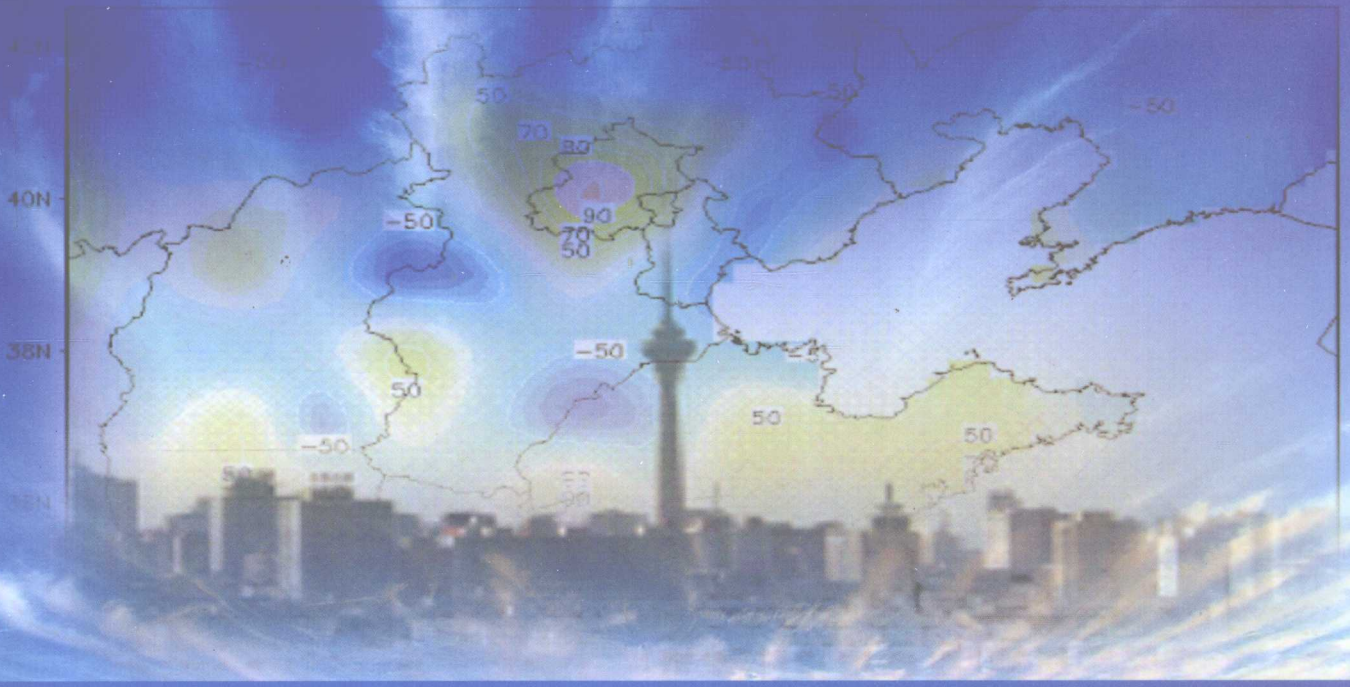


现代气象业务丛书

丛书主编：郑国光



大气成分与大气环境

张小曳 主编

现代气象业务丛书

大气成分与大气环境

主 编 张小曳
副主编 周凌晞 徐晓斌




154400

广西工学院鹿山学院图书馆



d154400

 气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

近几十年来,各国科学家通过对温室气体、反应性气体、臭氧、大气气溶胶等大气成分的研究,逐步认识到日益增加的人类活动最终是通过大气成分的变化、改变了地气及不同区域的辐射平衡,进而影响到天气气候的变化,并导致了近几十年的全球变暖、臭氧层破坏、酸雨问题加剧、空气质量下降等,也为科学界提出了新的命题,使大气成分和与之相连的大气化学、大气物理与大气环境学科成为大气科学领域中最活跃的部分。本书介绍了与现代气象业务有关的大气成分研究和业务服务的一些内容,包括:研究大气成分对天气气候、区域大气环境影响的主要理论和技术方法,大气成分观测业务的主要内容与应用,大气成分的数值预报、资料同化,静稳型和区域输送型污染气象条件的预报,还有现代大气成分业务的体系、平台、流程和产品等。

本书可供从事气象业务工作的科技人员使用,也可供相关高等院校师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

大气成分与大气环境/张小曳主编. —北京:气象出版社,2010.8

(现代气象业务丛书)

