

PM_{2.5}

PM_{2.5} AND
THE ENVIRONMENT
IN CHINA

与环境

曹军骥 等◎编著



科学出版社

PM_{2.5} 与环境

曹军骥 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

2011 年末我国发生多次大范围雾霾事件，引起国内外广泛关注，PM_{2.5} 概念被迅速广泛传播。这不仅是公众生产、生活的社会热点问题，更是国内外科学研究的焦点问题。本书通过对全国 PM_{2.5} 外场观测、遥感反演、实验分析、数值模拟等研究工作，以 PM_{2.5} 浓度水平和理化组成为基础，阐述我国 PM_{2.5} 的来源和时空分布特征，提出我国 PM_{2.5} 污染的管理体系和控制建议，同时深入总结了 PM_{2.5} 的环境、健康和气候效应。本书内容丰富，数据翔实，案例充分、针对性强，力求做到理论与实践并重、研究与管理应用相结合。

本书供大气环境科学研究人员以及管理部门专业人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

PM_{2.5} 与环境/曹军骥等编著. —北京：科学出版社，2014. 4
ISBN 978-7-03-040382-7
I. ①P… II. ①曹… III. ①细颗粒物—影响—空气
污染—研究 ②细颗粒物—影响—大气环境—研究
IV. ①X513 ②X510. 31
中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 071391 号

责任编辑：祝 洁 甄文全 / 责任校对：张妮华
责任印制：肖 兴 / 封面设计：范璧合

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

*

2014 年 4 月第 一 版 开本：787×1092 1/16
2014 年 4 月第一次印刷 印张：27 3/4
字数：640 000

定价：298.00 元
（如有印装质量问题，我社负责调换）

作者简介

曹军骥,二级研究员、博士生导师,现任中国科学院地球环境研究所所长,兼任亚洲气溶胶学会(AARA)主席、国际气溶胶学会(IARA)执行委员、国际空气与废弃物管理学会(AWMA)中国学会主席、SCI期刊 *Journal of the Air & Waste Management Association* 副主编、*Atmospheric Environment* 编委等。主要从事大气气溶胶与环境、PM_{2.5} 研究与控制、古气溶胶循环与过去全球变化等研究。国家基金委杰出青年科学基金获得者,新世纪百千万人才工程国家级人选。曾获 Frank A. Chambers 国际空气污染控制杰出成就奖(亚洲唯一)、亚洲气溶胶研究青年科学家奖、中国青年科技奖、“中国科学院杰出青年”等,分别于 2008 年和 2012 年获得国家自然科学二等奖。已发表 SCI 论文 200 余篇,被 SCI 引用约 4000 次。

序 I

军骥是1996年来读我的博士,考虑当时学科发展的需要,我安排他参与我正在主持的一项UNDP(联合国开发计划署)项目“西安大气颗粒物污染与控制”,鼓励他开始从事大气颗粒物及大气化学研究,并由张小曳研究员具体指导。当时UNDP项目在全球遴选到大气颗粒物研究的著名专家美国沙漠研究所(DRI)John Watson和Judith Chow教授,与我们开展UNDP的咨询研究。当时该项目主要是针对TSP的来源解析,并适当扩展到 PM_{10} 。恰巧在1997年美国出台全球第一个 $PM_{2.5}$ 的标准,我感到这个领域将有很大的发展空间。在1997年11月,抓住Judith Chow教授来实验室访问讲学的机会,我与她商定选派军骥去他们研究所进修半年,重点学习 $PM_{2.5}$ 的基本理论与研究方法,为国内开展相关研究提供科学储备。

1999年4月军骥在UNDP项目资助下开始到DRI进修,当他在10月回国时,Judith Chow教授给我写了一封评价信,高度赞扬军骥在美期间刻苦学习,掌握了 $PM_{2.5}$ 研究的基本方法,得到研究组人员的一致好评,并勉励他将来进一步与DRI合作,开展中国的 $PM_{2.5}$ 研究。

