

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

中国工程院重大咨询项目

大气污染控制技术
与策略丛书

中国大气PM_{2.5}污染防治 策略与技术途径

Strategies and Approaches for PM_{2.5} Pollution
Prevention and Control in China

“中国大气PM_{2.5}污染防治策略与技术途径”项目组

郝吉明 尹伟伦 岑可法 主编



科学出版社

中国工程院重大咨询项目

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

大气污染控制技术与策略丛书

中国大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治 策略与技术途径

“中国大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治策略与技术途径”项目组

郝吉明 尹伟伦 岑可法 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

《中国大气 PM_{2.5} 污染防治策略与技术途径》是中国工程院重大咨询项目的研究成果。该项目由国内大气污染控制及相关领域的 16 位院士近 100 名专家和多家单位共同参与,内容涵盖大气污染防治的各个层面,包括:我国大气 PM_{2.5} 的污染特征与来源解析;我国能源利用过程大气 PM_{2.5} 排放综合控制对策和技术途径;我国交通系统对大气 PM_{2.5} 污染的影响和控制战略研究;森林和农业植被对 PM_{2.5} 污染的影响及控制策略;我国大气 PM_{2.5} 污染的监测网络和方法体系构建;我国大气 PM_{2.5} 污染综合防治技术途径和对策建议。

本书可供从事大气科学、环境科学和大气污染控制等领域的研究人员参考,也可从事大气环境保护事业的决策者、管理人员和工程技术人员提供借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

中国大气 PM_{2.5} 污染防治策略与技术途径 / 郝吉明, 尹伟伦, 岑可法主编.
—北京: 科学出版社, 2016.6
(大气污染控制技术与策略丛书)
中国工程院重大咨询项目.
ISBN 978-7-03-048460-4

I. ①中… II. ①郝…②尹…③岑… III. ①可吸入颗粒物-污染防治-研究-中国 IV. ①X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 119655 号

责任编辑: 杨 震 刘 冉 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 黄华斌

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 40 1/4

字数: 810 000

定价: 180.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛书编委会

主 编：郝吉明

副主编（按姓氏汉语拼音排序）：

柴发合 陈运法 贺克斌 李 锋

刘文清 朱 彤

编 委（按姓氏汉语拼音排序）：

白志鹏 鲍晓峰 曹军骥 冯银厂

高 翔 葛茂发 郝郑平 贺 泓

宁 平 王春霞 王金南 王书肖

王新明 王自发 吴忠标 谢绍东

杨 新 杨 震 姚 强 叶代启

张朝林 张小曳 张寅平 朱天乐

丛 书 序

当前,我国大气污染形势严峻,灰霾天气频繁发生。以可吸入颗粒物(PM_{10})、细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)为特征污染物的区域性大气环境问题日益突出,大气污染已呈现出多污染源多污染物叠加、城市与区域污染复合、污染与气候变化交叉等显著特征。

发达国家在近百年不同发展阶段出现的大气环境问题,我国却在近 20 年间集中爆发,使问题的严重性和复杂性不仅在于排污总量的增加和生态破坏范围的扩大,还表现为生态与环境问题的耦合交互影响,其威胁和风险也更加巨大。可以说,我国大气环境保护的复杂性和严峻性是历史上任何国家工业化过程中所不曾遇到过的。

为改善空气质量和保护公众健康,2013 年 9 月,国务院正式发布了《大气污染防治行动计划》,简称为“大气十条”。该计划由国务院牵头,环境保护部、国家发展和改革委员会等多部委参与,被誉为我国有史以来力度最大的空气清洁行动。“大气十条”明确提出了 2017 年全国与重点区域空气质量改善目标,以及配套的十条 35 项具体措施。从国家层面对城市与区域大气污染防治进行了全方位、分层次的战略布局。

