

DAQI ZHONGWURAN GUOCHENG
YUCE JISHU YANJIU



大气重污染过程

预测技术研究

程水源 陈东升 / 著

中国环境出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

大气重污染过程预测技术研究

程水源 陈东升 著

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

大气重污染过程预测技术研究/程水源, 陈东升著. —北京: 中国环境出版社, 2014.5

ISBN 978-7-5111-1759-5

I. ①大… II. ①程… ②陈… III. ①空气污染控制—研究 IV. ①X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 038074 号

出版人 王新程
责任编辑 张维平 宋慧敏
封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112738 (管理图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2014 年 6 月第 1 版
印 次 2014 年 6 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 10.25
字 数 220 千字
定 价 40.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

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：赵英民

副组长：刘志全

成员：禹 军 陈 胜 刘海波

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项目系列丛书。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

随着经济飞速增长,城市化进程不断加快,机动车保有量大幅增加,我国大气污染的趋势没有从根本上得到遏制,已由单一的煤烟型污染转化为煤烟型与光化学污染并存的复合型污染。持续高浓度的大气污染频发,2002—2011年北京与周边地区就发生近百次大气颗粒物高浓度污染过程,颗粒物浓度水平经常超过国家标准数倍甚至十几倍。近几年京津冀、珠三角、长三角地区每年出现灰霾现象的天数超过100天,在不利的气象条件下,区域性的灰霾持续时间长达5~10天,浓度超标严重。我国大气环境高浓度污染发生频率之高,影响范围之大,污染程度之重,已成为制约我国社会经济发展的瓶颈之一,严重威胁到人民群众的身体健康和生态安全。

为逐步改善大气颗粒物的高浓度污染问题,新修订的《环境空气质量标准》于2012年2月29日正式发布,明确增加了细颗粒物($PM_{2.5}$)和臭氧8小时浓度限值监测指标。在环境保护部《关于实施〈环境空气质量标准〉的通知》(环发[2012]11号)中要求近期环保部门要建立健全极端不利气象条件下大气污染监测报告和预警体系,为公众提供健康指引,引导当地居民合理安排出行和生活。大气颗粒物的监测与预测预警已成为我国开展相关研究与环境管理工作的重点之一。但目前国内外关于大气颗粒物高浓度污染预报方法的相关研究较少,且由于气象及下垫面条件、地域污染特征、污染程度差异等因素,国外相关研究成果形成的污染预报方法无法在我国达到良好的预报效果。而我国在大气颗粒物污染预测(特别是细颗粒物和持续高浓度污染预测)方面的研究刚刚起步,研究成果相对匮乏,现有部分方法的预报效果难以满足环境管理与保障公众健康的需要。因此急需在这方面加大研究力度。

环境保护部2009年度环保公益性行业科研专项针对大气颗粒物高浓度污染预测技术方法设立了“大气重污染过程预测预警与量化分级技术研究”项目,北京工业大学作为“区域大气复合污染防治”北京市重点实验室,承担了该项

目的研究工作。本书即是项目组成员历时多年的研究成果，对大气重污染的形成消散规律、预测方法等进行了介绍，并针对性地提出我国大气重污染控制管理的对策建议。

相关研究工作和本书的编写工作中，李悦、尉鹏、田川、王志娟、刘超、陈朝晖、王芳、杨孝文等做了大量工作。在研究开展过程中，编写组得到任阵海院士、徐祥德院士、虞统研究员、苏福庆研究员及多位业内专家的大力支持，特此感谢！同时感谢中国环境出版社的领导和编辑在本书出版过程中付出的辛勤努力。本书出版获得了环保公益性行业科研专项（200909008）、国家自然科学基金重点项目（51038001）、北京市科学技术委员会和北京市教育委员会的共同资助。

在本书编写过程中，虽力求反映研究取得的新成果和新方法，但由于区域性大气重污染问题的复杂性与不确定性以及编者水平所限，时间紧迫，书中难免有不妥和错误之处，欢迎广大读者批评指正。

