



## 京津冀大气霾污染及 控制策略思考\*

文 / 王跃思 姚利 刘子锐 吉东生 王莉莉 张军科  
中国科学院大气物理研究所 北京 100101

**【摘要】** 改革开放35年来,我国经济持续高速发展,但大气霾污染问题同时凸显,尤其是京津冀环渤海、长三角和珠三角3个典型区域。文章以北京2013年1月霾污染过程为案例,分析了京津冀大气霾污染的现状、形成机制以及来源组成,并从政治智慧、管理创新、科学支撑和全民参与等几个方面提出了控制途径的思考。

**【关键词】** 霾污染,  $PM_{2.5}$ , 形成机制, 控制

DOI 10.3969/j.issn.1000-3045.2013.03.009

改革开放35年来,我国经济持续高速发展,工业化和城市化进程不断加速,伴随着城市人口的增长,机动车保有量暴增,能源大量集中消耗,道路等交通设施和污染物脱除技术严重滞后,导致城市和城市群区域大气污染日趋严重,表现为大气能见度严重下降,霾锁城事件频繁发生。涉及区域除十分典型的京津冀环渤海、长三角和珠三角,近年来中西部关中地区、中南部长株潭地区和东北辽东南地区大气污染也日趋严重,传统的四川盆地、兰州盆地和天山东麓的乌鲁木齐区域,严重的大气污染也未见显著好转。我国中东部大部分地区已经演变成为以高浓度细颗粒物(全年)和高浓度臭氧(夏

秋季节)为特征的典型“双高”型污染区域,其中以京津冀区域最为严重。2013年1月席卷整个中东部地区长时间、高强度的大气霾污染已为我国的环境危机拉响了警报,环境问题已成为京津冀、长三角、珠三角乃至所有经济快速发展区域的桎梏,解决经济发展与大气环境变化之间的矛盾势在必行。

### 1 霾的定义及化学组分

霾在气象学中被定义为:“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10km的空气普遍混浊现象”。组成霾的粒子极小,不能用肉眼分辨。霾与晴空区之间不能像雾一样形成明显的边界<sup>[1,2]</sup>。

\* 修改稿收到日期:2013年4月18日

基金项目:中科院战略性先导科技专项(XDB05020000、XDA05100100),国家自然科学基金(41230642、41021004)



中国科学院

中国气象局地面观测规范<sup>[3]</sup>中霾的判别条件是能见度小于10km,相对湿度小于80%;而相对湿度为80%—95%时,则需要人为对大气成分进行甄别。观测规范中按照能见度等级把霾细分为:轻微霾,5≤能见度<10km;轻度霾,3≤能见度<5km;中度霾,2≤能见度<3km;严重霾,能见度<2km。

总的来说,霾是指各种源排放的污染物(气体和颗粒物如CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>、VOCs、PM)在特定的大气流场条件下,经过一系列物理化学过程,形成的细颗粒物,并与水汽相互作用导致的大气消光现象。霾的本质是大气中PM<sub>2.5</sub>浓度超标,PM<sub>2.5</sub>的消光作用很强,当PM<sub>2.5</sub>浓度显著上升时,大气能见度随之显著下降。当能见度低于10km,就形成“霾”,公众的直观感受就是城市的高楼大厦漂浮于烟雾之中,空气质量差。PM<sub>2.5</sub>是指空气动力学直径小于或者等于2.5μm的大气颗粒物(气溶胶)的总称,学名为大气细颗粒物。PM<sub>2.5</sub>组成极其复杂,几乎包含元素周期表所有元素,涉及3万种以上有机和无机化合物(包括硫酸盐、硝酸盐、氨盐、有机物、碳黑、重金属等),真是“小粒子、大世界”。PM<sub>2.5</sub>中来自排放源直接排放的贡献较少,以一次排放的气体通过物理和光化学过程生成的二次粒子为主。

## 2 霾的影响与危害

霾中PM<sub>2.5</sub>细颗粒物浓度较高,当PM<sub>2.5-10</sub>粗颗粒物浓度较高时,表明有显著的沙尘或扬尘影响。霾造成气候、环境、健康等方面的负面影响有:(1)PM<sub>2.5</sub>浓度的增加可能是极端天气事件增加的原因之一。PM<sub>2.5</sub>影响大气辐射平衡,导致地面越来越冷、大气越来越热,可能加剧区域大气层加热效应、增加极端气候事件,严重影响区域和全球气候变化;(2)细颗粒物污染是全球性重要环境问题之一,1975年以来,除欧洲,全球范围内细颗粒物浓度都在明显上升。PM<sub>2.5</sub>浓度的增加会引起城市大气酸雨、光化学烟雾现象,导致大气能见度下

降<sup>[4]</sup>,阻碍空中、水面和陆面交通;(3)霾污染发生时,细颗粒物吸湿特性增强,可以直接传染细菌和病毒。PM<sub>2.5</sub>又称为可入肺颗粒,能够直接进入人体肺泡甚至血液系统中,直接导致心血管病等疾病。PM<sub>2.5</sub>的比表面积较大,通常富集各种重金属元素和有机污染物,其多为致癌物质和基因毒性诱变物质,危害极大。PM<sub>2.5</sub>污染会增加重病及慢性病患者的死亡率,使呼吸系统及心脏系统疾病恶化,改变肺功能及结构,改变人体免疫结构。中科院的研究已经基本证明大气污染与呼吸道疾病死亡率正相关。北京市近年肺癌患病率显著提高,2012年平均每天确诊104个肺癌病人。对广州市肺癌致死率与霾污染关系的研究表明,考虑7年滞后期,肺癌致死率和气溶胶消光系数的相关系数高达0.97<sup>[5]</sup>。

