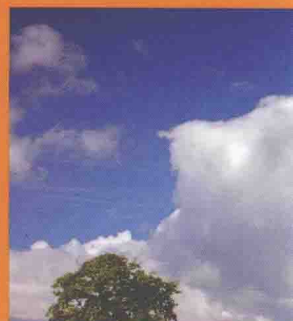


环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

PM_{2.5} MONITORING
METHODS AND
APPLICATIONS



PM_{2.5} 监测方法与应用

杜世勇 白志鹏 侯鲁健 等 著



科学出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

PM_{2.5} 监测方法与应用

杜世勇 白志鹏 侯鲁健 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度能否测得准,数据是否可靠,区域间是否有可比性,是全国环境监测工作面临的一项重要课题。本书是在环保公益性行业科研专项“城市环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 监测技术与规范研究”的研究成果基础上编写而成。内容涵盖城市环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 监测优化布点、手工和自动监测影响因素及监测技术规范 and 激光雷达遥感技术等方法;基于环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 手工监测技术和自动监测技术的标准规范建议等方面。可为后期国家制订相关标准技术规范提供技术支撑,为我国缺乏的环境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 监测仪器的适用性、质量控制和质量保证等提供技术支撑。

本书从当前我国 $\text{PM}_{2.5}$ 监测技术存在问题与实际管理需求出发,兼顾理论、方法与实践应用,力求以翔实的资料为从事大气环境监测、大气环境科学及环境管理等领域的相关人员提供参考,也可作为大中专院校环境专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

$\text{PM}_{2.5}$ 监测方法与应用 / 杜世勇等著. —北京: 科学出版社, 2016. 3

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书)

ISBN 978-7-03-047755-2

I. ①P… II. ①杜… III. ①可吸入颗粒物—空气污染监测 IV. ①X831

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 053091 号

责任编辑: 朱 丽 杨新改 / 责任校对: 韩 杨

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 耕者设计工作室

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

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 9 3/4 插页: 4

字数: 230 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书》
编委会

顾 问：吴晓青

组 长：熊跃辉

副组长：刘志全

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

《PM_{2.5} 监测方法与应用》参加编写人员名单

(按姓氏汉语拼音排序)

白志鹏	杜世勇	范国兰	耿春梅	郭 婷
何 涛	侯鲁健	吕 波	孙晓艳	王 静
王 恺	王治非	夏志勇	许宏宇	杨 文
张文杰	张文娟			

丛 书 序

我国作为一个发展中的人口大国，资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作，提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念新举措。在科学发展观的指导下，环境保护工作成效显著，在经济增长超过预期的情况下，主要污染物减排任务超额完成，环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长，资源环境约束进一步强化，环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减，环境质量改善的压力不断加大，防范环境风险的压力持续增加，确保核与辐射安全的压力继续加大，应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点，解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题，确保环保工作不断上台阶出亮点，必须充分依靠科技创新和科技进步，构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年，我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》（以下简称《规划纲要》），提出了建设创新型国家战略，科技事业进入了发展的快车道，环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求，原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会，出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》，确立了科技兴环保战略；2012年，环境保护部召开第二次全国环保科技大会，出台了《关于加快完善环保科技标准体系的意见》，全面实施科技兴环保战略，建设满足环境优化经济发展需要、符合我国基本国情和世界环保事业发展趋势的环境科技创新体系、环保标准体系、环境技术管理体系、环保产业培育体系和科技支撑保障体系。几年来，在广大环境科技工作者的努力下，水体污染控制与治理科技重大专项实施顺利，科技投入持续增加，科技创新能力显著增强；现行国家标准达1300余项，环境标准体系建设实现了跨越式发展；完成了100余项环保技术文件的制修订工作，确立了技术指导、评估和示范为主要内容的管理框架。环境科技为全面完成环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构，支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动，“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技部的总体部署，环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护科技发展规划》确定的重点领域和优先主题，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”以来，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目439

项，涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域，共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，提出了一系列控制污染和改善环境质量技术方案，形成一批环境监测预警和监督管理技术体系，研发出一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术，提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议，为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”以来环保公益性行业科研专项项目研究成果，及时总结项目组织管理经验，环境保护部科技标准司组织出版环保公益性行业科研专项经费系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希望通过这一尝试，能够进一步活跃环保科技的学术氛围，促进科技成果的转化与应用，为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青

