

【城市学文库·生态环境论丛】  
CHENGSHIXUEWENKU SHENGTAIHUANJINGLUNCONG

王国平 总主编

# 城市霾问题治理研究

杭州国际城市学研究中心 编  
浙江省城市治理研究中心

 浙江人民出版社

王国平 总主编

# 城市霾问题治理研究

——第四届“钱学森城市学金奖”征集评选活动获奖作品汇编

杭州国际城市学研究中心 编  
浙江省城市治理研究中心

## 图书在版编目(CIP)数据

城市霾问题治理研究: 第四届“钱学森城市学金奖”征集评选活动获奖作品汇编 / 杭州国际城市学研究中心, 浙江省城市治理研究中心编. —杭州: 浙江人民出版社, 2014. 10

(城市学文库/王国平主编. 生态环境论丛)

ISBN 978-7-213-06355-8

I. ①城… II. ①杭…②浙… III. ①城市—霾—文集②空气污染—污染防治—文集 IV. ①P427.1-53 ②X51-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 235752 号



|      |                                                            |
|------|------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 城市霾问题治理研究<br>第四届“钱学森城市学金奖”征集评选活动获奖作品汇编                     |
| 作 者  | 杭州国际城市学研究中心 浙江省城市治理研究中心 编                                  |
| 出版发行 | 浙江人民出版社<br>杭州市体育场路 347 号<br>市场部电话: (0571)85061682 85176516 |
| 责任编辑 | 闻 史                                                        |
| 责任校对 | 叶 宇                                                        |
| 电脑制版 | 杭州大漠照排印刷有限公司                                               |
| 印 刷  | 浙江印刷集团有限公司                                                 |
| 开 本  | 710×1000 毫米 1/16                                           |
| 印 张  | 40.25                                                      |
| 字 数  | 67.4 万                                                     |
| 插 页  | 2                                                          |
| 版 次  | 2014 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷                                   |
| 书 号  | ISBN 978-7-213-06355-8                                     |
| 定 价  | 128.00 元                                                   |

如发现印装质量问题,影响阅读,请与市场部联系调换。

## 城市学文库编辑委员会

总主编：王国平

副主编：许勤华 徐立毅 俞东来 张建庭  
董建平 顾树森 马时雍 陈新华  
杜卫 王金定 庞学铨 裴长洪  
钱永刚 于景元 郑杭生 牛凤瑞  
宁越敏 郑新浦 童健

编委：（以姓氏笔画为序）

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 马云  | 王水福 | 王建沂 | 方建生 |
| 卢春强 | 史建  | 刘颖  | 刘建设 |
| 江山舞 | 阮重晖 | 阳作军 | 吴太普 |
| 何俊  | 应雪林 | 辛薇  | 汪力成 |
| 沈建平 | 张勤  | 陈跃  | 陈菊红 |
| 尚佐文 | 金翔  | 周先木 | 赵晴  |
| 胡伟  | 胡征宇 | 聂忠海 | 徐海荣 |
| 翁文杰 | 曹强  | 廖玗  | 黎青平 |
| 滕建荣 |     |     |     |

# 总 序

城市是人类文明的摇篮、文化进步的载体、经济增长的发动机、新农村建设的引领者，也是人类追求美好生活的阶梯。中国城市化是中国经济社会发展的核心动力和扩大内需的最大潜力，也是人类进步和全球经济增长的强大引擎。

21 世纪是城市的世纪，21 世纪的竞争是城市的竞争。当前，中国城市化进程已进入高速发展期，过去 30 年，中国经历了世界上规模最大、背景最复杂、受益人口最多的城市化进程。2011 年是中国城市化带有标志性的一年，全国城市化率首次突破 50%。据中国科学院统计，未来 30 年，中国城市化率将以每年 1% 的速度增长，预计 2030 年中国城市化率将达到 70%，中国将用 50 年的时间，走完西方发达国家需要 100 年才能走完的路。城市化的加速推进，既带来了千载难逢的发展机遇，也引发了人口膨胀、环境污染、交通拥堵、千城一面、住房难、上学难、就医难、征地拆迁难等一系列“城市病”。