军骥于2001年初在我所获得博士学位,留所工作。为进一步开展 $PM_{2.5}$ 研究工作,我鼓励并支持他去香港理工大学空气实验室李顺诚教授处从事 $PM_{2.5}$ 相关的合作研究。他先后去了三次,前后达到两年多时间。在香港合作期间,他与李顺诚教授课题组合作于2003年组织了一次全国14城市的 $PM_{2.5}$ 同步观测,这也是国内第一次多城市 $PM_{2.5}$ 的季节性同步观测工作,此后他陆续发表十余篇较高影响因子的SCI研究论文,在学术界引起关注。此外,从2002年3月起,他与李顺诚、Judith Chow教授合作,共同在地球环境研究所观测站开展连续观测,先是每6天采集一个样品,后从2003年9月改为每天采集一个 $PM_{2.5}$ 样品、每3天采集一个 PM_{10} 样品,直至今日,该项工作仍在继续。这条 $PM_{2.5}$ 曲线成为当前国内唯一的一条超过10年的连续观测序列,相应的化学全组分资料可为 $PM_{2.5}$ 的环境健康乃至气候影响研究提供弥足珍贵的观测资料。

2004年8月军骥从香港回所后,我和周卫健院士鼓励并支持他建立实验室开展独立的 $PM_{2.5}$ 研究。他首先建立了含碳组分、离子组分及元素组分的分析实验室,后拓展至有机分析、同位素分析以及数值模拟研究,最近又扩展至控制技术及管理对策等多方面的探讨,对我国城市 $PM_{2.5}$ 的理化特征、时空分布、来源组成等方面取得较多成果,先后发表有关 $PM_{2.5}$ 的SCI论文100余篇,在国际上产生较好反响。在关注理论探讨的同时,我还鼓励他注重理论联系实际,将研究成果转化为陕西省、西安市等决策管理部门所应用,军骥研究组与周卫健和我等一起先后为省市领导与部门提交近10份咨询报告,主导了陕西省尤其是西安市的大气颗粒物污染治理方向的研究。此外,他还于2010年5月在西安举办了主题为“Leapfrogging Opportunities for Air Quality Improvement Conference”(空气污

染改善的跨越式机会)的 A&WMA(国际空气与废弃物管理学会)特别年会,来自世界 35 个国家的 450 余名参会者来西安参会,进一步宣传了我国在空气污染领域研究的新进展。

2011 年底以来,PM_{2.5}在全国范围内引起高度关注,我渐渐感到国内人们对 PM_{2.5}的基础认识不够,建议军骥组织编写一部 PM_{2.5}的专门材料。他于 2013 年 6 月开始组织课题组成员集体攻关,加班加点,将其课题组多年的研究成果与最新进展整理成册,半年内完成了该书的编写。该书的出版总结了近十余年军骥从事 PM_{2.5}理论与实践的研究成果,也是军骥广泛吸引人才,注重实验室与外场观测和数值模拟相结合,团结大家迈向国际学术前沿并为国家需求服务的优秀成果。该成果对 PM_{2.5}的基础理论、研究方法和前沿进展都有尚好阐述,体现在如下方面:

第一,系统性。该书对 PM_{2.5}研究内容覆盖较全面,提出了一个相对完整的有关 PM_{2.5}的知识体系,包括基本定义、研究简史、采样方法、理化分析、遥感观测、分布特征、来源组成、重污染成因、各种环境健康气候效应、管理对策、控制技术 etc,并对我国不同地区 PM_{2.5}研究成果进行归纳总结,使读者对 PM_{2.5}有较全面了解。

第二,理论性。该书结合多年的研究心得,力图从理论层面探讨各种空气污染现象。包括通过全国 14 城市 PM_{2.5}的观测-分析-模拟相结合研究,深入理解我国城市 PM_{2.5}的组成与来源;对 PM_{2.5}的环境影响不仅停留在其对空气质量的影响上,而且通过能见度的理论分析,结合案例,从地形、气象、排放、物理与化学反应等多角度探讨重污染事件(通常表现为雾霾天气)的影响;同时对一些前沿的新粒子生成、物理化学反应机制等也有所述评等,以期从理论角度认识雾霾成因,为制定相应控制对策提供指导。

第三,实用性。该书另外一个特点是注重成果的实用性,结合多个案例来深入认识 PM_{2.5}对能见度、文物腐蚀、生态系统、酸雨形成以及健康与气候的可能影响,并且总结国内外空气污染与 PM_{2.5}管理控制经验,提出我国城市 PM_{2.5}科学管理的初步框架,梳理总结各类 PM_{2.5}污染控制技术,等等,使读者更容易理解这些理论成果,以便在实际工作中易于应用。