2011年10月

前 言

随着我国工业化和城市化迅猛发展, 污染物排放总量持续增长, 环境问题日益凸显, 尤其是以颗粒物为首要污染物的重污染天气频发。2011 年 9 月, 世界卫生组织公布的一项以 PM_{10} 为代表的全球城市空气污染报告表明, 我国在参与排名的 91 个国家中位居第 77 位。我国 31 个省会及直辖市, 94% 的人口暴露在 PM_{10} 年平均浓度 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (世界卫生组织第一阶段目标值) 以上的空气中, 严重影响城市居民健康。2013 年《中国环境状况公报》中表明, 京津冀、长三角、珠三角等重点区域及直辖市、省会城市和计划单列市共 74 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度范围为 $26 \sim 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均浓度为 $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 74 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度与我国 $\text{PM}_{2.5}$ 二级标准比较 ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 达标城市比例仅为 4.1%; 京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $106 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 长三角区域 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 珠三角区域 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 与世界卫生组织环境空气质量指导值 ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 相比, 京津冀区域超标 9.6 倍, 长三角区域超标 5.7 倍, 珠三角区域超标 3.7 倍。我国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染形势不容乐观。

环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的高污染态势引起国家的高度重视。为改善环境空气质量, 保障人民健康, 2012 年我国环境保护部和国家质量监督检验检疫总局颁布的《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 将 $\text{PM}_{2.5}$ 纳入常规监测; 2013 年环境保护部发布《环境空气细颗粒物污染综合防治技术政策》; 2014 年 4 月, 国务院办公厅关于印发《大气污染防治行动计划实施情况考核办法(试行)》的通知(国办发〔2014〕21 号), 7 月环境保护部、发展改革委、工业和信息化部、财政部、住房城乡建设部、能源局六部委联合印发《大气污染防治行动计划实施情况考核办法(试行)实施细则》(环发〔2014〕107 号), 将环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度下降比例作为指标, 对京津冀及周边地区、长三角区域、珠三角区域、重庆市进行考核。因此 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度下降比例在政府环境管理中受到重点关注。

为保障考核的顺利实施, 环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度能否测得准, 数据是否可靠, 区域间是否有可比性, 是全国监测工作面临的一项重要课题。环境保护部科技标准司于 2009 年前瞻性地设立了环保公益性行业科研专项“城市环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 监测技术与规范研究”(2010467007, 2010—2013 年)。该项目于 2010 年 6 月启动, 编者在该项目资助下, 对城市环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 监测优化布点、手工和自动监测影响因素及监测技术规范 and 激光雷达遥感技术等方法开展一系列研究, 取得了基于环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 手工监测技术和自动监测技术的标准规范建议等成果, 为后期国家制订相关标准技术规范提供技术支撑, 为我国缺乏的环境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 监测仪器的适用性、质量控制和质量保证等提供技术支撑。

本书是针对我国空气 PM_{2.5} 监测存在的问题与实际管理需求,在综述国内外研究进展并结合公益项目的研究结果基础上编写而成。全书共 6 章,主要内容和编写分工如下:第 1 章概述国内外 PM_{2.5} 的污染现状和监测技术发展,由许宏宇、孙晓艳编写;第 2 章介绍基于目标函数的 PM_{2.5} 优化布点技术方法的建立及其应用,由侯鲁健、王恺编写;第 3 章介绍 PM_{2.5} 手工监测技术方法,主要包括手工方法原理、关键影响因素、质控及示范区初步应用情况,由杨文、郭婷、王静、耿春梅等编写;第 4 章重点介绍 PM_{2.5} 自动监测技术方法,主要包括 PM_{2.5} 自动监测方法原理、数据准确性影响因素、设备性能比较及其在示范区的应用,由吕波、王治非、夏志勇编写;第 5 章介绍激光雷达遥感反演 PM_{2.5} 监测技术方法的建立及其示范应用,由何涛、张文娟编写;第 6 章为全书结语及未来研究方向展望,由范国兰编写。全书由杜世勇、白志鹏策划和统稿,李国刚、柴发合、王自发、邵敏、李建军、潘本峰等专家提出了修改完善意见,感谢科学出版社朱丽编辑,是他们的共同努力和耐心促成了本书的出版。