著者

2014 年 1 月

目 录

第 1 章	区域性大气重污染现状	1
1.1	大气重污染问题概述	1
1.2	华北地区重污染现状	5
1.3	研究区域概况	7
第 2 章	国内外研究现状	14
2.1	区域性大气重污染研究现状	14
2.2	源解析方法研究现状	16
2.3	气象模式发展及应用现状	20
2.4	空气质量预报方法研究现状	26
第 3 章	研究目标与主要内容	34
3.1	研究意义与目标	34
3.2	主要研究内容	35
第 4 章	基础资料获取与数据处理方法研究	37
4.1	区域气象资料收集与处理方法	37
4.2	区域环境三维监测数据收集与处理方法	38
4.3	区域污染源排放数据收集与处理方法	40
第 5 章	大气颗粒物化学成分特征与来源分析	43
5.1	大气颗粒物样品采集与分析方法	43
5.2	重污染时段与常规时段颗粒物化学特征	47
5.3	重污染时段与常规时段颗粒物来源分析	60
第 6 章	区域污染物传输与重污染气象特征研究	73
6.1	大气污染物的区域输送汇聚规律研究	73
6.2	重污染时段敏感排放区域分析研究	84
6.3	基于天气型演变的重污染形成与消散机制研究	90
6.4	结合卫星遥感应用的重污染诊断与动力分析研究	110

第 7 章 大气重污染预测系统123

7.1 大气重污染预测系统概述123

7.2 天气类型划分124

7.3 污染程度初判130

7.4 重污染定量预测133

7.5 预测系统集成140

7.6 量化分级与可视化技术141

7.7 预测系统效果评估及示范应用146

第 8 章 结论与环境管理建议148

8.1 重污染过程的大气颗粒物理化特征148

8.2 重污染过程的颗粒物行业来源与环境管理建议148

8.3 华北区域敏感地区与环境管理建议149

8.4 大气污染物输送路径及其对重污染的影响149

8.5 天气型及其演变规律对区域重污染的影响150

8.6 区域大气重污染预测系统及其预报效果150

第1章 区域性大气重污染现状

重污染天气是表征空气质量的空气污染指数 (API) 数值大于 200 的污染天气的统称。区域性重污染过程是指由于大范围 (如整个华北地区) 的不利气象条件致使污染物积累造成的重污染过程^①, 是以颗粒物为主的高浓度污染, 频发于秋冬季节、形成区域性且持续时间较长的重污染过程, 首要污染物浓度水平经常超过国家标准数倍甚至十几倍, 对环境和人体健康造成严重的影响。目前区域性大气污染问题受到政府和学术界的高度重视, 成为当前公众关注的焦点问题。本章主要对大气重污染问题的基本概念和污染现状进行介绍。

1.1 大气重污染问题概述

1.1.1 大气重污染影响范围

目前, 世界上受到大气重污染问题影响的区域分布较广, 根据美国国家航空航天局 (NASA) 的卫星数据绘制而成的全球大气细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 污染浓度分布, 由北非撒哈拉沙漠一直延伸到东亚的大片区域内大气颗粒物污染十分严重, 而美国 $PM_{2.5}$ 水平相对较低, 但其中西部和东部一些中心区域仍存在颗粒物浓度超标情况。结合人口密度进行计算得知, 全世界超过 80% 的人口正在呼吸着严重颗粒物污染的空气, 污染指数超过世界卫生组织给出的最小安全值 ($10 \mu g/m^3$)。因此, 大气颗粒物重污染是全球性的严重环境问题之一。

对我国来说, 主要的大气污染物已由二氧化硫 (SO_2) 和总悬浮颗粒物 (TSP) 的污染转为可吸入颗粒物 (PM_{10}) 和细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 的污染。我国大气颗粒物浓度分布的高值区位于东北、西北及整个华北地区, 长江以南和四川盆地也有一小污染区, 污染程度均十分严重, 上述区域中尤以华北地区最为突出。其主要原因之一是以生态环境恶化为代价的破坏型经济增长方式和社会发展模式, 给我国经济带来繁荣的同时, 造成了日益严重的空气污染和生态破坏等环境问题。此外, 复杂的地形地貌和气象条件也是造成我国上述地区易形成重污染的原因之一。华北等地的地形复杂, 有山区、盆地、平原及滨海等多种地貌类型, 气象条件十分复杂, 局地大气污染因素较多, 存在大气污染物跨区输送现象, 因此极易发生区域大气重污染现象。对监测结果的研究表明, 在北京及其周边地区的空中存在大气气溶胶高浓度污染区间。^② 输送汇聚及其摆动造成的北京及其周边地区大气污染物