## 3 中国的霾污染现状

中国的霾污染问题比伦敦雾霾事件和洛杉矶光化学烟雾事件更为复杂和严重。2013年1月,罕见的连续高强度大气霾污染席卷了中东部地区,造成大量航班延误、高速公路封闭、呼吸道疾病患者涌向医院急诊室。中国中央电视台及英国电视台第一时间播报了此次污染事件,紧接着,各种多国媒体对这次污染事件进行了追踪报道,引起了世界范围内的高度关注。本次霾污染范围涉及我国中东部、东北及西南共计10个省市自治区,受害人口达8亿以上,其中污染最严重是京津冀区域。据统计,2013年1月京津冀共计发生5次霾污染过程。第一次发生在6—8日,北京PM<sub>2.5</sub>小时浓度最高值320μg/m<sup>3</sup>,大于300μg/m<sup>3</sup>的时数为1小时;第二次发生在9—15日,北京PM<sub>2.5</sub>小时浓度最高值680μg/m<sup>3</sup>,大于300μg/m<sup>3</sup>的时数超过46小时;第三次发生在17—19日,PM<sub>2.5</sub>小时最高浓度320μg/m<sup>3</sup>,大于300μg/m<sup>3</sup>的时数为1小时;第四次发生在22—23日,PM<sub>2.5</sub>小时最高浓度400μg/m<sup>3</sup>,大于300μg/m<sup>3</sup>的时数超过21小时;第五次发生在25—31日,PM<sub>2.5</sub>小时最高浓度530μg/

$\text{m}^3$ , 大于  $300\mu\text{g}/\text{m}^3$  的时数超过 50 小时。整个 1 月份(1—31 日), 北京共计 22 天  $\text{PM}_{2.5}$  超过 2016 年国家空气质量二级标准( $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 27 天超过国家一级标准( $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{PM}_{2.5}$  小时最高值达到  $680\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 只有 4 天晴好天气(图 1); 天津共计 21 天  $\text{PM}_{2.5}$  超过国家 2016 年二级标准, 只有 5 天晴好天气; 石家庄共计 26 天  $\text{PM}_{2.5}$  超过国家 2016 年二级标准, 只有 1 天晴好天气,  $\text{PM}_{2.5}$  小时最高值超过 690 和  $1\,000\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。京津冀背景地区兴隆的  $\text{PM}_{2.5}$  共计 6 天超过国家 2016 年二级标准, 京津冀空气污染形势十分严峻。长三角

线照射下, 原有的化学链遭到破坏, 形成新的含剧毒的光化学烟雾, 主要是以臭氧为代表。北京现在具有类似的情况。此外中国还大范围存在沙尘暴, 而沙尘的存在又会加剧霾过程的化学反应。

2013 年 1 月京津冀霾污染过程 5 个特点:

(1) 天气过程少见。受大气环流影响我国中东部偏北地区大气异常稳定, 空气垂直运动弱, 冷空气过程少且弱, 湿度大但无降水, 造成污染物极易积累叠加。这种天气过程缘于冬季北半球高纬平流层爆发性增温,

非常少见, 30 年才发生 5 次。

(2) 西北沙尘输送叠加。卫星和地面观测网都证实京津冀第二次污染过程的 9—15 日受到了沙尘输送的影响, 且石家庄、邯郸一线受到显著影响。首要特征是石

家庄地面  $\text{PM}_{10}$  浓度显著高于北京地区  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$  (10%), 但对  $\text{PM}_{2.5}$  几乎没影响, 北京 12 日夜间  $\text{PM}_{10}$  上升到  $1\,000\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 但  $\text{PM}_{2.5}$  占  $\text{PM}_{10}$  为 70%, 其余时间都接近 90% (已有研究表明, 沙尘输送使  $\text{PM}_{10}$  及粒径更大的粒子浓度飙升, 但对  $\text{PM}_{2.5}$  有清除作用); 另一个特征是第二个污染过程在受沙尘影响时段空气相对湿度短时间急剧下降, 从 85% 下降到 55%。1 月份的其余 4 次污染过程无迹象表明有沙尘叠加。

(3) 非均相化学过程的作用突出。白天的气态  $\text{SO}_2$  高值到晚上转化成为高浓度的硫酸盐颗粒, 更可怕的是油气挥发物转化成大量的有机硝酸酯或是有机胺, 对人体健康

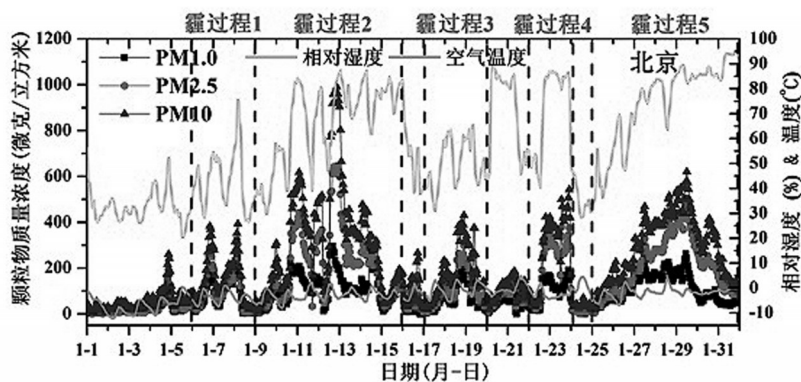


图1 北京 2013 年 1 月大气颗粒物质量浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

及珠三角空气污染形势同样十分严峻。

此次席卷我国中东部地区的霾污染过程以太行山东麓、燕山北麓的京津冀区域最为严重。以产业结构和能源结构甚至在全球都领先的北京为例, 霾污染情况远比 1952 年的伦敦雾霾事件、美国 20 世纪 40—50 年代洛杉矶光化学烟雾事件更为复杂和严重。北京地区空气中每立方米中有近 20mg 气态和固态污染物, 1952 年的伦敦每立方米也只有 4mg, 如此算来, 北京地区  $750\text{km}^2$ , 高度 300m 的大气范围约有 4 000t 污染物。洛杉矶光化学烟雾中主要是汽车尾气中的烯烃类碳氢化合物和二氧化氮( $\text{NO}_2$ )排放到大气中后, 在强烈的阳光紫外