总之,我认为该书对 PM_{2.5}研究的重点内容多有涉及,对现阶段 PM_{2.5}研究与控制的关键内容进行了很好的归纳与总结,提出了未来研究的方向,是一部易读的也许是我国出版的第一部专注于 PM_{2.5}参考书。相信通过 PM_{2.5}研究的发展,该书内容将会不断更新和进步。但我深信,该书将为国家紧迫治理 PM_{2.5}与雾霾污染尽一份微薄之力,为真正实现美丽中国的梦想做出贡献。

中国科学院院士

2014 年 1 月于西安

序 II

This book is an essential reference for air quality regulators, scientists, engineers, teachers, and students. It is the first of its kind written in the Chinese language. It tracks the evolution and history of particulate matter (PM) ambient air quality standards to the current $PM_{2.5}$ mass indicator. *PM_{2.5} and the Environment in China* assembles and summarizes Chinese $PM_{2.5}$ mass and chemical composition for 5 large urban areas, 27 provinces, and 4 special administrative districts. This book provides a first step for understanding $PM_{2.5}$ in China, including where it comes from, how it is measured, how it affects health, visibility, ecosystems, and climate, and how to reduce its concentrations.

PM pollution has long been known to cause adverse health effects, reduce visibility, and cause soiling on clothing and surfaces. More recently, PM components have been implicated in climate change and ecosystem (including forests and crops) damage. The sizes of suspended PM in the atmosphere are effectively limited at the upper end (particles with diameters $> \sim 30 \mu m$) by gravitational deposition and at the lower end (diameters $< \sim 0.03 \mu m$) by diffusion, evaporation, and coagulation. $PM_{2.5}$ mass (most of which is found in the 0.1 to 2.5 μm region) comprises particle sizes that can remain airborne for several days and transport over distances of 1000 km or more. Whereas coarse PM mass (the difference between PM_{10} and $PM_{2.5}$ or $PM_{10-2.5}$) is composed mostly of directly-emitted particles such as geological material (fugitive dust), sea salt, and bioaerosol, $PM_{2.5}$ consists of both directly-emitted particles and those that form from precursor gases. As a result, other regulated pollutant emissions such as SO_2 and NO_x must be reduced because they oxidize to PM sulfates and nitrates after emission, respectively. Non-regulated pollutant emissions, such as VOCs and NH_3 must also be considered, as they contribute to the $PM_{2.5}$ formation process. The importance of these precursors, and the mechanisms by which they convert to PM, are covered in this book.

$PM_{2.5}$ also has the most deleterious effects on public health. Owing to its long residence times, it spreads and mixes over urban and regional scales, sometimes at great distances from the emission sources, thereby maximizing the number of people exposed. Whereas much of the $PM_{10-2.5}$ deposits in the upper respiratory tract, $PM_{2.5}$ penetrates into the more sensitive alveolar areas of the human lung where it can cause short-term respiratory distress and long-term cancers. Many toxic elements, such as V, Ni, As, Se, Cd, Pb, and organic compounds, such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)

are present in the $\text{PM}_{2.5}$ fraction, owing to their condensation on primary combustion particles upon cooling soon after emission. This book provides a good summary of these effects and points to more detailed reviews of the topic.

$\text{PM}_{2.5}$ contains many particles with sizes comparable to the wavelength of visible light. This results in efficient scattering and absorption of incoming light along a sight-path, which causes the intense and persistent haze seen in so many Chinese cities. Some people have claimed that this haze is caused by fog, but if this is so then airport visual ranges would not have degraded by factors of 5 or more over the past 30 years. $\text{PM}_{2.5}$ is the main cause of urban and regional haze, and low visual range is a good indicator of high concentrations, as elucidated in this book. The same scattering, absorption, and extinction that causes haze also affects the Earth's climate; the black carbon component in $\text{PM}_{2.5}$ is a global warming forcing agent of the same magnitude as other greenhouse gases.

Air quality management to lower $\text{PM}_{2.5}$ levels is a process, as well as an application of emission reduction technology. Many Chinese industries and vehicles have pollutant gas and PM emission controls in place, and the most effective of these are described in the book. However, if the effectiveness of these controls is not monitored or enforced, there is no accountability for actual emission reductions. Obtaining accurate, real-world, multipollutant emission measurements is also a challenge, and it is not met by adapting antiquated source testing methods used by the USEPA for regulatory purposes. More modern leapfrogging opportunities are identified here that should be implemented in China for more cost effective and rapid emission assessments and accountability.