ISBN 978-7-5029-5029-3

I. ①大… II. ①张… III. ①大气成分—研究②大气环境—研究
IV. ①P421.3②X16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 160358 号

出版发行:气象出版社

地址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总编室:010-68407112

网址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:林雨晨

封面设计:博雅思企划

责任校对:赵 媛

印刷:北京中新伟业印刷有限公司

开本:889 mm×1194 mm 1/16

字数:300 千字

版次:2010 年 8 月第 1 版

定价:30.00 元

邮政编码:100081

发行部:010-68409198

E-mail: qxcbs@263.net

终审:黄润恒

责任技编:吴庭芳

彩 插:4

印 张:9.75

印 次:2011 年 6 月第 2 次印刷

印 数:1001—2500

总 序

《国务院关于加强气象事业发展的若干意见》(国发〔2006〕3号,以下简称“国务院3号文件”)明确要求,新时期气象事业发展要以邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导,全面贯彻落实科学发展观,坚持公共气象的发展方向,按照一流装备、一流技术、一流人才、一流台站的要求,进一步强化观测基础,提高预报预测水平,加快科技创新,建设具有世界先进水平的气象现代化体系,提升气象事业对经济社会发展、国家安全和可持续发展的保障与支撑能力,为构建社会主义和谐社会,全面建设小康社会提供一流的气象服务。到2020年,建成结构完善、功能先进的气象现代化体系,使气象整体实力接近同期世界先进水平,若干领域达到世界领先水平。

发展现代气象业务,是气象现代化体系建设的中心任务。为此,中国气象局党组认真总结中国特色气象事业发展改革的经验,深入分析我国经济社会发展对气象事业发展的需求,坚持“公共气象、安全气象、资源气象”发展理念,扎实推进业务技术体制改革,加快推进现代气象业务体系建设,努力实现国务院3号文件提出的实现气象现代化的战略目标,并下发了《中国气象局关于发展现代气象业务的意见》(气发〔2007〕477号)。

现代气象业务体系主要由公共气象服务业务、气象预报预测业务和综合气象观测业务构成,各业务间相互衔接、相互支撑。现代气象业务体系建设要以公共气象服务业务为引领、气象预报预测业务为核心、综合气象观测业务为基础。做好现代气象业务体系的顶层设计,扎实推进现代气象业务体系的建设,是当前和今后一个时期气象现代化体系建设,推动气象事业科学发展的重点任务。而编写一套能够体现现代气象科技水平和成果的《现代气象业务丛书》(以下简称《丛书》),以满足各类从事气象业务、科研、管理以及教育培训等人员的实际需要,是中国气象局党组推进现代气象业务体系建设的具体举措。

《丛书》遵循先进性、实用性和前瞻性的原则,紧密围绕建设现代气象业务体系的总体要求,以适应新形势下气象业务技术体制改革需要和提高气象业务科技水平和气象服务能力为宗旨,立足部门,面向行业,总结分析了国内外现代气象科技发展的最新成果和先进的业务技术体制与流程。《丛书》的编写过程是贯彻落实科学发展观和国务院3号文件的具体实践,也是科学推进现代气象业务体系建设的重要内容。

《丛书》共计十五分册,分别是《现代天气业务》、《现代数值预报业务》、《现代气候业务》、《气候变化业务》、《现代农业气象业务》、《大气物理与人工影响天气》、《大气成分与大

气环境》、《气象卫星及其应用》、《天气雷达及其应用》、《空间天气》、《航空气象业务》、《综合气象观测》、《气象信息系统》、《现代气象服务》和《气象防灾减灾》。

《丛书》编写工作是在气象部门科研业务单位、高等院校和科研院所以及气象行业管理专家、科技工作者的参与和大力支持下,在《丛书》编委会办公室的精心组织下进行的,凝聚了各方面的智慧。在此,我对为《丛书》编写工作付出辛勤劳动的专家、学者及参与编写工作的单位和有关人员表示诚挚的谢意!

郑国光

2009年12月于北京

前 言

近二三十年以来,各国科学家通过对温室气体、反应性气体、臭氧、大气气溶胶等大气成分的研究,逐步认识到日益增加的人类活动最终是通过大气成分的变化,改变了地—气、海—气及不同区域的辐射平衡,进而影响到天气和气候的变化,并带来了全球变暖、臭氧层破坏、酸雨问题加剧、空气质量下降等一系列问题。这使得与大气成分相关的大气化学、大气物理与大气环境等学科成为 20 世纪后 10 年和 21 世纪初期大气科学领域中最活跃的部分。

大气成分在区域和全球尺度的分布、输送、变化及其对天气、气候和环境的影响是全球大气观测(Global Atmosphere Watch, GAW)和国际全球大气化学研究(International Global Atmospheric Chemistry, IGAC)等重要计划的核心内容。大气成分研究和业务所涉及的内容与领域十分广泛,地基—空基—天基联网观测、实验分析、数值模式研究及预报系统的开发与应用,都与现代和未来的气象业务与服务紧密相关,大气成分的变化及其影响与反馈涉及的许多研究也与人类社会关注的热点问题关系紧密,所揭示的现象和研究成果是各国可持续发展战略、气候与环境变化国际公约谈判的基础资料和科学依据。大气成分与大气环境工作也是我国气象科学技术和业务建设的新的和重要的组成部分,随着我国社会主义现代化建设全面进入新的历史阶段,国家经济发展、气象事业发展、气候变化外交、学科发展等都对大气成分与大气环境的业务工作提出了更新、更高、更广的要求。