本书从当前我国 PM_{2.5} 监测技术存在问题与实际管理需求出发,兼顾理论、方法与实践应用,力求以翔实的资料为从事大气环境监测、大气环境科学及环境管理等领域的相关人员提供参考,也可作为大中专院校环境专业的教学参考书。

由于作者能力有限,书中难免有疏漏、不当及错误之处,恳请各位专家和同行批评指正。

著者

2016 年 1 月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 $PM_{2.5}$ 概述	1
1.1.1 $PM_{2.5}$ 的来源	1
1.1.2 国内外 $PM_{2.5}$ 的质量浓度水平	3
1.1.3 $PM_{2.5}$ 对环境和人体健康的影响	4
1.2 $PM_{2.5}$ 监测技术发展概况	5
1.2.1 美国 $PM_{2.5}$ 监测技术发展概况	6
1.2.2 欧盟 $PM_{2.5}$ 监测技术发展概况	7
1.2.3 日本 $PM_{2.5}$ 监测技术发展概况	10
1.2.4 我国 $PM_{2.5}$ 监测技术发展概况	11
1.3 本书的主要内容	14
参考文献	15
第 2 章 $PM_{2.5}$ 监测优化布点技术方法	18
2.1 $PM_{2.5}$ 优化布点技术方法概述	18
2.1.1 优化布点方法的国内外研究进展	18
2.1.2 监测数据和模拟数据在优化布点中的应用	19
2.2 基于目标函数的优化布点方法	20
2.2.1 优化布点思路	20
2.2.2 Models-3/CMAQ 模拟结果评价	21
2.2.3 优化布点目标与束缚条件设置和函数化	22
2.3 优化布点方法的应用	27
2.3.1 山东省优化布点结果	28
2.3.2 济南市优化布点结果	28
2.3.3 济南市建成区优化布点结果	31
参考文献	33
第 3 章 $PM_{2.5}$ 手工监测技术及应用	35
3.1 $PM_{2.5}$ 手工监测方法概况	35
3.1.1 国外 $PM_{2.5}$ 手工监测技术概况	35
3.1.2 我国 $PM_{2.5}$ 手工监测技术概况	36

3.2 PM _{2.5} 手工监测技术	36
3.2.1 滤膜选择	37
3.2.2 酸碱气性气体对采样的影响	38
3.2.3 流量对采样的影响	43
3.2.4 滤膜称重	46
3.2.5 样品保存	52
3.2.6 PM _{2.5} 理化特征分析技术	53
3.3 手工监测技术应用	56
3.3.1 典型城市 PM _{2.5} 污染特征	57
3.3.2 PM _{2.5} 手工监测技术在济南市 PM _{2.5} 来源解析中的应用	72
参考文献	78
第4章 PM _{2.5} 质量浓度自动监测技术及应用	81
4.1 PM _{2.5} 自动监测方法的主流仪器	81
4.2 PM _{2.5} 自动监测技术	82
4.2.1 PM _{2.5} 自动监测方法	82
4.2.2 PM _{2.5} 质量浓度监测影响因素	85
4.2.3 PM _{2.5} 自动监测方法适用性	96
4.3 PM _{2.5} 自动监测技术应用	102
4.3.1 在典型城市 PM _{2.5} 自动监测中的应用	102
4.3.2 在环境空气能见度考核中的应用	106
4.3.3 在环境空气质量数值预报中的应用	110
参考文献	113
第5章 激光雷达反演 PM _{2.5} 监测技术与应用	115
5.1 大气探测激光雷达方法概述	115
5.2 Mie 散射激光雷达反演 PM _{2.5} 浓度方法	117
5.2.1 消光系数反演方法选择	117
5.2.2 PM _{2.5} 浓度反演方法建立	118
5.2.3 消光系数与 PM _{2.5} 浓度定量关系	118
5.2.4 质量保证和质量控制	127
5.3 Mie 散射激光雷达反演 PM _{2.5} 质量浓度技术应用	131
5.3.1 定量公式在济南的适用性	131
5.3.2 济南地区 PM _{2.5} 空间分布特征研究	132
5.3.3 南京青奥会走航观测研究	136
参考文献	139
第6章 结论与展望	141
彩图	