The most important feature of this book is that it is specifically written for the technically-competent non-specialist. It took more than two decades from the mid 1960s to develop academic programs and trained air quality specialists in North America and Europe to staff the national, state, and local agencies, as well as the industries, that needed to manage air quality. China cannot wait this long. Rapid capacitation is needed to quickly devise and implement air quality management strategies at the provincial and city levels. $\text{PM}_{2.5}$ is a perfect focus, owing to its multipollutant/multieffect nature, and this book will give every air quality professional in China a leg up in forming a successful career to improve air quality for everyone.

Division of Atmospheric Sciences,
Desert Research Institute
Professor **Judith C. Chow**

前 言

随着我国国民经济的快速增长和城市化进程的加快,欧美发达国家经历了百余年的空气污染问题在我国近二十年内集中暴发。目前,我国空气污染逐步由传统的总悬浮颗粒物(TSP)及可吸入颗粒物(PM_{10})、 SO_2 污染转向以细颗粒物($PM_{2.5}$)和污染气体(O_3 、 SO_2 、 NO_x)等形成的复合型大气污染。特别是2011年末以来,多次大范围雾霾事件引起了国内外广泛关注,导致 $PM_{2.5}$ 的概念迅速被广泛接受,并成为当前我国大多数城市的首要污染物。国务院于2012年初即颁布了新的环境空气质量标准,使我国成为第一个出台 $PM_{2.5}$ 标准的发展中国家。新增 $PM_{2.5}$ 标准并将于2016年正式实施,各个城市都将面临 $PM_{2.5}$ 控制的迫切任务。据估计,我国大多数城市如要达到 $PM_{2.5}$ 标准约需要20年时间,因此亟待有关 $PM_{2.5}$ 及相关研究成果来科学指导达标与污染治理工作。

我国 $PM_{2.5}$ 的污染特征、来源组成及环境效应等,不仅是公众生产和生活的热点社会问题,更是国内外科学研究的焦点问题。虽然国内过去10多年的研究在某些领域达到了国际水平,但是还未形成完整的 $PM_{2.5}$ 学科体系,研究成果系统性不足,与美国等发达国家相比仍存在一定的差距,离真正为国家需求提供科技支撑尚有较大距离。研究表明, $PM_{2.5}$ 污染与TSP或 PM_{10} 污染在来源、组成与控制方面有较大差别。然而,目前国内尚缺少针对 $PM_{2.5}$ 研究与污染控制的专门教材或专著,这在很大程度上限制了人们深入理解 $PM_{2.5}$ 的行为特征及其污染治理工作。为了满足我国当前 $PM_{2.5}$ 污染研究和控制的迫切要求,出版系统研究 $PM_{2.5}$ 颗粒物的专著是非常必要的。

鉴于此,作者深感有必要梳理我国 $PM_{2.5}$ 研究已有成果,围绕亟须开展的污染控制工作总结 $PM_{2.5}$ 的理论体系。作者从 $PM_{2.5}$ 的概念、历史、采样分析、遥感观测新手段、理化组成与时空分布、来源、环境健康气候效应、管理与控制等方面探讨建立完整的 $PM_{2.5}$ 科学体系,以满足各类科研、技术与管理人员之急需。本书以本研究组17年在 $PM_{2.5}$ 研究方面取得的成果为主,结合国内外代表性成果,重点阐明 $PM_{2.5}$ 科学体系及其环境健康等影响。其主要内容包括下述几个方面。一是通过 $PM_{2.5}$ 外场观测和实验分析,以 $PM_{2.5}$ 浓度水平和理化组成资料为依据,阐述我国的时空分布特征和来源。二是系统梳理并归纳总结 $PM_{2.5}$ 研究的基本知识,主要以本研究组研究成果为案例,尝试阐述 $PM_{2.5}$ 科学的知识体系,为科学认识 $PM_{2.5}$ 的组成、特性和分布规律提供参考。三是结合本研究组成果与国内外最新成果,对 $PM_{2.5}$ 研究前沿科学问题如重污染事件成因、新粒子生成、 $PM_{2.5}$ 的环境、健康和气候效应等进行了评述,为未来 $PM_{2.5}$ 研究方向提出建议。四是参照国外空气质量管理经验,对比总结 $PM_{2.5}$ 的主要控制技术,探索建立具有我国特色的 $PM_{2.5}$ 管理体系,提出我国 $PM_{2.5}$ 污染的管理体系和控制建议,为我国管理和企业部门有效控制 $PM_{2.5}$ 污染的提供参考和借鉴。

