

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

KONGQI KELIWU CELIANG JISHU

空气颗粒物 测量技术

白志鹏 耿春梅 杜世勇 杨文 等编著



化学工业出版社

环保公益性行业科研专项经费项目

空气颗粒物 测量技术

白志鹏 耿春梅 杜世勇 杨文 等编著



化学工业出版社

本书介绍了颗粒物监测技术的发展、国内外颗粒物污染及监测技术现状、环境空气颗粒物滤膜采样技术、空气颗粒物在线监测技术、环境空气颗粒物垂直测量技术、颗粒物污染源监测技术、颗粒物理化分析技术、环境空气颗粒物监测的质量保证和质量控制方法、颗粒物源解析技术、颗粒物对环境及健康影响评价以及颗粒物控制技术。本书兼顾理论阐述与实际应用，可作为编制监测规范的参考书，也可供从事环境监测、大气环境科学、环境工程及环境管理等领域的科研人员、管理人员以及工程技术人员参考使用，还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

空气颗粒物测量技术/白志鹏等编著
工业出版社, 2014. 8
环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书
ISBN 978-7-122-19715-3



I. ①空… II. ①白… III. ①粒状污染物-测量技术
IV. ①X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 021900 号

责任编辑: 满悦芝
责任校对: 宋 玮

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张 13 1/2 字数 315 千字 2014 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

编著委员会

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

本书编委会

主 任

白志鹏

委 员

白志鹏 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室
济南市环境保护科学研究院 泰山学者

耿春梅 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室

杜世勇 济南市环境保护科学研究院/济南市环境监测中心站

杨 文 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室

张文杰 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室

王燕丽 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室

韩 斌 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室

任丽红 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室

王 婉 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室

王歆华 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室

侯鲁健 济南市环境保护科学研究院/济南市环境监测中心站

吕 波 济南市环境保护科学研究院/济南市环境监测中心站

何 涛 济南市环境保护科学研究院/济南市环境监测中心站

刘玉堂 济南市环境保护科学研究院/济南市环境监测中心站

王宝庆 南开大学环境科学与工程学院

赵 宏	南开大学计算机与控制工程学院
王 恺	南开大学计算机与控制工程学院
孔少飞	南开大学环境科学与工程学院
古金霞	天津城建大学/南开大学/济南市环境保护科学研究院博士后 工作站
陈 莉	中国环境科学研究院/天津师范大学

序 言

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，“十一五”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，建设了环境科技创新体系、环境标准体系、环境技术管理体系三大工程。五年来，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启动实施，科技投入持续增加，科技创新能力显著增强；发布了502项新标准，现行国家标准达1263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编制、修订工作，初步建成以重点行业污染防治技术政策、技术指南和工程技术规范为主要内容的国家环境技术管理体系。环境科技为全面完成“十一五”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“十一五”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”期间，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目234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”期间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“十一五”环保公益性行业科研专项经费系列丛书。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

Handwritten signature of Wu Xiaqing in black ink.

2013 年 8 月

前言

目前及未来一段时间内,我国环境空气质量状况总体形势依然严峻,恶化的趋势尚未得到根本遏制,环境矛盾凸显,压力继续加大。2013年1月以来,我国中东部地区连续发生了多次中度、重度、极重度污染天气,持续时间长、影响面积大、污染浓度高,受影响人群多,而颗粒物污染是元凶。治理颗粒物需要“源头严控,过程严管,后果严惩”,其中源头严控和过程严管都涉及环境和污染源监测,而颗粒物监测技术是重要的技术保障。

空气颗粒物监测技术已经发展了一百多年,特别是近五十年来,取得了长足的进步。各国空气质量标准的需求也直接促进了颗粒物监测技术的提高。从19世纪后半叶气溶胶科学和气溶胶测量方法学产生以来,气溶胶监测技术得到了逐步发展和完善,特别是从20世纪60年代开始,微电子、激光和计算机技术以及现代化学和电镜技术的迅速发展,极大地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及化学分析方法,颗粒物自动监测仪器在精密度和准确度上取得长足的发展。从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TSP到 PM_{10} 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。我国新修订的《环境空气质量标准》(GB 3095—2012),增加了 $PM_{2.5}$ 浓度限值,加严了 PM_{10} 浓度限值,对环境颗粒物的监测提出了新的需求。

