准则》中也指出当 PM_{2.5} 年平均浓度达到 35 μg/m³ 时, 人的死亡风险比年平均浓度达到 10 μg/m³ 时约增加 15%。

2012 年 12 月, 著名医学杂志 *Lancet* 发表了一份关于全球疾病负担评估研究成果: 从全球看, PM_{2.5} 在所有对健康有威胁的因素里排名第八, 2010 年全球有 322 万人的提前死亡和 PM_{2.5} 污染有关, 其中约有 120 万人是我国居民 (Lim S S et al., 2012)。在我国, PM_{2.5}

在所有健康危险因素里排名第四,前三分别是高血压、不良膳食习惯和吸烟(Yang G H et al., 2013)。2013 年 10 月,世界卫生组织(WHO)下属国际癌症研究中心首次将 PM_{2.5} 为代表的污染物归为一类致癌物。

2) 对环境的影响

根据我国环保部于 2013 年 8 月发布的上半年环境质量状况,74 个监测 PM_{2.5} 的城市中,仅舟山、海口、惠州和拉萨 4 个城市达标,占监测总数的 5.4%,PM_{2.5} 已成为我国城市空气的首要污染物(<http://www.zhb.gov.cn>)。

PM_{2.5} 直接影响能见度,而能见度则直接影响城市的交通,严重情况下会造成交通问题。例如 2013 年 1 月,持续高强度的大气霾污染了整个中东部地区,造成大量航班延误、高速公路封闭等交通问题。能见度的影响因素很多,主要因素是细颗粒物和气态污染物对光的吸收和散射,其中颗粒物的散射是最主要的,能造成 60%~95% 的能见度减弱,颗粒物中以 PM_{2.5} 及其所含硫酸盐、硝酸盐、有机物和黑碳为主。当颗粒物的直径和可见光的波长接近时,颗粒物对光的散射能力最强,而 PM_{2.5} 主要组成部分的颗粒物直径正好在可见光波长附近。

3) 对气候的影响

气溶胶颗粒物对气候的影响包括直接影响和间接影响。

直接影响:作为地球的“遮阳伞”,颗粒物粒子吸收和散射太阳辐射以及地表发射的长波辐射,会扰动地气辐射收支平衡。一方面由于散射阻挡了部分太阳光,增加了气溶胶光学厚度,减少抵达地面的太阳能,从而降低地面温度,增高高空温度。另一方面,由于大气中的黑碳颗粒物能吸收太阳短波辐射,进而影响太阳辐射传输,同样使高空温度升高,降低地表温度。

间接影响:云作为一种强反射体,可以将来自太阳的短波辐射反射回天空,从而减少到达地面的太阳辐射,降低地表温度。另外云也吸收地表发射的长波辐射,同时也作为发射源发射长波辐射。因此云量及其光学性质的变动可以干扰地气系统能量收支平衡。而气溶胶则是通过改变云量与光学性质来间接影响气候。如在云内液态含水量不变的情况下,气溶胶充当了云凝结核(CCN),增加云滴的数浓度,减小云滴粒径以增加云的反照率。同时 CCN 的增加会促使云吸收更多的水汽,使云量得到发展,进而也增加云的反照率(曹军骥, 2014)。

1.1.2 PM_{2.5} 形成机理与来源

(1) PM_{2.5} 的形成机理

PM_{2.5} 由直接排入空气中的一次粒子和空气中的气态污染物通过化学转化生成的二次粒子组成。一次粒子包括尘土性微粒和由植物及矿物燃料燃烧产生的炭黑粒子,二次粒子主要由硫酸铵和硝酸铵组成,是大气中一次气态污染物 SO₂ 和 NO_x 通过均相或非均相的氧化形成酸性气溶胶,再和大气中的 NH₃ 气体反应生成的。

(2) PM_{2.5}的来源

PM_{2.5}及其组分的来源比较复杂，主要分为人为源和自然源。其中人为源可分为固定源、流动源和面源。其中固定源包括电厂、供热、工业烟尘排放；流动源包括各类机动车在行驶过程中燃料燃烧排放尾气；面源包括露天火灾、扬尘、燃料与溶剂挥发等广泛分布的小污染源。

