

“十一五”国家重点图书出版规划项目



国家重点基础研究发展计划

燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术
基础研究学术丛书

燃烧源可吸入颗粒物的 物理化学特征

郝吉明 段 雷 著
易红宏 李兴华 胡京南

 科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
“十一五”国家重点图书出版规划项目
燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术基础研究学术丛书

燃烧源可吸入颗粒物的 物理化学特征

郝吉明 段 雷 著
易红宏 李兴华 胡京南



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题“燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征及其成因”(编号 2002CB211601)研究成果的总结。利用以荷电低压撞击器(ELPI)为核心的稀释采样系统,对中国典型的燃烧源,包括燃煤电厂、燃油电厂、工业锅炉、生物质炉灶和生物质开放燃烧等固定源以及汽油车、柴油车和替代燃料车等流动源,所排放的可吸入颗粒物的物理化学特征进行了系统全面的测试与分析。本书介绍了不同燃烧源排放可吸入颗粒物的典型粒径分布、微观形态和化学组成,以及不同燃烧条件对可吸入颗粒物物理化学特征的影响。基于已有的测试结果,本书还总结了各种燃烧源的可吸入颗粒物排放因子。

本书可供从事大气环境科学和大气污染控制的研究人员参考,也可供从事环境规划和管理的人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征/郝吉明,段雷等著. —北京:科学出版社,2008

(燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术基础研究学术丛书)

ISBN 978-7-03-021526-0

I. 燃… II. ①郝…②段… III. 燃烧产物-粒状污染物-物理化学-特性-研究 IV. X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 043281 号

责任编辑:刘宝莉 陈 捷 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平 / 封面设计:王 浩

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

*

2008 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008 年 6 月第一次印刷 印张:19 3/4 插页:4

印数:1—3 000 字数:380 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

《燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术 基础研究学术丛书》序

尽管进入 21 世纪,但是我国能源结构仍以矿物能源为主,煤炭和石油在很长时期内仍位居前列,由燃煤引起的 SO_2 、 NO_x 和颗粒物的污染仍是我国城市大气的主要污染源。研究表明:我国大城市的主要污染物中,大约 50%~60% 是由燃煤和机动车燃油引起的,特别是细粒子部分,其比例更高。尽管近年来各地都采取了一系列改善环境的措施,城市总悬浮颗粒物和可吸入颗粒物的总体污染情况有所好转,但是, $\text{PM}_{2.5}$ 特别是亚微米颗粒物的总量却没有下降,而是有所上升,这说明我国城市大气的主要污染物正在转向更细的颗粒物。因此,针对燃烧源排放的细微颗粒物的研究势在必行。

在科技部的支持下,围绕国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目——“燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术基础研究(2002CB211600)”组建了一支高水平的学术研究团队。经过五年的项目研究,他们在颗粒物的形成与控制基础两个方面都取得了重要的阶段性成果。这支团队由清华大学、北京大学、天津大学、华中科技大学、东南大学和中国环境科学研究院组成,每年举行一次超过 100 人的项目学术会议,形成了良好的学术交流氛围。在此项目研究期间,第一课题负责人郝吉明当选为中国工程院院士,第二课题负责人徐明厚成为“长江学者奖励计划特聘教授”和国家杰出青年科学基金获得者,首席科学家姚强在“十五”计划期间担任国家 863 洁净煤主题专家组成员、“十一五”计划 863 先进能源技术领域专家组成员兼工业领域节能减排总体专家组组长。

通过项目的研究,该学术团队提出了用于燃烧源颗粒物的采样、处理与分析的方法,例如,针对不同源与多种颗粒特性的撞击分离采样与分析系统、模拟大气过程的气溶胶综合反应箱、以显微 PIV 技术为核心的颗粒物在不同场中的运动规律的研究方法;研制搭建了一批具有国际先进水平的实验台架与测试仪器,例如,以全气缸取样为核心的柴油发动机颗粒物研究实验台,一维多燃料燃烧过程颗粒物形成与控制实验台, LII 碳黑形成与控制测量系统和煤的沉降炉实验台等。

到目前为止,关于此 973 计划项目取得主要研究成果如下:

(1) 完成了不同燃料、不同燃烧方式的 20 多种典型的固定源和 10 多种移动燃烧源（柴油车和汽油车）的可吸入颗粒物的粒径分级分布特性、形貌结构特性、主量化学组成、重金属富集特性和有机污染物在不同颗粒物上的富集特性等的研究；对我国燃用两种典型煤种的电厂各项目组进行了联合测试，获得了大量有关我国主要燃烧源可吸入颗粒物的基础数据；同时还进行了大量的实验室基础研究，获得了我国主要典型燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特性及其形成的基本规律。

(2) 通过对不同外部条件下可吸入颗粒物的多相流动、传热、传质与生长的规律的研究，以及在声场、电场、热温度场、磁场、相变环境、化学凝聚环境、自然环境等多种不同外力条件下的作用规律的实验和理论研究，首次获得了微米级颗粒在不同频率、不同声强的声场中不同位置的运动轨迹和团聚颗粒的运动轨迹，提出了一种确定粒径的新方法，并提出了相变、化学凝聚和预涂层技术等多个使颗粒团聚的技术研究方向。

(3) 通过实验与模型分析计算，建立了以通用颗粒物方程为基础的颗粒物在燃烧过程与降温排放过程中的气—液—固相互转化的物理化学机制，包括气化、成核、长大、非均相反应、团聚等的形成与转化规律。研究包括了复杂的物理化学过程，如各种物质的挥发行为及其转化行为，半挥发性和挥发性组分，特别是有机污染物的变化行为等，发现了燃烧源颗粒的三模态特性可以用铝元素作为标志性元素进行相关的表征，很好地解释了中间模式形成的机理。

(4) 根据可吸入颗粒物在产生、运动与演化过程中发生的一系列的碰撞和团聚，很好的预测了在降水过程中不同颗粒物的湿沉降，获得了碳烟（soot）形成过程的机理与主要影响因素，以及前体物在环境大气条件下转化为颗粒物的主要影响因素（包括温度、湿度等条件），并提出了在柴油机燃烧条件下控制碳烟形成的主要因素。

(5) 通过采用先进的在线观测技术研究颗粒物在大气环境中的演变规律，对细和超细粒子数浓度谱分布的连续在线观测发现了北京新粒子的形成，对北京大气中二次颗粒物的形成规律有了新的认识。

(6) 通过对不同荷电颗粒运动的研究，发现了荷电颗粒物在两相流动中两两相关的互相吸引、排斥、缠绕等规律；通过对微米级颗粒在碰撞与团聚的动力学过程的研究，发现了形成颗粒层结构与颗粒荷电、颗粒其他特性的关系，提出了微米颗粒动力学研究的新方法，为新型的电袋联合脱除技术的发展提供了基础数

据,指明了新的研究方向(此方向已获得科技攻关计划的支持)。

(7) 通过对内燃机颗粒物的过滤、催化氧化、等离子氧化等基本规律的研究,形成了具有催化过滤和等离子再生两项技术途径的颗粒物脱除与再生的新方法。

作为这一项目专家组的成员,本人一直跟踪这一项目的进展情况,上述成果表明将这一问题列入国家重大基础研究计划的正确性。这次科学出版社与项目组合作,共同将上述主要成果体现在一套丛书之中,是一件非常有意义的事。这套丛书是对五年基础研究成果的一个总结,为读者提供了关于燃烧源颗粒物从形成到排放控制的系统知识。丛书介绍了该项目最具代表性的研究方法、研究手段和研究成果,同时在编写上既考虑了专业研究人员的需要,又考虑了普通读者的需求。整套丛书系统性和针对性强,对未来从事颗粒物形成、排放与控制的研究和技术开发的科技人员有着重要的参考价值。衷心希望研究工作能够继续深入,愿本丛书的出版对读者了解燃烧源颗粒物的形成规律和控制技术有所帮助,并进一步推动该领域的研究和技术发展。

徐旭常

中国工程院院士

2008年5月于清华大学

前 言

可吸入颗粒物是指能够通过鼻和嘴进入人体呼吸道的颗粒物的总称,用 PM_{10} 表示(即空气动力学直径小于 $10\mu m$ 的颗粒)。当前可吸入颗粒物污染已成为突出的大气环境问题,日益引起世界各国的高度重视。它对人体健康有严重危害,也是导致大气能见度降低、酸沉降、全球气候变化、光化学烟雾等重大环境问题的重要因素。