本书介绍了与现代气象业务有关的大气成分研究和业务服务的一些内容,包括:大气成分与天气、气候及区域大气环境的主要理论和技术方法、大气成分观测业务的主要内容与应用、大气化学的数值预报系统、大气成分的资料同化、静稳型和区域输送型污染气象条件的预报以及现代大气成分业务的体系、平台、流程和产品等,希望能对从事气象业务工作的科技人员和大学学生有所帮助。

本书第一章由张小曳、孙俊英、王亚强、车慧正、张华、周凌晞、刘立新、姚波、徐晓斌、林伟立、郑向东、赵艳霞、李怡、刘煜、马建中、王郁、徐大海、徐祥德、薛敏编写,由孙俊英负责统稿;第二章由张晓春、靳军莉、孙俊英、王亚强、周凌晞、刘立新、姚波、徐晓斌、林伟立、郑向东、赵艳霞、李怡、汤洁编写,张晓春进行统稿;第三章由周春红、刘洪利、安兴琴、曹国良、程艳丽编写,周春红统稿;第四章由牛涛编写;第五章由徐祥德院士编写;第六章由杨元琴和王继志编写,第七章由张晓春、刘洪利、周春红、杨元琴、侯青、程艳丽、沈元芳、刘煜、张晓春、刘立新、刘洪利、周春红、杨元琴、侯青、程艳丽、赵艳霞编写,张晓春统稿。

全书由张小曳、周凌晞、徐晓斌编审,李怡对全书进行了编排和校审,张小曳最后审阅定稿。此外,徐祥德院士提供了很多资料,在此表示衷心感谢。

编者

2010 年 5 月

《现代气象业务丛书》编写委员会成员

主 任 郑国光
常务副主任 许小峰
副 主 任 矫梅燕 高学浩 胡 鹏 李 刚

委 员(按姓氏笔画为序)

王式功 王晓云 刘燕辉 孙 健
宋连春 张人禾 张庆红 张俊霞
李国平 杨 军 杨修群 肖子牛
陈洪滨 赵立成 程建军 端义宏

《现代气象业务丛书》审定专家组成员

(按姓氏笔画为序)

丁一汇 丑纪范 王守荣 伍荣生 宇如聪 许健民
吴国雄 李泽椿 沈晓农 陈联寿 赵柏林 徐祥德
涂传治 陶诗言 陶祖钰 巢纪平

《现代气象业务丛书》编写委员会办公室成员

主 任 高学浩(兼)
副主任 陈云峰 于玉斌 胡丽云 郑有飞
成 员 章国材 董一平 曹晓钟 刘莉红 俞小鼎
俞卫平 邹立尧 罗林明 董章杭 成秀虎
马旭玲 张 德 赵亚南

《大气成分与大气环境》分卷编写人员

主 编 张小曳

副主编 周凌晞 徐晓斌

撰稿人(按姓氏笔画排列)

马建中	王亚强	王 郁	王继志	车慧正
牛 涛	刘立新	刘洪利	刘 煜	汤 洁
安兴琴	孙俊英	李 怡	杨元琴	沈元芳
张小曳	张 华	张晓春	林伟立	周春红
周凌晞	郑向东	赵艳霞	侯 青	姚 波
徐大海	徐晓斌	徐祥德	曹国良	程艳丽
靳军莉	薛 敏			