本书主要是集成了科技部科技基础性工作专项项目“我国 $PM_{2.5}$ 主要排放源谱的编

研”和中科院战略先导性项目课题“我国气溶胶历史变化及气候效应”、陕西省科技统筹创新工程项目“关中地区大气细颗粒物污染特征与防治关键技术研究及示范”和中国科协继续教育试点项目资助的部分研究成果完成的。

本书利用了外场观测、遥感反演、化学分析、同位素分析、数据统计和数值模拟等多种方法开展研究,注重理论和实践相结合,技术方法与数据案例相结合,研究与管理应用相结合。

参加本书编写工作的课题组成员包括张宁宁、徐红梅、陈阳、苏小莉、沈振兴、赵竹子、李楠、王景芝、朱崇抒、张蓉、王启元、倪海燕、田杰、赵淑雨、龙鑫、周雅清、田鹏山、魏崇、王浥尘、张婷、胡塔峰、贾文婷、李建东、戴文婷、王平、李建军和刘随心,对他们的辛勤劳动表示特别的感谢,没有他们齐心协力的高效工作,本书是无法如此快完成的。美国沙漠研究所(Desert Research Institute, USA)的 Judith C. Chow 教授逐字逐句阅读全文并提出详细的建议与意见,John G. Watson 教授、王小亮副教授、Antony Chen 副教授认真阅读了有关章节并给出很好的建议;中国科学院大气物理研究所张仁健教授、香港理工大学李顺诚教授、香港中文大学 Kin-fai Ho 博士、复旦大学阚海东教授、北京大学黄薇教授及瑞士保罗谢勒研究所(Paul Scherrer Institute, PSI)黄汝锦博士等阅读了本书并提出建议;我所王格慧、韩永明、李国辉、铁学熙等研究员阅读了书稿内容,提出了很多修改建议与意见,在此表示特别感谢。对我所周卫健院士等对该项工作的大力支持,安芷生院士和张小曳研究员对我们进行的大气颗粒物研究给予的长期支持和指导在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,同时 $PM_{2.5}$ 研究正处于快速发展时期,书中难免存在不足,敬请读者不吝批评指正。

作者

2013 年 12 月

目 录

序 I	
序 II	
前言	
第一章 PM _{2.5} 概述	1
第一节 大气颗粒物	1
一、大气颗粒物简介	1
二、大气颗粒物粒径分布	1
三、颗粒物浓度的表示方法	3
第二节 PM _{2.5} 的基本特征	4
一、PM _{2.5} 主要来源	4
二、PM _{2.5} 的物理性质	4
三、PM _{2.5} 的化学组成	5
四、PM _{2.5} 的生物性质	6
第三节 PM _{2.5} 的研究意义及我国污染现状	6
一、PM _{2.5} 对环境、健康及气候的影响	6
二、PM _{2.5} 对生态文明、经济及社会发展的影响	7
三、我国 PM _{2.5} 污染现状	8
第二章 PM _{2.5} 的研究进展及标准	9
第一节 国外 PM _{2.5} 研究进展	9
一、空气污染发展历程	9
二、美国和欧洲 PM _{2.5} 研究	11
第二节 国内 PM _{2.5} 研究进展	13
第三节 国内外环境空气 PM _{2.5} 标准概述	14
一、美国环境空气 PM _{2.5} 标准	14
二、欧洲环境空气 PM _{2.5} 标准	16
三、WHO 关于环境空气 PM _{2.5} 指导性标准	16
四、我国环境空气 PM _{2.5} 标准	17
第三章 PM _{2.5} 的采样与分析方法	19
第一节 PM _{2.5} 样品的离线采集	19
一、过滤采集	19
二、采样器的组成	19
三、切割头的选择	20
四、滤膜的选择及滤膜支撑	22
五、采样流量的测定、控制和运行	23
六、美国 FRM 和 FEM 采样器简介	24