可吸入颗粒物也是目前我国城市首要的大气污染物。我国自 20 世纪 70 年代中期开始重视烟尘排放的控制与治理,1996 年颁布了可吸入颗粒物的环境空气质量标准,并在全国大中城市相继实行空气质量日报制度。1990 年至今的监测数据表明,尽管总悬浮颗粒物(TSP)的年均浓度呈逐年下降趋势,但影响城市空气质量的首要污染物仍是可吸入颗粒物,2006 年有三分之一左右的城市可吸入颗粒物浓度超过国家二级标准。可吸入颗粒物问题还在一定程度上影响着我国城市的国际形象和对外合作。

以煤炭、石油、天然气和生物质为燃料的电厂锅炉、工业锅炉和民用炉灶等固定源,以及燃用汽油、柴油和压缩天然气的机动车等移动源,是造成我国大气环境中可吸入颗粒物严重污染的主要原因,而我国经济社会的快速发展和以化石燃料为主要能源的国情,决定了这种状况还将持续很长时间。因此,控制燃烧源的可吸入颗粒物排放是一个亟待解决的、直接关系到国计民生的大问题。然而,由于可吸入颗粒物性质的特殊性,现有的除尘技术无法达到理想的去除效果,尽管它们对总颗粒物的去除效果是显而易见的。

不论是从认识燃烧源排放可吸入颗粒物的环境影响,还是从开发有效的可吸入颗粒物控制技术的角度,了解燃烧源排放可吸入颗粒物的物理化学特征都是十分必要的。但迄今为止,有关的研究还很少,国外可以借鉴的资料也相当缺乏。事实上,我国是唯一以煤为主要能源的大国,在这方面的研究需求最为迫切。另一方面,我国的燃烧源种类很多,有些燃烧源情况十分特殊,比如我国存在大量的中小工业锅炉和普遍的生物质露天焚烧,在以往的研究中却一直没有得到应有的重视。

为使我国在可吸入颗粒物形成与控制的理论与技术领域走在国际前列,并最终为燃烧源可吸入颗粒物排放控制提供各种决策依据和技术手段,2002 年国家重点基础研究发展计划(973 计划)支持了“燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术基础研究”项目,清华大学环境科学与工程系承担了其中“燃烧源可吸入颗粒

物的物理化学特征及其成因”课题的部分研究任务。根据我国燃烧源复杂的特点,该课题选择多个典型的电厂、工业锅炉、民用炉灶和机动车,进行排放的可吸入颗粒物物理化学特征的测试,这些测试涉及多种燃料,包括不同的典型煤种、汽油、柴油、天然气和生物质等。研究中还关注各种污染控制设施,比如除尘和脱硫装置,对可吸入颗粒物物理化学性质的影响。

经过五年的研究,当项目即将完成的时候,作为课题的承担者,我们已经掌握了一批有关中国各种燃烧源排放可吸入颗粒物物理化学特征的测试结果。我们深悉信息的交流与分享是促进科学研究进步与发展的动力,我们有责任将目前国内相关研究的进展和我们积累的成果进行发表,供可吸入颗粒物成因和影响的研究者、燃烧源可吸入颗粒物排放控制技术的开发者以及可吸入颗粒物污染控制的决策者参考,并向同行求教。这便成为写作本书的动力。

全书共分15章,包括燃烧源排放可吸入颗粒物的研究意义和测试方法,以及各种典型燃烧源(包括火电厂、工业锅炉、机动车、生物质炉灶和生物质露天焚烧等)可吸入颗粒物的排放特征。全书力图将可吸入颗粒物的排放特征同燃烧源、燃烧条件、燃料和控制措施等关键因素相关联。

本书的内容主要基于作者完成的上述研究,系集体讨论、分工执笔,最后由段雷统稿,郝吉明定稿。易红宏(第2~5章和第12章)、李兴华(第6~8章、第12章、第13章和第15章)和胡京南(第9~11章和第14章)分别参与了本书部分章节的写作。本书的出版还得到科学出版社的支持与国家科学技术学术著作出版基金委员会的资助,在此一并致以衷心谢意。