目
录

总序

前言

第 1 章

大气成分与天气、气候及区域大气环境:主要理论和技术方法/1

1.1 气溶胶/1

1.1.1 气溶胶的内涵/1

1.1.2 气溶胶辐射特性/1

1.1.3 气溶胶对气候的影响/4

1.1.4 气溶胶对人体健康的影响/6

1.2 温室气体及温室效应/6

1.2.1 温室气体的内涵/6

1.2.2 温室气体的种类/7

1.2.3 温室效应的影响/9

1.2.4 温室气体的国内外研究进展/11

1.3 反应性气体与大气光化学过程/12

1.3.1 反应性气体的内涵/12

1.3.2 反应性气体的研究现状与目前科学认知/12

1.3.3 对流层大气光化学过程/13

1.3.4 反应性气体在大气中的作用及其环境影响/15

1.4 臭氧总量与分布/17

1.4.1 大气臭氧的分布/17

1.4.2 臭氧的大气环境效应/18

1.4.3 臭氧层耗损及其影响/18

1.5 酸雨/18

1.5.1 酸雨简介/18

1.5.2 国内外研究概况/19

1.5.3 酸雨的环境效应/20

1.6 大气成分的数值模拟/21

1.6.1 大气成分数值模拟简介/21

1.6.2 空气污染预报/21

1.7 大气成分的反转模式系统/24

1.7.1 空气污染预报/24

1.7.2 空气污染指数/24

1.7.3 城市空气污染数值预报系统(CAPPS)简介/25

1.7.4 区域空气质量预报模式源同化新技术与模拟试验/25

	1.7.5 卫星 OMI 产品源同化反演模型及其 CMAQ 空气质量模式应用/37
第 2 章	大气成分观测业务的主要内容和应用/45
2.1	大气成分观测网络/45
2.1.1	观测网络规划设计/45
2.1.2	观测网络远期规划/47
2.1.3	观测网络的运行/48
2.1.4	观测网络的维护维修/48
2.1.5	观测网络的仪器标校/49
2.1.6	大气成分观测环境及站址的通用要求/51
2.2	气溶胶的观测/52
2.3	温室气体及相关微量成分观测/52
2.3.1	温室气体观测网络/52
2.3.2	温室气体观测方法/54
2.3.3	主要成效及应用/55
2.4	反应性气体观测/57
2.4.1	反应性气体观测技术/57
2.4.2	反应性气体观测目标与需求/59
2.4.3	反应性气体观测数据的用途/59
2.4.4	当前我国大气本底站的反应性气体观测/59
2.4.5	反应性气体观测的质量控制与质量保证/65
2.5	臭氧总量与垂直分布/66
2.6	酸雨观测/68
2.6.1	站网发展/68
2.6.2	样品采集/68
2.6.3	降水 pH 值测量/68
2.6.4	降水电导率测量/68
2.6.5	降水化学组成测量/69
第 3 章	大气化学的数值预报系统/70
3.1	基于排放源清单的数值模拟/70
3.1.1	大气污染源/71
3.1.2	大气排放源清单/72
3.1.3	大气污染源模式系统/74
3.2	大气污染反转模式数值预报系统/80
3.2.1	以 CAPP3-3 为例介绍/80
3.2.2	关键技术/80
3.2.3	业务运行及预报效果/82
3.2.4	预报服务/83
第 4 章	大气成分的资料同化/85
4.1	资料同化的缘由、需求及作用/85
4.2	资料同化的历史和主要方法/85
4.3	亚洲沙尘暴资料同化系统/88
4.3.1	概述/88
4.3.2	观测资料 and 同化分析场/88
4.3.3	同化效果说明/89

- 4.4 适应性观测研究——资料同化的又一新领域/91
- 第5章 城市群区域气溶胶卫星遥感—地面观测变分分析模型/92**
- 5.1 卫星遥感气溶胶观测点一面结合的技术途径/92
- 5.1.1 卫星遥感气溶胶光学厚度场/93
- 5.1.2 卫星遥感与地面气溶胶观测相结合的变分技术途径/94
- 5.1.3 气溶胶光学厚度区域性特征/96
- 5.1.4 气溶胶周边影响路径特征分析/97
- 5.1.5 低层气溶胶 PM_{10} 粒子浓度场变分分析/97
- 5.2 北京大气污染过程点一面时空变化特征/99
- 5.2.1 城市群气溶胶影响域及其区域性特征/99
- 5.2.2 大气污染过程点一面相关特征/100
- 第6章 静稳型和区域输送型污染气象条件的预报/104**
- 6.1 静稳型和区域输送型污染气象条件预报的意义/104
- 6.2 气象条件与大气成分(PM_{10} 、 SO_2 等)的相关性研究/104
- 6.3 北京及华北区域空气污染气象条件预报方法研究/105
- 6.3.1 空气质量与气象条件相关分析/105
- 6.3.2 空气质量与气象条件的参数诊断/105
- 6.3.3 Plam 方法在奥运开幕式污染气象条件预报中的应用实例分析/106
- 6.3.4 Plam 参数预报方法检验/107
- 6.3.5 Plam 参数方法应用前景/108
- 6.3.6 空气质量常规业务预报/108
- 6.3.7 空气质量专项预报/108
- 第7章 现代大气成分业务的体系、平台、流程和产品/112**
- 7.1 观测业务体系、平台和流程/112
- 7.1.1 原始观测资料的获取/113
- 7.1.2 观测资料的初级处理/114
- 7.1.3 观测资料质量控制/115
- 7.1.4 信息与技术保障/116
- 7.1.5 观测资料传输与存储/117
- 7.2 预报业务体系、平台和流程/118
- 7.2.1 资料业务与信息共享服务/119
- 7.2.2 数值预报业务/119
- 7.2.3 化学天气预报平台 CUACE/119
- 7.2.4 沙尘暴数值预报系统 CUACE/Dust/120
- 7.2.5 臭氧的数值预报/121
- 7.2.6 紫外线的预测、预报、预警技术/123
- 7.2.7 GRAPES 紫外线数值预报系统(GRAPES-UV)/123
- 7.2.8 区域大气成分数值预报系统 CAPPS-3/126
- 7.2.9 公共多尺度空气质量预报模式动力——统计及源同化技术系统/127
- 7.3 截至 2008 年业务产品介绍/128
- 7.3.1 中国大气成分本底值季报及对比分析产品概述/128
- 7.3.2 中国大气成分本底值季报及对比分析产品的内容和制作流程/129
- 7.3.3 中国大气成分本底值季报及对比分析产品的意义/129
- 7.3.4 酸雨业务/129

	7.3.5 大气成分业务产品(数值预报部分)清单/132
	7.4 服务/133
	7.4.1 大气成分决策服务/133
	7.4.2 大气成分公众服务/133
	7.5 大气成分与大气环境业务与其他相关业务的关系/134
	7.5.1 对其他业务资料的需求/134
	7.5.2 能提供给其他业务的支持/134
附录 1	对流层大气光化学概要/135
附录 2	基于校准信息的反应性气体数据订正方法/136
	参考文献/138

