



大气灰霾追因与控制*

文 / 贺泓¹ 王新明² 王跃思³ 王自发³ 刘建国⁴ 陈运法⁵

1 中国科学院生态环境研究中心 北京 100085

2 中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640

3 中国科学院大气物理研究所 北京 100029

4 中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031

5 中国科学院过程工程研究所 北京 100190

【摘要】 大气灰霾如何产生以及如何控制,不仅是大气科学研究面临的前沿课题,也是我国政府和公众迫切需要解决的重大环境污染问题。中科院开展的“大气灰霾追因与控制”专项将以大气细颗粒物(PM_{2.5})的生成、演化和控制为核心科学问题,以京津冀、长三角、珠三角为研究区域,通过可控实验、外场观测和数值模拟确定致霾污染物的组成及来源,阐明区域灰霾形成的关键物理化学机制,识别关键污染物和污染源,发展具有我国自主知识产权的大气灰霾监测技术以及预测预警及控制决策模型,研发致霾关键污染物的源控制和过程控制技术,为控制灰霾污染提供科学可行的技术和政策解决方案。

【关键词】 大气复合污染,灰霾,细颗粒物,致霾机制,源解析,数值模式,控制技术

DOI 10.3969/j.issn.1000-3045.2013.03.008

1 引言:控制大气灰霾污染是建设“美丽中国”的迫切需求

随着经济发展和城市化进程的加速,我国大气复合污染的态势日益严峻。卫星观测结果表明,我国约30%国土面积、近8亿人口正遭受灰霾的危害。尤其是京津冀、长三角和珠三角等区域面临着严重的灰霾污染。其中,北京、上海灰霾发

生频率大于50%,广州、深圳等地灰霾发生频率也超过30%^[1,2]。国务院《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》中明确指出:“近年来,我国一些地区酸雨、灰霾和光化学烟雾等区域性大气污染问题日益突出,严重威胁群众健康,影响环境安全。”灰霾的危害包括:影响公众身心健康和环境安全;降低大气能见度,影响区域气候;影响国家形象和环境外交等。因此,如何保持经济快速稳定发展的同时又能保障空气质量达标,已成为各级政府部门不可回避的问题。解决大气灰霾问题的最佳途径,首先是对现状的认

* 基金项目:中科院战略性先导科技专项(XDB05000000)

修改稿收到日期:2013年4月27日

知、评估和趋势预测,第二步是确定污染源头和权重,第三步是整体规划污染物减排目标,循序渐进、分步实施,最终使空气质量全面达标。因此,为了保持经济发展、保障环境质量、提高政府公信力及稳定和谐社会,必须在科学、技术及相应的对策方面对灰霾问题进行深入的综合研究。

1.1 国内外大气污染治理历程简要回顾

欧美发达国家曾出现过严重的大气污染问题,代表性事件如1952年伦敦烟雾事件以及20世纪40—50年代开始的美国洛杉矶光化学烟雾等。针对这些大气污染问题,以欧美为代表的发达国家逐渐形成了外场观测-实验室模拟-数值模式相结合的闭合研究体系,极大地提高了对大气污染的物理、化学过程的认识。对伦敦烟雾的研究表明,1952年伦敦烟雾事件发生的直接原因是燃煤产生的二氧化硫(SO_2)和粉尘污染,间接原因是开始于12月4日的逆温层所造成的大气污染物蓄积。大气中的 SO_2 被氧化形成硫酸盐,与燃煤产生的粉尘结合,导致表面大量吸附水,成为凝聚核,这样便形成了浓雾。针对1952年伦敦烟雾事件,产生了著名的《比佛报告》(*the Beaver Report*),英国政府于1956年颁布了《清洁空气法案》(1958年又加以补充),该法案是一部控制大气污染的基本法,对煤烟等排放做了详细具体的规定^[3,4]。洛杉矶光化学烟雾是汽车、工厂等污染源排入大气的碳氢化合物(HC)和氮氧化物(NO_x)等一次污染物,在阳光的作用下发生光化学反应,生成臭氧(O_3)、醛、酮、酸、过氧乙酰硝酸酯(PAN)等二次污染物,一次污染物和二次污染物的混合物所形成浅蓝色有刺激性的烟雾污染现象。1955年,美国国会通过了第一部联邦大气污染控制法规《空气污染控制法》,1963年国会再次通过更全面的空气质量管理办法,并且根据不同地区的地形和气象的特点来制定不