第二节 PM _{2.5} 实时在线监测	24
一、质量浓度在线监测	25
二、数浓度、粒径谱分布在线监测	26
三、化学组分在线监测	27
第三节 PM _{2.5} 常规分析	31
一、质量浓度的分析	31
二、元素分析	31
三、离子分析	33
四、碳组分分析	34
五、热解析-气相色谱/质谱联用(TD-GC/MS)的常规有机分析	35
第四节 PM _{2.5} 非常规分析	36
一、有机组分分析	37
二、单颗粒的表面形态和成分分析	41
三、同位素分析	42
四、生物组分分析	45
第五节 质量控制与质量保证	46
一、标准操作程序	46
二、质量审核目标	47
三、实验室操作审核	47
四、野外操作审核	47
第四章 遥感技术在 PM _{2.5} 研究中的应用	49
第一节 气溶胶遥感技术	49
第二节 遥感技术监测 PM _{2.5} 的研究现状	51
第三节 PM _{2.5} 质量浓度遥感反演的基本方法及实例分析	54
一、遥感反演的基本方法	55
二、基于 PARASOL AOD 估算西安地区 PM _{2.5} 质量浓度	57
第四节 PM _{2.5} 组分的遥感反演	62
一、地基遥感观测反演 PM _{2.5} 组分	63
二、卫星遥感观测反演 PM _{2.5} 组分	64
第五节 遥感技术在 PM _{2.5} 研究中的局限及其趋势展望	66
第五章 我国 PM _{2.5} 研究综述	69
第一节 全球 PM _{2.5} 分布概况	69
第二节 我国 PM _{2.5} 时空分布	70
第三节 北京市 PM _{2.5} 及其化学组成、来源变化特征	75
一、北京市概况	75
二、PM _{2.5} 质量浓度及化学组分特征	75
三、来源变化特征	89
四、奥运期间颗粒物浓度及化学组分变化特征	92
第四节 上海市 PM _{2.5} 及其化学组成、来源变化特征	93
一、上海市概况	93

二、PM _{2.5} 质量浓度及化学组分特征	94
三、世博会期间的空气质量状况	105
第五节 广州市 PM _{2.5} 及其化学组成、来源变化特征	106
一、广州市概况	106
二、PM _{2.5} 质量浓度及化学组分特征	106
三、亚运会期间的空气质量状况	117
第六节 西安市 PM _{2.5} 及其化学组成、来源变化特征	118
一、西安市概况	118
二、样品采集与分析方法	118
三、PM _{2.5} 质量浓度及化学组分特征	119
四、城区与郊区(背景点)PM _{2.5} 质量浓度与化学组分的差异研究	130
五、PM _{2.5} 来源变化特征	131
六、PM _{2.5} 质量浓度与西安市经济能源变化的关系	132
第七节 其他地区 PM _{2.5} 研究总结	132
一、东北地区	133
二、华北地区	137
三、华东地区	141
四、华中及华南地区	152
五、西部地区	157
第六章 我国 14 个城市 PM _{2.5} 时空分布、来源与变化	165
第一节 我国 14 个城市 PM _{2.5} 的同步观测	166
第二节 PM _{2.5} 质量浓度及元素、离子、碳组成变化特征	168
一、质量浓度时空分布	168
二、元素分布特征	170
三、水溶性无机离子特征	171
四、OC、EC 及 8 个碳组分的时空分布	172
五、14 个城市 PM _{2.5} 的物质平衡	176
第三节 PM _{2.5} 非常规化学特征及其来源示踪	177
一、水溶性金属和非金属元素分布	177
二、char 和 soot 时空分布特征	180
三、14 个城市有机组分时空分布	181
四、有机物/有机碳比值分析	183
五、稳定碳同位素测定与示踪	184
第四节 PM _{2.5} 模式与观测对比	187
一、实测数据用于酸雨研究	188
二、有机碳和黑碳排放源清单验证	189
三、区域模型碳组分验证	189
第五节 我国 14 个城市 2003 年和 2013 年 PM _{2.5} 对比	190
一、14 个城市 PM _{2.5} 质量浓度的空间分布	190
二、时间序列及冬季高污染的过程分析	191

