

大气污染控制技术
与策略丛书

长三角区域霾污染特征、 来源及调控策略

Characterization, Sources and Control
Strategy of Regional Haze in the
Yangtze River Delta, China

王书肖 程 真 赵 斌 付 晓 蒋靖坤 等 著



科学出版社

大气污染控制技术与策略丛书

长三角区域霾污染特征、 来源及调控策略

王书肖 程 真 赵 斌 付 晓 蒋靖坤 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书针对我国日益严重的霾污染问题,通过数据统计、外场观测、实验室分析和数值模拟,对长三角城市群霾污染的变化趋势、污染特征、排放来源和调控策略进行了系统研究。观测和分析了长三角区域典型城市大气污染的理化特征和时空分布,量化了颗粒物浓度和化学组分与能见度之间的关系;建立了长三角区域高分辨率大气污染物排放清单,利用源模型和受体模型揭示了典型灰霾过程的形成机制和来源;构建了长三角区域大气污染物排放与颗粒物污染间的非线性响应模型,提出了区域多污染物协同控制策略和技术途径,为长三角区域的霾污染防治提供了决策依据。本书的研究方法和结论对我国其他地区的大气污染防治及相关研究也具有借鉴意义。

本书可供大专院校和研究机构环境科学、环境工程、大气科学等专业的科技人员、研究生和本科生参考,也可供各级环境保护机构的相关管理及技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

长三角区域霾污染特征、来源及调控策略/王书肖等著. —北京:科学出版社,2016.3

(大气污染控制技术与策略丛书)

ISBN 978-7-03-047466-7

I. ①长… II. ①王… III. ①长江三角洲-霾-空气污染-污染防治 IV. ①X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 043685 号

责任编辑:杨 震 刘 冉 李 洁 / 责任校对:蒋 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>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张:19 1/2 插页:2

字数:390 000

定价:128.00 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 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($PM_{2.5}$)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。从国家层面上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、研究方法与手段、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

前 言

近年来,我国中东部地区多次发生大范围持续性霾污染,对人民群众的身体健
康和生产生活造成严重影响。霾的主要成因是不利气象条件下的大气复合污染,
气象和污染的共同作用导致区域性雾霾快速地恶化和蔓延。霾污染事件的大范围
发生,对我国区域和城市空气质量达标和大气污染防治工作提出了严峻的挑战。
因此,霾污染是一个亟待解决的、直接关系到国计民生的大问题。

面对重霾天气应对和空气质量改善的重大需求,2010 年国家环保公益性行业
科研专项支持了“典型地区大气灰霾特征与控制途径预研究”项目,清华大学承担
了其中“长三角地区大气灰霾特征与控制途径预研究”课题。长江三角洲地区是全
国四大霾污染最严重的区域之一。该课题系统地研究了长三角区域霾污染的时空
分布、变化趋势、理化特征、来源成因及调控策略,课题成果不仅为长三角区域霾污
染防治提供了科学支撑,课题的研究方法和相关结论对其他地区的大气污染防治
也具有借鉴意义。

本书作者王书肖教授来自清华大学,长期从事大气污染化学和控制策略研究。
作者根据过去几年研究团队在长三角区域开展霾污染特征与控制途径研究所取得
的成果,总结和提炼出了本书的主要核心内容,希冀能为解决我国区域大气复合污
染问题、改善区域空气质量尽绵薄之力,并为大气污染防治领域的科研人员和各级
环境保护机构的相关管理人员提供参考。

全书共 9 章,其中第 1 章介绍本书的写作背景、霾污染的定义及国内外的研究
进展;第 2 章介绍长三角区域霾污染的历史变化趋势;第 3 章介绍大气污染物排放
源清单的建立方法和长三角区域大气污染物排放特征;第 4 章和第 5 章介绍利用
外场观测和数值模拟两种方法进行长三角区域污染成因和形成机制分析;第 6 章
量化了长三角区域颗粒物的消光效率及其对霾污染的影响;第 7~9 章介绍了长三
角区域大气污染物排放与细颗粒物浓度间的非线性响应模型,利用该模型进行了
区域细颗粒物污染的来源解析,并提出了霾污染控制的对策与措施。