同的空气参数指标,加利福尼亚州制定了当时世界上最严格的机动车排放法规^[5]。通过实施这些措施,伦敦彻底摆脱了雾都的称号,洛杉矶光化学烟雾也在20世纪80年代以后得到很大缓解。

我国政府历来十分重视大气污染问题的治理。20世纪70年代,就展开了对酸雨问题的研究。在“七五”和“八五”期间,国家均将酸雨列为重点课题,高度重视酸雨形成机理的研究。通过研究揭示了排放到大气中的 SO_2 被强氧化剂氧化形成硫酸是导致酸雨形成的最关键因素;建立了我国酸沉降控制技术评价与筛选的原则、方法和指标体系以及基于硫沉降临界负荷的控制规划和对策;在大气污染物输送过程的研究方面也积累了一定经验和理论基础,开发了硫化物输送模式,初步计算了省区间和跨国的输送量^[6,7]。在此基础上,1987年制定并在1995年进一步修正了《大气污染防治法》,提出了污染排放控制的相关办法,尤其是针对 SO_2 排放的燃煤过程制定了总量控制的管理办法。与之相应的烟气脱硫技术和工艺也得到了长足发展和广泛应用,极大地控制了酸雨污染的恶化^[8]。

我国城市大气污染虽受以煤炭为主的能源结构的制约,早期呈现出明显的煤烟型污染特征,但随着中国汽车拥有量的激增,大城市氮氧化物污染逐渐加重,光化学烟雾的出现不容忽视。20世纪70年代末在兰州地区首次发现了由于当地地形和特殊的产业结构导致的光化学烟雾,并开展了大气物理和大气化学的综合研究^[9]。随后在北京、上海、广州等地都有光化学烟雾发生的报道。研究发现,光化学烟雾是典型的二次污染,臭氧(O_3)浓度与氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)呈高度的非线性关系,在大城市形成 O_3 的VOCs和 NO_x 的主要来源是汽车排放的尾气^[10]。因此,我国政府于



中国科学院

2000年对《大气污染防治法》进行了修正,将机动车船排放污染的防治纳入法规管理的范围,并对机动车的排放标准做出了多次加严调整。

然而,近年来我国大气污染日益呈现出复合污染的态势,即由煤烟型污染与机动车尾气污染及其他污染相叠加构成。大气中由多种来源的多种污染物在一定的大气条件下(如温度、湿度、阳光等)发生多种界面间的相互作用、彼此耦合构成的复杂大气复合污染体系。我国大气复合污染的重要特征包括:(1)大气氧化性增强;(2)PM_{2.5}浓度增加。而后者即是导致灰霾产生的本质原因。

1.2 我国大气灰霾污染和研究现状

大气灰霾是细颗粒物消光造成的大气能见度下降的现象。大气灰霾现象并不是我国所特有,但这一现象在我国和东南亚地区尤为严重。因此,围绕亚太地区的颗粒物先后开展了一系列大型观测实验,例如太平洋地区大气化学与输送研究计划(TRACE-P和INTEX-B)^[11, 12]、印度洋试验(INDOEX)^[13]以及针对东亚和西太平洋的大型气溶胶特性观测实验(ACE-Asia)^[14]。值得一提的是,由诺贝尔奖获得者Mario Molina组织欧美30多个国家150个科研院校超过450名专家对墨西哥城的霾问题开展了MILAGRO项目研究^[15, 16]。尽管如此,由于欧美发达国家大气污染问题具有明显的阶段性,而我国大气污染问题属于混合污染类型,因此发达国家在大气污染治理过程中并未经历过我国所面临的新老问题集中爆发的状况,因此目前我们尚无直接的国际经验可借鉴。