第1章 绪 论

细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)是指环境空气中空气动力学当量直径 $\leq 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物,与粗颗粒物(空气动力学当量直径在 $2.5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的颗粒物)相比,其粒径小,比表面积大,在大气中的停留时间长,输送距离远。 $\text{PM}_{2.5}$ 易于载带大量的有毒、有害物质,可进入人体肺泡并沉积,其载带的多环芳烃等有机污染物和重金属,随着人体循环系统转移到身体的其他部位,引起机体呼吸系统、心血管系统等损害。

当前我国面临十分严峻的大气污染问题,以 $\text{PM}_{2.5}$ 为特征的区域复合型大气污染日益突出,区域内空气重污染现象大范围同时出现的频次日益增多。 $\text{PM}_{2.5}$ 是我国绝大多数城市大气的首要污染物,也是导致城市及区域能见度降低的主要原因,日益突出的 $\text{PM}_{2.5}$ 环境污染问题已逐渐成为我国城市和区域空气质量改善的主要瓶颈。

为改善空气质量,环境保护部于2011年12月明确提出 $\text{PM}_{2.5}$ 监测时间表,指出急需在 $\text{PM}_{2.5}$ 监测仪器选型、建立监测规范、达标考核方法等方面加快进度,尽快出台相应的规定和指导意见。2012年2月新修订的《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)增设了 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧监测指标。 $\text{PM}_{2.5}$ 监测是制订空气质量标准、解析污染来源、探究大气化学过程、研究环境健康效应、预测气候影响的基础,其主要意义在于通过监测技术,分析其污染来源,从而采取有效的措施,控制 $\text{PM}_{2.5}$ 在大气环境中质量浓度,最大限度降低 $\text{PM}_{2.5}$ 环境风险。同时,准确的 $\text{PM}_{2.5}$ 监测结果还是考核评价城市环境空气质量改善情况的依据,是经济社会发展新常态下依法治国的必要保障。

1.1 $\text{PM}_{2.5}$ 概 述

1.1.1 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源

$\text{PM}_{2.5}$ 不是一种单一成分的空气污染物,而是由人为和自然源排放的不同化学组分构成的一种复杂且可变的大气污染物^[1]。 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源从排放途径可分为自然源和人为源^[2]:自然源,指由自然原因向环境释放颗粒物,如沙漠、干旱或半干旱地区裸露地面扬尘和岩石风化、火山喷发、森林火灾、海水溅沫的盐粒,以及植物的花粉、孢子、细菌等;人为源,指由化石燃料的燃烧、城市扬尘、汽车尾气、农作物秸秆焚烧及工农业生产等人类活动向大气排放颗粒物。从 $\text{PM}_{2.5}$ 形成方式又可分一次颗粒物和二次颗粒物:一次颗粒物,指直接以固态形式排放的一次粒子(主要化学成分是矿物质、有机碳、元素碳等)或者在高温状态下以气态形式排出、在烟羽的稀释和冷却过程中凝结成固态的一次可凝结粒子(如半挥发性有机物);二次颗粒物,指由气态前体物通过大气化学反应生成的二次粒子(如硫酸盐、硝酸盐、铵盐和有机物等)。

为有效控制环境空气 PM_{2.5} 的污染,不仅要了解其来源,还要定量计算各个污染源的贡献值和分担率,这就是 PM_{2.5} 源解析技术。颗粒物源解析是制定 PM_{2.5} 污染防治规划的依据,对确定污染治理重点和环境管理有着十分重要的指导意义。目前,颗粒物来源解析通常采用的方法包括受体模型法和源模型法。不同源解析方法具有各自的优点和缺陷,在实际应用中需根据目标区域大小、污染源信息差异等不同,选择一种或联合多种方法进行解析。