中国大气污染控制技术与对策研究始于 20 世纪 80 年代。2000 年以后科技部首先启动“北京市大气污染控制对策研究”,之后在 863 计划和科技支撑计划中加大了投入,研究范围也从“两控区”(酸雨区和二氧化硫控制区)扩展至京津冀、珠江三角洲、长江三角洲等重点地区;各级政府不断加大大气污染控制的力度,从达标战略研究到区域污染联防联控研究;国家自然科学基金委员会近年来从面上项目、重点项目到重大项目、重大研究计划各个层次上给予立项支持。这些研究取得丰硕成果,使我国的大气污染成因与控制研究取得了长足进步,有力支撑了我国大气污染防治的综合防治。

在学科内容上,由硫氧化物、氮氧化物、挥发性有机物及氨等气态污染物的污染特征扩展到气溶胶科学,从酸沉降控制延伸至区域性复合大气污染的联防联控,由固定污染源治理技术推广到机动车污染物的控制技术研究,逐步深化和开拓了研究的领域,使大气污染控制技术与策略研究的层次不断攀升。

鉴于我国大气环境污染的复杂性和严峻性，我国大气污染控制技术与策略领域研究的成果无疑也应该是世界独特的，总结和凝聚我国大气污染控制方面已有的研究成果，形成共识，已成为当前最迫切的任务。

我们希望本丛书的出版，能够大大促进大气污染控制科学技术成果、科研理论体系、研究方法手段、基础数据的系统化归纳和总结，通过系统化的知识促进我国大气污染控制科学技术的新发展、新突破，从而推动大气污染控制科学研究进程和技术产业化的进程，为我国大气污染控制相关基础学科和技术领域的科技工作者和广大师生等，提供一套重要的参考文献。



2015 年 1 月

中国工程院重大咨询项目

中国大气 PM_{2.5} 污染防治策略与技术途径 项目顾问及负责人

项目顾问

周 济 中国工程院 院长, 院士
杜祥琬 中国工程院 原副院长, 院士
谢克昌 中国工程院 原副院长, 院士

项目负责人

郝吉明 清华大学 院士
尹伟伦 北京林业大学 院士
岑可法 浙江大学 院士

执行秘书

王书肖 清华大学 教授

课题负责人

第 1 课题 任阵海 中国环境科学研究院 院士
第 2 课题 岑可法 浙江大学 院士
第 3 课题 郝吉明 清华大学 院士
第 4 课题 尹伟伦 北京林业大学 院士
刘 旭 中国农业科学院 院士
第 5 课题 魏复盛 中国环境监测总站 院士
第 6 课题 郝吉明 清华大学 院士

前 言

长期以来,我国以煤为主的能源结构,使得全国城市大气环境呈现高浓度的二氧化硫(SO_2)和可吸入颗粒物(PM_{10})污染。近20年来,随着经济的快速发展,城市化进程不断加速,高速发展的城市交通和汽车产业又导致了严重的机动车尾气污染。发达国家经历了近百年的环境污染问题在我国经济发达地区二三十年内便集中爆发,老的污染问题尚未解决,新的污染问题又接踵而至。在我国城市群出现了煤烟型与机动车污染共存的特殊大气复合污染,具有明显的局地污染和区域污染相结合、污染物之间相互耦合的特征,其表现为大气氧化能力不断增强、高浓度细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)使大气能见度下降。大气环境形势总体上进入了以多污染物共存、多污染源叠加、多尺度关联、多过程演化、多介质影响为特征的复合型大气污染阶段,已经对我国公众健康和生态安全构成巨大威胁,并存在发生环境灾变的隐患。2012年我国环境空气质量新标准增加 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度限值,这个标准体现了国家和人民的意志,承载了全社会对改善环境空气质量的新期待。