由于各地经济发展不平衡,在能源结构、产业结构、工业布局、区域自然环境等方面存在差异,各地区的颗粒物来源、浓度水平、成分特征各不相同,导致对颗粒物的监测,尤其是对细粒子的监测存在诸多问题,如①现有颗粒物监测仪器在我国不同区域的适用性有待系统评价;②缺少滤膜质量标准和评价技术规范;③现有自动分析仪器采样参数与我国法规要求不符;④缺少颗粒物测定仪器认证/指定程序;⑤GB 3095—2012仅将微量振荡天平法和 β 射线法作为 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的自动分析方法,仪器可选择种类少;⑥ PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 自动监测技术规范需要完善;⑦缺少污染源细颗粒物监测技术规范;⑧缺少统一的质量保证和质量控制规范等。

编著者针对当前我国空气颗粒物监测及污染控制存在问题与实际管理需要,编写了本书。编著者长期从事空气颗粒物监测、污染评估及控制相关工作。本书在国家环保公益性行业科研专项“ $PM_{2.5}/PM_{10}$ 颗粒物自动监测设备的标准量值传递和QA/QC关键技术研究”(201309010, 2013—2015)资助下出版。书中集合了公益项目的研究成果、编著者前期积累的部分研究成果,以及国内外最新的研究进展。

本书结构和编写分工如下:第1章概述颗粒物监测技术的发展,国内外颗粒物污染及监测技术现状,量值传递和溯源,由白志鹏、耿春梅、韩金保编写;第2章阐述环境空气颗粒物滤膜采样技术,由耿春梅、韩金保、杨文编写;第3章介绍空气颗粒物在线监测技术,由杨文、刘玉堂、王飞、孙如峰、张蕊、张文杰、王燕丽、杜世勇、侯鲁健、吕波编写;第4章介绍环境空气颗粒物垂直测量技术,由古金霞、何涛、耿春梅、杨文、张文杰编写;第5章介绍颗粒物污染源采样技术,由白志鹏、韩斌、孔少飞、韩金保编写;第6章介绍颗粒

理化分析技术，由王婉、韩金保、任丽红编写；第7章介绍环境空气颗粒物监测的质量保证和质量控制方法，由白志鹏、耿春梅、王凯、王宝庆、王歆华编写；第8章介绍颗粒物源解析技术，由白志鹏、韩斌、韩金保、赵宏、任丽红、王歆华编写；第9章介绍颗粒物对环境及健康影响评价，由耿春梅、古金霞、韩金保、韩斌、陈莉编写；第10章简要介绍颗粒物控制技术，由王宝庆编写；第11章结语由白志鹏、耿春梅编写。本书编写过程中，刘威德、郭光焕、吴兑、孙俊英和段玉森研究员、胡敏教授提出了修改完善意见，表示感谢！全书由白志鹏审定。

本书兼顾理论阐述与实际应用，可作为监测规范编制的参考书，也可供从事环境监测、大气环境科学、环境工程及环境管理等领域的科研人员、管理人员以及工程技术人员参考使用，也可作为大中专院校环境专业的教学参考书。