中国科学院



影响极大。

(4)区域输送显著,局地叠加强烈。尤其是第二次过程,从观测数据可以明显看到区域 $\text{SO}_2$ 和硫酸盐的区域输送量很大,到达北京山前平原与局地排放的含碳粒子混合,迅速吸湿,对公众的视觉冲击巨大。

(5)污染物有强烈的刺鼻气味。监测分析结果表明,刺鼻气味来源于燃煤排放的 $\text{SO}_2$ 和苯类物质(焦油味)以及汽车排放的油气、氮氧化物和氨气(腐败臭味)。

## 4 霾的成因

通过对京津冀2013年1月第二次霾污染过程(1月9—15日)进行溯源分析研究。此次霾污染成因如下:

### 4.1 天气过程和局地气象条件极其不利污染物扩散

极其不利于污染物扩散的天气过程和气象条

件是本次大面积霾污染形成的客观原因(外因)。本次霾污染的气象成因是我国华北、山东及河南等地受低压辐合或均压场控制,静稳天气严重阻碍了空气的水平和垂直流通,局地气象条件表现为高湿(75%—85%),逆温层厚(500m—1km)、逆温强度大(逆温温差 $5^{\circ}\text{C}$ — $10^{\circ}\text{C}$ ),1月12日20时逆温层厚度超过600m,温度差超过 $8^{\circ}\text{C}$ ,混合层高度仅为200—300m(晴天为2 000—3 000m),污染物扩散空间比通常减小10倍,导致了局地 and 区域污染物迅速积累,在高湿环境配合下造成 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度爆发式增长,表现为罕见的高强度空气污染(图2)。

### 4.2 沙尘输送

12日卫星监测显示,京津冀区域边界层及上部存在沙尘层和污染沙尘层,同时在边界层内与污染大陆性气溶胶和烟尘相混合(图3);后向轨迹矩阵显示,此区域近地层以弱偏南风为主,高空以偏西气流为主(图4),地面监测结果显示,在气流经过的敦煌、沙坡头地区,分别在11日23:00和12

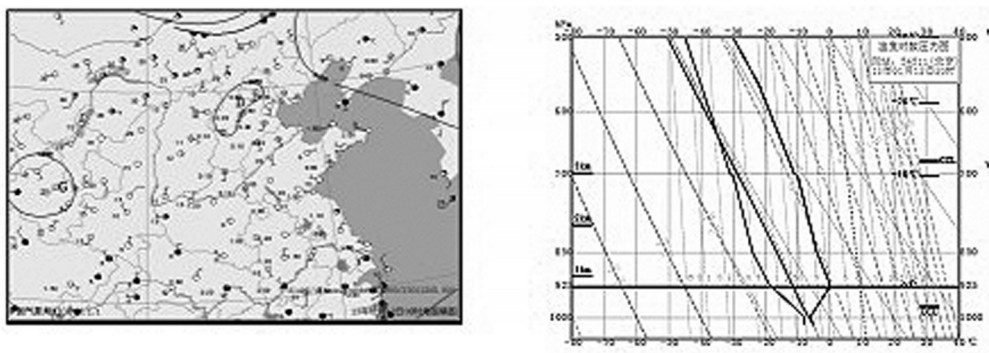


图2 2013年1月12日地面天气图及温湿层结曲线

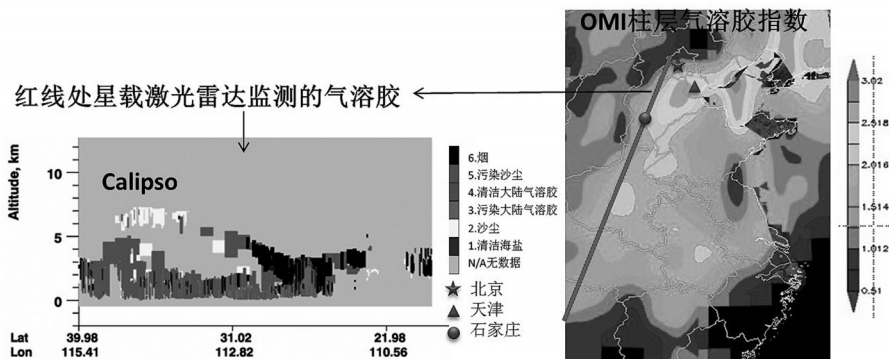


图3 12日卫星监测的气溶胶柱层及垂直分层属性

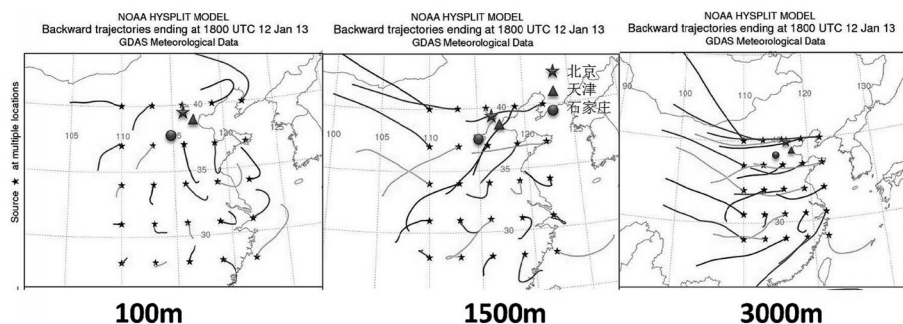


图4 12日不同高度区域24小时后相轨迹矩阵图

日5:00出现 $\text{PM}_{2.5}$ 小时最高值( $250\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $260\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),在西北气流的作用下,沙尘输送到华北地区,加剧了地面的污染强度。污染物累积在太行山和燕山山前,加剧了京津冀霾污染强度,并以石家庄、保定、邯郸、北京、天津、唐山等城市污染最为严重, $\text{PM}_{2.5}$ 小时最高值达 $700\sim 900\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。因此,西北沙尘气溶胶叠加是京津冀区域污染物浓度攀高的重要原因之一。