燃烧源可吸入颗粒物的排放特征是涉及多种影响因素的复杂问题,由于测试对象和条件有限,以及作者能力有限,若有疏漏及不当之处,恳请各位同行及专家指正。

目 录

《燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术基础研究学术丛书》序

前言

第 1 章 燃烧源可吸入颗粒物排放的研究意义与研究内容	1
1.1 可吸入颗粒物对大气环境和人体健康的影响	1
1.2 燃烧源在可吸入颗粒物排放中的重要性	3
1.3 国内外可吸入颗粒物排放控制的政策法规	9
1.4 燃烧源可吸入颗粒物的研究现状	10
1.4.1 燃煤排放颗粒物的粒径分布	10
1.4.2 燃煤排放颗粒物的痕量元素含量	13
1.4.3 燃烧源排放颗粒物的单颗粒性质	18
1.4.4 生物质燃烧排放颗粒物的特征	19
1.4.5 机动车排放颗粒物的特征	25
1.5 燃烧源可吸入颗粒物排放特征的研究内容	27
第 2 章 固定燃烧源可吸入颗粒物的测试系统和分析方法	32
2.1 固定燃烧源可吸入颗粒物的采样系统	32
2.1.1 固定燃烧源可吸入颗粒物的采样方法	32
2.1.2 固定燃烧源可吸入颗粒物测试系统的建立	36
2.2 燃烧源可吸入颗粒物样品的分析原理与方法	46
2.2.1 浓度和粒径分布	46
2.2.2 单颗粒物形貌与化学组成	47
2.2.3 水溶性离子组分	48
2.2.4 痕量元素组成	49
2.2.5 元素碳和有机碳含量	54
2.2.6 多环芳烃	54
第 3 章 火电厂可吸入颗粒物排放及粒径分布特征	58
3.1 现场实验设计	58
3.1.1 实验电厂选择	58
3.1.2 实验工况	60

3.1.3 采样和分析	63
3.2 火电厂可吸入颗粒物的粒径分布特征	63
3.2.1 粒数浓度与粒径分布	63
3.2.2 质量浓度与粒径分布	65
3.2.3 粒径分布的函数拟合	66
3.3 污染控制设施对火电厂可吸入颗粒物排放特征的影响	70
3.3.1 污染控制设施对颗粒物的分级去除效率	70
3.3.2 污染控制设施前后颗粒物的累积浓度分布	72
3.3.3 除尘器操作对可吸入颗粒物浓度的影响	74
3.4 火电厂可吸入颗粒物排放的其他影响因素	76
3.4.1 燃烧条件	76
3.4.2 煤种与组成	77
3.5 小结	78
第4章 火电厂可吸入颗粒物的单颗粒研究	80
4.1 采样、制样与图像分析方法	80
4.1.1 采样方法	80
4.1.2 制样方法	80
4.1.3 图像分析方法	81
4.2 火电厂可吸入颗粒物的微观形态	81
4.2.1 燃煤电厂可吸入颗粒物的微观形态	81
4.2.2 燃油电厂可吸入颗粒物的微观形态	88
4.3 火电厂可吸入颗粒物的单颗粒矿物组成	89
4.3.1 燃煤电厂可吸入颗粒物的单颗粒矿物组成	89
4.3.2 燃油电厂可吸入颗粒物的单颗粒矿物组成	91
4.4 小结	92
第5章 燃煤电厂可吸入颗粒物的元素组成及排放特征	94
5.1 元素在可吸入颗粒物上的富集机理	94
5.2 元素在可吸入颗粒物上的相对富集因子	100
5.3 可吸入颗粒物的元素粒径分布特征	105
5.4 除尘设施对元素的分级去除效果	107
5.5 煤中痕量元素在燃烧产物中的分配	112
5.6 小结	114

第 6 章 工业锅炉可吸入颗粒物的排放特征	116
6.1 工业锅炉可吸入颗粒物排放特征的研究方案	116
6.1.1 工业锅炉的选择	116
6.1.2 采样和分析方法	117
6.2 工业锅炉可吸入颗粒物的物化特征	119
6.2.1 工业锅炉可吸入颗粒物的粒径分布	119
6.2.2 工业锅炉可吸入颗粒物的化学组成	121
6.3 工业锅炉可吸入颗粒物排放特征的影响因素	126
6.3.1 燃烧状况的影响	126
6.3.2 烟气净化设备对可吸入颗粒物排放的影响	127
6.4 小结	128
第 7 章 生物质露天焚烧可吸入颗粒物的排放特征	130
7.1 生物质露天焚烧排放可吸入颗粒物的测试方法	130
7.1.1 采样条件的选择	131
7.1.2 农作物秸秆的选择和分析	132
7.1.3 农作物秸秆露天焚烧排放样品采集和分析	134
7.1.4 采样及分析质量保证与控制	137
7.2 生物质露天焚烧排放可吸入颗粒物的物化特征	138
7.2.1 生物质露天焚烧排放可吸入颗粒物的质量浓度和化学组成粒径分布	138
7.2.2 生物质露天焚烧排放细微颗粒物的化学组成	141
7.2.3 生物质露天焚烧排放细微颗粒物的瞬态浓度变化	144
7.3 小结	145
第 8 章 生物质炉灶可吸入颗粒物的排放特征	146
8.1 生物质炉灶污染物排放测试方法	146
8.1.1 燃料和炉灶的选择	147
8.1.2 实验方法	148
8.1.3 采样系统	149
8.1.4 分析方法与质量保证	151
8.2 生物质炉灶排放可吸入颗粒物的物化特征	151
8.2.1 生物质炉灶排放可吸入颗粒物的粒径分布	151
8.2.2 生物质炉灶排放可吸入颗粒物的化学组成	153
8.2.3 燃烧条件对生物质炉灶可吸入颗粒物排放的影响	164

