

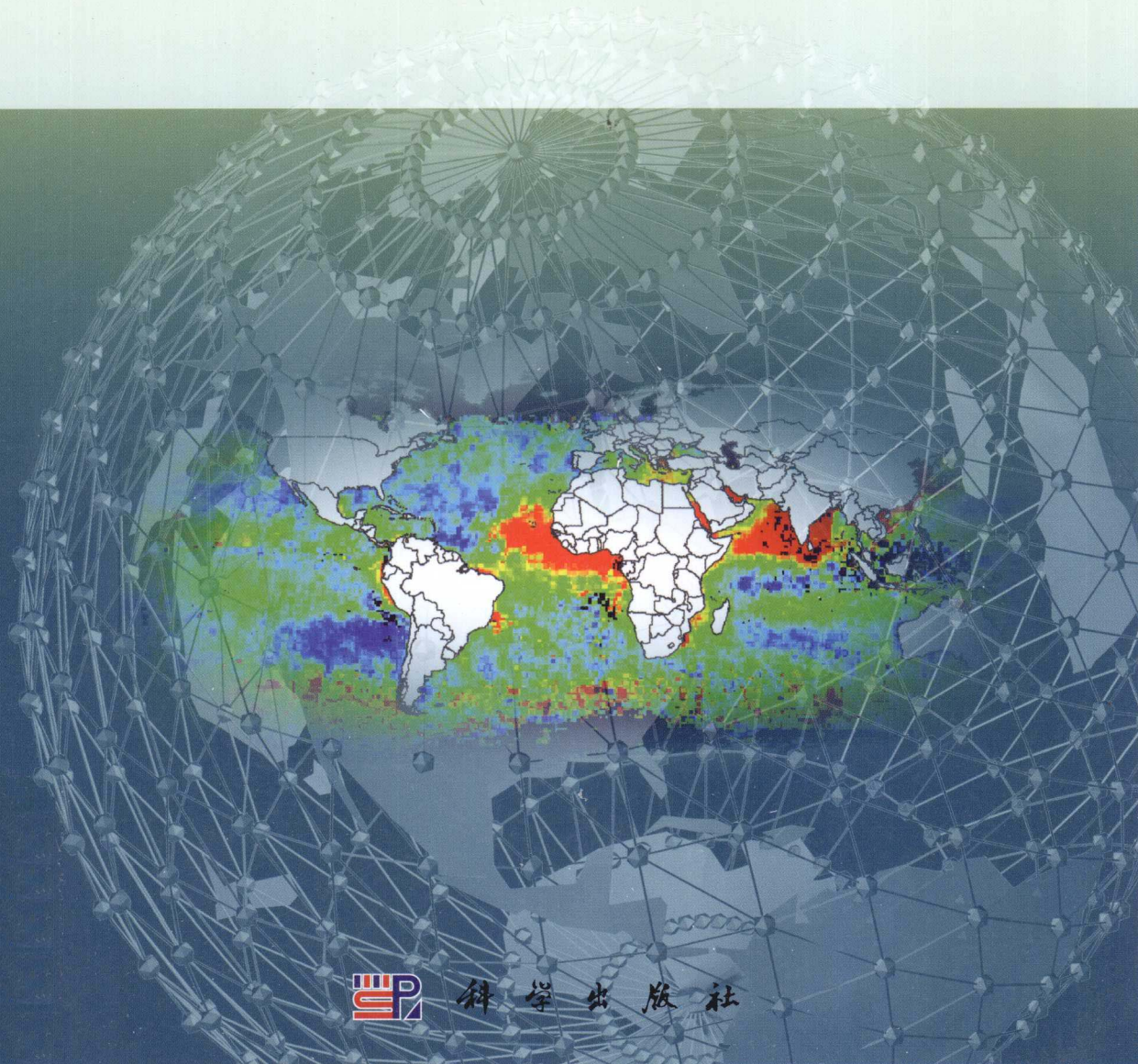


地球信息科学基础丛书

Geo-information Science

气溶胶遥感定量反演 研究与应用

陈良富 李莘莘 陶金花 王中挺 编著



科学出版社

气溶胶遥感定量反演 研究与应用

陈良富 李莘莘 陶金花 王中挺 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书共 14 章,介绍气溶胶的遥感定量反演方法,简要介绍气溶胶的来源和性质、气溶胶遥感反演的基本理论和方法,系统描述地基观测仪器太阳分光光度计和激光雷达的观测原理及气溶胶参数反演方法,阐述卫星遥感探测海洋与陆地气溶胶的原理、方法和数据处理以及相应反演结果的验证等内容。

本书可供从事气溶胶遥感、辐射平衡研究和大气环境监测工作的科研人员和相关专业研究生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

气溶胶遥感定量反演研究与应用/陈良富等编著. —北京:科学出版社,2011

(地球信息科学基础丛书)