全书由王书肖负责书稿总体设计、撰写、修改、审校和定稿工作。此外,第 1 章
和第 2 章主要由王书肖、程真撰写;第 3 章主要由付晓、王书肖撰写;第 4 章主要由
程真、蒋靖坤撰写;第 5 章主要由程真、付晓、王书肖、华阳撰写;第 6 章主要由程
真、蒋靖坤撰写;第 7 章主要由赵斌、邢佳、王书肖撰写;第 8 章主要由赵斌、王建栋
撰写;第 9 章主要由赵斌、王书肖、汪俊撰写。

本书涉及的主要内容和研究成果,得到国家环保公益性行业科研专项、中国工程院、中国科学院先导专项、丰田公司等资助,在此一并深表谢意。同时,感谢上海市环境科学研究院、上海市环境监测中心、江苏省环境监测中心、浙江省环境监测中心、南京市环境监测站、苏州市环境监测站、宁波市环境监测站和杭州市萧山区环境监测站在相关研究中提供的大力支持。书稿的完成,离不开众多长辈、同事和亲人的支持。在此特别感谢清华大学郝吉明院士、贺克斌院士,中国环境科学研究院柴发合研究员,环境保护部环境规划院王金南研究员,北京大学张远航院士、谢绍东教授,中国科学院大气物理研究所王自发研究员、王跃思研究员,中国科学院生态环境研究中心贺泓研究员,上海市环境科学研究院陈长虹教授,上海市环境监测中心伏晴艳总工程师,浙江大学高翔教授,美国环境保护署 Carey Jang 博士,田纳西大学 Joshua Fu 教授等的指导和帮助。此外,在本书成稿过程中,刘通浩、付侃、蔡思翌等同学对书稿涉及的研究工作做出了贡献;科学出版社的刘冉编辑对本书的立项和出版的各个环节提供了诸多的建议和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

霾污染的机理及控制研究是目前环境科学研究及管理重点和难点,涉及众多学科的复杂问题,受研究条件和作者学术水平限制,书中难免存在诸多不足之处,恳请广大读者和同行专家指正。

作 者

2015 年 10 月于北京清华园

缩略词及符号说明

ACSM	颗粒物化学成分在线监测仪 (Aerosol Chemical Speciation Monitor)
AOD	气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth)
API	空气污染指数 (Air Pollution Index)
APS	空气动力学粒径谱仪 (Aerodynamic Particle Sizer)
b_{abs}	吸收消光系数 (Absorption Coefficient)
b_{ext}	消光系数 (Extinction Coefficient)
b_{sca}	散射消光系数 (Scattering Coefficient)
BAU	趋势照常情景 (Business as Usual)
BC	黑碳 (Black Carbon)
CFB-FGD	循环流化床脱硫 (Circulating Fluidized Bed Flue Gas Desulfurization)
CMAQ	多尺度空气质量模型 (Community Multiscale Air Quality)
CMB	化学质量平衡 (Chemical Mass Balance)
DMA	差分电迁移率分析仪 (Differential Mobility Analyzer)
EC	元素碳颗粒物 (Elemental Carbon)
EF	排放因子 (Emission Factor)
ERSM	扩展的响应表面模型 (Extended Response Surface Modeling)
ESP	电除尘 (Electrostatic Precipitator)
$f(\text{RH})$	吸湿增长因子 (Hygroscopic Growth Factor)
FDMS	膜动态测量系统 (Filter Dynamics Measurement System)
FGD	烟气脱硫 (Flue Gas Desulfurization)
FIRMS	火点信息系统 (Fire Information for Resource Management System)
GDAS	全球数据同化系统 (Global Data Assimilation System)