8.3 小结	165
第9章 柴油车尾气细微颗粒物排放特征	167
9.1 柴油车尾气细微颗粒物的测试方法	167
9.1.1 现有的机动车尾气排放测试方法	167
9.1.2 重型车尾气排放车载测试系统	171
9.1.3 柴油车尾气排放测试方案	174
9.2 柴油车在不同运行工况下的尾气细微颗粒物浓度	179
9.2.1 柴油车尾气细微颗粒物在线浓度和车速的瞬态响应关系	179
9.2.2 柴油车在不同运行工况下的尾气细微颗粒物粒数浓度	180
9.2.3 柴油车在不同运行工况下的尾气细微颗粒物质量浓度	183
9.3 柴油车在不同行驶工况下的尾气细微颗粒物粒径分布	185
9.4 柴油车尾气颗粒物的物理形态	189
9.5 柴油车在自由加速和怠速条件下尾气细微颗粒物浓度比较	191
9.6 稀释气温度对尾气细微颗粒物浓度测试结果的影响	193
9.7 小结	195
第10章 汽油车尾气细微颗粒物排放特征	197
10.1 汽油车尾气细微颗粒物的测试方法	197
10.1.1 台架测试实验系统	197
10.1.2 汽油车尾气排放测试方案	198
10.2 汽油车在不同行驶工况下的尾气细微颗粒物浓度	200
10.2.1 汽油车尾气细微颗粒物在线浓度和车速的瞬态响应关系	200
10.2.2 汽油车在不同运行工况下的尾气细微颗粒物粒数浓度	202
10.2.3 汽油车在不同运行工况下的尾气细微颗粒物质量浓度	203
10.3 汽油车在不同行驶工况下的尾气细微颗粒物粒径分布	205
10.4 小结	209
第11章 替代燃料车尾气细微颗粒物排放特征	211
11.1 替代燃料车尾气细微颗粒物的测试方法	211
11.1.1 轻型汽车排放测试	211
11.1.2 公交车排放测试	211
11.2 液化石油气车在不同行驶工况下的尾气细微颗粒物浓度	212
11.2.1 液化石油气车尾气细微颗粒物在线浓度和车速的瞬态响应关系	212
11.2.2 液化石油气车在不同运行工况下的尾气细微颗粒物粒数浓度	213

11.2.3 液化石油汽车在不同运行工况下的尾气细微颗粒物质量浓度	214
11.3 液化石油汽车在不同运行工况下的尾气细微颗粒物粒径分布	216
11.4 替代燃料车在自由加速和怠速条件下尾气细微颗粒物浓度比较 ...	219
11.5 小结	221
第 12 章 燃煤源可吸入颗粒物的排放因子	223
12.1 燃煤电厂可吸入颗粒物的排放因子	224
12.1.1 燃煤电厂可吸入颗粒物和细微颗粒物的排放因子	224
12.1.2 燃煤电厂可吸入颗粒物中元素的排放因子	227
12.2 工业锅炉可吸入颗粒物的排放因子	233
12.2.1 工业锅炉可吸入颗粒物和细微颗粒物的排放因子	233
12.2.2 工业锅炉细微颗粒物中化学组分的排放因子	234
12.3 小结	239
第 13 章 生物质燃烧可吸入颗粒物的排放因子	241
13.1 生物质露天焚烧可吸入颗粒物排放因子	241
13.2 生物质炉灶可吸入颗粒物排放因子	245
13.3 小结	249
第 14 章 机动车可吸入颗粒物的排放因子	251
14.1 机动车排放模型简介	251
14.2 柴油车尾气颗粒物排放因子	253
14.3 汽油车尾气颗粒物排放因子	262
14.4 小结	266
第 15 章 典型燃烧源的 PAH 排放特征	267
15.1 PAH 排放测试方法	267
15.2 PAH 排放因子	268
15.3 典型燃烧源 PAH 排放源成分谱	271
15.4 PAH 排放的毒性评价	273
15.5 小结	274
参考文献	275