ISBN 978-7-03-031537-3

I. ①气… II. ①陈… III. ①气溶胶-光学遥感-反演算法 IV. ①TL941

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 113423 号

责任编辑:韩 鹏 朱海燕 卜 新 / 责任校对:林青梅

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>

源海印刷有限责任公司印刷

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:10 3/4 插页:4

印数:1—2 500 字数:246 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

气溶胶是大气组成成分中三大活跃成分之一,无论从时间尺度还是空间尺度上,其数量与质量的变化都是十分巨大的,难以用固定模式予以描述。鉴于气溶胶在大气辐射强迫、遥感反演、大气纠正及评价大气环境质量方面拥有举足轻重的地位,气溶胶定量遥感反演研究一直是遥感科技工作者的研究热点与难关。经三十余年广大科技工作者们坚持不懈的努力,已经取得了很大的进步,同时也面临着新的挑战。本书的作者们全面地总结了气溶胶定量遥感反演方面的成果,从基本原理着手,循循善诱,使读者能对各种遥感反演方法的本质内涵有深刻的认识,并清晰明了地阐明了新挑战的要害所在。使读者可以用最短的时间了解并掌握当今气溶胶定量遥感反演方面的全貌。据我所知,本书是国内第一本专论气溶胶定量遥感反演方法的专著,也是作者们多年科研成果的总结,值得一读。



2010年12月26日

前 言

气溶胶的吸收与散射效应在地表定量遥感和图像处理中是需要剔除的噪声。随着全球气候变化问题和空气质量问题逐渐成为当今影响人类生存和人们生活质量的严重问题,气溶胶光学特性、物理特性和质量特性的探测备受人们关注。气溶胶卫星遥感是唯一可以提供区域尺度、全球尺度气溶胶特性的探测方式。

卫星遥感探测气溶胶主要面临两方面的问题:一是如何从卫星接收到的信号中剔除地表反射噪声。因为相对气溶胶信息而言,地表反射噪声尤其是反射率大的亮目标要大得多,地表反射噪声的估算误差很容易掩盖气溶胶散射信息。所以地表反射噪声的去除问题或称地气分离问题,是气溶胶卫星遥感中必须面对的问题。二是气溶胶模式问题。因为气溶胶模式在时空分布上变化较大,在卫星探测过程中,无法事先知道待反演地区的气溶胶组成。气溶胶模式和气溶胶的光学特性、物理性质等均是需要反演的对象。所以如何确定气溶胶模式,将直接影响卫星遥感反演结果,也给气溶胶卫星遥感带来更大的难度。

针对现有的卫星遥感数据,研发不同的算法,以便剔除地表反射噪声,并确定气溶胶模式,这构成卫星定量遥感反演气溶胶的主要内容。

针对海洋反射噪声来说,由于海洋表面相对均一,而且红光和近红外波段的反射率很低,所以海洋尤其是大洋洋面气溶胶光学厚度的反演算法比较简单。近海二类水体区域泥沙含量的差异导致海面反射噪声的度量相对困难,所以近海二类水体上空的气溶胶反演仍是目前气溶胶反演中的一个挑战。由于陆地地表类型变化多样,在陆地表面 1km 尺度像元内多是混合像元,要精确构建像元尺度的地表反射率模型,以便准确估算像元尺度的地表反射噪声,是比较困难的。尤其是针对亮目标的反射来说,气溶胶散射信息是弱信息,地表的高反射率估算模型误差往往掩盖了气溶胶信息。所以,陆地地表比较成熟的算法只是针对低反射率的地表类型,为此美国国家航空航天局 MODIS 载荷专门设计大气效应很小的短波红外波段(2.1 μm),以获得该波段地表反射信息,然后通过与红光波段、蓝光波段反射率的线性关系获得红光和蓝光波段地表噪声的算法。该算法已用于业务运行,被称为暗像元算法。其他不具备类似波段设置的卫星探测数据在气溶胶光学厚度的反演中采取暗像元算法时需要解决假暗目标的识别问题。另外,应用旨在解决城市下垫面或亮目标地区地表反射噪声问题的结构函数法、耦合地表反射率算法等在国内外已开展少量的探讨性工作。除了卫星遥感探测,地基气溶胶的探测可用于卫星反演结果的验证,也可用于气溶胶的长期观测以改善气溶胶模式。