第 1 章

大气成分与天气、气候及区域 大气环境:主要理论和技术方法

本章将主要从气溶胶,温室气体、臭氧、反应性气体等大气成分以及它们对天气、气候、环境和人健康的影响研究方面做概要介绍。

1.1 气溶胶

1.1.1 气溶胶的内涵

气溶胶一词的严格含义是指悬浮在气体中的固体和(或)液体微粒与气体载体共同组成的多相体系。相应地,大气气溶胶是指悬浮在大气中粒径大小在 $0.01 \sim 100 \mu\text{m}$ 的固态和液态微粒共同组成的多相体系。大气气溶胶主要包括了六大类七种气溶胶粒子:沙尘气溶胶,碳气溶胶(黑碳和有机碳气溶胶),硫酸盐气溶胶,硝酸盐气溶胶,铵盐气溶胶和海盐气溶胶。气溶胶的自然来源有风蚀产生的矿物粉尘、海浪飞沫溅射产生的海盐粒子、生物源和火山喷发物等,这些自然来源气溶胶释放量变化通常较小;人为源的气溶胶主要包括了工业过程、矿物燃料燃烧、生物燃料燃烧和敞开燃烧产生和转化的颗粒物等(Andrea 1995)。

1.1.2 气溶胶辐射特性

1.1.2.1 特征参数

气溶胶的辐射特性参数包括:气溶胶的光学厚度 δ 、消光系数 $\sigma_e (= \sigma_{sp} + \sigma_{ap})$, σ_{sp} 是光散射系数, σ_{ap} 是光吸收系数)、相对湿度消光增长因子 $f(RH)$ 、单次散射反照率 Ω 以及不对称因子 g 。它们都是入射光波长的函数。单次散射反照率是表示气溶胶散射和吸收相对重要性的参数,定义为: $\Omega = \sigma_{sp} / \sigma_e$ 。不对称因子 g 反映的是粒子前、后向散射的相对强度,在 -1 (完全后向散射)到 $+1$ (完全前向散射)之间变化。以上参数除了光学厚度以外都可以通过散射理论计算得到。实际气溶胶散射相函数不对称因子都大于 0 。

气溶胶消光系数 $\sigma_e(\lambda) (\text{m}^{-1})$ 的米散射理论计算公式为:

$$\sigma_e(\lambda) = \int_{D_p^{\min}}^{D_p^{\max}} \frac{\pi D_p^2}{4} Q_e(m, a) n(D_p) dD_p \quad (1.1)$$

将气溶胶的密度代入式(1.1)可以得到气溶胶的质量消光系数 $E_e (\text{g}/\text{m}^2)$ 、质量光散射系数 $E_{sp} (\text{g}/\text{m}^2)$ 和质量光吸收系数 $E_{ap} (\text{g}/\text{m}^2)$:

$$E_e(D_p, \lambda, m) = \frac{6Q_e(m, \alpha)}{\pi\rho_p D_p^3} \quad (1.2)$$

$$E_{sp}(D_p, \lambda, m) = \frac{6Q_{sp}(m, \alpha)}{\pi\rho_p D_p^3} \quad (1.3)$$

$$E_{ap}(D_p, \lambda, m) = \frac{6Q_{ap}(m, \alpha)}{\pi\rho_p D_p^3} \quad (1.4)$$

式中 $n(D_p)$ 为气溶胶数浓度谱 (m^{-3})； $Q_e(m, \alpha)$ 为无量纲的消光效率因子； D_p 为气溶胶直径 (m)； α 为尺度参数。

1.1.2.2 粒径和化学成分的重要性

积聚模态气溶胶颗粒粒径范围是 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ ，可吸水使粒径变为 $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ ，在这个粒径范围内，气溶胶的质量消光效率最高。积聚模态的气溶胶粒径与太阳短波辐射波长相近，具有最大的质量消光效率，由于易悬浮在大气中，大气寿命长，因此是辐射强迫的主要贡献者；积聚模态的水溶性气溶胶，如硫酸盐，是最有效的云凝结核，因此间接辐射强迫也最强。爱根核模态 (粒径 $< 0.01 \mu\text{m}$) 会很快碰撞合并，粗模态气溶胶颗粒则很快沉降去除。

人为源气溶胶主要有五类：硫酸盐气溶胶、硝酸盐气溶胶、有机气溶胶 (生物质燃烧或挥发性有机物氧化生成)、烟炱 (Soot) 以及由人为活动产生的沙尘气溶胶。这些气溶胶主要集中在积聚模态，是大气中积聚模态气溶胶数浓度和质量浓度的主要来源，显著影响大气气溶胶的时间和空间分布及其光学性质。

表 1.1 粗模态和积聚模态气溶胶粒子比较 (IPCC 2001)