中国城市化中出现的种种“城市病”，大多是城市的“综合症”、“并发症”，甚至是“疑难杂症”，依靠现有的城市规划学、城市社会学、城市经济学、城市管理学、城市人口学、城市生态学等十几个独立城市学科，采用“头痛医头、脚痛医脚”办法，进行专项研究治理，其结果往往是顾此失彼、得不偿失。为此，当代杰出的科学家钱学森先生早在 20 世纪 80 年代，就提出要把城市作为一个复杂的巨系统，必须用系统科学方法进行研究，要建立一门应用性、综合性的城市学学科，开展城市学研究。我们认为，对于城市“复杂巨系统”所产生的种种“城市病”，只能采用钱学森倡导的综合系统、集成创新的方法，也就是城市学的方法进行研究。但时至今日，城市学在中国还没有成为一门“显学”，高速的城市化，正在呼唤应用性、综合性城市学的诞生。

为了适应中国城市化的发展要求,探索破解“城市病”治理路径,寻求中国城市科学发展模式,实现“城市,让生活更美好”的城市居民愿景,2010年杭州市委、市政府专门成立了全国第一家城市学研究机构——杭州国际城市学研究中心。为了推进应用性、综合性城市学研究工作,我们专门搭建了《城市学文库》这一研究平台。《城市学文库》既是城市学研究的主要载体,也是汇聚城市学专家智慧的重要平台。《城市学文库》由“城市学论丛”、“城市学译丛”、“城市学教科书”和“城市学蓝皮书”组成。其中“城市学论丛”是城市学研究成果的展示平台,包括城市学重大课题研究论丛、城市学专项课题研究论丛、城市学研究征集评选活动专题论丛、城市化论丛、城市学研究个人论丛等;“城市学译丛”是国际城市学研究交流的重要载体,包括城市学译著、城市学译文集等;“城市学教科书”是城市学学科建设的重要教材,包括城市学学科教材、城市学经典案例汇编、城市学专业资料选编、城市学讲义等;“城市学蓝皮书”是城市学研究的年度研究报告,包括综合性蓝皮书、专题性蓝皮书、年度性蓝皮书等。

杭州国际城市学研究中心作为从事城市学研究的专门机构,我们希望通过编纂出版《城市学文库》,全方位、多角度地研究破解中国“城市病”的方法途径,探索中国特色的城市化道路,为推动中国城市科学发展,作出应有的贡献。

是为序。

王國平

2012年12月

# 前 言

近年来,杭州国际城市学研究中心(简称“杭州城研中心”)秉承杭州籍杰出科学家钱学森先生的城市学思想,以打造“立足杭州、面向全国的城市学智库”和创建“中国城市学研究的杭州学派”为目标,以探索城市化的“中国模式”和研究治理中国“城市病”为己任,按照问题导向的学术研究思路和方法,选择中国城市化中最为突出、党委和政府最为关注、市民群众反响最为强烈的“城市流动人口问题”、“城市交通问题”、“城市教育问题”、“城市医疗卫生问题”、“城市住房问题”、“城市土地问题”、“城市历史文化遗产问题”和“城市生态环境问题”八大“城市病”,作为城市学研究工作的重点,开展一系列的研究、征集、评选、交流活动。我们设想借鉴“诺贝尔奖”的评选模式,开展“钱学森城市学金奖”征集评选活动,并以八大城市问题研究为基础,逐步形成八大门类的“钱学森城市学金奖”。钱学森先生是城市学的倡导者,为城市学学科发展作出了开拓性贡献。杭州是钱学森先生的故乡,杭州国际城市学研究中心是全国第一家以“城市学”命名的研究机构。开展城市学专业的征集评选活动,并以“钱学森城市学金奖”命名,既是对钱学森先生在城市学领域开创性贡献的最好纪念,也将有力地推进城市学研究事业。