本书针对上述几个方面,对气溶胶反演所需的基础知识、气溶胶地基探测、海洋和陆地地表类型的气溶胶探测进行叙述。

第 1~3 章主要介绍气溶胶的基本概念、气溶胶颗粒散射的基本特性以及卫星遥感反演气溶胶所需的大气辐射传输基本理论与算法,这些内容是卫星遥感反演的基础。第 4、

5 章主要介绍地基太阳分光光度计探测气溶胶光学厚度和其他参数的方法。第 6 章介绍激光雷达探测气溶胶垂直消光系数的方法。第 7、8 章主要阐述海洋气溶胶的卫星遥感反演方法,包括 MODIS 数据和多角度偏振数据对气溶胶的反演方法。第 9~12 章是陆地地表气溶胶反演方法。其中,第 9 章主要介绍针对 MODIS 数据的暗目标算法反演气溶胶光学厚度,第 10 章介绍有限波段数的高空间分辨率卫星遥感数据(以 CBERS 数据为例)反演陆地气溶胶的难点以及采用的改进暗目标算法,第 11、12 章介绍适合亮目标和城市地区气溶胶反演的结构函数算法思路与问题、耦合地表反射率的气溶胶反演算法。第 13 章是陆地气溶胶的多角度偏振遥感反演方法,即除了光学厚度的偏振探测外,还探索性地提出借助偏振载荷标量探测光学厚度和地基探测的细粒子比例,提高气溶胶粒子谱偏振探测的算法精度。第 14 章介绍气溶胶卫星遥感反演业务化运行必须考虑的高性能并行算法问题。

需要提及的是,下列一些方面需要进一步研究和探讨,本书未过多涉及,留待本书再版时讨论。第一,对地表是亮目标的沙漠、雪面和城市等气溶胶反演算法需要做深入的探讨;第二,目前有不少在轨运行的载荷可以用于气溶胶探测,如何针对这些不同的载荷特性开发相应气溶胶反演算法,形成一天多时相的气溶胶卫星探测结果;第三,除地基探测气溶胶部分物理参数外,气溶胶的直接和间接辐射强迫需要通过多角度标量探测和偏振探测方法作进一步探讨;第四,气溶胶模式始终是一个需要研究的问题。

本书是作者近年来完成的初步研究成果的集成,反演算法经过作者的实践检验。其中,海洋气溶胶偏振遥感反演方面的内容主要来源于怀红燕硕士研究生期间完成的研究成果,地基太阳分光光度计的气溶胶反演算法和陆地多角度偏振遥感探测方法是王中挺博士研究生期间完成的研究工作,耦合地表反射率的气溶胶反演算法和气溶胶反演高性能算法是李莘莘博士研究生期间的部分研究成果,MODIS 海洋与陆地气溶胶的暗像元算法是陶金花博士参考 NASA/MODIS 暗目标算法文档实现的,结构函数法反演气溶胶光学厚度的算法参考孙林博士研究生期间的工作,陈良富编著其余内容并统筹全书。本书阐述的内容是近年来作者承担国家高技术研究发展计划(863 计划)资源环境技术领域“重点城市群大气复合污染综合防治技术与集成示范”重大项目第三课题“多源卫星遥感大气污染综合监测技术”中的部分关键研究内容。

本书使用了中国科学院大气物理研究所楼顶和香河站点地基监测结果,对气溶胶卫星反演结果进行验证,这里对提供监测数据的陈洪滨研究员表示感谢。气溶胶探测是一个复杂的科学问题,加之作者水平有限,书中疏漏、取舍不当、疑惑谬误之处在所难免,希望读者批评指正。

陈良富

2010 年 10 月

于中国科学院奥运村科技园区

目 录

序

前言

第 1 章 气溶胶及其遥感监测	1
1.1 引言	1
1.1.1 对气候的影响	1
1.1.2 对环境的影响	1
1.1.3 对遥感量化的影响	2
1.2 气溶胶来源与类型	2
1.2.1 大气层热力结构	2
1.2.2 平流层气溶胶	4
1.2.3 对流层气溶胶	4
1.2.4 气溶胶类型	5
1.3 气溶胶的物理性质	6
1.3.1 气溶胶的粒径	6
1.3.2 气溶胶粒径子谱	7
1.3.3 气溶胶粒子尺度描述	9
1.3.4 气溶胶粒子三模态分布	10
1.3.5 复折射指数	11
1.4 气溶胶光学性质	11
1.5 气溶胶遥感探测	12
1.5.1 气溶胶科学与遥感	12
1.5.2 气溶胶探测的相关卫星与载荷	13
1.5.3 卫星遥感探测气溶胶的反演方法	14
1.5.4 地基遥感监测	16
第 2 章 气溶胶散射基本特性	18
2.1 引言	18
2.2 单粒子几何描述及其散射特性	18
2.2.1 单粒子散射	18
2.2.2 单粒子散射的几何描述	19
2.2.3 单粒子散射的相关特性	20
2.3 偏振光的表征与 Stokes 参数	21
2.3.1 简谐波与椭圆偏振	21
2.3.2 Stokes 参数	22