2012年6月,中国工程院环境学部和农业学部提出开展跨学部重大咨询项目的建议,得到具有共识的中国工程院主要领导和众多院士、专家的大力支持。经过充分讨论和认真准备,2012年11月,中国工程院批准由环境、农业和能源三个学部联合提出的立项建议,启动了“中国大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治策略与技术途径”重大咨询项目。国内大气污染控制及相关领域的15位院士和近100名专家共同参与,经过两年多的研究,取得了一系列重大研究成果。周济、杜祥琬、谢克昌、唐孝炎、徐祥德、丁一汇、王文兴、倪维斗、黄其励和侯立安等院士作为项目顾问或课题顾问,提出了大量的指导性意见。各位院士、专家广泛深入调查研究国内外现状及发展趋势,认真分析、总结,取得了大量宝贵信息,在此基础上,提出针对性的政策建议,部分研究成果和观点已经在政府相关规划、政策和重大决策中得到体现和应用。

“中国大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治策略与技术途径”重大咨询项目涵盖大气污染防治的各个层面,分为六个课题开展研究。

课题一:我国大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征与来源解析。基于前期工作,选择典型

区域、典型重污染时段开展外场观测,综合分析我国城市、农村及北京地区大气 PM_{2.5} 的污染水平,分析我国大气 PM_{2.5} 多尺度区域间输送特征,开展 PM_{2.5} 多维源解析,定量不同污染源对典型区域 PM_{2.5} 贡献。

课题二:我国能源利用过程大气 PM_{2.5} 排放综合控制对策和技术途径。旨在通过研究我国燃煤电站、工业锅炉、钢铁、水泥、煤化工等典型用能行业的能源消费水平和利用方式现状,掌握我国能源结构、典型用能行业产业结构、工艺技术水平以及污染物控制技术的变化和发展对大气 PM_{2.5} 及其前体物排放的影响,提出我国典型用能行业 PM_{2.5} 及其前体物排放控制技术途径和综合控制对策建议。

课题三:我国交通系统对大气 PM_{2.5} 污染的影响和控制战略研究。通过分析我国移动源的大气 PM_{2.5} 及其相关前体物排放现状和发展情景,结合大气 PM_{2.5} 减排整体目标和国内外移动源污染控制技术的发展趋势,提出我国未来 20 年移动源 PM_{2.5} 污染控制战略。

课题四:森林和农业植被对 PM_{2.5} 污染的影响及控制策略。拟开展森林植被与 PM_{2.5} 的关系研究,包括森林植被对 PM_{2.5} 及其前体物吸附、吸收及净化功能,森林植被的 VOC 排放状况及调控策略;研究不同类型的农田施肥和养殖业的大气氨排放及其调控策略,秸秆焚烧对大气 PM_{2.5} 的影响及其调控策略。

课题五:我国大气 PM_{2.5} 污染的监测网络和方法体系构建,系统分析我国社会经济发展过程中颗粒物污染演变趋势,全面评价我国细颗粒物污染状况,总结并借鉴国际上主要发达国家开展 PM_{2.5} 监测的工作历程和经验,研究和建立适用于我国实际情况的环境空气例行监测技术体系、研究性监测技术体系和污染源排放监测技术体系。

课题六:我国大气 PM_{2.5} 污染综合防治技术途径和对策建议。针对我国大气细颗粒物来源广泛、成因复杂、一次排放与环境空气污染物浓度成高度非线性的特征,研发区域复合污染协同控制响应模型技术,评估大气 PM_{2.5} 及其前体物控制技术的环境和经济性能,开展大气 PM_{2.5} 污染控制方案的费用效益分析。借鉴国内外大气 PM_{2.5} 相关控制法规和政策,提出我国大气 PM_{2.5} 污染控制目标、污染物减排目标、控制技术途径、对策建议及相关保障措施。

该重大咨询项目的成果,是中国工程院和大气污染防治领域相关专家集体智慧的结晶,体现了我国大气污染防治领域的最新认识和总体思路,对防治我国大气 PM_{2.5} 污染的战略方向选择和产业布局具有一定的借鉴作用,可供广大的科技