首届“钱学森城市学金奖”征集评选活动于2011年拉开帷幕,征集主题为“农民工的户籍与市民化问题”。2012年,第二届征集评选活动主题为“城市交通问题”。2013年,第三届征集评选活动围绕“城市教育问题”、“城市流动人口问题”和“城市交通问题”同时开展。杭州城研中心组织编辑出版历届征集评选活动获奖作品汇编,并列入《城市学文库·八大主题论丛》,得到了社会各界的广泛好评。

2014年,第四届“钱学森城市学金奖”征集评选活动围绕“城市生态环境问题”、“城市文化遗产保护问题”、“城市教育问题”、“城市流动人口问题”、“城市交通问题”同时开展征集活动。“城市生态环境问题”征集主题为“城市霾问题治理”。此次活动共收到国内外参评作品300余篇(部),成果形式包括专著、论文、研究报告。我们邀请了城市生态环境问题相关领域的专家,对应征作品进行初选、初评,产生了50篇入围作品。在此基础上,我们还将组织专家开展通信评审,评选出20篇入围作品。2014年10月,我们还将召开由国内权威专家参与的专家评审会,最终投票产生“城市生态环境问题”的“钱学森城市学金奖”1名、提名奖10名、优秀奖若干名。

为便于学术传播交流,杭州城研中心继续对“城市生态环境问题”征集主题的50篇入围作品进行汇编,在2014年中国城市学年会召开之际,编辑出版《城市霾问题治理研究——第四届“钱学森城市学金奖”征集评选活动获奖作品汇编》,并编入《城市学文库·生态环境论丛》之列。由于时间匆忙,水平有限,不足之处恳请各位领导、专家批评指正。

杭州国际城市学研究中心

2014年10月



# 目 录

|                                                                                                  |                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 我国雾—霾成因及其治理的思考 .....                                                                             | 张小曳 孙俊英等(1)    |
| 1961—2005 年中国霾日气候特征及变化分析 .....                                                                   | 高 歌(20)        |
| Water spray geoengineering to clean air pollution for mitigating<br>haze in China's Cities ..... | Shaocai Yu(32) |
| 大气灰霾追因与控制 .....                                                                                  | 贺 泓 王新明等(51)   |
| 大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用<br>.....                                                                  | 朱 彤 尚 静等(65)   |
| 电厂除尘设施对 PM <sub>10</sub> 排放特征影响研究 .....                                                          | 易红宏 郝吉明等(82)   |
| 2013 年 1 月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策<br>.....                                                           | 王自发 李 杰等(95)   |
| 大气二次细颗粒物形成机理的前沿研究 .....                                                                          | 叶兴南 陈建民(114)   |
| 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论 .....                                                                         | 吴 兑(130)       |
| 中国大气污染控制策略与改进方向评析 .....                                                                          | 吴 丹 张世秋(138)   |
| 大气颗粒物源解析受体模型优化技术研究 .....                                                                         | 朱 坦 吴 琳等(154)  |
| 我国大气颗粒物暴露与人群健康效应的关系 .....                                                                        | 阚海东 陈秉衡(167)   |
| 重型机动车实际排放特性与影响因素的实测研究 .....                                                                      | 陈长虹 景启国等(174)  |
| 城市灰霾数值预报模式的建立与应用 .....                                                                           | 刘红年 胡荣章等(189)  |
| 回收法烟气脱硫 .....                                                                                    | 谭天恩 施 耀等(201)  |
| 我国大气灰霾污染特征及污染控制建议<br>——以 2013 年 1 月大气灰霾污染过程为例 .....                                              | 高 健 王淑兰(208)   |
| 中国大气气溶胶研究综述 .....                                                                                | 毛节泰 张军华(215)   |
| 受体模型在大气颗粒物源解析中的应用和进展 .....                                                                       | 戴树桂 朱 坦等(234)  |
| 灰霾过程中的气溶胶特性观测研究 .....                                                                            | 闵 敏 王普才(246)   |