根据化学组分特征，将PM_{2.5}来源可分为一次排放源和二次排放源，其中二次转化的贡献占PM_{2.5}总质量浓度的50%以上。具体来源见表1-1。

表 1-1 PM_{2.5}组分及其主要来源

PM _{2.5} 组分	一次排放源		二次转化源	
	自然源	人为源	自然源	人为源
硫酸根离子	火山喷发、海浪飞沫、沙尘	化石燃料燃烧、工业生产中排放	海洋、火山喷发和森林火灾排放的含硫气体被氧化	化石燃料燃烧排放的SO ₂ 被氧化
硝酸根离子	风蚀过程	工业生产过程中的排放	土壤、森林火灾、闪电产生的NO _x 被氧化	化石燃料燃烧和机动车排放NO _x 被氧化
铵根离子			野生动物、未受人类活动影响的土壤释放的NH ₃ 发生化学反应	饲养动物、污水排放、人工施肥土壤所释放的NH ₃ 发生化学反应
土壤扬尘、矿物粉尘（Al、Si、Ca、Mg等）	风蚀和再悬浮	道路、林业、建筑施工产生的扬尘		
有机碳（OC）	天然火	化石燃料和秸秆木柴燃烧、机动车尾气排放	植被和天然火燃烧排放的碳氢化合物的氧化	机动车、化石燃料、秸秆木柴燃烧、有机溶剂挥发的碳氢化合物的氧化
元素碳（EC）	天然火	机动车排放、化石燃料、秸秆燃烧等		
金属元素（Fe、Pb、Zn、Cu等）	火山喷发	化石燃料燃烧、金属冶炼、机械加工等		
生物气溶胶	病毒和细菌	生化武器		

注：图表内容参考曹军骥（2014）。

1.1.3 PM_{2.5}监测

一般测量PM_{2.5}的要素包括质量浓度、数浓度、粒径谱分布、化学组分等，有直接测量和间接测量两类方法。

(1) 直接测量

这里主要介绍质量浓度在线监测，一方面它是大气颗粒物研究中最常用的测定分析项目，另一方面在一定程度上也便于大众对PM_{2.5}的存在有个直观的认识。目前主要有以下几种方法。

表 1-2 PM_{2.5} 质量浓度检测方法比较（曹军骥，2014）

类别	技术参数	方法原理
微量振荡天平法	检出限约 5 μg/m ³ （每 5 min 的平均值）； 颗粒物采集质量 10 mg；预热为 30~50℃； 精密度为±1.5 μg/m ³ （每 1 h）、±0.5 μg/m ³ （24 h）	测量出一定间隔时间前后的两个振荡频率， 计算出在该段时间内收集在滤膜表面颗粒物的 质量，然后除以体积
β射线衰减法	检出限约 5 μg/m ³ （每 1 h 的平均值）；放 射源为碳-14；精密度为±2 μg/m ³ （每 1 h）	通过测定穿过颗粒物的 β 射线的损失量，该 损失量与颗粒物之间符合朗伯-比尔定律
光散射法	检出限约 5 μg/m ³ ；光源为激光、红外光 和可见光	光源发出的光照射到颗粒物上发生散射，以 此推算质量浓度
压电晶体法	检出限约 5 μg/m ³ （每 1 min 的平均值）	用静电采样器将颗粒物采集在石英谐振器的 电极表面上，因电极上增加了颗粒物质量， 使其振荡频率发生变化，进而可估算颗粒物 浓度

(2) 间接监测

随着社会经济的发展，大气颗粒物污染问题日益严重，单纯的直接测量已不能满足人们对 PM_{2.5} 时空分布状况信息的需求。另外，直接测量方法虽然精度较高，但存在一定的局限性：一方面由于仪器成本太高，无法大面积应用，直接导致样本点在数量、密度、分布上受到了较大的限制，大范围的监测只能采用某一点的结果近似代替周边情况，或者通过多点监测的结果内插拟合出区域的颗粒物浓度，不适宜对大范围颗粒物污染进行客观的监测、预警和防控；另一方面颗粒物分布状况不是固定不变的，地面的观测信息难以精确反映 PM_{2.5} 浓度随时间和空间变化情况，难以准确估计出颗粒物的流动趋势，为下一地区做好防范准备。

卫星遥感技术具有区域性强、分布范围广的特点，弥补了地面监测的不足，有助于获取更宏观的 PM_{2.5} 分布状况，为大范围内的颗粒物污染治理评价提供重要的数据支撑。