近10年来,中国许多大城市,如北京、上海、广州、深圳等地,灰霾天数都超过全年的1/3,有的甚至超过一半。灰霾污染出现了发生频率增加、成霾区域面积增大的特点。例如,据中科院监测数据统计,2013年1月京津冀地区发生了5次强霾污染过程^[17]。其中,北京城区PM_{2.5}超过国家二级标准(75μg/m³,拟于2016年实施的环境空气质量标准)22天,超过国家一级标准(35μg/m³)27天。若按WHO规定的安全标准(10μg/m³),几乎全月都是超标的。2013年1月29日的灰霾发生面积达

到130万km²。这次持续的、高强度的灰霾事件席卷了中国中东部、东北及西南共计10个省市区,受害人口高达8亿以上,造成了极大的健康风险。WHO在2005年版《空气质量准则》中指出:当PM_{2.5}年均浓度达到35μg/m³时,人的死亡风险比10μg/m³的情形约增加15%^[18]。

灰霾形成受制于两个因素。一是以水平静风和垂直逆温为特征的不利气象因素;二是以悬浮细粒子浓度增加为特征的污染因素。气象是外因,具有不可控性;污染是内因,与人为活动密切相关,是可控的。因此,控制灰霾污染需要根据区域气候特征形成的环境容量和经济水平,合理削减各种导致大气细颗粒物的污染物排放,最终降低大气细颗粒物的浓度。然而,大气细颗粒物既有一次源,如工业粉尘、机动车尾气、道路扬尘等,也有二次源,即气态污染物在大气中经过气-粒转化(凝聚、吸附、反应等)生成细颗粒物,并随后吸湿增长导致消光。研究认为,二次源是我国大气细颗粒物的主要源^[19],且前体污染物和细颗粒物浓度之间并不具有简单的线性关系。因此,科学控制灰霾首先必须科学认识不同区域灰霾成因。

目前,学术界对我国及其周边地区灰霾成因有一些初步的但尚存争议的认识。例如,瑞典学者Gustafsson等基于同位素研究方法,指出生物质燃烧和化石燃料燃烧一次排放的碳质气溶胶是南亚灰霾形成的主要原因^[20]。而我国科学家基于多年观测研究认为,复杂的大气复合污染和二次细颗粒物才是我国灰霾形成的主要原因^[21-23]。此外,由于国内外污染状况存在较大差异,使得灰霾研究和控制不能直接借鉴国外现有成果,需要根据我国的污染状况和不同区域的经济水平制定灰霾的不同控制策略。目前国内对灰霾的研究还未成系统,现阶段的研究尚不能回答以下基本问题。即,典型区域灰霾形成关键前体污染物是什么?关键污染源权重如何?如何科学有效控制?具体表现为:

(1)致霾颗粒物中各组分的时空分布特征不明晰。一些研究机构已在全国不同地区开展了颗

粒物的分析。但是,目前仍缺乏对细颗粒物的粒径、组成和浓度的时空分布特性的长期系统监测,尚未获得灰霾天气下致霾颗粒物分布的一般规律;

(2)生成致霾细颗粒物的关键前体污染物和关键化学机制不清楚。对于复合污染,究竟何种污染物是该区域灰霾形成的主控因子,还不明确。国外在相对清洁大气条件下获得的大气化学机制,与我国高颗粒物浓度和高气态污染物浓度条件下的化学机制的差异还亟待研究。我国不同区域,因排放模式和污染水平的差异,灰霾形成关键污染物和化学机制是否存在差异还不清楚;

(3)致霾细颗粒物中各组分的物理化学性质及其耦合效应不确定。虽然已定性认识到细颗粒物的粒径、组成、混合状态等对其消光性质有显著影响,但现有研究尚未建立这些参数间的定量关系;

(4)前体污染物传输对灰霾形成的贡献缺乏研究。虽然灰霾更容易在静风状态下形成,更多的是局域污染物的贡献,但是发生灰霾前以及灰霾发生期间污染物的传输对灰霾形成和演化的贡献尚不清楚。同时,灰霾发生后的扩散对其他区域空气质量的影响也缺乏评估;

(5)致霾细颗粒物的来源不明确、源权重不清楚。基于外场观测的源解析结果存在较大的不确定性,其原因主要在于我国排放源清单还存在较大的不确定性和强烈的动态变化;

(6)不同区域控制方案不明确。由于对生成致霾细颗粒物的关键前体污染物和关键化学机制不清楚,模式研究结果和观测数据差异较大,不同区域污染物的控制方案无法确定,对灰霾的控制效果不显著。