|                                                   |     |           |
|---------------------------------------------------|-----|-----------|
| 中国灰霾历史渊源和现状分析·····                                | 张保安 | 钱公望(259)  |
| 集聚与环境污染·····                                      | 张可  | 豆建民(265)  |
| 我国燃煤污染控制技术与对策的研究·····                             | 徐旭常 | 陈昌和(283)  |
| 中国城市灰霾问题的协同治理研究·····                              | 张旺  | (294)     |
| 城市环境大气重污染过程周边源影响域·····                            | 徐祥德 | 周丽等(306)  |
| 区域大气污染物总量控制技术与示范研究·····                           | 柴发合 | 陈义珍等(320) |
| 夏秋季节天气系统对边界层内大气中 $PM_{10}$ 浓度分布和演变过程的影响<br>·····  | 任阵海 | 苏福庆等(336) |
| 珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究<br>·····                   | 陈训来 | 冯业荣等(358) |
| 长江三角洲地区大气 $O_3$ 和 $PM_{10}$ 的区域污染特征模拟<br>·····    | 李莉  | 陈长虹(367)  |
| 我国中东部一次大范围霾天气的分析·····                             | 饶晓琴 | 李峰等(385)  |
| 离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲地区灰霾天气的影响<br>·····                | 陈训来 | 冯业荣等(397) |
| 城市霾治理:一种典型的跨域危机协同治理的理论与实践互动研究<br>——以长三角城市群为例····· | 李敏  | (416)     |
| 杭州主城区大气臭氧对空气污染指数 API 的影响·····                     | 洪盛茂 | (431)     |
| 杭州市区机动车危险气态污染物排放的模型计算·····                        | 郭慧  | 张清宇等(444) |
| 上海 $PM_{2.5}$ 工业源谱的建立·····                        | 郑玫  | 张廷君等(456) |
| 北京市大气细粒子的来源分析·····                                | 宋宇  | 唐孝炎等(466) |
| 杭州市大气 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 污染特征及来源解析·····       | 包贞  | 冯银厂等(475) |
| 杭州市灰霾天气基本特征及成因分析·····                             | 金均  | 吴建等(485)  |
| 济南秋季霾与非霾天气下气溶胶光学性质的观测·····                        | 徐政  | 李卫军等(493) |
| 天津市夏季灰霾与非灰霾天气下颗粒物污染特征与来源解析<br>·····               | 魏欣  | 毕晓辉等(505) |
| 北京降水化学组成特征及其对大气颗粒物的去除作用<br>·····                  | 胡敏  | 张静等(521)  |
| 南京地区大气灰霾的数值模拟·····                                | 胡荣章 | 刘红年等(536) |
| 霾天气下南京 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染特征及来源分析<br>·····         | 杨卫芬 | 银燕等(548)  |

|                                                  |                           |
|--------------------------------------------------|---------------------------|
| 北京市大气光化学氧化剂污染研究·····                             | 马一琳 张远航(559)              |
| 北京城市气候图系统的初步建立·····                              | 贺晓冬 苗世光等(569)             |
| 北京及周边城市群落气溶胶影响域及其相关气候效应<br>·····                 | 徐祥德 施晓晖等(590)             |
| 北京市雾霾天气成因及治理措施研究·····                            | 周 涛 汝小龙等(607)             |
| 《洛杉矶雾霾启示录》内容提要<br>·····                          | 奇普·雅各布斯、威廉·凯莉著 曹军骥等译(618) |
| 《雾霾和沙尘污染天气气溶胶单颗粒研究》内容提要·····                     | 李卫军 邵龙义(620)              |
| 《雾霾天气治理中的企业社会责任:理论与案例研究》内容提要<br>·····            | 邓玉华(622)                  |
| 《雾霾真相:京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染解析及减排策略研究》内容提要<br>····· | 关大博 刘 竹(627)              |