性质	粗模态粒子 (粒径大于 $1 \mu\text{m}$)	积聚模态粒子 (粒径小于 $1 \mu\text{m}$)
产生机制	机械过程	成核, 凝聚; 多相化学反应; 机械过程 (少部分);
数浓度	很小; 小于 1 cm^{-3} ;	很大; $10 \sim 1000 \text{ cm}^{-3}$
运动	重力沉降为主; 易于降水去除;	布朗运动; 没有沉降或很少受影响;
云凝结核能力	在很低的过饱和度下即可, 但是浓度很小;	需要高过饱和度 (1%), 但是云凝结核主要来源;
pH	通常碱性	酸性

表 1.2 污染大气和清洁大气气溶胶光学性质的区别 (IPCC 2001)

光学参数	污染陆地大气	清洁陆地大气 (非城市) (人类干扰少)	清洁海洋大气 (人为活动干扰可忽略)
光学厚度 δ	0.2~0.8	0.02~0.1	0.05~0.1
单次散射反照率 Ω	0.8~0.95	0.9~0.95	接近 1
光散射系数 $\sigma_{sp} (\times 10^6 \text{ m}^{-1})$	50~300	5~30	5~20
光吸收系数 $\sigma_{ap} (\times 10^6 \text{ m}^{-1})$	5~50	1~10	0.01~0.05
亚微米级质量浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5~50	1~10	1~5
CCN 数浓度 0.7%~1% 过饱和度 (cm^{-3})	1000~5000	10~1000	10~20

气溶胶的化学成分决定了气溶胶的光学性质和吸水性，对于直接辐射有重要影响。大气中的颗粒物通常不是单一组分的，是不同来源的污染物的混合物。有两种混合方式：外混合，即不同成分的气溶胶颗粒以独立个体的形式存在；内混合，如以黑碳为内核外层覆盖硫酸盐等其他气溶胶颗粒物。假设气溶胶颗粒物是由吸光物质黑碳和其他颗粒 (如硫酸盐) 混合而成，则外混合中两种不同光学特性的颗粒互不影响，可以简单地看作辐射强迫作用的抵消；内混合中两种物质互相影响，混合后的光学性质复杂，吸光系数显著增加。

气溶胶的吸水性对形成云的凝结核有重要作用,只有含有一定量吸水性物质的气溶胶颗粒才能成为云的凝结核。大气中亲水性气溶胶种类丰富,包括硫酸盐气溶胶、海盐气溶胶、硝酸盐气溶胶等无机颗粒物,表面含有亲水基团的有机气溶胶等。不同混合方式对于气溶胶的吸水生长也有影响。

1.1.2.3 气溶胶的间接辐射强迫作用

具吸水性的气溶胶颗粒是云凝结核的主要来源。因此气溶胶颗粒的浓度、粒径大小和吸水性对云滴粒径和数浓度都有很大影响,可以改变云的辐射性质,从而改变地球大气系统的辐射平衡。气溶胶主要影响低层暖云。当气溶胶浓度大幅度上升,CCN数目增加,在云中含水量不变的情况下,云滴的数浓度增加,粒径减小,提高云对太阳辐射的反照率,造成负的辐射强迫(第一类间接效应)。由于云本身是红外不透明的,对红外光的光学厚度很大,所以云滴数浓度的增加对于云对红外辐射吸收的影响可忽略。云滴粒径的减小,使降水效率降低,云的寿命增长、云厚度以及云量增加,产生负的间接辐射强迫(第二类间接效应)。云寿命的增加对于云的短波和长波红外辐射都有很大的影响。

气溶胶对间接辐射强迫的影响过程如下:



其中,CCN:云的凝结核;CDNC(cloud droplet number concentration):云滴的数浓度;IN:冰核;IP:冰晶。

1.1.2.4 直接辐射强迫估算以及不确定性分析

(1)直接辐射强迫估算公式

Charlson等(1992)利用简单的辐射传输方程和箱子模型估算辐射强迫,公式如下:

$$\overline{\Delta F_R} \cong -0.5 F_T T^2 (1 - A_C) (1 - R_S)^2 \beta \alpha_{\text{SO}_4^{-2}} f(RH) \times Q_{\text{SO}_2} Y_{\text{SO}_4^{-2}} \tau_{\text{SO}_4^{-2}} / A \quad (1.5)$$

式中: $\overline{\Delta F_R}$ ——太阳短波辐射强迫, W/m^2 ;

$\frac{1}{4} F_T$ ——全球平均大气顶端辐射通量, W/m^2 ;

A_C ——云的覆盖率;

T ——气溶胶上部大气传输的入射光强度百分数;

R_S ——下界面的反照率;

β ——气溶胶的前向散射分数;

$\alpha_{\text{SO}_4^{-2}}$ ——相对湿度为30%下的细颗粒硫酸气溶胶的光散射效率, m^2/g ;

$f(RH)$ ——相对湿度消光增长因子;

Q_{SO_2} ——二氧化硫的人为源强, gS/a ;

$Y_{\text{SO}_4^{-2}}$ ——气相二氧化硫向硫酸盐转化效率;

$\tau_{\text{SO}_4^{-2}}$ ——硫酸盐颗粒物的寿命, a ;