第 1 章 燃烧源可吸入颗粒物排放的研究意义与研究内容

可吸入颗粒物是指可通过鼻和嘴进入人体呼吸道的颗粒物的总称,用 PM_{10} 表示(空气动力学直径小于 $10\mu m$ 的颗粒)。其中更细的为 $PM_{2.5}$ (空气动力学直径小于 $2.5\mu m$), 又称为细微颗粒物或可入肺颗粒物,它能够进入人体肺泡甚至血液循环系统,直接导致心血管病等疾病。当前 PM_{10} 污染已成为突出的大气环境问题,引起世界各国的高度重视。它对人体健康有严重危害,也是导致大气能见度降低、酸沉降、全球气候变化、光化学烟雾等重大环境问题的重要因素。

1.1 可吸入颗粒物对大气环境和人体健康的影响

近十多年来,大量的研究表明较小颗粒物与人体健康危害的相关程度显著高于较大的颗粒物,细颗粒物和超细颗粒物对人体健康的危害远远高于粗颗粒物^[1~4]。 PM_{10} 对人体健康危害很大,在一定颗粒物浓度下暴露的时间长短与多种健康指标密切相关^[5~7]。近年来,流行病学研究表明,因呼吸系统和心血管疾病导致的死亡率增加与短期内大气颗粒物的小幅度增加有关^[8,9]。这些结果虽然颇具争议,但却推动了决策者和研究人员重新考虑大气颗粒物污染的控制标准,并促进了更多的流行病学、毒理学和其他方面的研究^[10]。这些研究揭示了长期或短期暴露的颗粒物(通常以环境空气中的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的质量浓度表征)与多种健康指标,如就诊率、呼吸系统发病率、肺活量和死亡率等之间的联系。例如,有研究表明, PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 的年均浓度每增加 $10\mu g/m^3$, 相对风险分别达到 1.10 和 1.14, 即死亡率分别上升 10% 和 14%^[11]。颗粒物浓度的增加还导致支气管炎患病率显著上升,成年人与儿童的肺功能显著降低,其中 $PM_{2.5}$ 比 PM_{10} 对人体的健康影响更大。在人口统计基础上的健康影响研究也说明, PM_{10} 浓度直接影响长期和短期死亡率^[12]。例如,我国云南宣威地区是肺癌高发区,其原因正是农民在室内燃烧烟煤所形成的 PM_{10} , 浓度高达 $3.66mg/m^3$, 其中富含具有严重致癌效应的多环芳烃(PAH)类有机污染物;上海市 1960~1979 年由于工业发展,造成大气 PM_{10} 污染,导致居民肺癌死亡率由 0.525×10^{-3} 上升至 3.579×10^{-3} , 20 年间约上升了 6.8 倍;此外, PM_{10} 污染与感冒时咳嗽、支气管炎的发病率均呈显著性正相关,即 PM_{10} 污染越重,两种疾病发病率越高,而儿童肺功能随着空气污染加重而下降,儿童咳痰和咳嗽症状的发生率呈线性增加^[13]。又

例如,近年来我国各城市市区肺癌死亡率与大气总悬浮颗粒物(TSP)呈正相关关系;我国某电厂烟囱主风向下风侧居民区新生儿的先天畸形发病率明显高于洁净区,并且距电厂越近,畸形发病率越高,其中电厂排放的颗粒物起到重要的毒害作用^[13]。