工作者、环境管理人员和企业管理人员参考。

受大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治的复杂性和研究人员水平的限制,难免存在疏漏、偏颇甚至错误之处。请各位同行及相关专家和读者批评、指正。大气污染防治任重道远,我们会坚持不懈、不断研究与实践,在防治大气污染的漫漫长路上与大家同呼吸共奋斗。



2015年4月21日

摘 要

随着我国国民经济的持续快速发展,能源消费的不断攀升,各种大气污染物排放量居高难下,远远超过大气环境容量。在近二三十年内,我国区域性大气复合污染呈加重和蔓延趋势,大气环境质量形势非常严峻,存在发生大气严重污染事件的隐忧。2012年修订颁布的环境空气质量新标准,体现了国家意志和人民意志,承载了全社会对改善空气质量的新期待。我国大气环境质量管理进入新阶段,需要以改善大气环境质量为核心,以保护人体健康和生态环境为核心目标,科学应对以 $\text{PM}_{2.5}$ 为代表的大气复合型污染。

中国工程院作为我国工程科技界最高的荣誉性、咨询性学术机构,立足我国经济社会发展需要和大气环境保护的宏观战略,及时组织开展了“中国大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治策略与技术途径研究”重大咨询项目。经过两年多的调查研究,圆满完成预定的研究任务,项目研究成果凝聚了众多院士与专家的集体智慧,部分研究成果和观点已经在政府相关规划、政策和重大决策中得到体现,其主要研究成果简要归纳如下。

一、对我国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染形势的总体判断

(1) 我国大气 $\text{PM}_{2.5}$ 及其前体物排放总量大、强度高。2013年,以单位陆地面积污染物排放强度计,我国一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)等气态前体物的排放强度是美国的2~3倍。京津冀、长三角和珠三角的排放强度为全国平均值的2~6倍,鲁豫地区的排放强度为全国平均值的4~5倍。

(2) 整个中国东部均为 $\text{PM}_{2.5}$ 的高值区。2014年京津冀 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度高达 $93\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,是全球 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重的地区之一。济南和郑州虽未划入重点地区,其 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度也在 $100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右。我国大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中二次成分占30%~70%,复合型污染特征突出。

(3) 目前对形成我国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的主要污染源和关键污染物,在宏观层面上的科学共识基本清晰。《大气污染防治行动计划》(以下简称“大气十条”)抓住了工业污染、燃煤污染、机动车污染和扬尘污染等核心问题,具备全面推动 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治的基本条件。“大气十条”实施以来,治理污染的各项重点工程和措施进

展顺利,全国各个城市 PM_{2.5} 浓度呈下降态势,但重污染天气尚未得到有效遏制,我国大气污染防治进入了全面攻坚阶段。

二、我国控制 PM_{2.5} 污染面临的挑战

(1) 我国一次 PM_{2.5} 和主要前体物排放量仍居高难下,特别是挥发性有机物(VOCs)和氨(NH₃)排放尚未有效控制;鲁豫、成渝等 PM_{2.5} 污染严重的地区尚未得到应有的重视。

目前仅 SO₂ 和 NO_x 被纳入国家总量控制目标,一次颗粒物、VOCs 和 NH₃ 排放尚未有效控制。除京津冀、长三角、珠三角等重点地区外,全国其他地区均以 PM₁₀ 作为考核指标,与当前大气 PM_{2.5} 污染的严峻形势不相适应。目前的大气污染控制分区对大气污染传输规律考虑不够,未对我国东部地区进行整体控制。山东、河南、四川、山西、湖北等大气污染物排放量大、对周边地区空气质量影响显著的省份,尚未纳入重点控制区。