三、PM _{2.5} 质量浓度的 10 年对比	192
第七章 PM_{2.5} 的主要来源与源解析	195
第一节 PM _{2.5} 主要来源	195
一、一次排放	195
二、二次转化	195
第二节 PM _{2.5} 来源解析技术及其应用	199
一、化学标识物比值等定性及半定量示踪法	199
二、同位素示踪	202
三、单颗粒表征与源识别	203
四、定量来源解析的受体模型	205
五、过程解析的模型方法	212
六、源解析技术的发展趋势	214
第三节 我国 PM _{2.5} 源谱的研究	215
一、PM _{2.5} 源谱样品采样方法概述	217
二、我国主要 PM _{2.5} 排放源源谱	225
三、我国源谱工作的不足	234
第四节 源排放清单综述	235
一、源排放清单建立方法	235
二、我国源排放清单的研究	236
三、我国排放清单的应用	241
四、我国排放清单工作的不足	242
第八章 重污染事件的历史、成因与控制	244
第一节 重污染事件的概念	244
第二节 重污染事件危害及举例	245
第三节 历史上著名的重污染事件	246
一、伦敦烟雾事件	246
二、洛杉矶光化学烟雾事件	246
第四节 我国重污染事件概述	248
一、北京市	248
二、西安市	251
三、上海市	252
四、香港	253
第五节 重污染事件的成因分析	254
一、不利的天气条件	254
二、空气相对湿度	255
三、地形地貌	255
四、气态二次无机组分的形成	256
五、重污染形成过程中的新粒子生成和生长	256
六、雾滴/云滴中的二次污染物	257
第六节 重污染事件的预警及控制建议	262

第九章 $PM_{2.5}$ 的环境影响	264
第一节 $PM_{2.5}$ 对大气能见度的影响	264
一、大气颗粒物的光学特性	264
二、颗粒物与能见度的关系	266
三、能见度测量方法	268
四、美国能见度研究历史及现状	268
五、我国能见度的变化趋势和现状	269
六、我国典型城市能见度下降案例分析	271
第二节 $PM_{2.5}$ 对文物的影响	275
一、颗粒物对文物保存环境的影响	275
二、文物保存微环境监测	277
三、 $PM_{2.5}$ 对文物的影响机理与启示	279
第三节 $PM_{2.5}$ 与生态系统的相互作用	281
一、 $PM_{2.5}$ 与植物的相互影响	281
二、 $PM_{2.5}$ 与自然生态系统的相互作用	281
三、 $PM_{2.5}$ 与城市生态系统的相互作用	282
第四节 $PM_{2.5}$ 对酸雨的影响	284
一、酸雨的形成	284
二、酸雨中 $PM_{2.5}$ 的作用	284
第十章 $PM_{2.5}$ 的健康影响	286
第一节 $PM_{2.5}$ 对人体健康的影响概述	286
一、 $PM_{2.5}$ 物理特性对健康的影响	287
二、 $PM_{2.5}$ 化学成分对健康的影响	288
三、 $PM_{2.5}$ 生物组分对健康的影响	290
第二节 $PM_{2.5}$ 的急慢性健康效应及致病机理探讨	290
一、 $PM_{2.5}$ 的急慢性健康效应	291
二、呼吸系统疾病	292
三、心血管疾病	292
四、癌症和遗传毒性	293
第三节 我国 $PM_{2.5}$ 健康影响研究实例	295
一、北京市	295
二、上海市	296
三、广州市	297
四、西安市	298
五、4个城市 $PM_{2.5}$ 健康研究对比	301
第十一章 $PM_{2.5}$ 的气候影响	304
第一节 气候概述	304
一、气候系统的定义与特征	304
二、气候系统的辐射平衡	305
三、气候系统的影响因子	306