GDP	国内生产总值 (Gross Domestic Product)
HSS	哈默斯利序列采样方法 (Hammersley Quasi-random Sequence Sampling)
HYSPLIT	单粒子拉格朗日轨迹模型 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)
IC	离子色谱 (Ion Chromatography)
ICP-MS	电感耦合等离子体质谱仪 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)
IMPROVE	(美国)保护视觉环境跨部门观测计划 (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments)
IPCC	政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change)
LHS	拉丁超立方采样 (Latin Hypercube Sampling)
LNB	低氮燃烧技术 (Low NO _x Burner)
MAE	单位质量吸收效率 (Mass Absorption Efficiency)
MARGA	气溶胶及气体测量仪 (Monitor for Aerosols and Gases)
MaxNE	最大标准误差 (Maximum Normalized Error)
MDL	最低检出限 (Maximum Detection Level)
MEE	单位质量消光效率 (Mass Extinction Efficiency)
MEGAN	天然源气体和气溶胶排放模型 (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)
MFB	平均比例偏差 (Mean Fractional Bias)
MFE	平均比例误差 (Mean Fractional Error)
MFR	最大减排潜力情景 (Maximum Feasible Reduction)
MNE	平均标准误差 (Mean Normalized Error)
MODIS	中等分辨率成像分光计 (Moderate-resolution Imaging Spectrometer)

MOUDI	微孔均匀沉降碰撞采样器 (Micro-Orifice Uniform Deposition Impactors)
MSE	单位质量散射效率 (Mass Scattering Efficiency)
NH ₃	氨 (Ammonia)
NH ₄ ⁺	铵盐颗粒物 (Ammonium)
NMB	标准平均偏差 (Normalized Mean Bias)
NME	标准平均误差 (Normalized Mean Error)
NMVOC	非甲烷挥发性有机物 (Non-Methane Volatile Organic Compounds)
NO ₂	二氧化氮 (Nitrogen Dioxide)
NO ₃ ⁻	硝酸盐颗粒物 (Nitrate)
NO _x	氮氧化物 (Nitrogen Oxides)
NOAA	(美国)国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration)
OC	有机碳颗粒物 (Organic Carbon)
OM	有机颗粒物 (Organic Matter)
PAHs	多环芳烃 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)
PBL	行星边界层高度 (Planetary Boundary Layer)
PM	颗粒物 (Particulate Matter)
PM ₁	空气动力学直径小于或等于 1 μm 的颗粒物
PM _{2.5}	细颗粒物 (Fine Particulate Matter), 即空气动力学直径小于 2.5 μm 的颗粒物
PM ₁₀	可吸入颗粒物 (Inhalable Particulate Matter), 即空气动力学直径小于或等于 10 μm 的颗粒物
PM _{10~2.5}	粗颗粒物 (Coarse Particulate Matter), 即空气动力学直径介于 2.5~10 μm 的颗粒物
PR	循序渐进情景 (Progressive Reduction)
PSD	气溶胶粒径谱仪 (Particle Size Distribution)

RH	相对湿度 (Relative Humidity)
RSM	响应表面模型 (Response Surface Modeling)
SCR	选择性催化还原技术 (Selective Catalytic Reduction)
SNCR	选择性非催化还原技术 (Selective Non-Catalytic Reduction)
SO ₂	二氧化硫 (Sulfur Dioxide)
SO ₄ ²⁻	硫酸盐颗粒物 (Sulfate)
SSA	单次散射反照率 (Single Scattering Albedo)
TEOM	振荡天平 (Tapered Element Oscillating Microbalance)
TOR	热光反射分析法 (Thermal/Optical Reflectance)
VOC	挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds)
WRF	气象研究与预测模型 (Weather Research & Forecasting)
XRF	射线荧光光谱 (X-Ray Fluorescence)