1.3 大气灰霾控制亟需科技提供支撑

准确全面掌握大气灰霾污染特征,认识

其形成和演变规律是制定我国灰霾污染防治措施的基础。先进的灰霾监测与模拟研究方法和平台建设则是我国灰霾研究和控制工作开展的前提。因此,灰霾研究需要实现大气灰霾监测和外场观测技术与设备的国产化;建立一定数量的小型、中型和大型的烟雾箱系统,针对我国复杂的大气复合污染进行系统研究,为适合我国大气污染条件的数值模式的开发和验证提供科学依据;研发适合我国大气污染状况的数值模型,用于评估灰霾成因、进行预报预警,完善灰霾观测与研究的平台。

另一方面,研究灰霾的目的在于减少或消除灰霾。在技术上,要研发灰霾重要污染物的控制材料和减排技术,完成示范工程,引领灰霾重点污染物控制技术发展,为灰霾控制提供可靠的技术保障;在控制策略方面,通过大气灰霾协同控制方案设计技术研究,促进灰霾基础性研究向污染控制及决策方案制定方向推进,为环境管理部门有针对性地制定体现多污染物协同控制和区域联防联控的区域灰霾综合控制途径提供科学决策方案,并为区域环境规划、环境立法提供强有力的理论依据。在对灰霾研究的基础上,系统地了解我国大气环境现状,全面评估对目前主要致霾污染物控制技术、管理技术、规划技术,开发区域灰霾控制综合优化决策平台,并以此为基础构建未来我国大气环境污染控制研究的技术路线图和方案,为我国大气污染防治的中长期战略提供先导性研究规划和前期技术支撑基础。

2 专项的主要科技内容与目标

针对中国严重的灰霾现状以及灰霾研究和控制中存在的问题,中科院组织多个研究所的科技人员,联合高校和其他科研院所,共同承担科技先导性专项——“大气灰霾追因与控制”。包括生态环境研究中心、



中国科学院

大气物理所、广州地球化学所、合肥物质院安徽光机所、过程工程所等在内的14家中科院研究所参加,以及包括北京大学、清华大学、中国环境科学研究院等在内的8家院外单位参与,参与科研人员超过300人。该专项共分5个项目,下设25个课题。主要研究技术路线如下:

2.1 灰霾追因模拟(项目1)

该项目重点回答我国区域灰霾成因机制,即在我国典型区域大气环境条件下,细颗粒物如何产生、演化、致霾?

致霾细颗粒物以二次生成为主,大气氧化是二次气溶胶形成的最重要的过程机制,但 O_3 、 NO_x 、 HO_x 自由基等重要大气氧化剂的形成、转化和再生机制,目前认识尚不完全;二次有机气溶胶(SOA)形成机制是当前国际大气化学前沿领域;已有研究得到的有机碳(OC)或SOA模型模拟值远低于实测值,是一直困扰大气科学工作者的一个难题,其根本原因是气粒转化机制和大气多相界面过程缺乏深入认识;此外,研究我国大气复合污染现状下二次气溶胶的形成机制,需要在国内外已有相对简单体系模拟的基础上,针对我国实际复杂大气污染条件开展进一步的深入研究工作。面向我国实际需求和科学前沿,该项目拟利用我国已有和即将建成的烟雾箱平台,开展区域灰霾形成机制的模拟研究,主要开展的研究包括实际大气中典型污染物对二次颗粒物生成的贡献,典型污染源对颗粒物的贡献,大气颗粒物的老化过程与理化性质对成霾的影响,大气氧化过程对二次细颗粒物形成及成霾的影响以及大气自由基的形成和转化机制等。

通过该项目研究,将完善和升级我国灰霾、细颗粒物和二次污染物等方面研究平台,在深入认识成核、多相反应、自由基生消等过程机制的基础上,从科学层面为灰霾模式的改进(项目3)提供理论基础和合理的参数化方案;识别人为源和自然源中的关键致霾污染物,明确典型地区重要污染源对细颗粒物生成和成霾的贡献,与大气灰霾溯