1.2 PM_{2.5} 监测卫星及传感器发展现状

目前，PM_{2.5} 卫星遥感监测工作主要是基于搭载在卫星上的气溶胶监测传感器开展的，在卫星遥感气溶胶反演的基础上，再进行 PM_{2.5} 遥感监测。

1.2.1 国外 PM_{2.5} 卫星及传感器发展现状

1.2.1.1 早期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，它是一个具有 5 通道的交叉轨道扫描辐射计，从 1978 年开始搭载于 NOAA 极轨卫星上飞行，自 1981 年以来，NOAA 下午星用于业务反演海洋上空气溶胶光学厚度，AVHRR 传感器数据最早实现了海洋上空

气溶胶光学厚度的业务化反演,在卫星遥感气溶胶特性的历史中具有里程碑式的意义。

另一个较早用于探测气溶胶特性的传感器是 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer),此传感器在 1978 年 10 月首次搭载于“Nimbus-7”卫星上,并在后期被搭载于多个卫星上。TOMS 传感器的主要应用目的是通过测量太阳后向散射辐射来获得全球大气臭氧总量,同时也可用于探测平流层气溶胶。该传感器对吸收性气溶胶粒子非常敏感,却不利于定量分析气溶胶特性,在气溶胶层高度的确定方面也存在很大的不确定性(Torres et al., 1998; King et al., 1999)。

1979—1981 年,平流层气溶胶和气体实验传感器 SAGE I 搭载于 AEM-2 上发射升空;1984 年 10 月, SAGE II 搭载在 ERBS (Earth Radiation Budget Satellite) 上发射升空,此类传感器可提供全球范围内气溶胶、臭氧、水汽以及氮氧化物分布数据。

1.2.1.2 近期卫星及传感器发展情况

20 世纪 90 年代以来,越来越多的大气探测传感器搭载于不同的卫星相继升空,为气溶胶监测提供了丰富数据源。

1995 年 ESA (European Space Agency) 发射的 ERS-2 卫星上搭载了一种新型多角度传感器 ATSR-2 (The Along-Track Scanning Radiometer),其目的是准确测定海面温度,它具有与 AVHRR 相似的通道,并有两个不同的观测角,能用于气溶胶反演;1999 年 NASA 成功发射的 TERRA 地球观测卫星,是美国地球观测计划中的第一星,每天上午从北向南通过赤道,其上搭载了中分辨率光谱成像仪 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectrometer) 和多角度成像光谱仪 MISR (Multiangle Imaging Spectro Radiometer) 等多个传感器,最大空间分辨率达 250 m,已经用于陆地和海洋上空气溶胶的反演。为与 TERRA 卫星数据采集时间上相互配合, NASA 于 2002 年成功发射了 AQUA 卫星并搭载 MODIS 传感器, AQUA 卫星每天下午从南到北通过赤道,与 TERRA 配合观测,每天可共获取 4 次 MODIS 过境轨道资料,全球许多国家和地区都在接收和使用 MODIS 数据实现对大气气溶胶的遥感观测。2004 年 NASA 发射的 AURA 卫星是继 TERRA 和 AQUA 后的又一颗重要的对地观测系统卫星,其上搭载的臭氧监测仪 OMI (Ozone Monitoring Instrument),可用来反演紫外吸收性气溶胶的时空分布情况。2004 年法国空间中心发射的 PARASOL 地球观测卫星,其上搭载了改进后的多角度偏振探测仪 POLDER-3 (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectance), POLDER 辐射偏振探测器是第一个针对海陆气溶胶进行反演而设计的传感器,已经用于陆地和海洋上空气溶胶的反演。2006 年 NASA 再次成功发射了 CALIOP 卫星,其上搭载的 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations),利用激光雷达实现了对大气气溶胶的垂直空间观测。2011 年, NASA 发射了新一代对地观测卫星 SuoMiNPP,主要用来接替即将服役到期的上一代对地观测卫星。近年来,地球同步轨道卫星技术逐步发展,韩国在 2010 年 6 月 26 日发射的一颗通信-海洋-气象卫星 (Communication、Ocean & Meteorological satellite: COMS-1, 又称“千里眼”),是一颗多用途卫星(司耀锋和应海燕, 2010),此卫星搭载的