第二节 气溶胶的气候效应.....	307
一、气溶胶的直接气候效应	308
二、气溶胶的间接气候效应	308
第三节 气溶胶气候效应的研究进展.....	309
一、气溶胶对直接辐射的影响	309
二、气溶胶对云和降水的影响	309
三、气溶胶对季风和水循环的影响	315
四、气溶胶对冰冻圈的影响	317
五、气溶胶对海洋生态系统的影响	318
第十二章 PM _{2.5} 的空气质量管理与控制	321
第一节 空气质量管理及其理论.....	321
一、空气质量概况	321
二、空气污染控制理论	322
第二节 国外 PM _{2.5} 污染控制管理	323
一、美国 PM _{2.5} 空气环境质量管理	323
二、欧洲 PM _{2.5} 污染控制管理	326
三、日本 PM _{2.5} 污染控制管理	327
四、发达国家空气污染控制经验和教训	328
第三节 空气质量及 PM _{2.5} 管理体系	329
一、空气质量管理体系	329
二、PM _{2.5} 管理体系.....	332
三、洛杉矶 PM _{2.5} 管理经验	332
第四节 我国 PM _{2.5} 污染管理	334
一、我国空气质量管理及颗粒物标准演变	334
二、我国 PM _{2.5} 浓度标准制定	336
三、我国 PM _{2.5} 污染控制管理案例	337
第五节 中美环境空气质量比较.....	339
一、中美空气质量管理机构设置	339
二、中美空气质量监管和执行体系	341
三、中美空气质量评价体系	343
四、我国 PM _{2.5} 管理体系建立	344
第六节 我国大气复合污染和区域联防联控.....	346
一、大气复合污染	346
二、区域联防联控	347
三、多污染物协同控制	348
第七节 PM _{2.5} 污染控制技术	349
一、工业 PM _{2.5} 污染控制技术	349
二、机动车污染控制技术	354
三、其他 PM _{2.5} 污染源控制技术	355
参考文献.....	358
缩略词中英文对照表.....	422

第一章 PM_{2.5}概述

细颗粒物 (fine particle, PM_{2.5}) 是指悬浮在大气中空气动力学等效直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物, 其主要含有多环芳烃和重金属等对人体有毒害作用的成分, 部分成分如黑碳 (black carbon, BC) 对太阳光有较强的吸收特性。PM_{2.5} 由于具有较长的大气滞留时间等特征, 所以对环境质量、大气能见度、人体健康及气候变化均有重要的影响。工业革命以来, 大规模地使用化石燃料并向空气中大量排放气态和固态污染物, 造成了一些严重的环境公害问题, 颗粒物污染引起了人们的广泛关注。欧美等发达地区经过近半个多世纪的污染治理, 特别是制定了严格的环境空气质量标准, 空气质量得到了显著改善。20 世纪 80 年代以后, 随着我国国民经济的快速增长和城市化进程的加快, 发达国家经历了百余年的空气污染问题在我国经济发达地区二三十年内集中暴发, 如京津冀、珠江三角洲和长江三角洲等地区, 空气质量状况令人担忧。目前, 我国空气污染已由传统的总悬浮颗粒物及可吸入颗粒物污染转向以 PM_{2.5} 和污染气体 [臭氧 (O₃)、二氧化硫 (SO₂)、氮氧化物 (NO_x)] 形成的复合型污染。PM_{2.5} 成为我国当前首要大气污染物, 是改善环境空气质量的主要瓶颈之一, 其污染状况、化学特征及其形成机制等不仅是国内外科学研究的重点问题, 而且成为影响我国公众生产和生活的热点社会问题。

第一节 大气颗粒物

一、大气颗粒物简介

颗粒物和气溶胶是广泛使用的两个紧密关联, 但性质不同的概念。气溶胶 (aerosol) 是指液体或固体微粒均匀地分散在气体中形成的相对稳定的悬浮体系 (王明星, 1999)。整个人类赖以生存的环境大气可视为一个宏大的气溶胶体系。大气中的气溶胶以粉尘 (dust)、烟羽 (fume)、烟 (smoke)、雾 (fog)、轻雾 (mist)、霾 (haze) 以及烟雾 (smog) 的形式存在。大气中的颗粒物 (固态) (particle) 是气溶胶的一部分, 通常是指动力学直径为 0.003~100 μm 的颗粒态粒子。由于人们重点关心和研究气溶胶体系中各种粒子的来源、组成、迁移转化及其沉降的影响和危害等, 因此, 通常将气溶胶体系中分散的各种固态粒子称为大气颗粒物。

二、大气颗粒物粒径分布

不同粒径的颗粒物其来源和理化特征存在明显差异。粒径较小的细颗粒物主要组成包括燃烧过程排放的粒子、气态物质凝集形成的粒子及气-粒转化形成的物质等。而粒径较大的粗颗粒物通常由机械过程形成, 如土壤尘、道路和建筑扬尘等物质。颗粒物许