① 北京市环境保护监测中心. 北京市大气污染预报及预警技术研究报告[R]. 2002.

② 王玮, 等. 中国华北地区冬季大气污染物航空测量 (II) [J]. 环境科学研究, 2000, 13 (1): 10-13; 王玮, 等. 华南地区气溶胶的污染特征及其与酸雨的关系[J]. 环境科学学报, 1992, 12 (1): 7-15.

汇聚,是形成区域重污染的主要原因。^①另外,北京及周边地区经常受高空西风气流控制,近地面气流在太行山迎风坡抬升,在背风坡下沉并将污染物携带到华北平原,在此形成弱气压场和低压槽。华北地区上空存在的弱气压场和低压槽使得大气污染物不易扩散,造成这个地区发生大面积的高浓度污染。同时,华北地区地形复杂,山区、盆地与平原同时存在,山地风与平原季风通道经常相互交汇,易形成污染物的辐合汇聚带,典型的辐合汇聚带会造成区域性的大气环境污染,研究结果表明太行山山前、燕山山前有常驻性输送汇,容易造成较重的高浓度大气环境污染。

1.1.2 大气重污染分类及特征

根据污染成因及特点,我国华北地区的颗粒物重污染可以分为区域性重污染、局地性重污染、沙尘重污染和特殊重污染四类。^②华北地区代表城市北京的大气污染反映了该地区的区域性环境问题,可以作为华北地区大气污染特征的典型代表城市。下面以北京为例,对四种重污染过程进行介绍。

区域性重污染过程 是指由于大范围如整个华北地区的不利气象条件致使污染物积累造成北京市重污染的过程。此时整个区域的其他城市污染同样严重。这种重污染类型通常在稳定天气形势下发生。

局地性重污染过程 是指在不利气象条件下,由于北京市局地污染物的积累而造成的重污染过程。此时各项污染物浓度均较高,这种重污染多发生在秋冬季节,时间上有连续性,纯粹的局地性重污染发生概率较低。

沙尘类型重污染过程 主要是指由于上游地区发生沙尘暴,沙尘随西北气流输入本地,造成严重空气污染的过程。此时通常有局地扬尘相伴。这种重污染季节性强,具有连续性,表现形式多样,大多数沙尘重污染伴随有大风天气,但也有在较稳定的天气条件下发生的沙尘重污染。

特殊重污染过程 是由于在不利的天气条件下,北京及周边地区污染源排放异常所造成,如大面积农田秸秆焚烧。这种重污染的发生带有很大的随机性。

综上所述,华北地区的大气颗粒物重污染基本上可以分为稳定气象条件下的重污染和风沙季节沙尘类型的重污染。稳定气象条件下又区分为区域性的重污染过程和局地性的重污染过程,这两种重污染类型是在考虑了污染源不同影响的基础上进行区分的。华北地区污染的区域性特征日益明显,纯粹的局地性重污染发生概率很低。另外,尽管沙尘类型的重污染是颗粒物重污染的一个重要方面,但由于其主要受外来沙尘的影响,对于北京及周边地区的环境综合整治意义不大。因此,区域性重污染是各种类型中具有重要研究意义的重污染类型,本书主要以区域性重污染作为主要对象展开相关研究。

1.1.3 环境与人体健康危害

大气颗粒物重污染对生态环境和人体健康都会造成严重影响。它会大幅度降低大气能见度,并干扰地表温度,同时严重危害人体的呼吸系统、神经系统和心血管健康,造成多

① 苏福庆,任阵海,等.北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统[J].环境科学研究,2004,17(1):21-25.