我国自 20 世纪 80 年代后期开始进行源解析相关研究,北京、上海、广州、南京、杭州、宁波、天津、成都、济南等多个城市对 PM_{2.5} 的主要来源进行了解析,解析结果详见表 1-1。总体来说,我国 PM_{2.5} 主要来源有燃煤尘、机动车尾气尘、扬尘(包括土壤扬尘和建筑扬尘)、二次粒子、生物质燃烧、有机物、海盐粒子等,不同城市各源类的贡献率存在区域差异。

表 1-1 我国不同城市 PM_{2.5} 源解析结果汇总

城市	解析方法	源解析结果	文献
南京	CMB	扬尘 37.28%, 煤烟尘 30.34%, 硫酸盐 9.87%, 建筑尘 7.95%, 汽车尘 2.98%, 冶炼尘 2.57%, 其他 9.01%	[3]
武汉	PMF	机动车源 27.1%, 二次硫酸盐和硝酸盐 26.8%, 工厂排放 26.4%和生物质燃烧 19.6%	[4]
成都	PMF	土壤尘及扬尘 14.3%, 物质燃烧 28.0%, 机动车源 24.0%和二次硝酸盐/硫酸盐 31.3%	[5]
青岛	CMB-iteration 模型	城市扬尘 22.1%, 煤烟尘 15.9%, 建筑水泥尘 4.86%, 二次硫酸盐 19.3%, 二次硝酸盐 8.97%, 机动车尾气尘 13.7%, 海盐粒子 1.75%, 二次有机气溶胶 6.07%	[6]
杭州	CMB	机动车尾气尘 21.6%、硫酸盐 18.8%, 煤烟尘 16.7%, 燃油尘 10.2%, 硝酸盐 9.9%, 土壤尘 8.2%, 建筑水泥尘 4.0%, 海盐粒子 1.5%	[7]
宁波	CMB	城市扬尘 19.9%, 煤烟尘 14.4%, 硫酸盐 16.9%, 机动车尾气尘 15.2%, 硝酸盐 9.78%, 二次有机气溶胶 8.85%	[8]
乌鲁木齐	富集因子和 CMB	城市扬尘 24.7%, 煤烟尘 15.6%, 建筑水泥尘 0.5%, 钢铁尘 4.6%, 机动车尾气尘 9.0%, 二次硫酸盐 28.6%, 二次硝酸盐 9.4%, 其他 7.6%	[9]
深圳	PMF	二次硫酸盐 30%, 机动车排放 26.9%, 生物质燃烧 9.8%, 二次硝酸盐 9.3%, 高氯源、重油燃烧、海盐、扬尘和冶金等贡献 2%~4%	[10]
北京	CMB、PMF、数值模式和源清单综合解析	机动车 31.1%, 燃煤 22.4%, 工业生产 18.1%, 扬尘 14.3%, 其他 14.1%	北京市环保局 2014 年 4 月发布
天津	数值模式、CMB 模型与源清单综合解析	扬尘 30%, 燃煤 27%, 机动车 20%, 工业生产 17%, 其他 6%	天津市环保局 2014 年 8 月发布
石家庄	数值模式、CMB 模型与源清单综合解析	燃煤 28.5%, 工业生产 25.2%, 扬尘 22.5%, 机动车 15.0%, 其他 8.8%	石家庄市环保局 2014 年 8 月发布
济南	CMB、PMF、数值模式和源清单综合解析	燃煤 27%, 扬尘 24%, 工业生产 18%, 机动车 15%, 其他 16%	济南市环保局 2014 年 10 月发布

1.1.2 国内外 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度水平

2010年,加拿大达尔豪斯大学研究人员根据美国国家航空航天局(NASA)两台卫星监测仪得到的2001~2006年 $\text{PM}_{2.5}$ 的监测结果,绘制出了全球 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度地图。全球 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重的是从北非撒哈拉沙漠延伸至东亚的大片区域,特别是中国华北、华东和华中地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平超过了撒哈拉沙漠。美国 $\text{PM}_{2.5}$ 水平普遍相对较低,但城市群聚集的中西部 and 东部一些中心区域的污染依然存在。西欧各国中,德国、法国浓度较小,仅为几微克每立方米,意大利、西班牙、英国等国家浓度略高,约为几十微克每立方米。表1-2列出了国内外城市空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值,可以看出和国外城市相比,我国的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况非常严重。