目 录

丛书序

前言

缩略词及符号说明

第 1 章 绪论	1
1.1 霾污染的定义及危害	1
1.2 长三角区域霾污染的严峻形势及影响因素	2
1.2.1 高强度的人为源大气污染物排放	4
1.2.2 不利气象扩散条件	8
1.2.3 沙尘暴和秸秆焚烧的影响	9
1.3 欧美国家霾污染的治理过程	12
1.3.1 美国	12
1.3.2 欧洲	14
1.4 霾污染控制对科学研究的需求	15
1.5 本书的研究目标及内容安排	16
1.5.1 研究目标	16
1.5.2 内容安排	17
参考文献	18
第 2 章 长三角区域霾污染的历史变化趋势	21
2.1 长江三角洲地区概况	21
2.2 气象和空气质量数据来源	22
2.2.1 气象数据来源	22
2.2.2 空气质量数据来源	23
2.3 大气能见度历史变化趋势	24
2.3.1 长期变化趋势	24
2.3.2 低能见度时段分布	27
2.4 大气污染物浓度历史变化趋势	29
2.4.1 我国城市地区可吸入颗粒物浓度变化	29
2.4.2 长三角地区颗粒物浓度变化	35
2.4.3 长三角地区气态污染物浓度变化	37
2.5 能见度变化趋势成因初探	39

2.5.1 气象因子和颗粒物浓度的变化趋势	39
2.5.2 霾天数的变化趋势	40
2.6 小结	42
参考文献	43
第3章 长三角区域大气污染物排放清单	45
3.1 大气污染源清单建立方法	45
3.1.1 大气污染源分类	45
3.1.2 排放量计算方法	47
3.1.3 基础数据收集	47
3.1.4 排放量的时空和化学组分分配方法	51
3.2 固定排放点源的污染排放情况估算	53
3.2.1 电力行业	53
3.2.2 水泥行业	54
3.2.3 钢铁行业	55
3.3 移动源的污染排放情况估算	56
3.3.1 道路源	56
3.3.2 非道路源	58
3.4 主要面源的污染排放情况估算	59
3.4.1 化石燃料燃烧源	59
3.4.2 生物质燃烧源	60
3.4.3 其他工艺过程源	61
3.4.4 NMVOC 面源	62
3.5 长三角区域大气污染物排放特征	65
3.5.1 各个城市的排放量	65
3.5.2 各个部门的排放量	66
3.5.3 排放量空间分布	67
3.5.4 PM _{2.5} 及 NMVOC 排放量物种分配	68
3.5.5 与其他清单的比较	70
3.5.6 不确定性分析	71
3.6 小结	72
参考文献	72
第4章 长三角区域霾观测与模型模拟方法	76
4.1 长三角区域联合观测	76
4.1.1 观测点位及时段选择	76
4.1.2 观测指标及仪器型号	78

4.1.3 质量控制与质量保证	82
4.2 细颗粒物组分消光特征的加强观测	89
4.2.1 实验地点、时间及仪器	89
4.2.2 质量控制与数据比对	90
4.3 区域大气污染的模拟与验证	92
4.3.1 空气质量模型的配置	92
4.3.2 卫星与气象观测资料	93
4.3.3 空气质量模拟结果校验	93
4.4 小结	96
参考文献	96
第5章 典型霾事件的污染特征与形成机制	98
5.1 长三角区域霾污染特征及典型事件甄别	98
5.1.1 能见度和颗粒物污染总体特征	98
5.1.2 能见度和颗粒物浓度的季节变化特征	100
5.1.3 典型霾事件甄别	102
5.2 春季北方沙尘暴传输	103
5.2.1 能见度及颗粒物污染特征	104
5.2.2 沙尘暴输送路径	106
5.2.3 沙尘排放、输送及影响模拟	107
5.3 夏季生物质秸秆焚烧	112
5.3.1 能见度及颗粒物污染特征	112
5.3.2 气象条件及污染传输路径	116
5.3.3 秸秆焚烧贡献定量评估	120
5.4 秋季典型霾过程的影响因素和来源解析	125
5.4.1 能见度及颗粒物污染特征	125
5.4.2 污染来源解析	127
5.4.3 气象条件及成因分析	130
5.5 冬季静稳天气对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响	134
5.5.1 能见度及颗粒物污染特征	134
5.5.2 气象成因分析	137
5.5.3 本地及区域贡献	140
5.6 小结	142
参考文献	143