② 北京市环境保护监测中心.北京市大气污染预报及预警技术研究[R].2002.

种疾病, 导致死亡率的增加。

(1) 对能见度的影响

20 世纪 70 年代以来, 大气颗粒物对能见度的影响就一直是环保、气象部门所关注的问题之一。大量的研究表明, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的性质与能见度的降低密切相关。能见度的降低主要是由于气体分子与颗粒物对光的吸收和散射减弱了光信号, 并由于散射作用减小了目标物与天空背景之间的对比度而造成的^①。

光的散射是能见度降低的最主要因素, 颗粒物的散射能造成 60%~95% 的能见度减弱。空气分子对光的散射作用很小, 其最大的视距(极限能见度)为 100~300 km (具体数值与光的波长有关)。^② 在实际的大气中由于颗粒物的存在, 能见度一般远远低于这一数值: 在极干净的大气中能见度可以达到 30 km 以上; 在城市污染大气中能见度在 5 km 左右甚至更低; 在浓雾中能见度只有几米。在大气气溶胶中, 主要是粒径为 0.1~1.0 μm 的颗粒物通过光的散射而降低物体与背景之间的对比度, 从而降低能见度。

PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 对光有吸收效应通常是使能见度降低的第二大因素。而 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 对光的吸收几乎全部都是由炭黑和含有炭黑的颗粒引起的。每年世界上炭黑的排放量占人为颗粒物排放量的 1.1%~2.5%, 占全部颗粒物排放量的 0.2%~1.0%。但是, 它们的消光效应却是不可忽视的, 因为煤烟的总消光系数是透明颗粒的 2~3 倍, 所以大气中少量的煤烟颗粒就可以导致光强降低很多。这些光吸收颗粒物可能会使某些地方的能见度降低一半以上, 还可形成烟雾而使城市呈褐色。

能见度的降低会增加交通事故和飞机起落事故的概率, 对人们的生活造成不良影响。另外, 由于飞机的起飞和着陆对能见度的要求很高, 因此能见度的降低也会对机场飞行安全造成严重威胁, 增加事故发生率。

(2) 对温度的影响

由于颗粒物的存在, 其直接阻挡太阳光抵达地球表面, 使可见光的光学厚度增大, 抵达地面的太阳能通量剧烈下降, 从而使地面温度降低, 高空的温度增高。特别是直径在 0.1~0.5 μm 的颗粒, 通过散射与吸收太阳和地球辐射, 在大气能量平衡中起着重要作用。资料表明, 当 PM_{10} 浓度达 100 $\mu g/m^3$ 时, 到达地面的紫外线减少 7.5%; 当 PM_{10} 为 600 $\mu g/m^3$ 时, 到达地面的紫外线减少 42.7%; 当 PM_{10} 为 1000 $\mu g/m^3$ 时, 到达地面的紫外线减少 60%。全球本底不透明度增加 4 倍, 将使全球温度降低 3.5℃, 若该降温幅度维持若干年, 则将造成一个冰河期。

(3) 对人体健康的影响

全球 35 个国家和地区的相关研究结果表明, 空气中颗粒物的水平与人体健康存在一定的关系。由于 PM_{10} 更易于进入人体, 在环境中滞留时间更长, 以及吸附的重金属和有毒有害的物质较多, 因而对人体的危害也更大。国外进行的大量有关 PM_{10} 的流行病学研究表明, 可吸入颗粒物浓度的增加与疾病的发病率、死亡率密切相关, 尤其是呼吸系统疾病及心肺疾病。目前已知的可吸入颗粒物对人体的危害主要包括以下几方面。

对呼吸系统的影响 大量研究发现, 大气中 PM_{10} 浓度的上升容易引起上呼吸道感染,

① 刑黎明, 贾继霞, 张艳红. 大气可吸入颗粒物对环境 and 人体健康的危害[J]. 安阳工学院学报, 2009 (4): 48-50.

② 刘新民. 大气颗粒物与能见度关系研究[D]. 北京: 北京大学, 2002.