#### 4.3 北京近周边污染物气团输送

1月12日500m高空后推48小时的气团后向轨迹分析表明,北京城区污染受来自于东南方向近距离输送的影响显著。经过市区的气团11:00还是来自于西部,13:00以后就逐渐转变为偏南气团并维持,低空气团沿地形弧形移动至北京东南区域,污染物输送到北京(图5)。后向轨迹气团路径与可见光真彩卫星图片的烟羽轨迹非常吻合。放大北京东南区域局部,可看到许多星罗棋布的烟雾团点。冬季北京偏南区域高

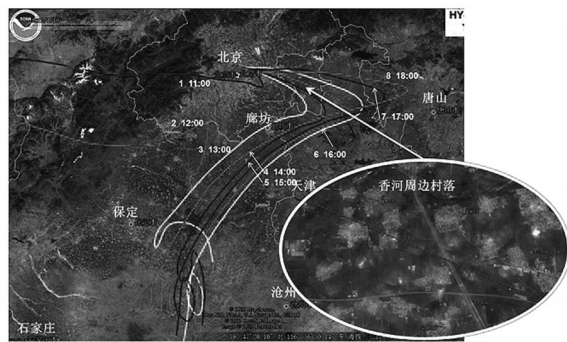


图5 北京近周边气团轨迹输送示意图

浓度污染烟羽聚拢到北京市区是本次霾污染事件的另一重要原因。

#### 4.4 污染物局地排放

(1)污染气体。局地污染排放扩散受阻是本次污染浓度攀升的重要原因之一。各种污染物同步升高、协同作用,导致污染物浓度非线性急剧增长。北京城区典型的机动车排放源一氧化氮( $\text{NO}$ )在12日夜间一度高达 $310\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,是平日的4.5倍;机动车和燃煤直接排放的一氧化碳( $\text{CO}$ )浓度高达 $12\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,是平时的8倍;油气化石燃料和餐饮直排的挥发性有机物( $\text{VOC}$ )增加2倍以上。当湿度增大时,空气中的 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 等气态污染物遇水汽变成酸雾,与 $\text{VOC}$ 的进一步反应生成了大量有毒有害的有机颗粒物。

(2)超细粒子及增长。人们用肉眼看不见机动车尾气排放的超细颗粒物,12日20—100nm粒子浓度峰值出现在早6:00—9:00交通高峰时段,其浓度加合高达 $2.5$ 万个/ $\text{cm}^3$ ,在静稳高湿条件下,这些粒子难以扩散,且迅速增长为100—1000nm的致霾粒子,致使霾粒子浓度比平时增加了3.5倍(图6左图)。成分分析表明,50—100纳米的超细颗粒物,主要是化石燃料燃烧排放的含碳粒子,一旦增长到400nm(可见光波长为400—700nm)以上,粒子中吸水性很强的硫酸盐等从原来的20%增长到60%(图6右图)。疏水



中国科学院

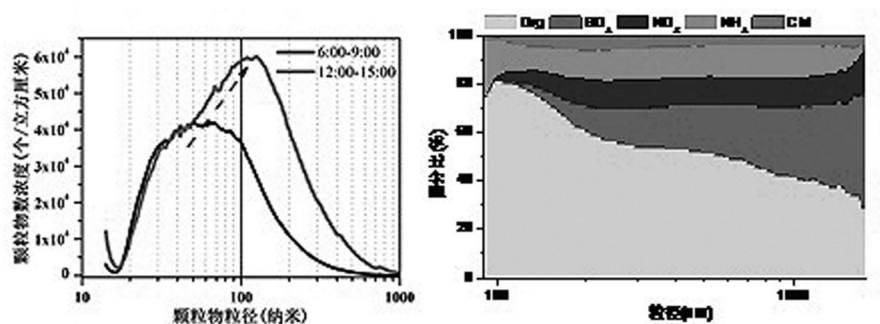


图6 不同粒径范围上各化学组分在NR-PM<sub>1</sub>中的比例

的碳粒子在吸水的硫酸盐包裹下,迅速吸湿膨胀,从“不可见”到“可见”,就是我们看到的“霾”。

#### 4.5 二次粒子的生成过程

(1)二氧化硫转化成硫酸盐。本次污染事件突发的一个重要原因,是以周边燃煤排放为主的SO<sub>2</sub>(不可见,刺鼻气体)一夜之间转化成了硫酸盐(可见,霾的成分)。北京城区白天空气SO<sub>2</sub>出现高值,少部分来自于局地排放,大部分来自于区域输送。其原因是以周边燃煤排放为主的SO<sub>2</sub>传输到北京,造成北京上空SO<sub>2</sub>浓度总是高于地面,白天对流输送将高空SO<sub>2</sub>传输到地面,造成北京空气SO<sub>2</sub>浓度升高;夜间对流终止,SO<sub>2</sub>形成酸雾,并被其中的氧化剂(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub>等)转化为硫酸盐颗粒,此非均相转化过程不需要阳光照射。正如图7所示,白天SO<sub>2</sub>浓度高,晚上硫酸盐浓度高而SO<sub>2</sub>出现低值,这种反位相变化,也从另一个侧面说明,本次污染过程SO<sub>2</sub>不是主要来自北京城市排放。