表 1-2 国内外城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平

城市	时间	$\text{PM}_{2.5}$ 浓度/ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
北京 ^[11]	2014 年	85.9
上海 ^[11]	2014 年	52
广州 ^[11]	2014 年	49
济南 ^[11]	2014 年	90
首尔 ^[12]	2002 年 9 月~2004 年 2 月	42.9
横滨 ^[12]	2007~2008 年	20.6
河内 ^[13]	2001~2004 年	124
曼谷 ^[13]	2001~2004 年	50
金奈 ^[13]	2001~2004 年	46
万隆 ^[13]	2001~2004 年	53
马尼拉 ^[13]	2001~2004 年	44
洛杉矶 ^[14]	2009 年	11
华盛顿 ^[14]	2010 年	10.3
黎巴嫩 ^[15]	2003 年 2 月~2003 年 5 月	40
米兰 ^[16]	2002 年 8 月~2003 年 11 月	32.8
杜伊斯堡 ^[17]	2002 年 10 月~2002 年 11 月	14.7
布拉格 ^[17]	2002 年 11 月~2003 年 1 月	29.6
阿姆斯特丹 ^[17]	2003 年 1 月~2003 年 3 月	25.4
赫尔辛基 ^[17]	2003 年 3 月~2003 年 5 月	8.3
巴塞罗那 ^[17]	2003 年 3 月~2003 年 5 月	20.0
雅典 ^[17]	2003~2008 年	17.7
肯尼亚 ^[18]	2009 年	98.1

据《中国环境状况公报》统计^[11], 2014 年我国 PM₁₀ 年均浓度范围为 35~233 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均浓度为 105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 达标城市比例为 21.7%; PM_{2.5} 年均浓度范围为 19~130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均浓度为 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 达标城市比例仅为 11.2%。我国京津冀、长三角、珠三角三大重点区域 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 年均污染水平如图 1-1 所示。我国 PM_{2.5} 空间分布呈现明显区域性特征, PM_{2.5} 高污染区主要分布在华北平原京津冀地区, 其次为华中、华东大部分区域, 以及东北、四川盆地等地区, 这些地区经济较发达, 人口较为集中, 污染物排放量较大。

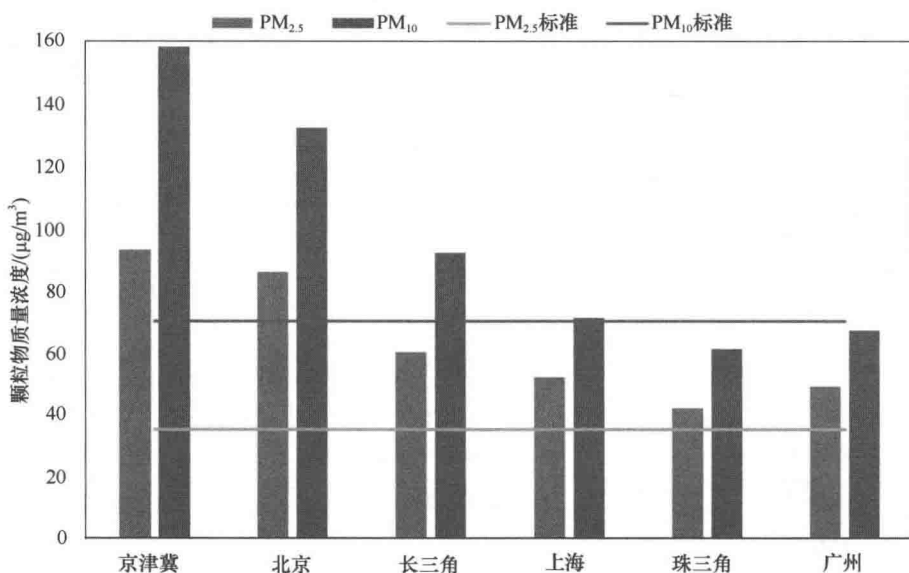


图 1-1 2014 年我国三大重点区域 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 年均污染水平^[11]