# 我国雾—霾成因及其治理的思考

■张小曳 孙俊英等

**摘 要:**通过分析雾和霾与气溶胶的联系、维持机制、污染物构成及如何治理等问题,指出我国现今雾—霾问题的主因是严重的气溶胶污染,但气象条件对其形成、分布、维持与变化的作用显著。二次气溶胶(通常占我国小于  $10\mu\text{m}$  气溶胶质量浓度的一半以上)形成与变化受气象条件影响大,导致我国霾呈区域性分布的特点。在我国霾最为严重的华北区域,新粒子形成和老化阶段均有有机气溶胶的贡献,与有机物混合后的气溶胶潮解点提前,吸湿增长因子变小。干气溶胶粒子吸湿增长会使在高相对湿度下观测的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度“虚高”;有约 70% 的气溶胶粒子与其他类型气溶胶内混合,高浓度矿物气溶胶与污染气体发生非均相化学反应使更多二次气溶胶形成,也使我国雾—霾问题更为复杂。还发现受气溶胶影响的低云较高云中云滴数多但有效半径小,高浓度气溶胶影响的云雾形成机制明显不同于低污染状况,在低过饱和条件下大量大于  $150\text{nm}$  粒子活化为云雾凝结核,且化学组成对活化有明显影响。由于我国气溶胶浓度水平在世界范围内较高,仅次于南亚城市,远高于欧洲和美洲的城市与城郊区域,且具有上述变化特点并与云雾的相互作用复杂,导致我国当今的雾和霾都已不是完全的自然现象,人为气溶胶粒子不仅对霾有贡献,还作用于云雾的形成。雾—霾形成后会使到达地面的辐射减少,大气层节稳定度增加,有利于气溶胶不断积聚、凝结和增长,在达到过饱和状况下还产生更多云雾滴,形成“恶性循环”的持续性雾—霾。异常的静稳天气和居高的气溶胶浓度共同造成了 2013 年 1 月 6—16 日我国中东部大范围、持续性雾—霾。对治理雾—霾污染的长期与艰巨性要有充分的科学判断,建议政府对能源结构调整作出抉择,且要不遗余力地对近期可以削减的污染源加大控制力度。污染控制需要区域共同参与,应有国家政策和机制的强力驱动。

【关键词】 霾;雾; $\text{PM}_{2.5}$ ;气溶胶化学组成;污染来源;控制对策

2013年1月多次严重影响我国中东部地区的雾霾天气,在2月份依旧来势汹汹,深锁多城。到底是什么形成了雾和霾?为何雾—霾出现难驱散?随着人类活动的加剧,雾—霾是否也产生了新的变化?本文主要基于国家重点基础研究发展计划(973计划)“我国大气气溶胶及其气候效应”和“气溶胶—云—辐射反馈过程及其与亚洲季风相互作用的研究”在我国气溶胶各化学成分的浓度及其与全球的对比、新粒子形成、气溶胶在环境大气中的转化及变化过程、吸湿增长、混合和非均相化学反应、活化为云雾凝结核等方面的研究,分析和总结了我国雾—霾成因与特点。并通过2013年1月6—16日我国中东部雾—霾期间气象条件的定量分析,指出异常的静稳型天气对雾—霾形成的作用。通过我国各区域气溶胶化学组成分析,特别是通过解析北京 $\text{PM}_{10}$ 的来源,讨论了我国气溶胶污染控制所可能面临的问题。

## 1 现今的雾和霾,都已不是完全的自然现象,气溶胶污染是背后的主因

雾和霾是自然界两种天气现象。根据气象学上的定义<sup>①</sup>,霾是大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度小于10千米的空气普遍混浊现象,这里的干尘粒指的是干气溶胶粒子。当空气中水汽较多时,某些吸水性强的干气溶胶粒子会吸水、长大,并最终活化成云雾的凝结核,产生更多、更小的云雾滴,使能见度进一步降低,低于1千米时被定义为雾,而能见度在1—10千米时则被定义为轻雾。

由于干气溶胶粒子和云雾滴都能影响能见度,所以,能见度低于10千米时,可能既有干气溶胶的影响(即霾的贡献),也有雾滴的影响(即雾的贡献)。霾和雾在一天之中可以变换角色,甚至在同一区域内的不同地方,雾和霾也会有所侧重。一般情况下,老百姓看到的我国区域性能能见度低于10千米的空气普遍浑浊现象被称为“雾—霾”天气。

没有干气溶胶粒子就不能形成霾,没有气溶胶粒子参与在实际大气中也无

---

① 中国气象局. 地面气象观测规范. 北京:气象出版社,1979.