2.3.3	Stokes 参数的测量与计算	23
2.4	球形粒子 Mie 散射	23
2.4.1	散射相矩阵	23
2.4.2	球形 Mie 散射	25
2.5	分子散射	26
2.6	粒子群散射特性	28
2.7	非球形粒子散射	29
2.8	非球形冰晶散射	30
2.8.1	几何反射与折射	30
2.8.2	冰晶散射特性的蒙特卡罗模拟	31
第 3 章	大气辐射传输基本理论	33
3.1	引言	33
3.2	辐射传输方程	33
3.2.1	传输方程	33
3.2.2	比尔-布格-朗伯定律	34
3.2.3	平面平行大气的传输方程	34
3.2.4	矢量辐射传输方程	35
3.3	辐射传输方程求解中的基本算法	36
3.3.1	辐射传输方程的 Fourier 变换	36
3.3.2	散射相矩阵的 Legendre 展开	38
3.3.3	高斯型求积公式	40
3.4	前向散射的快速算法	41
3.4.1	δM 方法	42
3.4.2	δ -fit 方法	43
3.5	大气辐射传输的基本解法简介	44
3.5.1	连续阶散射近似与 SOS	44
3.5.2	倍加累加法与 RT3	47
3.5.3	其他方法	52
第 4 章	地基太阳光度计反演气溶胶	53
4.1	引言	53
4.2	观测仪器	53
4.3	仪器定标	54
4.3.1	无水汽影响通道定标	54
4.3.2	水汽通道(936nm)定标	54
4.3.3	灵山定标试验结果	55
4.4	气溶胶光学厚度反演	56
4.4.1	气溶胶光学厚度反演方法	56
4.4.2	CE318 数据处理软件介绍	57
第 5 章	地基多角度偏振光度计反演气溶胶	59

5.1	引言	59
5.2	Dubovik 和 King 的反演方法	59
5.2.1	前向模型	59
5.2.2	气溶胶光学性质的物理模式	60
5.2.3	多源数据的统计最优化反演	60
5.2.4	最小值求取方法	61
5.3	多角度偏振反演方法	62
5.3.1	气溶胶光学性质反演	62
5.3.2	气溶胶物理性质反演	64
5.3.3	反演实验	66
第 6 章	地基激光雷达反演气溶胶	70
6.1	引言	70
6.2	微脉冲激光雷达简介	70
6.3	激光雷达数据预处理过程	71
6.4	激光雷达探测气溶胶消光系数	72
6.4.1	Collis 斜率法	72
6.4.2	Klett 方法	73
6.4.3	Fernald 方法	73
6.5	激光雷达探测混合层高度	75
6.6	激光雷达探测气溶胶的退偏振比	76
6.7	观测结果	76
第 7 章	MODIS 数据反演海洋气溶胶	77
7.1	引言	77
7.2	基本原理	77
7.3	数据预处理	79
7.4	反演算法	79
7.5	结果示例	80
第 8 章	多角度偏振反演海洋气溶胶	81
8.1	引言	81
8.2	POLDER/PARASOL 简介	81
8.2.1	POLDER/PARASOL 探测器特性	81
8.2.2	PARASOL 数据格式	82
8.2.3	PARASOL 相关参数	83
8.3	海洋表面偏振模型	84
8.3.1	Cox-Munk 粗糙海面的 BPDF 模型	84
8.3.2	BPDF 模型模拟	86
8.4	查找表的参数设置	87
8.5	数据预处理算法	88
8.5.1	大气分子散射	88

8.5.2	波浪的非涅尔反射	88
8.5.3	海面泡沫反射率	88
8.5.4	离水反射	89
8.6	气溶胶反演过程	89
8.6.1	数据选择	89
8.6.2	云处理	90
8.6.3	太阳耀斑处理	90
8.7	结果与验证	90
第9章	MODIS 数据暗目标算法反演陆地气溶胶	92
9.1	引言	92
9.2	基本原理	93
9.3	地表反射噪声去除方法	93
9.3.1	基于地表反射率关系的暗像元算法	93
9.3.2	基于地表反射率模型算法	94
9.4	气溶胶模式	95
9.5	查找表构建	96
9.6	反演插值与海拔高度校正	97
9.7	结果验证	97
9.7.1	反演结果精度的验证	97
9.7.2	全国尺度气溶胶反演结果	99
第10章	高空间分辨率数据反演陆地气溶胶	100
10.1	引言	100
10.2	CCD 数据反演气溶胶的思路	101
10.3	CCD 相机红光和蓝光波段反射率的测量	102
10.3.1	仪器介绍	102
10.3.2	测量方法	102
10.3.3	CCD 相机红光和蓝光波段典型地物光谱数据	102
10.4	适合 CCD 数据的改进暗像元法	103
10.4.1	暗像元的识别	103
10.4.2	伪暗像元的剔除	103
10.5	CCD 数据的气溶胶反演	104
10.5.1	查找表的建立	104
10.5.2	数据预处理	105
10.5.3	气溶胶光学厚度的反演流程	105
10.6	反演结果比对与误差分析	105
10.6.1	气溶胶光学厚度反演结果	105
10.6.2	反演结果的误差分析	106
第11章	结构函数法反演陆地气溶胶	108
11.1	引言	108