使鼻炎、慢性咽炎、慢性支气管炎、支气管哮喘、肺气肿、尘肺等呼吸系统疾病恶化。 PM_{10} 每增加 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 成人男女感冒咳嗽的发生率分别升高 4.81% 和 4.48%。同时, 成年男性患支气管炎的比率增加 5.13%。另外, 过多的可吸入颗粒物的沉积会损害肺部呼吸氧气的的能力, 使肺泡中巨噬细胞的吞噬功能和生存能力下降, 导致肺部排除污染物的能力降低。空气中 PM_{10} 每增加 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 肺功能下降 1%。1994 年, 中国国家环保总局与美国国家环境保护局合作开展了一项“大气污染对人体呼吸健康影响研究”的课题, 通过对广州、武汉、兰州、重庆 4 个城市几年的跟踪调查, 数据表明, 大气颗粒物浓度 (尤其是小颗粒物) 与儿童肺功能异常率存有明显的相关性。有研究结果表明, 空气动力学尺度大于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 基本上被阻止于人的鼻腔; $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 的颗粒, 可进入人体咽喉, 约 90% 可进入并沉积于呼吸道的各个部位, 10% 可以到达肺的深处, 并沉积于肺中; 小于 $2 \mu\text{m}$ 的颗粒, 100% 可以吸入肺泡中, 其中 $0.3 \sim 2 \mu\text{m}$ 的粒子几乎全部沉积于肺部而不能呼出, 进而进入人体血液循环。^① 根据可吸入颗粒物在人体肺泡处的沉积比例数据可以得出, 集中在 $1 \mu\text{m}$ 尺度左右的颗粒对人体危害最大, 同时也最难以清除。

对心血管疾病的影响 由颗粒物引起的心脏自主神经系统在心率、心率变异、血黏度等方面的改变能增加突发心肌梗死的危险。人暴露在高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 中, 会增加血液的黏稠度和血液中某些白蛋白, 从而引起血栓。Costa 的研究指出, 可吸入颗粒物对健康的影响在中年以上和已患心脏疾病的人群中表现得较为明显, 认为可吸入颗粒物是引起心脏病的因子之一。^②

对神经系统的影响 在城市中的可吸入颗粒物, 许多是由机动车尾气产生的。含铅汽油燃烧后生成的铅化物微粒 (含氧化铅、碳酸铅) 扩散到大气中, 随呼吸道进入人体而影响身体健康。研究表明, 铅对人体神经系统有明显的损害作用, 可影响儿童智力的正常发育。母体接触铅污染后, 会导致后代神经系统发育异常。小于 $1 \mu\text{m}$ 的含铅颗粒物在肺内沉积后极易进入血液系统, 其大部分与红细胞结合, 小部分形成铅磷酸盐和甘油磷酸盐后进入肝、肾、肺和脑, 几周后进入骨内, 导致高级神经系统紊乱和器官调解失能, 表现为头疼、头晕、嗜睡和狂躁严重的中毒性脑病。

致癌、致突变、致残作用 石油、煤等化石燃料及木材、烟草等有机物在不完全燃烧过程中会产生多环芳烃 (PAHs), 排放的 PAHs 可直接进入大气, 并吸附在颗粒物, 特别是直径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的细颗粒物上。由于 PAHs 具有致癌、致突变、致残作用, 因此对人体健康危害极大, 其中代表物苯并[a]芘 (BaP) 是最具致癌性的物质, 能诱发皮肤癌、肺癌和胃癌。另外, 空气中的 PAHs 可以和 O_3 、 NO_x 、 HNO_3 等反应, 转化成致癌或诱变作用更强的化合物, 从而对人体健康构成威胁。

死亡率 虽然对于健康人而言, PM_{10} 不是直接的致死因素, 但是却可以导致患有心血管病、呼吸系统疾病和其他疾病的敏感体质患者的死亡。据报道, 仅 PM_{10} 就导致美国每年 6 万人和英国每年 1 万人的死亡。在美国犹他谷进行的 PM_{10} 流行病学研究表明, PM_{10} 日均质量浓度增加 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 死亡率平均增加 4%~5%。 PM_{10} 超过 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, 死亡率

① Health Effects Institute. Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany. Part I: role of particle number and particle mass[R]. Cambridge MA, 2000.