在本书编写过程中，参考了相关文献中的研究成果，编著者已将参考文献列于正文之后，在此对文献作者表示诚挚的谢意！

由于编著者研究领域所限，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者
2014年6月

目 录

1 概述	1
1.1 颗粒物监测技术发展	1
1.2 国外颗粒物污染和监测现状	2
1.2.1 国外颗粒物污染现状	2
1.2.2 美国颗粒物监测现状	3
1.2.3 欧洲颗粒物监测现状	5
1.3 我国颗粒物污染和监测现状	5
1.3.1 我国颗粒物污染现状	6
1.3.2 我国颗粒物监测网络	6
1.3.3 我国颗粒物监测方法	8
1.4 量值溯源与量值传递简介	9
1.4.1 我国量值传递及溯源体系简介	9
1.4.2 颗粒物测量的量值传递及溯源	10
参考文献	11
2 颗粒物滤膜采样技术	14
2.1 粒径切割采样技术	14
2.1.1 撞击式采样技术	14
2.1.2 旋风式采样技术	16
2.1.3 虚拟式采样技术	16
2.1.4 其他采样技术	17
2.2 过滤收集技术	18
2.2.1 滤膜	18
2.2.2 膜托	20
2.3 滤膜自动更换采样技术	20
2.4 气态干扰物选择性去除技术	20
2.5 水分干扰去除技术	21
参考文献	22
3 颗粒物在线监测技术	24
3.1 基于重量法在线监测技术	24
3.1.1 测量原理	24
3.1.2 技术应用	25
3.2 基于空气动力学在线监测技术	26
3.2.1 测量原理	26
3.2.2 技术应用	28

3.3	基于光学法在线监测技术	30
3.3.1	测量原理	30
3.3.2	技术应用	37
3.4	基于电迁移率法在线监测技术	40
3.4.1	测量原理	40
3.4.2	技术应用	45
3.5	基于核素放射法在线监测技术	47
3.5.1	测量原理	47
3.5.2	技术应用	48
3.6	基于质谱法气溶胶在线监测技术	50
3.6.1	测量原理	50
3.6.2	技术应用	51
	参考文献	53
4	环境空气颗粒物垂直测量技术	60
4.1	激光雷达遥感技术	60
4.1.1	激光雷达测量基本原理	60
4.1.2	激光雷达反演消光系数方法	61
4.1.3	激光雷达遥感校准	63
4.1.4	激光雷达在环境监测中的应用	64
4.2	卫星遥感技术	66
4.2.1	卫星遥感测量基本原理	67
4.2.2	卫星遥感反演气溶胶光学厚度的方法	67
4.2.3	卫星遥感校准	69
4.2.4	卫星遥感在大气环境领域的应用	69
4.3	飞行器颗粒物测量技术	74
4.3.1	飞行器采样口设计	74
4.3.2	常用飞行器颗粒物测量仪器	75
4.3.3	飞行器颗粒物采样的复杂性	76
4.3.4	飞行器在大气环境领域的应用	77
4.4	其他垂直测量技术	80
4.4.1	地基太阳光度计垂直测量技术	80
4.4.2	高塔垂直测量技术	80
4.4.3	系留气球/飞艇垂直测量技术	81
	参考文献	82
5	颗粒物污染源采样技术	86
5.1	固定源采样技术	86
5.1.1	直接采样技术	86
5.1.2	稀释通道采样技术	90
5.2	移动源采样技术	91
5.2.1	台架测试技术	91

5.2.2	随车采样技术	93
5.2.3	隧道/停车场/检车线测量技术	93
5.2.4	路边采样技术	94
5.3	开放源采样技术	94
5.3.1	开放源样品收集方法	94
5.3.2	颗粒物再悬浮技术	95
	参考文献	97
6	颗粒物理化分析技术	99
6.1	颗粒物的滤膜称重及储运	99
6.1.1	采样前滤膜称重	99
6.1.2	采样滤膜编号	100
6.1.3	采样后滤膜称量和储存	100
6.1.4	滤膜自动标识和称重系统	101
6.1.5	影响样品称量的主要因素	101
6.2	颗粒物无机元素组分分析技术	101
6.2.1	颗粒物无机元素无损分析技术	101
6.2.2	颗粒物无机元素有损分析技术	103
6.3	颗粒物碳组分分析技术	107
6.3.1	热学法	107
6.3.2	光学法	108
6.3.3	热光结合法	108
6.4	颗粒物水溶性无机离子分析技术	109
6.4.1	离子色谱法	109
6.4.2	离子选择电极法	110
6.4.3	比色法	110
6.4.4	离子在线色谱法	110
6.4.5	傅里叶变换红外光谱法	112
6.5	颗粒物有机组分分析技术	112
6.5.1	气相色谱法	113
6.5.2	高效液相色谱法	113
6.5.3	气-质联用法	114
6.5.4	其他有机物分析技术	114
6.6	单粒子分析技术	115
6.6.1	扫描电镜法	115
6.6.2	光学显微镜法	116
6.6.3	激光微探针质谱法	116
6.6.4	二次离子质谱法	116
6.6.5	拉曼微探针法	117
6.7	分析测试数据的质量控制	117
6.7.1	电荷平衡分析	117
6.7.2	无机元素数据与离子数据的比较	118