11.2	结构函数法反演原理	108
11.2.1	基本原理	108
11.2.2	结构函数法反演思路	109
11.3	结构函数法存在的问题	109
11.4	结构函数模型及其影响因素	110
11.4.1	结构函数模型	110
11.4.2	结构函数值的影响因素	111
11.5	结构函数法反演气溶胶例子	112
第12章	耦合地表反射率算法反演陆地亮目标气溶胶	113
12.1	引言	113
12.2	耦合地表反射率的地气解耦方法	114
12.2.1	地表反射率	114
12.2.2	蓝光波段地表反射率变化分析	114
12.3	北京地区气溶胶模式	116
12.3.1	气溶胶模式的地基观测描述	116
12.3.2	北京地区的气溶胶模式观测结果	117
12.4	耦合地表反射率算法反演结果与验证	118
12.4.1	耦合地表反射率算法的反演过程	118
12.4.2	反演试验与验证	119
12.5	误差分析与结论	120
12.5.1	误差分析	120
12.5.2	耦合地表反射率算法适用性评估	123
第13章	卫星多角度偏振反演陆地气溶胶	124
13.1	引言	124
13.2	偏振探测的基本原理与不同散射处理方法	124
13.2.1	单次散射的大气偏振	124
13.2.2	多次散射的大气偏振	125
13.3	陆地地表偏振模型	125
13.3.1	土壤偏振模型	125
13.3.2	植被偏振模型	125
13.3.3	地表分类数据	127
13.4	气溶胶模式	129
13.4.1	单峰和双峰气溶胶模式比较	129
13.4.2	气溶胶最优模式匹配	130
13.5	气溶胶光学厚度的偏振反演	130
13.5.1	基于矢量辐射传输计算的查找表构建	130
13.5.2	反演步骤	131
13.6	反演结果比较与分析	131
13.6.1	单峰与双峰气溶胶模式反演结果对比	131

13.6.2	大气偏振单次散射和多次散射处理的反演结果	132
13.6.3	单次散射和多次散射之间的误差分析	134
13.7	标量探测光学厚度辅助粒子谱多角度偏振反演	136
13.7.1	光学厚度偏振载荷的标量探测	136
13.7.2	地基粒子谱细粒子比例探测	136
13.7.3	光学厚度的细粒子比例辅助偏振粒子谱反演	137
13.7.4	粒子谱反演结果的地基比较	137
第 14 章	气溶胶光学厚度高性能反演算法与系统设计	140
14.1	引言	140
14.2	集群环境与系统架构	140
14.2.1	集群环境	140
14.2.2	系统架构	141
14.3	气溶胶光学厚度卫星反演处理流程	143
14.3.1	串行化处理流程	143
14.3.2	并行化处理流程	144
14.3.3	数据切分策略	145
14.4	结果与性能分析	147
14.4.1	并行反演结果	147
14.4.2	不同数据切分策略性能分析	148
14.5	并行环境下查找表构建与性能分析	149
参考文献		152

第 1 章 气溶胶及其遥感监测

1.1 引言

大气中含有悬浮的各种固体和液体粒子,如尘埃、烟粒、微生物、花粉,以及云雾滴、冰晶和雨雪等粒子,把这种悬浮在气体中的固体或液体微粒与气体载体组成的多相体系称为气溶胶。气溶胶粒子通过对电磁波的吸收和散射作用,在紫外、可见光到红外很宽的波段内对辐射传输产生影响。这种辐射效应在气候模拟、大气传输、遥感应用、环境监测等众多领域作用重大。

1.1.1 对气候的影响

对流层气溶胶是地球-大气系统的重要组成部分,它主要通过以下几个机制对气候产生影响。第一,气溶胶粒子对太阳辐射的散射和吸收所导致的直接辐射强迫。直接辐射强迫使到达地面和被大气反射回太空的短波辐射发生了变化。直接辐射强迫对气候系统是增温还是冷却作用,取决于气溶胶的吸收特性;气溶胶对长波辐射的吸收和散射相对短波来说较小。第二,气溶胶粒子可以通过改变云微物理特性使云的辐射特性发生变化,相对气溶胶的直接强迫来说,这种影响被称为间接效应。因为气溶胶浓度的增加,产生更多更小的云滴,增加地球大气中云的反照率,引起间接辐射强迫。气溶胶除了改变云滴浓度和粒子尺度外,在某些情况下,气溶胶能增加液态水含量并延长云的生命周期。另外,黑炭气溶胶作为云凝结核吸收太阳辐射,导致增温,会使云物理性质发生更复杂变化。第三,气溶胶粒子对各种化学反应有间接影响,这会通过改变气候要素(如臭氧等)的含量而影响气候。