除对健康影响外,PM₁₀还对气候和大气能见度产生较大的影响。颗粒物通过散射和吸收太阳辐射可直接影响气候,也可以通过云凝结核的形式改变云的光学性质和云的分布而间接影响气候^[14]。因此,国内外启动了各种大型的气溶胶观测计划,研究颗粒物对全球气候的影响^[15,16]。研究表明,尽管气溶胶只占大气成分中很少的一部分,但在城市地区对大气光学性质的影响甚至可达99%^[17]。大气能见度主要是由大气气溶胶对光的散射和吸收效应(统称为消光效应)决定的。在极干净的大气中能见度可达30km以上,而在污染的大气中能见度在5km左右甚至更低。据统计,北京市大气能见度呈现随空气污染加重而明显下降的趋势,全年大气能见度小于4km的天数由20世纪50年代的60天,增加到70代的150天和80年代的180天,1994年达到203天^[18]。大气颗粒物对光的吸收效应几乎全部是由黑碳(也称元素碳)和含有黑碳的颗粒物造成。尽管全世界每年排放的黑碳仅占人为颗粒物排放量的1.1%~2.5%和全部颗粒物排放量的0.2%~1.0%,但其引起的消光效应却要高得多,在某些地方甚至可以使能见度降低一半以上^[17]。另外,由颗粒物导致的光散射效应与细颗粒物的质量浓度,尤其是其中的黑碳、硫酸盐和非土壤钾的含量具有很强的相关关系,其平均消光系数占总消光系数的49%^[19]。近年在北京进行的研究显示,PM_{2.5}和PM₁₀的质量浓度与能见度之间呈现明显的负相关关系^[20],线性相关系数分别为0.96和0.75,表明北京市近年来能见度的降低可能与大气中细颗粒物浓度的增加密切相关。

PM₁₀是目前我国城市的首要大气污染物。据我国环境质量报告书和世界资源报告提供的数据,我国空气质量超标的城市中,很大部分以颗粒物污染为主。我国自20世纪70年代中期开始重视烟尘排放的控制与治理,1996年颁布了PM₁₀空气质量标准,PM₁₀监测也于1999年4月起被纳入覆盖42个城市(当时)的常规监测网络,并在全国大中型城市相继实行空气质量日报制度。1990~2005年的监测数据表明,尽管TSP年均浓度呈逐年下降趋势,但影响城市空气质量的主要污染物仍是颗粒物,2002年64.2%的城市的PM₁₀浓度超过国家二级标准,2005年该比例下降到38.7%,颗粒物污染较重的城市主要分布在山西、内蒙古、辽宁、河南、湖南、四川及西北各省、自治区^[21]。图1.1是根据国家环境监测总站发布的空气质量日报对国家控制监测网47个城市的首要空气污染物出现频率的统计,事实表明PM₁₀已成为我国城市最主要的大气污染物。PM₁₀问题同时也在一定程度上影响着我国城市的国际形象和对外合作。

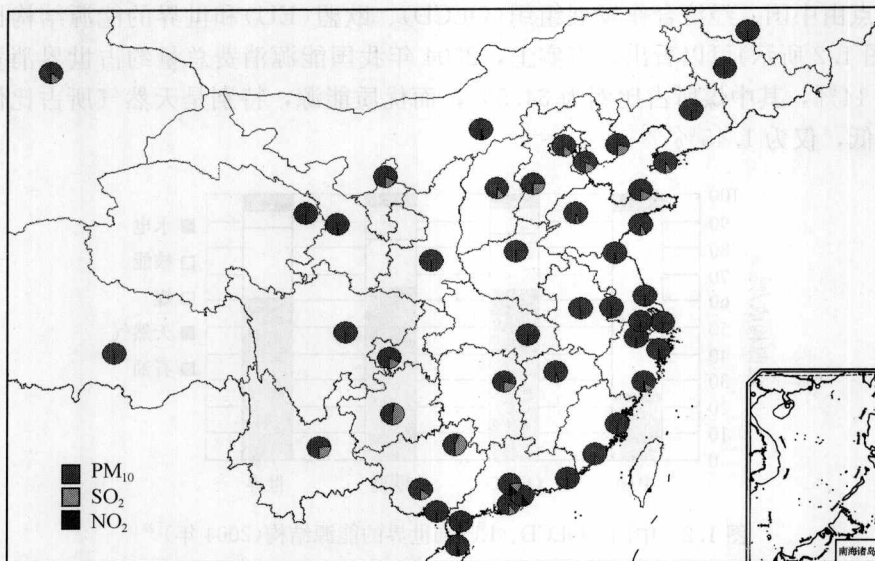


图 1.1 中国 47 个城市的首要污染物(2001~2004 年)