(2)氮氧化物转化成硝酸盐。氮氧化物向硝酸盐转化也是本次污染PM<sub>2.5</sub>飙升的重要原因之一,其转化机制更为复杂,但有一点可以确定,北京城市大量的机动车排放是造成NO<sub>x</sub>大气浓度上升的原因,也是硝酸盐同步上升的原因之

一。图8表现出白天NO<sub>2</sub>浓度出现高值,并同步出现硝酸盐浓度高值,但北京机动车NO<sub>x</sub>排放造成的危害,远非生成这些无机硝酸盐,与以往不同的是生成了大量的含氮有机颗粒物。

(3)挥发性有机物(VOC)向二次有机颗粒物(SOA)的转化。本次污染过程中强致霾粒子PM<sub>1</sub>的主要化学组成浓度变化见图9,其特点是当污染发生时,细小颗粒物中的有机物、硫酸盐、硝酸盐

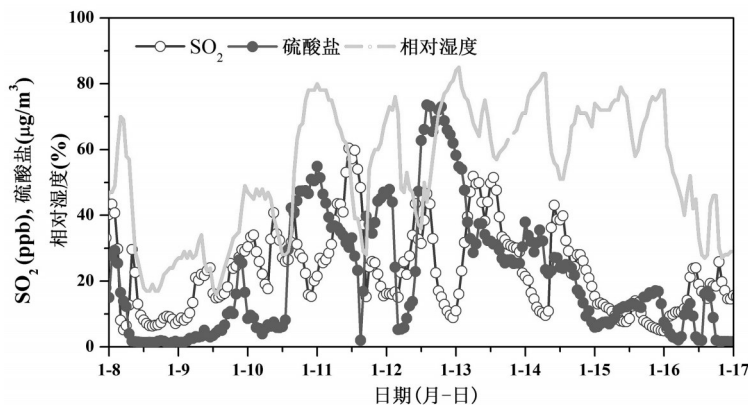


图7 SO<sub>2</sub>和硫酸盐相互转化关系

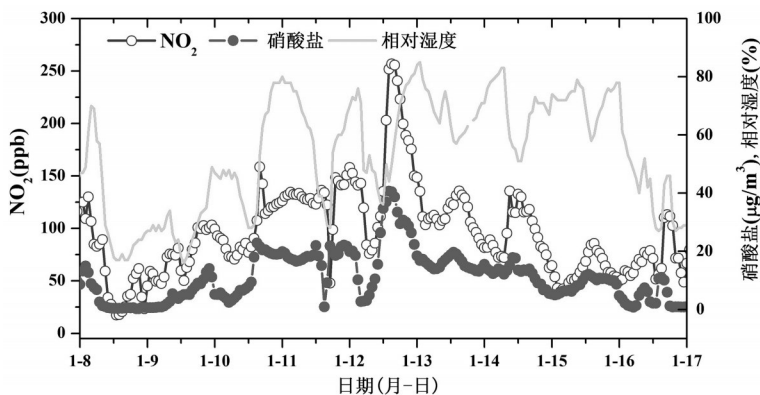


图8 NO<sub>2</sub>和硝酸盐相互转化关系



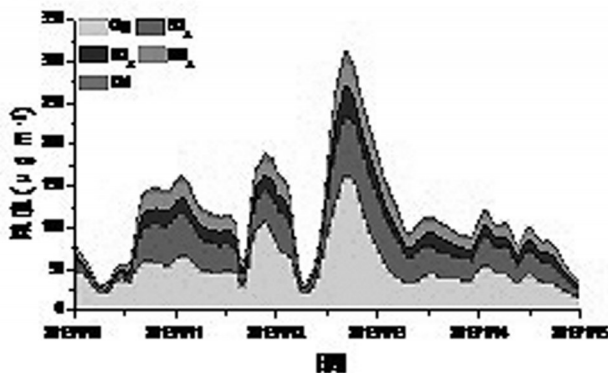


图9 污染过程强致霾粒子化学组成浓度变化和铵盐的浓度大幅度升高,污染最严重的13日,当 $PM_{2.5}$ 突破 $600\mu g/m^3$ 时, $PM_{10}$ 突破了 $300\mu g/m^3$ , $PM_{10}$ 中有机物、硫酸盐、硝酸盐和铵盐、氯化物浓度分别达到了160、70、40、30和 $15\mu g/m^3$ ;  $PM_{10}$ 硫酸盐、硝酸盐和铵盐增长幅度大于有机物,硫酸盐、硝酸盐、铵盐和有机物比平时晴好天气分别增长了30、20、20和10倍,但从绝对量分析,有机物增长最多(图10),那么大量的有机物究竟从何而来?

利用源解析技术,识别出4类有机组分:(1)氧化型有机颗粒物(OOA),主要来自于北京周边输送;(2)油烟型有机物(COA),主要来自局地烹饪源排放;(3)氮富集有机物(NOA),(光)化学产物;(4)烃类有机颗粒物(HOA),主要来自于汽车尾气和燃煤。其中OOA在整个污染过程所占比例最大,为44%,其余3个组