地球静止海洋水色成像仪 (the Geostationary Ocean Color Imager: GOCI) 具有高频次观测、较高空间分辨率的特点 (Faure, 2009), 可以为高时空分辨率的大气气溶胶监测提供便利。日本于 2014 年 10 月 7 日发射了新一代静止气象卫星“向日葵 8 号”(Himawari 8), 并于 2016 年 11 月 2 日发射了第二颗静止气象卫星“向日葵 9 号”(Himawari 9)。Himawari8/9 卫星携带的传感器 Advanced Himawari Imager (AHI) 有 16 个探测通道, 每 10 min 成像一次的监测频率, 可用于高时间分辨率的气溶胶监测。

卫星提供的丰富数据源使得卫星环境遥感应用领域越来越广, 覆盖了环境保护的诸多方面。卫星观测的独特优势是覆盖范围广、实时、连续、分辨率高, 可以观测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, 以及大气中的动力和热力过程信息。目前, 可用于大气气溶胶及颗粒物遥感的卫星及传感器越来越多, 下面介绍其中主要的几种卫星平台及传感器。

(1) ERS-2/GOME-1

全球臭氧监测仪 (Global Ozone Monitoring Experiment, GOME-1) (ESA, 1995) 是 1995 年 4 月 21 日欧空局发射的 ERS-2 卫星上的一台臭氧层探测设备, 其主要目的是对以 O₃ 为核心的对流层和平流层痕量气体的全球监测, 同时还可实现对污染气体 (NO₂、SO₂) 和气溶胶的监测。此卫星的轨道高 771~797 km, 倾角 98.5°, 降交点的地方太阳时间为 10: 30AM, 轨道周期为 100.5 min, 轨道截距为 25.1°。GOME 是一个四通道中精度光谱仪, 覆盖光谱范围为 240~790 nm, 光谱分辨率为 0.17~0.33 nm, 标准扫描模式像素分辨率为 40 km×320 km, 像素点重返周期 35 d, 但在标准模式下 3d 可基本覆盖全球, 高纬度覆盖率更高, 在 75°N 的纬圈地表完全覆盖只需 1 d。2003 年 ERS-2 上的数据存储设备损坏, GOME-1 已进行了 1995 年 6 月至 2003 年 7 月的全球观测。从那以后, GOME-1 观测数据通过使用 ERS-2 的直接广播和网络接收来获得, 全球覆盖率达 40%。GOME-1 光谱属性见表 1-3。

表 1-3 GOME-1 通道设计		
高精度通道	光谱范围/nm	光谱分辨率/nm
1	240~316	0.2
2	311~405	0.17
3	405~611	0.29
4	595~793	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

(2) Terra/Aqua MODIS

1999年12月18日NASA成功发射了地球观测系统EOS/Terra (AM-1), 在地方时10:30由北向南穿越赤道线; 2002年4月18日发射了Aqua (PM-1) 卫星, 在地方时13:30由南向北穿越轨道线。Terra和Aqua卫星轨道高度为705 km, 属太阳同步轨道卫星, 两颗卫星均搭载了中分辨率光谱成像仪MODIS, 形成两颗卫星上下午组网观测, 每天可以对同一地区至少观测两次, 也是目前被广泛用于探测大气气溶胶的主要卫星传感器之一。

MODIS有36个通道及成熟的星上定标器, 仪器视场 $\pm 55^\circ$, 幅宽2 230 km, 它是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器, 分布在0.4~14 μm 的电磁波谱范围内, 覆盖了紫外、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1 000 m、500 m、250 m, 在对地观测过程中, 每秒可同时获得6.1Mbit的来自大气、海洋和陆地表面的信息, 可用于天气预报; 洪水、火灾、干旱、雪暴、沙暴、海冰等自然灾害的监测; 环境监测、土地利用、气候和农业区划及国土资源的调查。目前NASA网站有MODIS大气气溶胶及其他业务化产品提供, 是目前最常用的气溶胶监测卫星传感器。基于MODIS传感器的算法研究也很丰富, Kaufman等(1997)描述了利用暗目标法由MODIS反演的陆地上空气溶胶, 并通过地基AERONET监测网的气溶胶进行了验证, 产品误差为 $0.05 \pm 15\% \tau$ (Chu et al., 2002; Ichoku et al., 2005; Remer et al., 2005), 沙漠和沿海地区的误差更大 (Abdou et al., 2005); 通过适当调整可见光与短波红外波段的比值, Min M.Oo等(2010)反演的结果与AERONET观测相关性更高(在纽约的验证, R^2 由0.85提高到了0.92); Bilal(2013)基于MODIS开发的新算法SARA (Simplified Aerosol Retrieval Algorithm), 最终反演的AOD与地面观测的AOD相关性系数为0.964, 均方根误差为0.077, 与MODIS产品AOD相关性系数为0.917, 均方根误差为0.087。Tzu-Chin Tai等将(2011)MODIS垂直订正的后的AOD与我国台湾地区2006—2008年四季的PM_{2.5}进行了验证对比, 由于秋季的边界层稳定均匀, 故得出的相关性系数为0.88~0.93, 夏天则最低, 相关性系数为0.67。