气溶胶辐射强迫作为主要的气候变化因子在 20 世纪后期开始引起关注。它在气候强迫辐射中带来显著的不确定性。相对于温室气体 $2.5 \pm 0.3 \text{ W/m}^2$ 的辐射强迫,硫酸盐气溶胶辐射强迫是 $-1.4 \pm 1.5 \text{ W/m}^2$ (Houghton et al., 1996)。生物质燃烧产生的气溶胶烟羽的全球平均直接辐射强迫为 $-0.3 \sim 2 \text{ W/m}^2$ (Penner et al., 1992; Hobbs et al., 1997),一旦引入有机气溶胶,可能会增大到 $-2.5 \pm 2 \text{ W/m}^2$ 。由于对流层气溶胶持续时间最多可达几天,产生了各种模式的辐射强迫,随着光学厚度的巨大变化,区域尺度上辐射强迫达到 10 W/m^2 数量级的变化 (Tegen et al., 1996),这些变化可在全球尺度上达到 $1 \sim 2 \text{ W/m}^2$ 强迫。基于气溶胶模拟的初步估计表明:对生物质燃烧气溶胶,约 70% 的气溶胶辐射强迫来自光学厚度超过 0.1 的区域 (Remer et al., 1999)。所以利用遥感的方法对于估计目前气溶胶的影响是非常有用的。

1.1.2 对环境的影响

气溶胶颗粒是影响大气环境质量的重要污染物。城市气溶胶引起空气质量问题,包

括能见度下降、可吸入颗粒物增加影响人们健康等。我国 20 世纪 70 年代以来的快速工业化过程、生物质燃烧、城市生活等都排放了大量气溶胶,已经引起城市区域性空气污染问题的出现。酸雨、光化学烟雾已经在城市密集地区构成区域性污染。直径在 $10\mu\text{m}$ (PM₁₀, Particulate Matter) 以下的气溶胶颗粒物可到达人类呼吸系统的支气管区,直径小于 $5\mu\text{m}$ 的微粒可到达肺泡区,最终导致心血管和哮喘疾病的增加 (Auger et al., 2006);气溶胶导致紫外辐射的减少也使得城市儿童佝偻病发病率增加。直径小于 $2.5\mu\text{m}$ 的气溶胶颗粒 (PM_{2.5}) 因为对可见光的消光作用导致地面能见度的下降,给城市的景观造成负面影响,也直接对城市交通、市民生活造成显著的影响。

1.1.3 对遥感定量化的影响

地球表层的定量化遥感是 21 世纪遥感应用研究的一个必然发展趋势,它的核心是建立地物电磁波辐射与传感器所获取信息之间的定量关系,从而定量探测与电磁波辐射有关的各类地物属性。遥感定量化的基础是传感器的精确定标和遥感数据的大气校正。对地观测传感器获得的信号是地面信号和大气信号的叠加,对水体遥感时大气信号可达总信号的 90% 以上 (Gorden et al., 1983)。大气影响不仅造成成像传感器图像模糊、对比度下降以及细节损失,还使后继的地表反射率、植被指数、光合作用有效辐射、叶绿素浓度等定量化反演结果偏离真值。大气校正的效果强烈依赖于输入的大气参数的精度,其中影响最大的部分就是大气气溶胶,同时气溶胶的时空分布变化很大。因此精确探测气溶胶的时空分布是遥感定量化中必不可少的重要环节。

1.2 气溶胶来源与类型

1.2.1 大气层热力结构

大气是地球的一层气体屏障,自地球表面向上,随高度的增加,空气越来越稀薄。大气的上界可延伸到 2000~3000km 的高度。现代大气是在地球生命的形成和进化过程中逐渐形成的,共发展延续了四五十亿年。

观测资料表明,大气在垂直方向上的组成、状态以及物理性质的差异十分显著,远远大于地球水平方向。按照大气在垂直方向的各种特性,可以将大气分成若干层次。按大气温度随高度分布的特征,可把大气分成对流层、平流层、中间层、热层和外逸层。按大气各组成成分的混合状况,可把大气分为均匀层和非均匀层。按大气电离状况,可分为电离层和非电离层。按大气的光化学反应,存在臭氧层。按大气运动受地磁场控制情况,存在磁层。较为常见的是采用大气温度对大气进行分层,也就是大气的热结构。