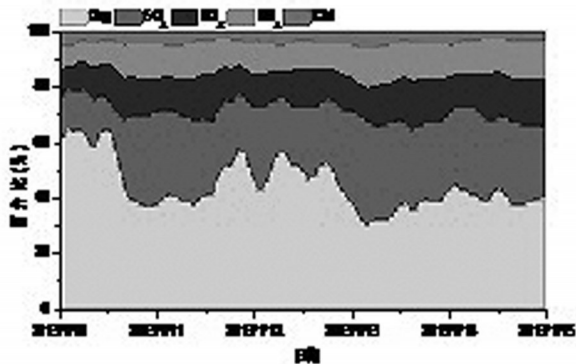


图10 强致霾粒子 $PM_{10}$ 的主要化学组成比例

分COA、NOA和HOA分别占21%、17%和18%(图11)。本次污染过程最危险的信号是大量含氮有机颗粒物的检出,它们是美国南加州20世纪光化学烟雾的主要成分之一,是大量二氧化硫、氮氧化物和挥发性有机物相互反应,共同产生的有机含氮细颗粒污染物。

本次席卷我国中东部地区的霾污染物化学组成,是英国伦敦1952年烟雾事件和20世纪40—50年代美国洛杉矶光化学烟雾事件污染物的混合体,并叠加了我国特色的沙尘气溶胶,是人为粗放式排放和自然生态被破坏的直接后果。

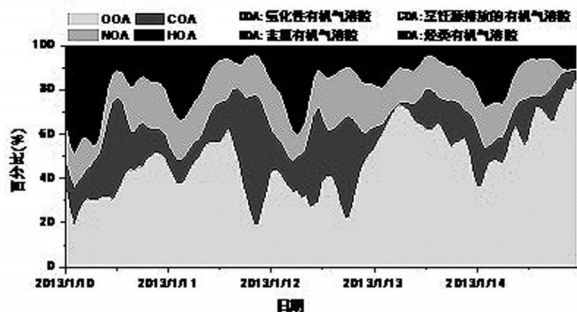


图11 北京强污染过程中有机颗粒物来源比例变化

总的来说,北京霾污染过程有天气条件、周边沙尘、局地排放、大气环流等主要原因:(1)天气原因主要包括静风稳定天气加上高湿、混合层薄、逆温强度大等气象条件。受低压辐合或均压场的影响,天气系统较弱,近地面大气稳定,风速较小,并以弱偏南风为主,湿度较大,且逆温层厚度大(500m—1km)、强度高(逆温温差 $5^{\circ}C$ — $10^{\circ}C$ ),进一步阻碍了空气对流,导致区域和局地排放的污染物迅速累积,空气污染严重;(2)近周边沙尘区域输送,京津冀近周边的沙尘层引发污染,输送至本地,与本地的污染大陆性气溶胶混合,加重污



中国科学院

染;(3)局地排放,包括:一是大量机动车排放造成硝酸盐上升;二是周边输送来的燃煤 $\text{SO}_2$ 排放造成硝酸盐前体物氮氧化物浓度上升<sup>[6]</sup>;三是光化学产物、局地烹饪、汽车尾气等造成的挥发性有机物转化为二次有机气溶胶;(4)大气纬向环流和气候变化导致的北半球平流层升温,使污染物向北半球中纬度区域聚拢,使中国区域大气污染程度加剧。

另外,中国霾污染成因有季节性变化。在冬季,北方的采暖加上稳定的大气边界层结构和较低的混合层高度很容易导致霾污染现象。在夏季,高温、高辐射气候加上高湿天气会促进污染物的光化学反应和吸湿性增长。在秋季,白天强烈辐射和高温会加速大气光化学反应,促进气粒转化,而早晚低温和高湿在稳定的天气系统中容易导致霾污染事件。在春季,远程沙尘输送、局地扬尘、城市酸性气体和空气中较多的水分也会促成霾的形成。

## 5 霾的来源

霾污染的形成与大气细颗粒物浓度升高密切相关。约10%的细颗粒物来自自然排放,其他近90%来自人为排放。对北京2013年1月5次霾污染分析得出,大气细颗粒物的主要化学组成包括有机碳、元素碳、硫酸盐、硝酸盐、铵盐、扬尘等。硫酸盐、硝酸盐和铵盐是基于一次排放的二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和氨气( $\text{NH}_3$ )气体经过化学反应形成。挥发性有机物(包括来自烹饪源的油烟型有机物、来自汽车尾气烃类有机颗粒物、来自光化学反应的氮富集有机物以及从北京周边输送过来的氧化型有机颗粒物),在大量二氧化硫和氮氧化物的作用下发生反应,向二次有机气溶胶转化,产生更加具毒性的细颗粒污染物。它们是20世纪中期美国南

加州光化学烟雾的主要成分。

这些污染物都和人类的生产和生活活动息息相关。对北京 $\text{PM}_{2.5}$ 的源解析结果表明,燃煤、机动车为最主要来源。北京年平均 $\text{PM}_{2.5}$ 排放中,燃煤占26%,机动车19%,餐饮11%,工业10%。1月的霾污染过程中(根据对颗粒物 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分的分析和综合源解析,估算出北京地区霾污染过程污染物初始排放源比例如图12所示),北京机动车排放贡献最大,占25%,其次为燃煤19%和外来输送19%;京津冀地区的主要污染来源则是燃煤34%、机动车16%和工业15%。此外,河北和天津地区的燃煤、化工、重金属冶炼都是重金属污染的来源。北京城市大量的机动车排放是造成 $\text{NO}_x$ 大气浓度上升的原因,也是硝酸盐同步上升的原因之一。白天 $\text{NO}_2$ 浓度出现高值,并同步出现硝酸盐浓度高值,但北京机动车 $\text{NO}_x$ 排放造成的危害远非仅生成无机硝酸盐,更可怕的是生成了大量的含氮有机颗粒物。白天生成的硝酸盐夜间在高浓度 $\text{SO}_2$ 和硫酸盐的作用下向致癌物亚硝酸盐转化相关。