6.7.3	化学质量闭合分析	118
参考文献		120
7	颗粒物测量质量保证和质量控制	123
7.1	QA/QC 体系框架	123
7.2	管理过程的 QA	125
7.3	测量过程的 QA	126
7.3.1	监测网络设计	126
7.3.2	质量控制	129
7.3.3	标定和校准	132
7.4	评估过程的 QA	137
7.5	数据确认和应用过程的 QA	138
7.6	我国空气颗粒物监测标准和规范中的 QA	138
7.6.1	国家标准中的质量保证	138
7.6.2	行业标准中的质量保证	139
参考文献		140
8	源解析技术	143
8.1	排放源识别	143
8.2	源模型估算法	145
8.2.1	源模型发展历程	145
8.2.2	Models-3 空气质量模型	146
8.3	受体模型估算法	148
8.3.1	源未知类受体模型	149
8.3.2	源已知类受体模型	152
8.4	我国颗粒物源解析现状及策略	154
8.4.1	我国颗粒物污染特点及源解析现状	155
8.4.2	我国空气颗粒物源解析存在的问题	156
8.4.3	我国空气颗粒物源解析策略	156
参考文献		157
9	颗粒物对环境及健康影响评价	159
9.1	环境空气质量评价	159
9.1.1	环境空气颗粒物标准概述	159
9.1.2	环境空气质量评价方法	160
9.2	颗粒物人体健康风险评估	162
9.2.1	健康风险评估方法	162
9.2.2	风险管理	164
9.3	能见度评价	165
9.3.1	能见度概述	165
9.3.2	能见度的影响因素分析方法	165
9.3.3	能见度评价方法	165

9.4 霾评价	166
9.4.1 霾概述	166
9.4.2 霾的影响	167
9.4.3 霾等级评价方法	167
9.5 颗粒物对生态系统影响评价	168
9.5.1 概述	168
9.5.2 典型颗粒物对生态系统的影响	168
9.6 颗粒物对气候的影响评价	170
9.6.1 直接气候效应	170
9.6.2 间接气候效应	171
9.7 颗粒物对材料的影响评价	171
参考文献	172
10 颗粒物控制技术	175
10.1 固定源颗粒物控制技术	175
10.1.1 水泥行业颗粒物控制技术	176
10.1.2 燃煤电厂颗粒物控制技术	177
10.1.3 技术应用	178
10.2 移动源颗粒物控制技术	180
10.2.1 优化燃烧技术	180
10.2.2 机动车尾气控制技术	181
10.2.3 排放性能的车载监测技术	183
10.2.4 汽油车改装成天然气/汽油两用燃料车的技术	183
10.2.5 无烟柴油技术	184
10.2.6 技术应用	185
10.3 生物质燃烧源颗粒物控制技术	186
10.3.1 生物质锅炉燃烧技术	186
10.3.2 生物质成型燃料燃烧技术	187
10.3.3 生物质与煤混烧技术	187
10.4 扬尘源颗粒物控制技术	187
10.4.1 建筑施工扬尘控制技术	188
10.4.2 堆场扬尘控制技术	188
10.4.3 裸土扬尘控制技术	189
10.4.4 交通道路扬尘控制技术	190
参考文献	191
11 结语	193
附录	196
附录1 缩略语	196
附录2 索引	199
附录3 主要环境空气颗粒物相关标准	202