(2) 我国重点区域单位面积煤炭消费强度高,且散烧煤比例高,发达国家控制大气污染的经验难以复制。

我国煤炭消费占一次能源消费总量的 2/3,京津冀、长三角、珠三角等区域单位国土面积煤炭消费强度超过 1720 t/km²,是美国的 16 倍。我国小型锅炉和炉灶散烧的煤炭是美国的 20 余倍,这些锅炉平均燃烧效率低,污染物排放系数高。即使我国的煤炭污染治理水平达到美国等发达国家水平,仍无法满足我国大气环境达标的要求。

(3) 机动车保有量高速增长、高频使用和高度聚集,给能源安全和空气质量带来严重挑战;由于尚未建立完善的“车-油-路”一体化的控制体系,严重影响控制措施的效果。

过去二十年我国机动车保有量经历了高速增长,预计今后十年内我国将成为世界上汽车保有量最大的国家。我国私家车使用频率高,年均行驶里程是日本的 2 倍,比欧洲高出 50%。机动车排放高度聚集在我国东部地区,2012 年该地区单位面积机动车排放强度是欧美的 5~6 倍。

我国油品质量滞后于新车排放标准,严重影响了重型柴油车排放控制的进程。非道路移动源的排放标准和油品质量控制和监管缺位,远远滞后于道路机动车的控制进程。此外,控制重点集中于标准升级和行政手段,交通调控和基于市场的经济调控薄弱。

(4) 农业源氨排放对 PM_{2.5} 污染的影响长期以来被忽视,以保护大气环境为

目的减少农业源氨排放措施在我国基本上是空白。

我国农业含氮化肥使用和牲畜养殖的大气 NH_3 排放高达 900 万吨/年,是二次颗粒物的重要来源。如果 NH_3 排放控制滞后, SO_2 和 NO_x 减排的效益不能充分体现,特别是在重污染时段。但农业源氨排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响尚未被重视,排放措施在我国尚属空白。

(5) 我国初步建成大气 $\text{PM}_{2.5}$ 监测网络,但监测人员、监测设备、运行维护水平均不能满足高质量数据的要求。对 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组成等方面的监测有待改善。

我国监测系统在监测仪器配备、技术人员素质、 $\text{PM}_{2.5}$ 监测技术研究等方面还难以保障 $\text{PM}_{2.5}$ 监测工作需要。目前,国家监测网主要监测 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度,对于 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组成、来源解析、健康效应等方面监测与科研工作严重欠缺,无法全面反映 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征和支撑 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治工作。

三、对防治我国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的政策建议

(1) 科学统筹规划,明确 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治的分阶段目标;完善联防联控机制,应将京津冀、长三角、晋鲁豫陕鄂等作为一个整体考虑。

为使全国绝大多数城市达到国家《环境空气质量标准》,全国 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 的排放量与 2012 年相比,至少应分别削减 52%、65%、57% 和 39%, NH_3 排放量也要有所下降。污染严重的区域需更大幅度减排,如京津冀地区 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs 和 NH_3 的排放量应分别至少削减 59%、72%、70%、44% 和 21%。应编制实现分阶段环境目标的全国中长期减排规划,并建立规划编制阶段预评估制度和实施阶段跟踪评估制度。

大气环境管理分区需综合考虑大气污染物排放时空分布、气象条件、地形因素及污染输送规律,应将京津冀、长三角、晋鲁豫陕鄂等作为一个整体考虑。以该区域空气质量整体达标为目标,制定各区域分阶段污染物减排目标和控制方案。

(2) 推动能源生产和消费革命,实施煤炭清洁、高效、集中和可持续利用战略,构建低碳低排产业体系,实现空气质量和气候变化的协同效益。

提高能源效率,控制能源消费总量;提高清洁能源比重,控制煤炭消费总量。2017 年煤炭占能源消费总量比重降至 65%,重点区域煤炭消费实现零增长或降低;2020 年煤炭消费总量达到拐点,电煤占煤炭消费比重提高至 60%;2030 年煤炭占能源消费总量的比重降至 50%,电煤占煤炭消费比重提高至 70%。