源研究(项目2)形成相互校验;同时科学评价大气污染控制技术(项目5)对削减一次和二次致霾粒子的成效,为灰霾控制决策(项目3)和相关设备技术研发(项目4、5)提供依据。

2.2 大气灰霾溯源(项目2)

该项目利用多种高技术监测手段,包括地面联网、高塔梯度、系留艇、无线探空和卫星探测,重点对京津冀、长三角、珠三角严重霾污染典型区域,开展三维立体观测;完善校核全国和典型区域污染源排放清单。将全国污染源排放清单升级至 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率,京津冀、长三角和珠三角区域升级至 $3 \times 3 \text{ km}$ 分辨率;对不同区域、在不同季节将致霾粒子分粒径段采集,分析其质量浓度谱、数浓度谱和精细化学组成,并对重点区域颗粒物的吸湿性、混合状态和单颗粒结构进行剖析,定量每个物理、化学参数对颗粒物消光系数的影响,颗粒物的源解析和化学成分重组拟合度90%以上。

通过三维立体连续观测、源清单编制升级校核、颗粒理化特性分析与源解析3项研究任务,获得全国大尺度大气灰霾分布、颗粒物浓度及其时空演变规律;京津冀、长三角和珠三角3个重点区域致霾颗粒物及其前体物的高分辨率时空分布特征;全国和重点区域高分辨率及可动态更新的排放源清单;不同源头排放的污染物种对区域大气灰霾污染形成的权重及气象要素成因诊断与量化,不同区域、不同季节严重霾污染的产生和消散机制,与灰霾追因模拟研究(项目1)形成相互校验。该项目的研究,还可为烟雾箱模拟提供真实大气参量,为数值模式(项目3)提供适用的动态源排放清单和预测预警结果检验,并为研制仪器(项目4)和控制技术(项目5)提供示范平台。

2.3 大气灰霾数值模拟与协同控制方案(项目3)

该项目拟回答的核心科学问题包括:(1)如何用数值方法科学表征灰霾在大气边界层中的演化过程,并实现预报预警?(2)如何定量评估影响区域灰霾事件生消的关键因子?(3)如何合理估算灰霾的跨界输送量和制定多污染物协同控制方案?

如何有效地制定灰霾控制措施是我国环境管理部门面临的难题。结合项目1、2研究成果,阐明气溶胶粒子在边界层内的演变规律,揭示影响区域灰霾事件生消的关键因子,从而实现灰霾事件的预报预警则是解决这一问题的关键,也是制定大气灰霾协同控制方案的科学基础。三维数值模式作为核心研究手段,既可量化众多物理化学过程的综合作用,解析不同过程和来源的相对贡献及其时空分布,还可实现对大气污染的预报预警。然而目前国内外数值模式均难以模拟我国区域灰霾的生消过程。该项目基于项目1、2的研究成果,包括外场观测和烟雾箱模拟获得的灰霾中各气溶胶成分、光学特性、粒子谱等时空分布特征及相关反应参数,研发适合我国大气污染特征的区域大气灰霾模式,构建区域灰霾集合预报系统,发展基于同位素分析技术和数值模拟技术的跨界输送评估方法,制定基于灰霾控制目标的多污染物减排方案。

2.4 灰霾监测关键技术和设备研制(项目4)

该项目针对灰霾污染特征和过程监测中的关键技术问题,进行灰霾监测国际先进技术和专业设备的研发,为有效掌握我国灰霾污染特征和变化趋势、揭示灰霾形成机理和来源提供实验模拟(项目1)和外场观测(项目2)技术支撑平台。该项目研究任务包括:烟雾箱系统研制与应用,大气氧化性(HOx 、 NO_3 自由基)在线测量技术,大气细颗粒物、水汽和臭氧激光雷达探测技术,大气细粒子谱和消光特性自动监测技术,大气光化学关键组份高灵敏在线测量技术。通过研制大气氧化剂的高灵敏测量技术设备、研制大气细颗粒物、水汽、臭氧时空分布高分辨探测激光雷达、建设具有国内领先水平的室内烟雾箱、完善气溶胶理化性质的综合表征与研究平台,最终突破多项国际先进水