空气颗粒物（气溶胶）是悬浮在空气中的固体和液体微粒共同组成的多相混合体系。按粒径大小可分为三类：即粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的超细粒子，在大气中的停留时间较短；粒径为 $0.1\sim 2.5\mu\text{m}$ 的积聚模态颗粒物，在大气中最为稳定，滞留时间长、输送距离最远，被认为是区域性及跨边界输送的污染物；第三类是粒径大于 $2.5\mu\text{m}$ 的粗粒子，易通过沉降方式除去，影响范围较小。一般将超细粒子和积聚模态的颗粒物称为细颗粒物（ $\text{PM}_{2.5}$ ）。与粗颗粒物（通常指粒径范围为 $2.5\sim 10\mu\text{m}$ 的颗粒物）相比， $\text{PM}_{2.5}$ 比表面积大，容易成为其他污染物的载体和反应体，许多对人体具有潜在危害的物质主要富集在细粒子上，因此越来越引起人们的关注。

空气颗粒物研究可以为制订空气质量标准、解析污染源、验证模式、探究大气化学过程和环境及健康效应、预测气候影响及制定污染防治政策提供大量实测数据和科学依据，而空气颗粒物的测量技术是空气颗粒物研究的基础。

1.1 颗粒物监测技术发展

人们很早就认识到尘埃可导致消光、能见度下降，《诗经·国风·邶风·终风》中“终风且霾”四字非常形象。但直到 19 世纪后半叶，才产生了气溶胶科学和气溶胶测量方法学，气溶胶监测技术的发展大致划分如下三个阶段。

第一阶段：经典前期。20 世纪之前，人们已经注意到了空气中的细微粒子并开始研发仪器进行观测。19 世纪 70 年代前后，Coulier 发明了凝结核检测器；Aitken 发明了计量粒子数目的便携式设备；Tyndall 发明了丁达尔仪、测云器和超倍显微镜，并为热沉降器的发明奠定了基础；Bidaszeusky 用超倍显微镜观察到烟雾粒子的运动和沉降。

第二阶段：经典发展期。自 1918 年 Donnan 首次提出“气溶胶”一词开始，到 20 世纪中期《气溶胶力学》(*Mechanics of Aerosol*) 的出版。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，如单级撞击式采样器、串级撞击式采样器、热沉降器、静电沉降器等，并开始使用滤膜采样；研发了凝结核计数器和光学粒子计数器等。该时期采样误差较大，数据可比性差。

第三阶段：现代发展期。从 20 世纪 60 年代开始，微电子、激光和计算机技术以及现代化学和电镜技术的迅速发展，极大推动了颗粒物监测技术的进步：①颗粒物自动监测仪器在

精密度和准确度上取得了长足的发展，如串联撞击式采样器、气溶胶电迁移率分析仪、光学粒子计数器和分析仪等获得改进；②发展了适合环境颗粒物采样的滤膜；③更灵敏的现代分析化学方法应用于气溶胶分析，包括色谱、质谱、等离子和激光光谱，放射法等，用以确定颗粒物中大部分无机成分和有机成分；④单个气溶胶粒子实时测量和识别技术的发展推动单粒子计数器和理化分析仪日趋成熟；⑤丰富和发展了等速采样理论。

1.2 国外颗粒物污染和监测现状

1.2.1 国外颗粒物污染现状

就全球范围而言，欧洲和北美洲以及拉丁美洲和亚洲的部分城市， PM_{10} 的排放量有所减少，但是它依然是亚洲和拉丁美洲其他众多城市中最主要的污染物。部分国家的室外 PM_{10} 浓度接近世界卫生组织（World Health Organization, WHO）指南中的 $20\mu g/m^3$ 。如美国环境颗粒物浓度持续降低，如图 1-1 所示，在 2010 年，全美 PM_{10} 年平均浓度为 $51.02\mu g/m^3$ ， $PM_{2.5}$ 年平均浓度为 $9.99\mu g/m^3$ ；欧洲 2011 年所有监测点的颗粒物浓度如图 1-2 所示， PM_{10} 年平均浓度为 $(16.1\pm 7.1)\mu g/m^3$ ， $PM_{2.5}$ 年平均浓度为 $(10.1\pm 4.9)\mu g/m^3$ 。