电力、冶金、建材等行业进一步降低单位产品能耗。推动污染物超低排放和协同控制技术的研发,在重点行业 and 重点区域进行示范和推广。

加快环保装备运营监管体系建设。健全环保装备标准体系,推动环保装备制造与运营的专业化、高质化和社会化;推进基于物联网和大数据技术的环保设施智能化远程监视管理系统开发及应用,实现全国范围内重点污染源治理设施全流程和全天候实时监控。

(3) 重塑节能减排、安全快捷的公共交通体系,扭转私家车出行为主的发展思路;构建“车-油-路”一体化的排放控制体系,强化全生命周期的排放控制和监管。

优化城市空间结构和功能布局,避免单核心、单功能的城市规划导致出行总量的过快增长和高度集中。重塑城市节能减排的公共交通体系,实现城际高铁-市内轨道-地面公交的无缝连接。大力改善城市慢行交通的出行条件,增加自行车专用道和步行道。充分利用交通管理和经济政策调控重点区域和特大城市的汽车使用总量,包括控制汽车保有量和降低小客车年均行驶里程。

建立车辆排放-燃油质量一体化的标准体系。力争全国 2020 年左右(东部地区 2018 年左右)轻型车和重型车同步过渡到国六排放水平,逐步统一同车型的汽油和柴油新车排放标准。推动工程机械、船舶等非道路移动源的排放标准和燃油质量与道路机动车控制水平接轨。持续推进燃油的低硫化进程并改善非硫组分。大力发展能源和环境双赢的新能源车辆技术。

(4) 推进农业生产方式和农村能源变革,大力推广智能种养一体化,有效减少农业 NH₃ 排放、林业 VOCs 排放及秸秆焚烧污染物排放,提升林木吸附、吸收 PM_{2.5} 及其前体污染物的能力。

调整农业化肥构成,增加硝态氮肥比例,控制农田氨排放。变革农业生产方式,实行种养一体。养殖业废弃物用于生产沼气作为城镇化居民用能,沼渣、沼液作为种植业的有机肥,有效降低大气 NH₃ 排放。

选择适宜树种及树种配置,发挥森林植被对 PM_{2.5} 污染的吸收净化作用,选择种植 BVOCs 排放量少的树种,削减 BVOCs 的排放,同时加大湿地恢复治理,构建低 VOCs 排放、低污染的城市森林体系。乔木、灌木和草本植物的合理配植是植被最大效率地吸收 PM_{2.5}、净化空气的重要手段。实施乔、灌、草景观配植技术,适当增加乔木的比例和常绿乔木的数量,以及具有保健功能的植物,形成具有保健功能的森林群落,最大限度地发挥绿地改善生态环境的作用。

(5) 加强 PM_{2.5} 监测的质量管理,补充建设大气 PM_{2.5} 化学成分监测站,构建国家大气污染物排放清单和污染源实时监控系統,推进监测数据信息公开和共享,

充分发挥监测数据的先行和引导作用。

我国的 $\text{PM}_{2.5}$ 监测网络能够反映当前污染范围，但应严格按照技术规范对监测系统开展定期维护和校准，开展自动监测方法与手工标准方法的比对，确保监测结果准确可靠。建设适量的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分监测站点，以全面反映 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征和来源。

建立国家大气污染源排放清单是空气质量管理中最关键的一环。需构建国家大气污染物排放清单和污染源实时监控系统，跟踪重点污染源的主要污染物排放，包括一次颗粒物、 SO_2 、 NO_x 、VOCs 和 NH_3 等。

加大 $\text{PM}_{2.5}$ 监测信息、大气污染物排放清单和污染源监测数据的公开力度，对社会公众全面开放实时监测数据和历史数据的下载共享服务，保障公众环境知情权，发挥公众监督作用。提高大气环境保护依法行政效能，健全“统一监管、分工负责”和“国家监察、地方监管、单位负责”的监管体系，对大气污染源实施统一监管。