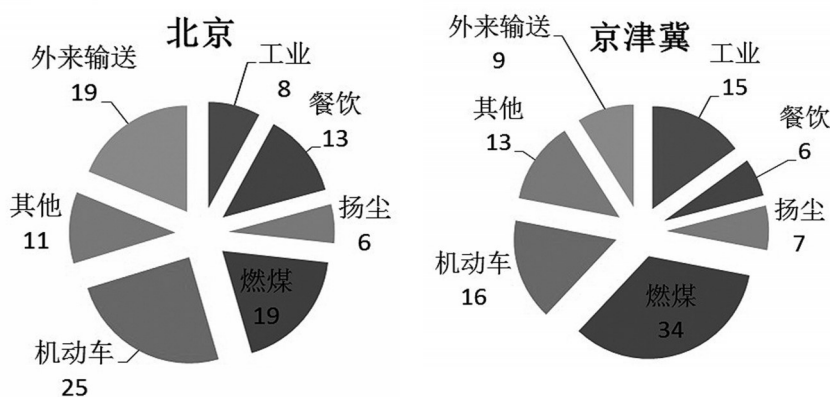


图12 北京地区和京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析(%)

总的来说,就北京而言,机动车为城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的最大来源,约为1/4;其次为燃煤和外来输送,各占1/5。油气挥发和餐饮近年来有快速上升趋势,应加紧控制,工业和地面扬尘应进一步改善。

京津冀区域应重点控制工业和燃煤过程,重



点在于燃烧过程的脱硫、脱硝和除尘;同时要高度关注柴油车排放和油品质量。

## 6 霾控制建议

### 6.1 局地排放和周边输送增加了大气污染物控制和治理的难度,北京不可能单独治理霾问题

以北京大气霾溯源为例,北京  $\text{PM}_{2.5}$  约 30%—40% 来自原始排放, 20%—30% 来自大气中的光化学转化, 30%—40% 来自区域输送。北京治霾要“三分之一靠天气, 三分之一靠自己, 三分之一靠周边”。北京本地排放主要包括大量机动车排放造成的硝酸盐、光化学作用产物、局地烹饪和汽车尾气等排放的挥发性有机物转化为二次有机气溶胶。 $\text{SO}_2$  的梯度观测结果表明, 北京地区 280m 高空的  $\text{SO}_2$  浓度远远高于地面监测结果。表明北京大气  $\text{SO}_2$  和硫酸盐主要来源于周边  $\text{SO}_2$  排放及其转化。局部流场分析, 北京城区大量污染物来自于东南方向的低空气团的近距离输送。京津冀近周边的沙尘层输送至北京, 与本地的污染性气溶胶混合后加重污染。

因此, 北京市虽然能努力降低自身大气污染物的排放, 却无法解决周边污染物排放与传输。除本地汽车尾气之外对北京霾污染的形成有直接重大影响的, 还有天津的工业排放和河北的燃煤排放。

### 6.2 霾可以提前预测预警并缓解

对大气污染物跟踪监测表明, 北京奥运会期间的大气细颗粒物浓度非常低,  $\text{PM}_{1-2.5}$  不足  $50\text{ug}/\text{m}^3$ 。单双号和黄标车限行可将  $\text{PM}_{1-2.5}$  控制在  $100\text{ug}/\text{m}^3$  以下, 而在机动车未限行时段该数据可达  $200\text{ug}/\text{m}^3$ 。同样对 2013 年 1 月份的第 4 次霾过程分析表明, 汽车排放的氮氧化物和燃煤排放的硫化物贡献超过  $100\text{ug}/\text{m}^3$ , 占当时污染物浓度的一

半。这些情况表明, 在易于形成霾的气象条件下(如静稳天气、逆温), 可考虑外来污染物的大气环流, 通过提前预测预警来加强局地污染控制, 减轻北京等地区的大气污染。如能前瞻部署, 则 2013 年 1 月份的 5 次霾事件可通过预警和临时防治措施减缓 3 次。

### 6.3 防治建议

参照发达国家经验, 我国的调控措施不宜完全照搬, 需要根据国情长远规划, 分步实施; 打破区划, 实现全区域的综合治理; 全民动员, 落实细节; 科学实干, 防止走过场。 $\text{PM}_{2.5}$  监控治理比以往任何一种污染物控制治理都复杂得多, 根治  $\text{PM}_{2.5}$  需要政治智慧、管理创新、科学支撑和全民参与。

#### 6.3.1 根治霾污染需政治智慧

正像联产承包、分产到户解决了我国改革开放初期的农业发展问题, 市场经济和经济特区解决了改革开放初期的工业商业发展问题, 一国两制解决了香港和澳门问题一样, 根治霾污染需要在国家管理体制上有所创新, 有所突破。如果没有突破性的管理体制改革, 难以短时间彻底解决问题。应增加经济管制的份额, 推进环境容量资源化进程, 实现跨行政区划的排污共同负担治理费用的政策。其中, 首要的就是要健全排污收费制度, 建立完善的污染物排放交易政策。

#### 6.3.2 必须实施区域联防联控

京津冀地区处于同一个气候带, 故此形成了一个大的区域协同污染区, 根治大气污染需要区域联防联控。这需要突破现有以行政单位各自为政的管理制度。欧共体协同治理酸雨和大气污染, 美国南加州联防联控遏制光化学大气污染都是成功的范例。可以考虑成立京津冀大气污染联防联控委员会, 将该区域作为大气污染防治的试点“特区”, 并对联防联控委员会赋予相对独立的权力(类似司法独立), 有固定的经费来源