② World Health Organization. Meta-analysis of time-series studies and panel studies of particulate matter (PM) and ozone (O_3) [R]. EUR/04/5042688. 2004.

比 PM_{10} 小于 $50\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时平均高出 11%。据 Ostro 等在泰国曼谷的研究, 当 PM_{10} 日平均增加 $10\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, 总死亡率增加 1%~2%, 其中呼吸道疾病死亡率增加 3%~6%, 心血管疾病死亡率增加 1%~2%。^① 由于许多对人体具有潜在危害的物质, 如酸、重金属、PAHs 等, 主要集中在 $\text{PM}_{2.5}$ 上, 因此, 可认为大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的增加会导致发病率和死亡率的增加。

1.2 华北地区重污染现状

区域污染的程度与区域的经济发达程度有很大关系, 通常发达地区多为严重污染地区。华北的京津冀地区是我国政治、经济、文化中心, 社会经济发展飞速, 加之复杂的地形和气象条件, 长年存在严重的区域性大气环境污染问题。1998 年 12 月华北地区的中心代表城市北京采取了 12 个阶段的大气污染治理专项行动, 针对工业、居民生活及采暖、机动车、扬尘等大气污染源实施了一系列由面到点、由宏观到具体的治理措施, 大气一次气态污染物的污染发展趋势得到有效遏制, 空气质量达标天数逐年增加, 但大气污染问题依然严峻。2002—2010 年华北地区发生近百次大气重污染过程, PM_{10} 浓度超标情况严重。

本书利用 2000—2011 年的数据进行统计, 得出重污染日和非重污染日华北地区重点城市各污染物为首要污染物的比例列表, 见表 1-1。由该表可知, 在我国主要城市空气质量公报的各种污染物中, 华北地区非重污染时段的首要污染物主要为可吸入颗粒物、二氧化硫, 极少情况下为二氧化氮, 而重污染时段的首要污染物则全部为可吸入颗粒物。因此, 本书以颗粒物为主要研究对象进行区域大气重污染的研究。

表 1-2 为 2000—2011 年华北地区重点城市(北京市、天津市、石家庄市、太原市和呼和浩特市)的重污染发生天数, 其中北京市的重污染以上污染级别(Ⅳ级 1: API 为 201~250; Ⅳ级 2: API 为 251~300; V 级: API 为 301 以上)的组成比例及所占天数情况如图 1-1 所示。由图表可知, 近 10 年的重污染问题仍不容忽视, 如北京市的重污染日占全年 2~6 个百分点, 平均每年发生约 12 d, 最多为 24 d (2006 年) 和 23 d (2001 年)。

图 1-2 是利用 2000—2011 年华北地区代表城市北京的污染数据统计得到的, 该图显示了重污染发生频次的月度分布。从图中可以看出, 华北地区的重污染主要发生在秋冬季和春季(秋冬季主要为区域性重污染, 春季主要为沙尘型重污染), 夏季(7、8、9 月)几乎没有大气重污染过程发生, 即区域性大气颗粒物重污染具有秋冬季高发的特征。

表 1-1 华北地区重点城市首要污染物出现比例 单位: %

城 市	非重污染日首要污染物			重污染日首要污染物		
	PM_{10}	SO_2	NO_2	PM_{10}	SO_2	NO_2
北 京	93	7	0	100	0	0
天 津	79	21	0	100	0	0
石 家 庄	91	9	0	100	0	0
唐 山	75	25	0	100	0	0
太 原	83	17	0	100	0	0
呼和浩特	84	16	7	100	0	0

① 李延红, 袁东, 阚海东, 等. 大气颗粒物污染与人群死亡率变化流行病学研究[J]. 环境与职业医学, 2003, 20 (1): 47-49.