法形成雾。在过去,当人类活动较弱时,这些气溶胶粒子主要源于自然过程,在大气当中被视为背景气溶胶。

但是,随着人类活动的加剧,这一现象在我国近二三十年出现了显著变化。通过对我国能见度与气溶胶关系的分析发现,我国近二三十年中东部区域霾问题的日益严重,主要是由人为排放的大气气溶胶显著增加所致<sup>①</sup>。在一定的气象条件下,又由于大量气溶胶粒子还可以活化为云雾凝结核(CCN)<sup>②</sup>,参与云雾的形成,这就意味着,当今不论是霾还是雾,其背后都有大量与人类活动有关的气溶胶粒子参与(例如:PM<sub>2.5</sub>),都已经不是完全的自然现象。减少雾—霾天气所带来的影响,必须对这种变化背后的大气气溶胶污染给予特别重视。

## 2 我国雾—霾成因

### 2.1 雾—霾加剧与我国居高不下的气溶胶粒子浓度水平有关

我国气溶胶质量浓度水平在世界范围内较高,其中硫酸盐气溶胶年均浓度在我国城市和城郊区域分别约为每立方米空气 34 $\mu$ g 和 16 $\mu$ g,有机碳分别为 30 $\mu$ g 和 18  $\mu$ g,硝酸盐分别约为 15 $\mu$ g 和 8 $\mu$ g,铵约为 12 $\mu$ g 和 6 $\mu$ g,元素碳为 8.6 $\mu$ g 和 3.4 $\mu$ g。这样的浓度水平仅次于南亚城市,而在欧洲的城市和城郊区域,硫酸盐年均浓度分别约为每立方米空气 4.7 $\mu$ g 和 3.3 $\mu$ g,有机碳是 6.0 $\mu$ g 和 2.8 $\mu$ g,硝酸盐为 4.1 $\mu$ g 和 2.1  $\mu$ g,铵为 2.2 $\mu$ g 和 1.3 $\mu$ g,元素碳为 3.7 $\mu$ g 和 1.3 $\mu$ g,均远低于我国<sup>③</sup>。我国气溶胶浓度较高与人口众多和经济快速发展导致的人为污染源排放量大密切相关<sup>④</sup>。

①③ Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. *Atmos Chem Phys*, 2012, 11: 26571—26615.

② Deng Z Z, Zhao C S, Ma N, et al. Size-resolved and bulk activation properties of aerosols in the north China plain: The importance of aerosol size distribution in the prediction of CCN number concentration. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11: 3835—3846; Zhang Q, Meng J, Quan J, et al. Impact of aerosol composition on cloud condensation nuclei activity. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12: 3783—3790.

④ 曹国良, 张小曳, 龚山陵等, 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单. *科学通报*, 2011, 56: 261—268; Zhang Q, Streets D G, Carmichael D R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 5131—5135.

## 2.2 二次气溶胶形成与变化受气象条件影响大导致了我国霾呈区域性分布的特点

在我国  $PM_{10}$  质量浓度中有约 35% 是矿物气溶胶的贡献, 3.5% 为黑碳, 约 15% 为有机碳气溶胶<sup>①</sup>, 因总有机碳中约有 60% 为二次有机碳气溶胶<sup>②</sup>, 故一次排放的有机碳约贡献了  $PM_{10}$  的 6%。由于矿物气溶胶中的大部分源于自然源并可视作背景气溶胶<sup>③</sup>, 且一次气溶胶粒子通常粒径较大、质量浓度较高, 但粒数浓度低, 对霾的贡献有限, 其变化主要受排放强度的控制<sup>④</sup>。