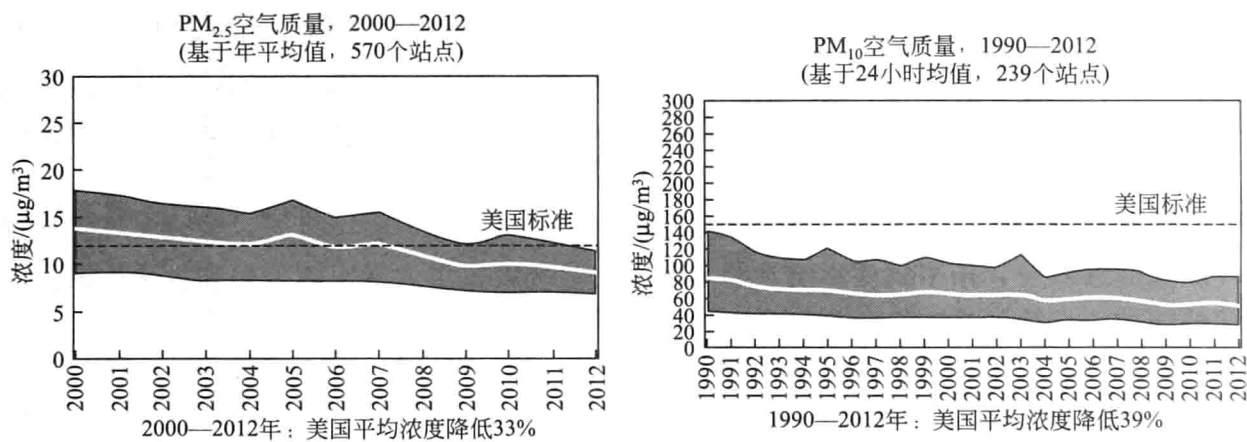


图 1-1 美国 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势

[引自：<http://www.epa.gov/airtrends/pm.html>]

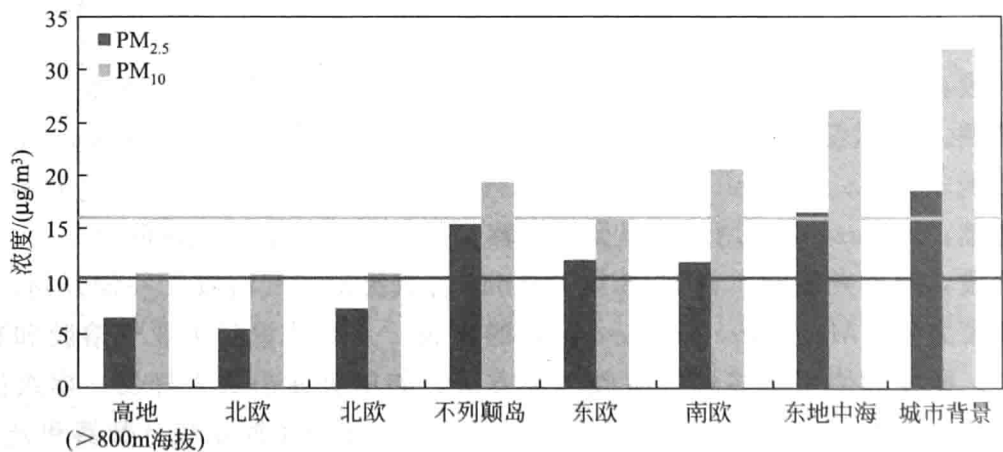


图 1-2 欧洲 2011 年 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年平均浓度 (图中横线表示所有监测点的平均浓度值)

[引自：EMEP status report: Transboundary particulate matter in Europe 2013, 4/2013]