(3) Terra/Aqua MISR

MISR (Diner et al., 1998) 和MODIS (Barnes et al., 1998) 仪器能够以较高的分辨率提供气溶胶含量和特性等信息。MISR仪器包括9个CCD推扫式相机, 角度变化范围从 -70° 到 70° , 每一个相机有4个线阵列电荷耦合器件(CCDs), 覆盖的光谱波段的中心波长是446 nm、558 nm、672 nm和867 nm, 波段宽度是20~40 nm, 共有36个通道。MISR在局地观测模式下, 天底观测的像元空间分辨率是250 m, 其他角度观测的像元空间分辨率是275 m; 而在全球观测模式下, 像元的空间分辨率最大会降到1 km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)。反演结果提供气溶胶谱分布, 单次散射反照率和球面度 (Kahn et al., 1997, 2001; Kalashnikova and Kahn, 2006)。AERONET的地面测量验证表明MISR的气溶胶反演误差要小于 $0.05 \pm 20\%$ 。

(4) Aura OMI

2004 年 7 月 15 日,美国国家航空航天局发射的 Aura 地球观测系统卫星携带了 4 个仪器: 臭氧监测仪 (OMI), 微波分支探测仪 (MLS), 高分辨动力分支探测仪 (HIRDLS) 和对流层发射分光仪 (TES)。OMI (Levelt, 2002) 由荷兰、芬兰和 NASA 合作制造, 是继 GOME 和 SCIAMACHY 后的新一代大气成分探测传感器, 轨道扫描刈幅为 2 600 km, 空间分辨率是 13 km×24 km, 一天覆盖一次全球。OMI 有 3 个通道, 波长覆盖范围为 270~500 nm, 光谱分辨率为 0.5 nm (表 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), 可以获得逐日、直接的全球低层大气中 O₃ 以及 NO₂、SO₂、HCHO、BrO、OCIO 等影响空气质量的污染物的含量, 以及气溶胶紫外指数和云检测产品等, 为研究污染物的长途输送及其复杂性提供依据。OMI 的观测结果有助于我们更好地了解臭氧层空洞怎样对未来平流层冷却做出反应, 为科学家对影响平流层臭氧层与气候的物理和化学过程提供了新的认识途径, 有助于科学家监测全球污染的产生和重新认识气候变化将怎样影响平流层臭氧层的恢复。OMI 既能监测气溶胶的消光和散射 (Torres 等, 2007), 又能够对甲醛、SO₂、O₃、NO₂ 等进行监测。Omar Torres 等 (2012) 利用 OMI 近紫外通道观测的数据反演了气溶胶光学厚度, 结果与 POLDER 反演的结果具有较强的一致性, 误差分析发现在典型的阴云天气, 气溶胶反演的准确率大约为 54%。Ahn (2014) 基于 OMI 传感器近紫外气溶胶反演算法 (OMAERUV) 反演气溶胶, 发现只有在干旱和半干旱地区 OMAERUV 算法反演的结果才能与 MODIS 深蓝算法和多角度成像光谱仪反演的 AOD 具有可比性。

表 1-4 OMI 传感器通道设置参数

通道	光谱范围/nm	光谱分辨率/nm	光谱采样距离/ nm/pixel
UV-1	270~310	0.42	0.32
UV-2	365~3 109	0.45	0.15
V IS	365~500	0.63	0.21