1.2 燃烧源在可吸入颗粒物排放中的重要性

PM₁₀的排放源可分为自然源和人为源。其中人为源中的燃烧排放是 PM₁₀的最大来源之一,环境空气中大部分 PM₁₀来源于电厂、工业窑炉、机动车、生物质燃烧及其他的燃烧方式,并且这些颗粒物一般都含有较多的有毒有害物质^[22]。同样燃烧源也是大气中的细颗粒物,尤其是 PM_{2.5}的主要来源。据估计,2001 年全国燃烧源共向大气中排放 PM₁₀约 $17.8 \times 10^6 \text{ t}$ ^[23]。在对北京市大气中细颗粒物的来源解析中发现,PM_{2.5}主要来源于燃煤和工业、机动车、水泥和建筑、土壤扬尘、交通道路扬尘、二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)的化学转化(二次源)以及挥发性有机物(VOC,二次源或直接排放)等七类,它们对 PM_{2.5}浓度的贡献率分别为 15.5%、5.6%、2.9%、13.6%、9.9%、11.4%和 14.4%^[24]。

目前,我国的大气 PM₁₀污染已十分严重,并且我国经济社会的快速发展以及以化石燃料为主要能源的国情,决定了这种状况还会持续很长时间。

1. 能源需求与煤炭消耗持续增加

我国是一个煤炭生产大国,已探明的煤炭储量约为 $76.5 \times 10^{12} \text{ t}$,若按每年 $1.90 \times 10^9 \text{ t}$ 的开采速度可供利用约 400 年。另一方面,我国也是能源消费大国,能源消费量仅次于美国,居世界第 2 位^[25]。我国的能源资源情况、经济状况和科技发展水平等综合因素决定了其是世界上极少数以煤为主要能源的国家之一。

这一点由中国、经济合作发展组织(OECD)、欧盟(EU)和世界的能源结构比较(如图 1.2 所示)可以看出。事实上,2004 年我国能源消费总量约占世界消费总量的 14%,其中煤所占比例为 34.5%,而优质能源,特别是天然气所占比例明显偏低,仅为 1.45%^[26]。

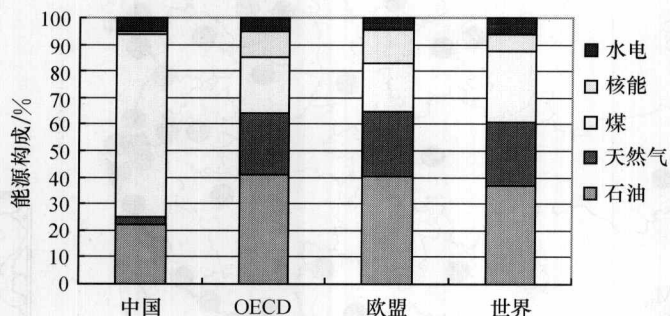


图 1.2 中国、OECD、EU 和世界的能源结构(2004 年)^[26]

近年来,随着经济的持续增长和人民生活水平的提高,煤炭和电力的消费快速增长,使我国的能源消费总量呈现快速增长趋势。由 1980~2004 年能源消费构成来看(如图 1.3 所示),到 2004 年煤炭在一次能源消费中的比例仍高达 67.7%^[27]。

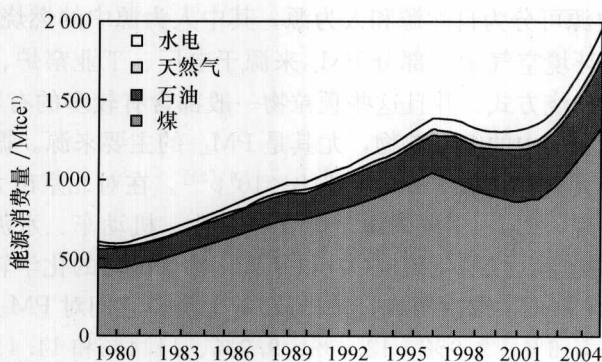


图 1.3 1998~2004 年中国能源消费构成^[27]

根据我国的能源消费需求预测^[28],2010 年和 2020 年能源消费总量将分别达到 2.44×10^9 t 和 3.62×10^9 t 标准煤,煤炭在能源消费组成中仍然是最主要的组成部分。由于我国煤炭消费量的 80% 为原煤直接燃烧,以煤炭为燃料的锅炉成为大气颗粒物的主要来源,其中又以火电厂的锅炉为主。长期以来,以燃煤为主

1) Mtce 指百万吨标煤,下同。