表 1-2 华北地区重点城市的重污染天数

单位: d

年份	重污染天数 (API 为 201 以上)				
	北京市	天津市	石家庄市	太原市	呼和浩特市
2000	7	—	—	—	—
2001	23	—	—	—	—
2002	19	12	28	19	9
2003	5	2	21	28	2
2004	17	1	4	25	2
2005	9	3	6	7	4
2006	24	3	14	11	7
2007	11	1	4	4	4
2008	8	1	2	2	1
2009	5	2	1	3	2
2010	6	0	2	1	1
2011	5	1	0	1	1

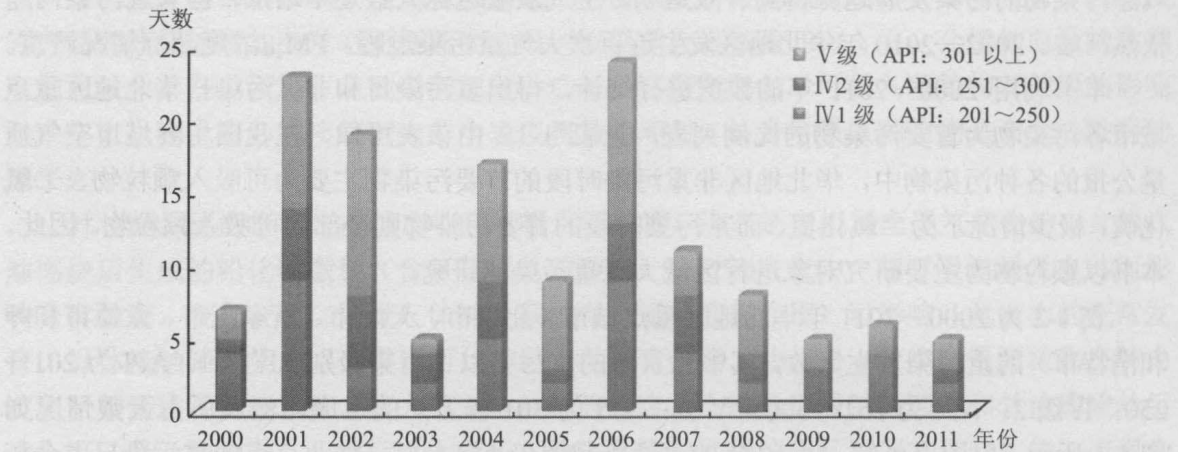


图 1-1 北京市各级别重污染天数年度序列图

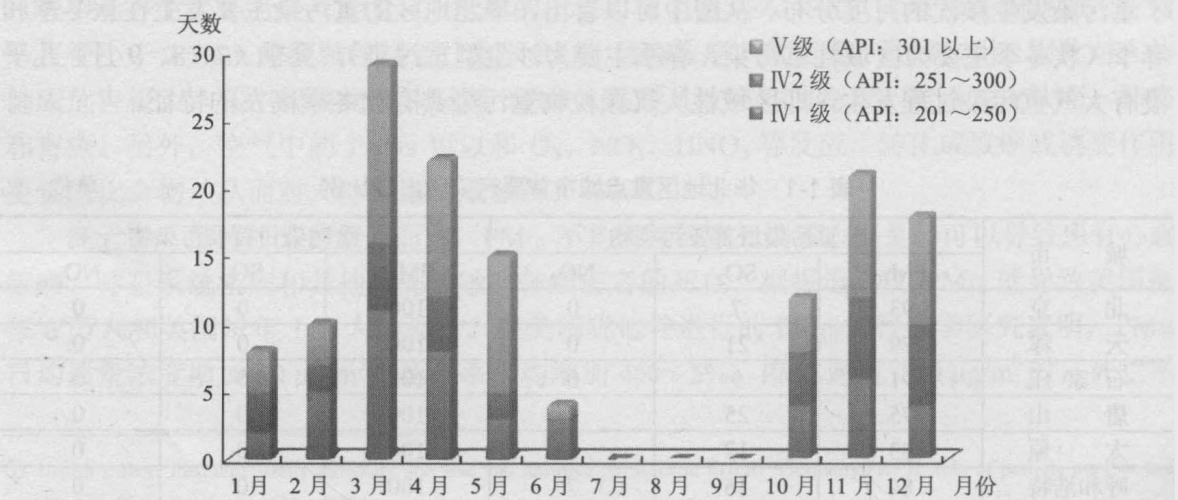


图 1-2 北京市各级别重污染天数月分布图

1.3 研究区域概况

华北地区处于北纬 $32^{\circ}\sim 42^{\circ}$ 、东经 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}$ ，位于中国北部，西邻黄土高原，东濒黄、渤二海，北与东北地区、内蒙古地区相接。覆盖北京市、天津市、河北省、山西省和内蒙古自治区的一部分。华北地区以丹东、阜新、彰武、围场、张北、右玉、榆林、定边、中宁至乌鞘岭一线为分界。华北地区的西界，自乌鞘岭以南沿祁连山东麓、洮河以西至白龙江，大致以 3 000 m 等高线与黄土高原相接。南界为著名的秦岭淮河线，夏季长达 6~9 个月，具体界线为秦岭北麓，经伏牛山、淮河至苏北灌溉总渠，各种自然现象在这条线的两侧都有显著差异，是我国自然地理上的一条重要分界线。^①

以北京为代表的华北地区是我国政治、经济和文化中心，具有举足轻重的战略地位。但该地区水资源严重短缺，京津两个超大城市在狭窄区域内共存，并直接面临内陆海域，制约区域环境承载容量。此外，京津冀地区还是我国重要的工业基地、能源基地，各城市间存在大气污染的相互影响和输送问题，这些因素就使得华北地区的大气污染问题十分突出。随着区域社会经济的快速发展，该地区环境质量持续恶化，现已成为世界上大气污染最严重地区之一，其日益严重的环境问题已成为国家实施可持续发展战略的重要瓶颈。