A ——考虑区域的面积, m^2 。

模型的假设:气溶胶净水平传输通量为零,区域辐射强迫与颗粒物质量成正比。主要用于估算硫酸盐气溶胶散射辐射强迫。同时模型忽略了云中气溶胶的辐射强迫以及除硫酸盐之外其他气溶胶颗粒,例如生物质燃烧产生碳黑的影响。

(2)不确定性分析

辐射强迫公式中的各个辐射强迫特征参数可以通过米散射理论计算或是由颗粒物的光学性质反演获得。通过上述方程,以硫酸盐为模型气溶胶,估算全球气溶胶辐射强迫的不确定因子。Charlson在1992年建立此方程,估算人为源硫酸盐的全球平均辐射强迫。由上述方程,估算各个参数不确定因子的大小,并用泰勒展开计算气溶胶辐射强迫不确定因子为2.2(IPCC 2001)。表1.3列出了Charlson估算值以及IPCC计算的不确定因子。

表 1.3 人为源硫酸盐气溶胶全球年平均直接辐射强迫以及不确定性因子 (IPCC 2001)

参数	$1-A_c$	T	$1-R_s$	R	$\alpha(\text{SO}_4^{2-})$	$f(\text{RH})$	Q_{SO_2}	$Y_{\text{SO}_4^{2-}}$	$\tau_{\text{SO}_4^{2-}}$	$\overline{\Delta FR}$
值	0.4	0.76	0.85	—	5	1.7	90×10^{12}	0.4	0.02	-1.3
单位					$\text{m}^2(\text{gSO}_4^{2-})^{-1}$		gS/a		a	W/m^2
不确定因子	1.1	1.15	1.05	1.3	1.4	1.2	1.15	1.5	1.4	2.2

注 1: 总不确定因子 $f_i = \exp\left[\sum(\log f_i)^2\right]^{\frac{1}{2}} = 2.2$

注 2: 不确定因子定义为: 最大值和最小值之差与最可能值的比值。

(3) 气溶胶的直接辐射强迫清单

表 1.4 全球平均辐射强迫清单 (IPCC 2001)

全球平均辐射强迫 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)/a				
	SAR(1750—1993)	TAR(1750—1998)	AR4(1750—2005)	自 TAR 来的变化评价
综合人为辐射强迫	未评估	未评估	1.6(-1.0, +0.8)	最新评估
长寿命温室气体(包括 CO_2 , CH_4 , N_2O 和 halocarbons)	+ 2.45 [15%] (CO_2 1.56; CH_4 0.47; N_2O 0.14; halocarbons)	+ 2.43 [10%] (CO_2 1.46; CH_4 0.48; N_2O 0.15; halocarbons)	+ 2.63 [± 0.26] (CO_2 [± 0.17]; CH_4 0.48 [± 0.05]; N_2O 0.16 [± 0.02]; halocarbons 0.34 [± 0.03])	因为温室气体的增长特别是二氧化碳的增长, 辐射强迫全面增加。卤代烃的趋势是正向的。
平流层臭氧	-0.1[2x]	-0.15[67%]	-0.05 [± 0.10]	重新评估为减弱
对流层臭氧	+0.40[50%]	0.35[43%]	+0.35[-0.1, +0.3]	最好的评估结果为无变化, 但是, 有可能是辐射强迫增加
平流层来自甲烷的水汽	未评估	+0.01 至 +0.03	+0.07 [± 0.05]	最新评估为增加
总直接气溶胶	未评估	未评估	-0.50 [± 0.40]	最新评估
直接硫酸盐气溶胶	-0.40[2x]	-0.40[2x]	-0.40 [± 0.20]	更好的约束效果
直接矿物燃料气溶胶(有机碳)	未评估	-0.10[3x]	-0.05 [± 0.05]	重新评估为减弱
直接矿物燃料气溶胶(黑碳)	+0.10[3x]	+0.20[2x]	+0.20 [± 0.15]	与 TAR 相当, 受间接效应影响
直接生物质燃烧气溶胶	-0.20[3x]	-0.20[3x]	0.03 [± 0.12]	重新评估为有显著变化。受间接效应影响
直接硝酸盐气溶胶	未评估	未评估	-0.10 [± 0.10]	最新评估
直接矿尘气溶胶	未评估	-0.60 至 +0.40	-0.10 [± 0.20]	重新评估结果认为有小部分人为源部分
对云反照率的影响	0 至 -1.5(仅硫酸盐气溶胶)	0 至 -2.0(所有气溶胶)	-0.70 [-1, 1, +0.4]	最好的评估结果
表面反照率(土地利用)	未评估	-0.02[100%]	-0.20 [± 0.20]	更多的研究
表面反照率(冰雪表面的黑碳气溶胶)	未评估	未评估	+0.10 [± 0.10]	新评估
持续线性凝结	未评估	0.02[3.5x]	0.01 [-0.007, +0.02]	重新评估为减小
太阳辐射	0.30[67%]	0.30[67%]	+0.12 [-0.06, +0.18]	