我国陆地众多污染源向大气中排放大量的气体<sup>⑤</sup>, 这些气体经过大气化学反应, 最终一部分转化为气溶胶粒子(称为二次气溶胶粒子), 一部分生成臭氧(因其不影响能见度, 在雾—霾问题中不做讨论)。二次气溶胶形成方式主要有 3 种: 一是直接从气体变为气溶胶粒子(这些新形成的气溶胶粒子粒径通常在 30 nm 以下); 二是新粒子形成后通过碰并、集聚等过程形成一些更大的粒子(粒径通常在 100—200 nm); 三是通过凝结等过程进一步形成一些粒径更大的粒子(多数在 300 nm, 一般不超过 1000 nm, 即  $PM_1$ )<sup>⑥</sup>, 通过对我国 16 个站点两年的分析, 发现  $PM_{10}$  质量浓度中有超过 50% 是二次气溶胶<sup>⑦</sup>, 在北京夏季, 此

① Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. *Atmos Chem Phys*, 2012, 11: 26571—26615.

② Zhang X Y, Wang Y Q, Zhang X C, et al. Carbonaceous aerosol composition over various regions of China during 2006. *J Geophys Res*, 2008, 113: D14111, doi: 10.1029/2007JD009525.

③ Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation. *J Geophys Res*, 1997, 102: 28041—28047; Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission. *Geophys Res Lett*, 2003, 30, doi: 10.1029/2003GL018206, 2272.

④ Zhang X Y, Wang Y Q, Lin W L, et al. Changes of atmospheric composition and optical properties over Beijing 2008 Olympic Monitoring Campaign. *BAMS*, 2009, 1634—1651.

⑤ 曹国良, 张小曳, 龚山陵等, 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单. *科学通报*, 2011, 56: 261—268; Zhang Q, Streets D G, Carmichael D R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX—B mission. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 5131—5135.

⑥ Seinfeld J H. *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. Somerset, NJ: John Wiley and Sons, Inc, 1986.

⑦ Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. *Atmos Chem Phys*, 2012, 11: 26571—26615.

比例可达 80%<sup>①</sup>。除传统研究认识硫酸盐对新粒子形成有贡献外<sup>②</sup>,在我国华北区域观测发现,不论在新粒子形成以及随后的老化阶段,二次有机气溶胶的贡献均很大<sup>③</sup>。通过对比排放和气象条件对区域霾形成的贡献,发现一次排放的气溶胶与排放强度关系密切,天气条件却控制着区域中占多数的二次气溶胶的形成及总体 PM<sub>10</sub> 的浓度变化,导致了人们通常看到的雨过天晴后的一两天空气变得浑浊,能见度逐渐变差的空气普遍浑浊现象(即霾)具有跨省、连片的区域性特征<sup>④</sup>。

### 2.3 气溶胶粒子吸湿增长会使观测的不确定性加大

当空气中水汽较多时,某些吸水性强的干气溶胶粒子(硫酸盐、硝酸盐、铵盐和部分可溶性有机气溶胶)会吸水、长大。在我国华北区域的观测发现吸湿后的气溶胶粒子粒径会增大 20%—60%<sup>⑤</sup>,使得在相对湿度大时观测的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度“虚高”,因其不完全是气溶胶粒子的贡献,还有水分的影响。国际气溶胶科学界在做气溶胶研究时,通常是在相对湿度小于 40% 的状况下监测和对比干气溶胶粒子浓度<sup>⑥</sup>。通过室内实验研究还发现,苯甲酸等芳香类有机物与无机盐混合的气溶胶可以在相对湿度 70% 时就开始吸湿增长,但高湿条件下粒子增幅和理论值相比变小<sup>⑦</sup>,这会导致气溶胶滞空时间加长,光学特性变化,使与霾有关的 PM<sub>2.5</sub>、能见度和气溶胶光学厚度观测的不确定性加大,也会影响公众的感觉。

①④ Zhang X Y, Wang Y Q, Lin W L, et al. Changes of atmospheric composition and optical properties over Beijing 2008 Olympic Monitoring Campaign. BAMS, 2009, 1634—1651.