目 录

丛书序

前言

摘要

第 1 章 我国大气 $PM_{2.5}$ 的污染特征与来源解析	1
1.1 大气 $PM_{2.5}$ 及其前体物的排放特征	3
1.1.1 1990~2013 年中国大气污染物排放清单	3
1.1.2 重点区域污染物排放清单	9
1.1.3 中国高分辨率大气污染物排放清单的空间分布	11
1.2 大气 $PM_{2.5}$ 及其前体物质量浓度及化学组成时空变化特征	14
1.2.1 我国主要城市和地区大气 $PM_{2.5}$ 浓度特征	14
1.2.2 我国主要城市和地区大气 $PM_{2.5}$ 前体物浓度特征	17
1.2.3 我国大气气溶胶光学厚度分布特征	18
1.2.4 大气 $PM_{2.5}$ 化学组成时空变化特征	21
1.3 区域大气 $PM_{2.5}$ 的输送特征	24
1.3.1 中尺度大气输送网络统计分析	24
1.3.2 $PM_{2.5}$ 区域性重污染过程筛选	26
1.3.3 首都及其外围圈层 $PM_{2.5}$ 重污染过程的浓度分布及其输送通道	26
1.4 面向环境基准的 $PM_{2.5}$ 毒理特征	36
1.4.1 $PM_{2.5}$ 的细胞毒性特征	37
1.4.2 基因表达谱分析结果	41
1.4.3 GO 功能显著性富集分析	44
1.4.4 KEGG 通路显著性富集分析	44
1.4.5 实时荧光定量 PCR (qRT-PCR) 验证差异基因表达水平	46
1.4.6 蛋白质免疫印迹试验验证	48
1.4.7 $PM_{2.5}$ 诱导 16-HBE 细胞 IL6 升高剂量-效应关系	48
1.5 大气 $PM_{2.5}$ 来源解析	49
1.5.1 基于空气质量模型的 $PM_{2.5}$ 来源解析	49

1.5.2 基于后向轨迹模型的大气 PM _{2.5} 来源解析	52
1.6 小结	58
参考文献	59
第 2 章 我国能源利用过程大气 PM_{2.5} 排放综合控制对策和技术途径	63
2.1 我国能源利用现状	65
2.1.1 我国能源消费现状	65
2.1.2 主要用能行业现状	70
2.2 我国 PM _{2.5} 及其前体物排放现状	85
2.2.1 我国主要用能行业污染点源及控制政策	85
2.2.2 我国主要用能行业 PM _{2.5} 及其前体物排放特征	89
2.3 我国主要用能行业 PM _{2.5} 及其前体物控制技术	102
2.3.1 颗粒物控制技术	102
2.3.2 二氧化硫控制技术	106
2.3.3 氮氧化物控制技术	111
2.3.4 汞等重金属污染物控制技术	113
2.3.5 挥发性有机物 (VOCs) 控制技术	118
2.4 我国主要用能行业 PM _{2.5} 及其前体物减排情景分析	120
2.4.1 情景设置	120
2.4.2 污染物排放预测	120
2.5 小结	125
参考文献	127
第 3 章 我国交通系统对大气 PM_{2.5} 污染的影响和控制战略研究	131
3.1 我国交通系统大气污染排放控制面临的挑战	133
3.2 我国交通源大气污染物排放特征	134
3.2.1 移动源排放测试方法和系统	134
3.2.2 道路机动车排放特征分析	136
3.2.3 非道路移动源排放特征分析	142
3.3 我国交通源大气污染物排放清单的建立	149
3.3.1 移动源排放清单的方法学和数据库	149
3.3.2 道路移动源排放清单的建立	154
3.3.3 非道路移动源排放清单的建立	159
3.4 交通源排放控制技术和控制策略发展趋势研究	161
3.4.1 国内外道路移动源排放控制体系分析	161