平的灰霾氧化性监测等技术,研发满足业务化应用或科学研究应用需求的灰霾监测关键技术及设备。

2.5 灰霾重点污染物控制前沿技术(项目5)

目前人们对灰霾污染生成机制已经有了初步的认识,其中一次排放细颗粒物、 NO_x 、 SO_x 、 VOCs 、 NH_3 是致霾重点污染物的结论已成为共识。我国目前亟需能够消减这些灰霾前驱体污染物的新型控制技术和解决方案,这对从源头治理和削减污染排放、降低灰霾污染发生的频次都具有极其重要的作用。

该项目宗旨在针对当前多种主要的致霾污染物,研究和开发相应的处理和净化技术,从源头上为削减灰霾前驱体排放提供新型的技术储备和解决方案,并阐明相关的科学问题。其研究任务包括:燃煤锅炉烟气均流高效高通量电袋复合细粒子捕集技术与示范;工业 VOCs 的减排控制技术与示范;餐饮及生活面源污染物催化净化技术与示范;无机膜多污染物一体化控制技术;活性焦多污染物协同控制技术;环境大气中典型致霾前体物光催化去除技术。该项目立足我国当前污染现状和构成,与其他灰霾追因的系列课题相互协作,力争在将来在整个专项研究团队获得灰霾成因、演变和发展的科学信息的同时,给出行之有效的灰霾污染物处理技术和解决方案。

3 进展与启示

该专项自2012年9月启动以来,在中科院领导和专项领导小组的指导下,各项工作全面展开。由于专项准备时间较长,酝酿充分,各项目根据国家需求和专项科技内容制定了相应的工作计划与流程,充分发挥参与者的创新积极性和探索性,通过近半年的工作,取得了一些突出的进展,产生了一些积极的影响,得到了一些有益的启示。



中国科学院

3.1 近期研究进展

利用已建立的中科院监测网络,对2013年1月京津冀地区发生的5次强霾污染事件进行了综合立体观测,发现在灰霾期间硫酸盐、硝酸盐、铵盐和有机气溶胶的含量显著增高。进一步分析发现,造成这5次持续强霾事件的主要原因包括:罕见的北半球高纬平流层爆发性增温天气条件、大气氧化性及非均相化学过程的复合作用、浮尘与人为排放污染物混合、区域输送和局地污染叠加等因素,它们共同促发了灰霾的形成。

同时,在实验室开展了燃烧92#汽油的汽车尾气生成二次粒子的烟雾箱模拟,发现汽油车尾气中一次有机气溶胶(POA)的浓度较低,而SOA的生成量为POA的9.8倍,同时还会生成大量硝酸盐和铵盐;对机动车排放重要组分黑炭的实验室模拟,发现可见光条件下soot颗粒能被氧气老化,改变soot气溶胶的致霾效应和气候效应^[24]。此外,在已有基础上,进一步研制了双向嵌套多尺度空气质量模式;成功研制了探测灵敏度达到国际先进水平的大气臭氧和细粒子雷达,能够对灰霾时空演化进行监测;完成燃煤锅炉烟气电袋复合细粒子捕集技术的关键——气流分布实验平台的搭建,并设计出交替开孔的纸蜂窝材料,实现了低气阻下餐饮雾滴的有效去除。

3.2 启示

造成中国频繁出现范围大、持续时间长灰霾事件的根本原因在于大气中的PM_{2.5}或PM₁₀及其前体污染物,如SO₂、NO₂、NH₃、VOC等严重超过了由当地气候、地形等条件形成的环境容量。一旦出现持续的静稳天气,将不利于污染物扩散,而有利于污染物经均相和非均相化学过程产生的二次颗粒物积累,并与一次颗粒物叠加导致大气中细粒子超标。根据全球气温变化和局地环流推测,如果京津冀污染源不进行大幅度减排,区域大气污染事件可能会更加频繁地出现。

因此,降低我国灰霾发生频率,近期需要从以下几个方面进行控制:

(1)油品质量和机动车尾气污染控制应该放在最优先的位置。机动车尾气直接排放致霾的PM_{2.5}(含碳颗粒、硫酸盐等)及其前体物(NO_x、VOCs、SO₂),对城市圈大气灰霾的形成有较大的贡献。提高油品质量不仅能直接减少机动车硫酸盐和SO₂的排放,而且可大大促进机动车尾气净化后处理技术的应用。另外,汽油车的排放法规尚未包含细颗粒物的限制,应尽快着手研发汽油车细颗粒物控制技术,支撑新标准立法。加快淘汰老旧机动车;发展公共交通,缓解城市交通拥堵;立法控制非道路机动车(工程车、农用车等)排放。和其他污染源相比,机动车尾气污染控制具有技术含量高、易于规模应用和见效快的特点,应该放在目前重中之重的位置。

(2)切实做好燃煤烟气脱硫脱硝工作。燃煤电厂烟气排放新标准已相当严格,采用的除尘脱硫脱硝技术联用给企业带来不小的成本压力。2013年1月京津冀灰霾期间的观测结果表明,PM_{2.5}中硫酸盐浓度居高不下。虽目前烟气脱硫技术已普及,但SO₂排放仍在高位运行,远未得到根本控制,有必要对环保技术的应用状况进行调查,发现可能出现的漏洞环节。此外要尽快推广烟气脱硝技术,遏制NO_x排放继续上升势头,完成“十二五”末消减NO_x排放总量10%的约束性指标。

(3)对工业废气污染控制,应该加快立法和新技术研发。工业(工业锅炉、石油、化工、钢铁、水泥等行业)是一次颗粒物和二次颗粒物前体物(SO₂、NO_x、VOCs等)的重要来源。由于各行业所需环保技术和成本承受能力各异,废气排放控制立法和技术研发进度参差不齐,建议加快工业行业废气排放控制立法工作,重点研发一批PM_{2.5}及其前体物联合控制技术并推广应用。另外,废气排放控制立法也有利于利用市场手段鼓励先进产能,淘汰落后产能,促进产业升级。

(4)农业区应加强NH₃排放的控制,减少生物质的无组织燃烧。NH₃排放对于污染物气粒转化及颗粒物吸湿增长致霾具有极大的促进作用,而

目前对于农业源 NH_3 排放还缺少相应的控制措施。生物质燃烧排放的颗粒物也是导致灰霾产生的重要原因之一,建议加强生物质无组织燃烧的管理。

截至2010年,中国人口数量已接近14亿,其中超过一半居住在城市。城市化的飞速发展,导致大量能源集中消耗和污染物集中排放。主要体现在机动车数量和燃煤消耗量爆发增长、城市建筑和日常生活活动强度增加。考虑到我国中东部城市规模大和人口密度高的特殊国情,以及复合污染下单一污染物环境容量下降的情况,中东部应制定比发达国家更加严格的大气排放标准,并严格执行才有望解决困扰我国中东部的大气灰霾问题。

我国应将防治大气污染纳入国民经济和社会发展规划:合理规划能源结构,大力实施节能减排,稳妥推进新能源利用,逐步减少煤炭、石油等传统能源的使用;合理规划产业布局,促进产业升级,淘汰落后产能,发展环保产业,转变经济增长方式,真正实现可持续发展。

致谢 本文是在“大气灰霾追因与控制”专项领导小组与项目成员的大力支持下完成的,马庆鑫、马金珠博士在材料准备和引文索引方面提供了诸多帮助。在此表示衷心的感谢!

参考文献

1 Chang D, Song Y, Liu B. Visibility trends in six megacities in China 1973-2007. *Atmos. Res.*, 2009, 94(2): 161-167.

2 Che H Z, Zhang X Y, Li Y et al. Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981-2005. *Theor. Appl. Climatol.*, 2009, 97: 235-242.

3 Davis D L, Bell M L, Fletcher T. A Look Back at the London Smog of 1952 and the Half Century Since; Bates D V. A Half Century Later: Recollections of the London Fog; *Environ. Heal. Perspect.*, 2002, 110: A734-735.

4 Greater London Authority. 50 Years On: The struggle for air quality in London since the great smog of December 1952.

5 Chass RL, Krenz WB, Nevitt JS et al. Los Angeles county acts to control emissions of nitrogen oxides from power plants. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.*, 1972, 22(1): 15-19.

6 张新民, 柴发合, 王淑兰等. 中国酸雨研究现状. *环境科学研究*, 2010, 23(5): 527-532.