PM_{2.5} 化学成分组成复杂, 包括有机物、元素碳、硫酸盐、硝酸盐、地壳物质、微量元素等, 且易受污染源类型、气象条件、人为活动、土壤类型等多种因素影响, 呈现明显的时间和空间分布差异。Yang 等^[19]总结了我国具有代表性的城市站 PM_{2.5} 的化学组成, 表明有机物是中国 PM_{2.5} 的重要化学物种, 东部地区二次无机气溶胶 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+) 普遍较高, 占 PM_{2.5} 质量的 40%~57%, 地壳物质的高含量也是中国 PM_{2.5} 组成的又一特征, 在受沙尘影响的地区和季节尤甚。

1.1.3 PM_{2.5} 对环境和人体健康的影响

PM_{2.5} 具有复杂的区域性理化性质, 能在大气中发生各种物理化学反应, 在大气中寿命也长达数天至数周, 在此期间可形成跨区域的长距离传输, 已成为国际大气化学乃至地球科学研究中的关注焦点。

PM_{2.5} 对环境的影响主要包括生态影响、能见度降低、全球气候变化以及建筑材料腐蚀等。PM_{2.5} 吸收、散射太阳辐射, 使地面接收太阳辐射减少, 并且颗粒物载带

的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 及微量元素等化学成分会不同程度地降低能见度^[20-22]、影响自然生态系统。硫酸盐是 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分中对能见度下降贡献最大的成分，二次气溶胶对能见度下降的贡献高于一次颗粒物黑炭^[23]。 $\text{PM}_{2.5}$ 通过降低昼夜温差影响温度变化^[24,25]，通过吸收和散射可见光或成云过程直接和间接影响气候变化^[26-30]。 $\text{PM}_{2.5}$ 还会使建筑材料、文物以及城市雕塑等表面污浊，可吸附和氧化某些气态污染物，直接腐蚀材料表面，滋生微生物，加速其自然风化过程^[31, 32]。

$\text{PM}_{2.5}$ 是对人体健康危害最大且代表性最强的大气污染物之一，相对于粗颗粒物， $\text{PM}_{2.5}$ 比表面积大、粒径小、寿命长、吸附有害物质较多，更易进入人体内参与血液循环。世界卫生组织（WHO）在 2005 年版《空气质量准则》^[33]中指出：当 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达 $35\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时，人的死亡风险比 $10\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时增加约 15%；大气慢性效应研究结果表明， $\text{PM}_{2.5}$ 浓度每增加 $10\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，总死亡率增加 13%（95%CI：4.4%~23%）、心肺疾病死亡率增加 17%（95%CI：5.8%~42%）。吸入人体的 $\text{PM}_{2.5}$ 主要影响呼吸系统和心血管系统，如：刺激呼吸道、引发咳嗽、呼吸困难、降低肺功能、加重哮喘，导致慢性支气管炎、心率失常、非致命性心脏病、心脏病患者过早死等，其对呼吸系统最严重的危害是使肺纤维化，引发各种呼吸系统病变，同时 $\text{PM}_{2.5}$ 可以携带多环芳烃、多氯联苯等致癌物质，导致癌症发病率升高^[34-36]。颗粒物危害人体健康主要有 3 个影响因素：粒径大小、浓度水平及化学成分^[37]。粒径大小决定粒子在人体内沉积的部位；短期暴露（数小时到数周）于高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 会使居民的日死亡率和发病率升高^[38]，长期暴露（数月到数年）可使患有慢性疾病的患者病情恶化，甚至导致健康正常人发生疾病或者死亡；化学成分则决定其对人体器官的损伤类别与程度。表 1-3 给出了 $\text{PM}_{2.5}$ 中对健康影响较为显著的化学成分与危害。

表 1-3 $\text{PM}_{2.5}$ 中对健康影响较为显著的化学成分与危害

$\text{PM}_{2.5}$ 化学成分	健康危害	参考文献
有机碳（OC）、元素碳（EC）	与心率变异性、血压、系统性炎症、血液高凝状态等有关，其中 OC 含有致癌物质和遗传毒性诱变物	[39]，[40]
硫酸盐	损伤呼吸系统	[41]
硝酸盐、 Cl^- 、 F^-	损伤心血管系统等	[42]
过渡金属	引起活性氧的产生和炎症因子的释放，损伤心肺系统等	[43]
As、多环芳烃（PAHs）	引起遗传物质损伤，与癌症和出生缺陷有关	[44]