1.1.3 气溶胶对气候的影响

气候系统是由大气圈、水圈、岩石圈、冰雪圈和生物圈共同组成的具有极其复杂的物理、化学和生物

过程的巨大系统。气候变化通常表现为在长期变化趋势上叠加着各种不同时间尺度的波动。不同时间尺度的气候变化具有不同的控制和影响因子。一般认为,在最近几十年到一两百年的时间段上,全球气候的变化受到了自然过程和人类活动的共同影响,其中人类活动导致的大气成分显著增加起到了非常重要的作用。IPCC 先后出版了四次评估报告和一系列特别报告,全面而系统地总结评估了这一领域的研究成果和存在的问题。IPCC 第三次评估报告(IPCC 2001)指出,在众多的气候变化影响因子中,最不确定和亟待解决的是气溶胶的辐射强迫作用。该报告认为,在工业革命(1750 年)以来的 250 多年来里,太阳常数(气候变化自然因素的主要代表)变化的贡献估计为 $+0.3 \pm 0.2 \text{ W/m}^2$, CO_2 等温室气体增加引起的全球年均辐射强迫为 2.4 W/m^2 ,误差大约只有 10%(图 1.1)。但是,各种气溶胶所产生的直接辐射强迫的估计,却存在着极大的不确定性,例如硫酸盐为 $-0.4 (-0.2 \sim -0.8) \text{ W/m}^2$; 生物质燃烧产生的气溶胶为 $-0.2 (-0.07 \sim -0.6) \text{ W/m}^2$,不确定性因子高达 4~9 倍,其他类型气溶胶辐射强迫的不确定性就更大。

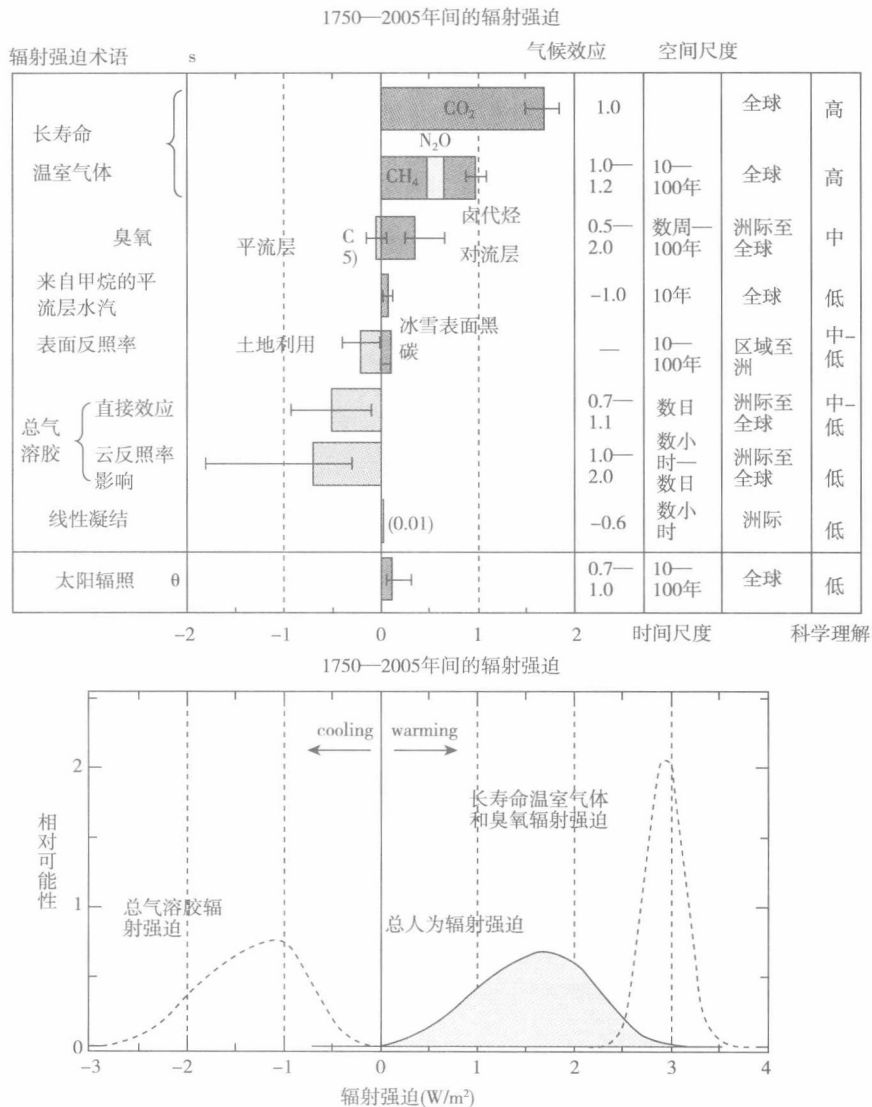


图 1.1 1750—2005 年间各种辐射强迫因子的全球平均辐射强迫(IPCC,2001)

气溶胶辐射强迫的估算比全球均匀混合的温室气体辐射强迫的估算更复杂,而且有更大的不确定性。主要原因是:

(1)气溶胶的直接和间接辐射效应都与颗粒物粒径和化学组成有关,不能简单以气溶胶质量源强衡量其辐射强迫的相对大小;