第 6 章 颗粒物对霾污染影响的定量表征	145
6.1 霾污染定量表征的相关指标及计算方法	145
6.1.1 能见度和消光系数	145
6.1.2 颗粒物整体质量消光效率	147
6.1.3 细颗粒物组分的质量消光效率	150
6.2 长三角地区颗粒物的消光贡献	154
6.2.1 数据来源及计算方法	154
6.2.2 颗粒物质量消光效率	156
6.2.3 颗粒物的消光贡献及其吸湿增长因子	158
6.3 霾污染对应颗粒物质量浓度阈值的判定	161
6.3.1 现有霾判断指标及阈值	161
6.3.2 霾对应的颗粒物浓度阈值估算	162
6.3.3 不同阈值等级霾天数的统计及比较	163
6.4 细颗粒物化学组分的质量消光效率评估	165
6.4.1 IMPROVE 公式的误差评估	165
6.4.2 基于本地观测信息的细颗粒物化学组分质量消光效率	168
6.4.3 本地化公式的应用误差评估	177
6.5 长三角地区细颗粒物化学组分的消光贡献	178
6.5.1 年均与季节平均	178
6.5.2 典型霾污染事件中颗粒物化学组分的消光贡献	181
6.6 小结	182
参考文献	183
第 7 章 长三角区域大气污染物排放-浓度非线性响应模型	187
7.1 扩展的响应表面模型开发	187
7.1.1 响应表面模型(RSM)	187
7.1.2 ERSM 建模思路	191
7.1.3 ERSM 构建方法	192
7.1.4 ERSM 的局限性	200
7.2 长三角地区 ERSM 的构建	200
7.2.1 长三角地区细颗粒物污染模拟与校验	200
7.2.2 控制变量选取和控制情景设计	203
7.3 长三角地区 ERSM 的可靠性校验	205
7.3.1 外部验证	205
7.3.2 等值线验证	207
7.4 本章小结	211

参考文献	211
第 8 章 基于非线性响应模型的细颗粒物来源解析	213
8.1 $PM_{2.5}$ 及其组分的非线性源解析	213
8.1.1 $PM_{2.5}$ 的非线性源解析	213
8.1.2 二次无机气溶胶的非线性源解析	217
8.1.3 主要污染源贡献率排序	219
8.2 基于健康终点的 $PM_{2.5}$ 来源解析	222
8.2.1 $PM_{2.5}$ 健康影响的评估方法	222
8.2.2 主要排放源对健康终点的贡献评估	224
8.3 本章小结	227
参考文献	228
第 9 章 长三角区域霾污染控制对策与措施	230
9.1 长三角地区空气质量目标和污染物减排方案	230
9.1.1 长三角地区空气质量目标	230
9.1.2 主要污染物排放趋势预测	230
9.1.3 污染物减排方案	235
9.2 长三角地区大气污染物减排技术途径	239
9.2.1 AIM/Enduse 模型原理概述	239
9.2.2 AIM/Enduse 参数数据库的建立	242
9.2.3 长三角地区大气污染物减排措施优化	266
9.3 长三角地区霾污染控制对策建议	277
9.3.1 优化产业结构,实现环境和经济协调发展	277
9.3.2 加强能源清洁利用,控制区域能源消费总量	278
9.3.3 加大综合治理力度,实现多种污染物同时减排	279
9.3.4 建立区域协作机制,改善区域空气质量	284
9.3.5 健全法律法规体系,严格依法监督管理	285
9.3.6 加强区域大气污染联防联控能力建设	286
9.4 本章小结	287
参考文献	287
索引	290
彩图	