1.2 $\text{PM}_{2.5}$ 监测技术发展概况

人们很早就认识到尘埃可消光、导致能见度下降，如《诗经·邶风》中有风吹尘土的记载，包括“终风且暴”、“终风且霾”、“终风且噎”、“噎噎其阴”四种天象。

近代随着工业发展,汽车尾气、工地扬尘、燃煤烟尘等不断排入大气环境,颗粒物成分愈加复杂,引发的污染关联效应愈加深入。

19 世纪后半叶,人们已经注意到了大气中的细微粒子并开始研发仪器进行观测,产生了气溶胶科学和气溶胶测量方法学。20 世纪中期《气溶胶力学》(*Mechanics of Aerosol*)出版后,人们认识到工业气溶胶和粉尘对人体健康的危害,研发和使用多种气溶胶采集方法。20 世纪 60 年代,微电子、激光、计算机技术、现代化学和电镜技术的迅速发展,推动了颗粒物监测技术的进步,发展了适合大气环境的颗粒物滤膜采样和化学分析方法,极大提升了颗粒物自动监测仪器的精密度和准确度。20 世纪 70 年代开始,各国空气质量标准中均纳入了颗粒物的指标,经历了从总悬浮颗粒物(TSP)到 PM₁₀ 再到 PM_{2.5} 的过程,浓度限值逐步收紧,颗粒物监测技术也随之不断发展。

1.2.1 美国 PM_{2.5} 监测技术发展概况

1963 年,美国通过了首部《清洁空气法案》(Clean Air Act),并分别于 1970 年、1977 年、1990 年进行了修订。1970 年尼克松总统签署的《清洁空气法案》修正案对美国的环境空气质量标准分级制度作了明确的规定:环境空气质量共分为两级,一级标准目标在于保护公众健康,二级标准目标在于保护公共福利。1971 年根据国会通过的《清洁空气法案》修正案,美国政府颁布了《国家环境空气质量标准》(National Ambient Air Quality Standards, NAAQS),一级标准规定 TSP 年均浓度和 24 小时日均浓度,分别为 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;二级标准仅规定了 TSP 的 24 小时日均浓度,为 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。随着颗粒物对人体健康影响研究的不断深入,人们发现健康效应与粒径更小的颗粒物关系更加紧密。1987 年,美国环境保护署(EPA)废除了 TSP 环境空气质量标准,制定实施 PM₁₀ 环境空气质量标准,规定 PM₁₀ 年均浓度和 24 小时日均浓度分别为 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,一级标准与二级标准相同。与此同时,美国科学家开始了关于 PM_{2.5} 的科学研究。1997 年,美国 EPA 率先在环境空气质量标准中增加了 PM_{2.5} 指标,规定了 PM_{2.5} 年均浓度和 24 小时日均浓度,分别为 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,一级标准与二级标准相同,同时保留了 PM₁₀ 环境空气质量标准不变。2006 年,美国 EPA 加严了 PM_{2.5} 的 24 小时日均浓度标准至 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,并废除 PM₁₀ 的年均浓度标准。2012 年,美国 EPA 继续修订了 PM_{2.5} 的年均浓度标准,规定一级标准为 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,二级标准为 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

美国 EPA 从 1987 年开始对 PM₁₀ 的网络化观测,PM_{2.5} 监测网络于 1999 年开始建设,2000 年网络建设基本完成,2006 年获得有效的 PM_{2.5} 监测数据,并开始常规化运行。美国目前已经建立了一个从地方、州到国家层面,由常规监测、趋势监测到支持光化学烟雾、气溶胶形成及人体健康与空气污染研究的全方位的立体空气质量监测网络,包括由 4000 多个子站组成的 SLAMS (State and Local Air Monitoring Stations) 网络、由 1080 个子站组成的 NAMS (National Air Monitoring Stations) 网