7 Hao J M, Duan L, Zhou X L et al. Application of a LRT model to acid rain control in China. *Environ. Sci. Technol.*, 2001, 35(17): 3407-3415.

8 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程. 北京: 高等教育出版社(第二版), 2002.

9 张远航, 邵可声, 唐孝炎等. 中国城市光化学烟雾污染研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, 34(223): 392-400.

10 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学. 北京: 高等教育出版社(第二版), 2006.

11 Jacob D J, Crawford J H, Kleb M M et al. Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) aircraft mission: Design, execution, and first results. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108, D20, 9000.

12 Dunlea E J, DeCarlo P F, Aiken A C et al. Evolution of Asian aerosols during transpacific transport in INTEX-B. *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, 9: 7257-7287.

13 Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J et al., Indian Ocean Experiment: An integrated analysis of the climate-forcing and effects of the great Indo-Asian haze. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(D22), 28: 371-28,398.

14 Huebert B J, Bates T, Russell P B et al. An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(D23): 8633.

15 Molina L T, Madronich S, Gaffney J S et al. An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City-emissions and their transport and transformation. *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, 10: 8697-8760.

16 Tollefson J. Mexico's scientist in chief. *Nature*, 2010,



中国科学院

- 467, 902-905.
- 17 中新网新闻. <http://www.chinanews.com/gn/2013/02-03/4544001.shtml>
- 18 Air quality guidelines global update 2005. World Health Organization.
- 19 Yang F, Tan J, Zhao Q et al. Characteristics of PM_{2.5} speciation in representative megacities and across China. *Atmos. Chem. Phys.* 2011, 11: 5207-5219.
- 20 Gustafsson Ö, Kruså M, Zencak Z et al. Brown Clouds over South Asia: Biomass or Fossil Fuel Combustion? *Science*, 2009, 323: 495-498.
- 21 Quan J, Zhang Q, He H et al. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP). *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, 11: 8205-8214.
- 22 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述. *环境科学学报*, 2012, 32: 257-269.
- 23 张小曳, 孙俊英, 王亚强等. 我国雾-霾成因及其治理的思考. *科学通报*, 2013, 58: 1-10.
- 24 Han C, Liu Y, Ma J, He H. Key role of organic carbon in the sunlight enhanced atmospheric aging of soot by O₂. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.*, 2012, 109(52): 21250-21255.

Formation Mechanism and Control Strategies of Haze in China

He Hong¹ Wang Xinming² Wang Yuesi³ Wang Zifa³ Liu Jianguo⁴ Chen Yunfa⁵

(1 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4 Anhui Institutes of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

5 Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The control strategies for haze in China are not only cutting-edge topics of atmospheric research, but also an urgent issue to be addressed by the Chinese government and the public. Focused on the core scientific issues of the formation, evolution, and control of atmospheric fine particles (PM_{2.5}), this project will carry out a series of laboratory simulations, field observations, and numerical simulations. The research programs aim to determine the composition and sources of pollutants causing haze; to clarify the key physical and chemical mechanisms of regional haze formation in the regions of Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta, and Pearl River Delta; and to identify the key pollutants and sources of pollution. We will develop atmospheric haze monitoring technology, forecast and early warning, control decision-making models, as well as conduct R & D on source and process control technology for key pollutants that induce haze. Thus, the scientific and practical techniques and policy solutions will be provided to control the haze pollution.

Keywords air pollution complex, haze, fine particles, formation mechanism, source apportionment, numerical model, control technology

贺泓 中科院生态环境研究中心研究员。1965年1月出生于河北省邯郸市。东京大学理学博士，在日本、美国、加拿大留学和工作11年。国家杰出青年科学基金获得者。2001年入选中科院“百人计划”。主要从事大气污染防治(环境催化、非均相大气化学和灰霾成因、柴油车尾气催化净化、室内空气催化净化)方面的研究工作。以第一作者或责任作者在国内外学术刊物包括 *PNAS*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, *Chem. Commun.*, *J. Catal.*, *Environ. Sci. Technol.* 上发表论文150余篇。获2011国家技术发明奖二等奖等多项奖励。E-mail: honghe@rcees.ac.cn