中国科学院

和补贴分配权力(如,区域内各省市以每年一定比例的GDP进行匹配),对于污染企业有一票否决权和处罚的权力等等。

### 6.3.3 防治霾要加强法治

仅靠政府部门、工厂企业和居民团体自觉地维护大气环境显然不够,要逐步制定落实相应的法律规章,依法治污才有长治久安的可能。具体来说,要强化电厂脱硫脱硝的监控,避免三天打鱼两天晒网的不彻底现象。同时应建立第三方数据检测,加强油品质量管理。在今后的每个五年计划中,应将环境和能源指标更多的添加到各级领导的激励系统中。另外,要进一步明确环境负责机构为省级环保局,授予省级环保局更多的权利,为其提供更多的资金和更大的知识能力。保证实施效果的另一个关键性因素是形成制衡系统,各机构以及利益相关方可以籍此对彼此进行监督以提高问责,共同发挥监督作用。

### 6.3.4 要制定多种污染物减排的一揽子计划,加强污染物协同控制

仅降低 $PM_{2.5}$ 是不够的,应减排所有的污染气体与颗粒。不能只关注硫化物减排,氨气的减排也很重要。由于 $PM_{10}$ (粒径小于 $10\mu m$ 的颗粒物)浓度逐年下降,而 $PM_{2.5}$ 浓度高居不下,区域大气污染控制应以细粒子减排和多种污染物联合控制为主,并在源头上控制 $CO$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$ 、 $VOCs$ 和 $NH_3$ 的排放。在电力行业,同时控制 $SO_2$ 、 $NO_x$ 、 $VOCs$ 及粉尘有助于降低污染治理成本。

### 6.3.5 要各有侧重地控制一次污染源

首先要从源头控制,大力消减 $PM_{2.5}$ 形成前的主要气态物 $SO_2$ 、 $NO_x$ 、 $CO$ 、 $NH_3$ 和 $VOCs$ 的排放。控制 $SO_2$ 的重点在工业、采暖和燃煤电厂。 $NO_x$ 的控制重点依次为机动车、燃煤电厂和工业。 $CO$ 的控制重点依次为机动车工业和燃煤电厂。 $VOCs$ 应以机动车、无组织(餐厨、干洗店等)排放和工业为主。另外,北方城市的冬季由于受到大规模燃煤采暖的影响, $SO_2$ 、 $NO_x$ 、 $CO$ 、 $PM$ 较非采暖期相

比,呈上升趋势,应在冬季采暖时段加强对这些污染物的控制,而 $VOCs$ 则在全年都要控制。

### 6.3.6 区域源控制应以产业结构布局和调整为重

产业结构调整方面,加大第三产业比例,降低高能耗第二产业比例。产业结构布局方面,尽量将高污染企业迁至区域的下风场地区或高海拔地区,这有利于一次污染物的扩散和沉降。同时加强环保监管措施,控制新排放源的加入。

### 6.3.7 霾治理要科学先行

由于我国的 $PM_{2.5}$ 来源复杂,形成原理不清,观测分析设备落后,难以制定科学合理的治理方案。此时,切勿盲目采用国外监测技术及照搬国外调控标准。应抓紧时间进行基础研究,加大科学投入,并根据科学研究结果制定出一套详尽完备的 $PM_{2.5}$ 减排控制方案。在控制技术方面更要加紧研究,当发现问题后,如何解决就成了关键。我国大气的 $PM_{2.5}$ 污染来源和形成机制与发达国家不同,治理技术也不能完全照搬。

### 6.3.8 霾治理需要公众参与

公众行为是面源强度大小的最重要控制因子,小到餐饮出行,大到择业置产,都要考虑到尽量减少污染排放,因此首先要提高公民整体素质,只有每个人都从自我做起,从点滴小事做起,才有可能保障我们有干净的空气呼吸。加大宣传力度,提高公民的环保意识,使公众有合理的参与途径和方式,能够从科学上认知正确防控 $PM_{2.5}$ 的方法,才能与政府部门一道控制 $PM_{2.5}$ ,保护生存环境,保护我们的家园。

### 参考文献

- 1 侯俊峰. 如何正确识别烟、霾、轻雾. 山西气象, 2002, (4): 42-42.
- 2 肖湘卉. 轻雾和霾的区别. 陕西气象, 2006, (3): 17-18.
- 3 中国气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003.
- 4 Wang K, Dickenson RE, Lian S. Clear-sky visibility has decreased globally from 1973-2007. Science, 2009a, 323: 1468-1470.
- 5 Tie X, Wu D, Brasseur G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China. Atmos. Envi-

- ron, 2009,43, 2375-2377.
- 6 Sun Y et al. The air-borne particulate pollution in Beijing —concentration, composition, distribution and sources. Atmospheric Environment, 2004, 38(35): 5991-6004.

## Formation of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and their control strategies

Wang Yuesi Yao Li Liu Zirui Ji Dongsheng Wang Lili Zhang Junke

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract** In the recent 35 years after the reform and opening-up policy, economy of China has been developed rapidly. At the same time, atmospheric haze pollution became more and more serious, especially in the three typical areas, named Beijing-Tianjin-Hebei region, Yangtze River Delta and Pearl River Delta. This paper takes the serious haze pollution event occurred in January, 2013 of Beijing as an example, to discuss the pollution status, physical and chemical formation mechanism and sources of haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Finally, possible abatement policies are proposed from thoughtful considering political wisdom, management innovation, scientific support and public participation.

**Keywords** haze pollution,  $PM_{2.5}$ , physical and chemical formation mechanism, abatement policy

**王跃思** 中科院大气物理所研究员, 博士生导师。1961年1月出生于北京。国家杰出青年基金获得者。发表期刊论文300余篇, 其中SCI论文100余篇, 创建10项国家发明专利技术应用于国内外百家科研单位, 曾获国家科技进步奖二等奖3项。目前正在主持中科院战略性先导科技专项“大气气溶胶化学成分全国联网观测研究”、“大气灰霾溯源”和国家自然科学基金重点基金等相关重大科研项目, 主攻方向为大气霾污染化学。E-mail: wys@mail.iap.ac.cn



中国科学院