1. 对流层

对流层是大气的最下层。它的高度因纬度和季节而异。就纬度而言,低纬度平均为 17~18km;中纬度平均为 10~12km;高纬度仅 8~9km。就季节而言,对流层上界的高度,夏季大于冬季。对流层的主要特征:①气温随高度的增加而递减,平均每升高 100m,

气温降低 0.65°C 。其原因是太阳辐射首先主要加热地面,再由地面把热量传给大气,因而越近地面的空气受热越多,气温越高,远离地面则气温逐渐降低。②空气有强烈的对流运动。地面性质不同,因而受热不均。暖的地方空气受热膨胀而上升,冷的地方空气冷缩而下降,从而产生空气对流运动。对流运动使高层和低层空气得以交换,促进热量和水分传输,对成云致雨有重要作用。③天气的复杂多变。对流层集中了 75% 大气质量和 90% 的水汽,因此伴随强烈的对流运动,产生水相变化,形成云、雨、雪等复杂的天气现象。

2. 平流层

自对流层顶向上 55km 高度,为平流层。其主要特征:①温度随高度增加由等温分布变逆温分布。平流层的下层随高度增加气温变化很小。在 20km 以上,气温又随高度增加而显著升高,出现逆温层。这是因为 20~25km 高度处,臭氧含量最多。臭氧能吸收大量太阳紫外线,从而使气温升高。②垂直气流显著减弱。平流层中空气以水平运动为主,空气垂直混合明显减弱,整个平流层比较平稳。③水汽、尘埃含量极少。由于水汽、尘埃含量少,对流层中的天气现象在这一层很少见。平流层天气晴朗,大气透明度高。

3. 中间层

从平流层顶到 85km 高度为中间层。其主要特征:①气温随高度增高而迅速降低,中间层的顶界气温降至 $-113\sim-83^{\circ}\text{C}$ 。因为该层臭氧含量极少,不能大量吸收太阳紫外线,而氮、氧能吸收的短波辐射大部分被上层大气吸收,故气温随高度增加而递减。②出现强烈的对流运动。这是由于该层大气上部冷,下部暖,空气产生对流运动。但由于该层空气稀薄,空气的对流运动不能与对流层相比。

4. 热层

从中间层顶到 800km 高度为热层。热层的特征:①随高度的增高,气温迅速升高。据探测,在 300km 高度上,气温可达 1000°C 以上。这是由于所有波长小于 $0.175\mu\text{m}$ 的太阳紫外辐射都被该层的大气物质所吸收,从而使其增温的缘故。②空气处于高度电离状态。这一层空气密度很小,在 270km 高度处,空气密度约为地面空气密度的百亿分之一。由于空气密度小,在太阳紫外线和宇宙射线的作用下,氧分子和部分氮分子被分解,并处于高度电离状态,故热层又称电离层。电离层具有反射无线电波的能力,对无线电通信有重要意义。

5. 外逸层

热层顶以上,称外逸层。它是大气的最外一层,也是大气层和星际空间的过渡层,但无明显的边界线。这一层,空气极其稀薄,大气质点碰撞机会很小。气温也随高度增加而升高。由于气温很高,空气粒子运动速度很快,又因距地球表面远,受地球引力作用小,故一些高速运动的空气质点不断外逸到星际空间,外逸层由此而得名。据宇宙火箭资料证明,在地球大气层外的空间,电离气体组成极稀薄的大气层,称为“地冕”。它一直伸展到 22 000km 高度。由此可见,大气层与星际空间是逐渐过渡的,并没有截然的界限。

大气气溶胶主要分布在大气层下部的平流层和对流层。由于重力沉降作用,大气气溶胶粒子浓度一般随高度增加而呈指数减少,地面气溶胶粒子数密度最大,到对流层顶处最小,称为对流层气溶胶,随季节和地区变化较大;到平流层中 20km 左右高度,气溶胶粒子数密度出现新的峰值,称为平流层气溶胶,一般认为来自火山爆发,变化较小,性质比较稳定。

1.2.2 平流层气溶胶

平流层气溶胶是指分布在平流层中的气溶胶。就全球范围内来说,平流层气溶胶主要由含 60%~80% 硫酸的溶液构成,来源于火山爆发的含硫气体(H_2S , SO_2)以及地面扩散到平流层的羰基硫,它们被太阳辐射作用以及一系列的化学反应,最终形成硫水化合物的小水滴,即气溶胶粒子。平流层气溶胶光学厚度虽然小,但在某些方面,如对小粒子特别敏感的偏振遥感以及对大气校正精度要求很高的海洋遥感等(Lafrance and Herman, 1998),对卫星遥感有一定影响。在平流层气溶胶对太阳辐射的影响,单次散射占主要部分,辐射影响主要取决于光学厚度和气溶胶层的平均散射特性。