1.3.1 北京市概况

(1) 自然地理

地理位置 北京市位于北纬 $39^{\circ}38'\sim 41^{\circ}05'$ 、东经 $115^{\circ}24'\sim 117^{\circ}30'$ ，地处华北大平原北端，三面环山，一面对海，西北高、东南低。地貌为西部山地、北部山地和东南平原三大块。西部为太行山，与市区接近的是太行山余脉，称作西山。北部为燕山山脉，自西向东直抵山海关。北京市东西宽 160 km，东至密云县花园村之东；西至门头沟区东灵山顶。北京市南北长 176 km，北至怀柔县石洞子村北；南至大兴县榆垓镇南，地理坐标为北纬 $39^{\circ}38'$ 。全市土地面积 16 807.8 km²，其中山区面积 10 417.5 km²，占 62%，平原面积 6 390.3 km²，占 38%。^②

地形地貌 北京的中部和南部属于华北平原的北部边缘，由海河水系的冲积而成，西部为太行山脉的北部延续，北部的燕山山脉是内蒙古高原的延续。山地海拔 1 000~1 500 m，全市最高峰为西部的东灵山，海拔 2 303 m。平原主要由众多洪冲积扇联合而成，海拔 20~60 m，自西北向东南缓慢倾斜与华北大平原连接，坡降 1%~3%。

自然生态 北京建成了山区、平原、城市绿化隔离地区三道绿色生态屏障。截至 2011 年年底，北京市森林覆盖率达 37.6%^③，人均公共绿地 15.3 m²，林木绿化率达到 54%，全北京市公园数量达 339 个，全市近 2/3 的居民走出家门不超过 500 m 就能享受到公园绿地。北京将增加大规格苗木 10 万株，种植月季、菊花等花卉 100 万株，建设百余处精品休闲绿地。到“十二五”末，使全市森林面积增加 5 万 hm²，森林覆盖率达到 40%，林木绿化

① 华北百度百科[DB/OL]. [2012-02-10] <http://baike.baidu.com/view/144248.html>.

② 北京百度百科[DB/OL]. [2012-11-12] <http://baike.baidu.com/view/2621.html>.

③ 中国森林覆盖率[DB/OL]. [2010-12-11] <http://lt.cjdbby.net/forum.php?mod=viewthread&tid=1026554>.