② Kerminen V M, Petaja T, Manninen H E, et al. Atmospheric nucleation: Highlights of the EUCAARI project and future directions. Atmos Chem Phys, 2010, 10: 10829—10848; Sipila M, Berndt T, Petaja T, et al. The role of sulfuric acid in atmospheric nucleation. Science, 2010, 327: 1243—1246.

③ Zhang Y M, Zhang X Y, Sun J Y, et al. Characterization of new particle and secondary aerosol formation during summertime in Beijing, China. Tellus, 2011, 63: 382—394.

⑤ Pan X L, Yan P, Tang J, et al. Observational study of influence of aerosol hygroscopic growth on scattering coefficient over rural area near Beijing mega-city. Atmos Chem Phys, 2009, 9: 7519—7530.

⑥ WMO/GAW. Aerosol measurement Procedures Guidelines and Recommendations. GAW. 2003.

⑦ Shi Y, Ge M, Wang W. Hygroscopicity of internally mixed aerosol particles containing benzoic acid and inorganic salts. Atmos Environ, 2012, 60: 9—17.



## 2.4 气溶胶粒子混合与非均相化学反应使雾—霾更为复杂

气溶胶粒子在大气中多以混合状态存在,还会发生非均相化学反应<sup>①</sup>。对气溶胶单粒子作分析发现,我国华北区域中70%的气溶胶与2种或3种其他来源气溶胶内混合<sup>②</sup>。低温条件下, $O_3$ 与 $SO_2$ 在矿物气溶胶表面存在协同效应,使二次硫酸盐生成速率随着温度降低出现先加快后减慢的趋势,直接影响大气中二次硫酸盐生成总量<sup>③</sup>。矿物气溶胶还与2—3种酸性气体反应,在表面形成液膜,抑制了新粒子形成,但促使更多的硫酸盐和硝酸盐在其表面转化形成<sup>④</sup>。自身也更易吸湿参与云雾形成。矿物气溶胶因非均相反应形成的酸性界面,还加强了前体物表面吸附和化学反应易形成更多的二次有机气溶胶。研究发现酸性液态表面对气液反应过程有一定的催化作用,同时氧化剂的存在可以显著地提高反应速率,促进二次有机气溶胶的形成<sup>⑤</sup>,使我国雾—霾问题更为复杂。

## 2.5 大量人为气溶胶粒子活化为云雾凝结核使现今的雾已非完全的自然现象

在大气中相对湿度达到过饱和时,一部分气溶胶粒子会活化为云雾凝结核(CCN),形成云雾滴,使能见度进一步降低。在我国华北区域的飞机观测显示,因有气溶胶的作用,低云中云滴数多于高云,但云滴的有效半径减小,高浓度气溶胶作用下的云雾形成明显区别于海洋和污染较少的其他陆地区域<sup>⑥</sup>。观测还

① 朱彤,尚静,赵德峰,大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用. 中国科学:化学, 2010,40: 1731 - 1740; An J, Li Y, Chen Y, et al. Enhancements of major aerosol components due to additional HONO sources in the North China Plain (NCP) and implications for visibility and haze. Adv Atmos Sci, 2013, 30: 57—66.

② Li W, Shao L. Transmission electron microscopy study of aerosol particles from the brown hazes in northern China. J Geophys Res, 2009, 114: D09302.

③ Wu L Y, Tong S R, Wang W G, et al. Effects of temperature on the heterogeneous oxidation of sulfur dioxide by ozone on calcium carbonate. Atmos Chem Phys, 2011, 11: 6593—6605.

④ Li W, Li P, Sun G, et al. Cloud residues and interstitial aerosols from non-precipitating clouds over an industrial and urban area in northern China. Atmos Environ, 2011, 45: 2488—2495.

⑤ Liu Z, Wu L Y, Wang T H, et al. Uptake of methacrolein into aqueous solutions of sulfuric acid and hydrogen peroxide. J Phys Chem A, 2012, 116: 437—442.

⑥ Zhang Q, Quan J N, Tie X X, et al. Impact aerosol particles on cloud formation under different cloud water conditions: Aircraft measurements in Beijing, China. Atmos Environ, 2010, 45: 665—672.