除了火山爆发后的几个月,平流层气溶胶空间变化很小,差不多是带状分布的,可以简化为仅随纬度变化。同时,随时间变化也比较稳定(Brognez and Lenoble, 1991)。平流层气溶胶的复折射指数可以用 75% 硫酸化合物计算出来(Rosen and Hofmann, 1986)。粒子可以假定为球形。平流层气溶胶的谱分布可以认为是单峰对数正态分布,通过有效半径和有效方差表示(Hansen et al., 1996)。

对平流层气溶胶进行遥感观测的传感器主要是平流层气溶胶和其他试验仪器(Stratospheric Aerosol and Gas Experiment, SAGE)系列。SAGE 系列已经先后发射了 SAGE I、SAGE II、SAGE III 三个传感器,最新的 SAGE III 传感器 2001 年 12 月搭载在俄罗斯的 METEOR-3M 上发射升空,目前仍在获取数据,每天利用日出日落时太阳运动进行观测,主要致力于平流层气溶胶、臭氧和二氧化氮等的观测。

1.2.3 对流层气溶胶

与平流层气溶胶相比,对流层气溶胶则要复杂得多。主要原因首先是来源的复杂性,既有来自于释放(自然过程或人为过程),也可以通过气-粒转换过程形成;其次是物理化学性质的高度时空可变性,粒子可以是球形的也可以是非球形的,可以是液态的也可以是固态的,在大气中的寿命可以在几天到几周之间。对流层气溶胶粒子有原生和次生两种类型。原生气溶胶粒子包括自然源,如土壤风蚀、海水泡沫蒸发、火山爆发、自然燃烧和植物花粉等;次生气溶胶粒子包括人工源,主要是工业排放、交通运输、建筑粉尘等。

1. 扬尘

扬尘是裸露土壤、岩石风化和火山喷发等尘埃由于风吹而扬起并输送到远处的过程。就全球粒子的来源看,干旱地区和沙漠的扬尘乃至尘暴是背景大气中粒子的重要来源。我国酸雨研究发现,扬尘是中和雨水酸性的重要碱性物质,并认为北方降水不酸的原因是

北方干旱地区扬尘所致。

2. 粉尘

粉尘由工业上作为能源的煤以及民用生活用煤造成的,工矿业在生产过程中还会产生很多粉尘。由于人类活动产生的气溶胶粒子在浓度上具有明显的日变化。从清晨人类生产活动和生活活动开始,近地面层颗粒物浓度逐渐上升;随着向上的垂直对流输送,颗粒物的边界层分布高度被逐渐抬高;到夜间由于大部分人类活动停止,气溶胶颗粒物逐渐减少。

3. 海水泡沫

海水按其重量有 3.5% 的比例是海盐,海盐中 85% 的成分是氯化钠。在海面上波浪的白色顶部及其周围含有大量的气泡,这些气泡浮升到水表面,在冒出水面时会破裂而产生大量的海水飞沫,有相当一部分飘浮在空气中,由湍流向上输送,水分蒸发后形成海盐粒子。海沫破碎蒸发产生以氯化钠为主的气溶胶海盐颗粒。由于海洋面积约占全球面积的 70.8%,因而海洋是一个重要的气溶胶颗粒物来源。

4. 气-粒转化

即气体-粒子的转化,是二次气溶胶的产生过程。气-粒转化有几种类型,即单成分均相成核过程、多成分均相成核过程和非均相凝结过程。在气-粒转化过程前,大气产生一系列物理和化学反应形成可凝结气体,在过饱和条件下气体由成核气体分子结合而形成粒子,此为单成分均相成核。多成分均相成核是由多种物质分子组成的,不同成分分子间发生相互作用,形成溶液或者发生反应,形成组分分子团和粒子。非均相凝结是在已有的粒子上发生气体的凝结,或在粒子表面和液滴内部发生化学变化,同时使粒子增大的过程。由污染气体转化形成的粒子是城市气溶胶的一个重要来源。

其他方面有微生物、植物孢子和花粉等均释放有机物颗粒。

1.2.4 气溶胶类型

针对气溶胶的类别,即气溶胶模式,在国际上已经有了比较统一的认识。1983 年国际气象与大气物理协会辐射委员会为计算大气辐射模型而把气溶胶按成分分为六种:①水溶性粒子;②沙尘性粒子^①;③海洋性粒子(海浪溅沫形成的,含有 30% 的海盐和 70% 的水);④煤烟;⑤火山灰;⑥75% 硫酸水溶液液滴。

前四种成分在对流层不同地点按一定体积分数组成,表 1.1 显示大陆、城市工厂、海洋三种气溶胶模型的成分。

① 水溶性粒子、沙尘性粒子是陆地近地面空气中气溶胶的主要成分,溶于或不溶于水,沙尘性粒子尺度大,沙尘暴粒子中沙尘性粒子较多,由风从干旱地区地面吹到空中。