(5) PARASOL POLDER

2004 年 PARASOL 发射升空, 并加入 “A-Train” 计划。PARASOL 是一个小卫星, POLDER 是其搭载的唯一传感器 (Lier and Bach, 2008)。POLDER 传感器包括一个线阵 CCD 相机、宽视场电子光学器件和一个带旋转轮的滤镜测量仪器, 具有从蓝波段 (0.443 μm) 到近红外波段 (1.020 μm) 的 9 个光谱通道, 不同通道的波段宽度为 20~40 nm。POLDER 偏振通道设置在 0.490 μm、0.670 μm 和 0.865 μm, 能够获得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±51°, 穿轨视场±43°, 地面上的气溶胶算法是基于 Deuzé 等 (2001) 的研究, 通过使用偏振辐亮度来反演气溶胶的细模式, 算法对小颗粒比较敏感。Guo 等人 (2016) 基于 PARASOL level 2 产品 AOD, 采用了 4 种回归模型 (线性、二次回归、指数回归和对数回归) 预测 PM_{2.5} 并与地面观测

值对比验证,得到的相关性系数依次为0.64、0.63、0.62和0.57,效果较为理想。Gu等人(2011)将北京和坎普尔2005—2009年PARASOL的AOD产品分别与AERONET的总AOD和细模态AOD对比,可以明显看到,PARASOL的AOD与AERONET的细模态AOD相关性更高;Milinevsky等人(2014)结合AERONET与POLDER数据,分析乌克兰2008—2013年气溶胶四季变化情况,得出AOD在春季和夏季值最大,秋季值最小。

(6) CALIOP CALIPSO

2006年4月,CALIPSO搭载在CALIOP卫星上发射升空。CALIPSO是一个星下点激光雷达观测仪器,其在探测气溶胶和云垂直分布信息以及光学和物理特性方面具有一定的优势(Winker et al., 2003),所得数据主要用于测量影响地球辐射收支的气溶胶和云在大气中的垂直分布及其光学和物理性质。CALIPSO是围绕二极管泵浦Nd:YAG激光器在1064 nm和532 nm发射线性偏振光脉冲建立的。通过使用激光雷达后向散射(Liu et al., 2004)和光谱变化来区分云和气溶胶层。气溶胶消光廓线从消光后向散射率或者雷达比率来计算,垂直分辨率为120~360 m,能够识别出光学厚度为0.01的气溶胶层(McGill et al., 2007)。Kacenelenbogen等(2011)基于多种传感器,多种平台获取的AOD与CALIOP version 2的AOD比较,一方面指出CALIOP version 2的AOD不足,另一方面对比分析引起不足的原因。Kuhlmann等(2010)用CALIPSO数据评价西藏地区气溶胶对亚洲夏季风的影响,同时通过卫星数据发现在大气层下5 km处最集中。Huang等(2013)用CALIPSO level 3气溶胶廓线数据分析了气溶胶垂直分布的季节性和昼夜变化情况,得出沙尘型气溶胶是对流层中上部的主要气溶胶类型,尤其是在北方的春夏季。

(7) NPP VIIRS

2011年10月28日,美国发射了新一代对地观测卫星SuomiNPP,用来取代服役年限即将到期的上一代对地观测卫星,该卫星上搭载了臭氧成像和廓线仪(Ozone Mapper Profiler Suite, OMPS)、高级微波探测器(Advanced Technology Microwave Sounder, ATM)、可见光红外辐射成像仪(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, VIIRS)、云和地球辐射能量系统(Cloud and the Earth's Radiant Energy System, CERES)、红外探测器(Cross-track Infrared Sounder, CrIS)等共5个科学传感器,主要用于对全球臭氧含量(特别是极地地区)、近地表气温和湿度廓线、地表温度和火灾及大气环境的综合监测,其数据产品和上一代计划的数据产品较为类似。

可见光红外成像辐射仪(Visible infrared Imaging Radiometer, VIIRS)是NPP卫星上重要的传感器。可收集陆地、大气、冰层和海洋在可见光和红外波段的辐射图像。它是高分辨率辐射仪AVHRR和地球观测系列中分辨率成像光谱仪MODIS系列的拓展和改进。VIIRS数据可用来测量云量和气溶胶特性、海洋水色、海洋和陆地表面温度、海冰运动和温度、火灾和地球反照率。气象学家使用VIIRS数据来提高我们对全球温度变化的了解。VIIRS作为美国第二代中分辨率影像辐射计,设计了可见光和近红外波段9个、中红外波段和远红外波段12个及DNB波段1个共22个波段,主要用于监测陆地、大气、冰和海洋环境在可见光红外波段的辐射变化,为监测大气气溶胶、植被、海洋水色、洋面温度和