缪育聪, 郑亦佳, 王姝, 等. 2015. 京津冀地区霾成因机制研究进展与展望 [J]. 气候与环境研究，20 (3): 356−368，doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14255. Miao Yucong, Zheng Yijia, Wang Shu, et al. 2015. Recent advances in, and future prospects of, research on haze formation over Beijing–Tianjin–Hebei, China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (3): 356−368.

京津冀地区霾成因机制研究进展与展望

缪育聪　郑亦佳　王姝　刘树华

北京大学物理学院大气与海洋科学系，北京 100871

摘　要　为满足当前对京津冀地区霾研究和控制的迫切要求，本文梳理了近年来京津冀地区霾的长期变化特征、天气学特征、污染物来源等相关研究成果，发现：从 2000 年以后，京津冀地区的霾日数呈现出了下降趋势；北京细颗粒物（PM2.5）质量浓度也在总体上呈现下降的趋势，但 2013 年年均质量浓度仍高达 89.5 μg m^{-3}，约为我国空气质量标准的 3 倍（35 μg m^{-3}），京津冀空气污染的形势依然严峻；近年来京津冀地区的霾污染事件频发可以归因为不利天气条件与大量污染物人为排放的共同作用；大量的研究表明，区域输送对京津冀地区霾事件的形成和维持有不可忽视的影响；京津冀地区的大气污染不再局限于一时一地，针对重污染天气的预警以及应急控制应该以区域预报为基础实现区域联动；京津冀地区独特的地理环境条件加上城市群的快速发展，形成的局地大气环流也会对局地的污染过程产生重大的影响；大气边界层内气象要素的变化对重污染发生具有显著贡献。京津冀地区的污染控制需要城市群的联动应对治理。

关键词　京津冀地区　霾　细颗粒物（PM2.5）　源解析　污染控制

文章编号　1006-9585（2015）03-0356-13　　**中图分类号**　P427.1^{+}22　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14255

Recent Advances in, and Future Prospects of, Research on Haze Formation over Beijing–Tianjin–Hebei, China

MIAO Yucong, ZHENG Yijia, WANG Shu, and LIU Shuhua

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, *School of Physics*, *Peking University*, *Beijing* 100871

Abstract　Recent progress in understanding the haze formation over the Beijing–Tianjin–Hebei area was systematically reviewed, including the long-term trend in haze days, the synoptic characteristics during haze formation periods, and source apportionment of the primary pollutant, PM2.5. The studies show that haze days in Beijing began to decline from 2000, as well as the mass concentration of PM2.5. However, the annual PM2.5 mass concentration for 2013 in Beijing was 89.5 μg m^{-3}, i.e., almost three times the national standard (35 μg m^{-3}). Thus, the heavy pollution over the Beijing–Tianjin–Hebei area demands effective control. Studies also show that the frequent occurrence of haze over the Beijing–Tianjin–Hebei area is caused by a combination of stable synoptic conditions and heavy pollutant emissions. The regional transport of pollutants plays an important role in regional haze episodes, and local atmospheric boundary layer processes over the Beijing–Tianjin–Hebei area (mountain–valley breezes, sea–land breezes, and urban heat island) can result in accumulation of pollutants and exacerbating the local air quality. Additionally, a two-way feedback process between atmospheric boundary layer evolution and pollutants accumulation contributes substantially to the haze formation. To control the heavy pollution over the Beijing–Tianjin–Hebei area, joint efforts among the cities in this cluster are

收稿日期　2014-11-28；**网络预出版日期** 2015-02-15

资助项目　国家自然科学基金项目 41175004、41465001，公益性行业（气象）科研专项项目 GYHY201106033

作者简介　缪育聪，男，1987 年出生，博士研究生，从事区域大气环境与大气边界层研究。E-mail: miaoyucong@yeah.net

通讯作者　刘树华，E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

necessary.

Keywords Beijing−Tianjin−Hebei area, Haze, PM2.5, Source apportionment, Pollution prevention and control

1 引言

根据中国气象局（2003）的定义，霾是指大量极细微的干颗粒物（以 PM2.5 为主）均匀地浮游在空中造成空气普遍浑浊、近地面水平能见度小于 10 km 的现象。当空气中水汽较多时，某些吸湿性强的干颗粒物会吸水、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 km 时被定义为雾，而在 1～10 km 时则被定义为轻雾（张小曳等，2013）。由此可见，虽然雾和霾分别属于不同的天气现象，但两者经常同时发生，且两者之间存在着相互转化（吴兑，2006）；大气中存在大量的颗粒物参与霾—湿霾—雾之间循环（Deng et al., 2011；Zhang et al., 2012a；曹军骥，2014）。当相对湿度较低时，光化学反应形成的半挥发性有机污染物通过气固相分配进入颗粒物相，形成二次有机气溶胶；相对湿度升高、温度降低时，颗粒物吸湿增长，吸收可溶性无机组分和有机组分，发生液相二次过程，产生二次有机气溶胶、硫酸盐、硝酸盐等；当相对湿度降低、温度升高时，颗粒物中水分蒸发，挥发性较低的污染物质保留在颗粒物中。

20 世纪 80 年代以后，随着我国国民经济的快速增长和工业化、城市化进程的加快，发达国家曾经历百余年的大气污染问题也在近 20～30 年内在我国的经济发达地区频繁出现。目前，我国的空气污染逐步由传统的总悬浮颗粒物及可吸入颗粒物（PM10）、SO_2 污染转向以细颗粒物（PM2.5）和污染气体（O_3、SO_2、NO_x）等混合的复合型污染（曹军骥，2014）。

京津冀地区位于环渤海区域的西部，华北平原北端，其西侧、北侧背靠太行山山脉和燕山山脉，是近 30 年全球经济发展最快的地区之一，也是国内大气污染最为严重的区域之一。2013 年 1 月，京津冀地区遭遇了史上最严重的持续霾污染事件（Huang et al., 2014；韩霄和张美根，2014；高怡和张美根，2014；曹军骥，2014），根据北京市环保监测中心数据显示，主要污染物 PM2.5 的浓度高达 886 μg m^{-3}（曹军骥，2014）。2014 年 7 月 23 日，我国环境保护部发布了 2014 年上半年包含京津冀、长江三角洲、珠江三角洲在内的 74 个城市空气质量状况；2014 年上半年，京津冀地区的 13 个城市空气质量达标天数比例平均为 36.4%，其中重度及以上污染天数比例为 20.1%，高于 74 个城市的平均值；主要污染物为 PM2.5，其次为 PM10，二者的平均浓度高达 100 μg m^{-3} 和 174 μg m^{-3}；北京、天津和石家庄 2014 年上半年的空气质量达标天数比例仅为 43.6%、46.4%和 18.9%，京津冀地区空气污染形势十分严峻。

为了满足当前对京津冀地区霾的研究和控制的迫切要求，本文梳理了京津冀地区霾的长期变化特征、天气学特征、污染物来源等方面的一些研究成果，并对京津冀地区未来相关的研究和治理做出展望。

2 霾日数的长期变化特征

中国作为近几十年来全世界人口增长及经济发展最快的国家之一，城市化进程不断加快，随之而来的是污染物排放的加剧以及环境的恶化。21 世纪初有学者发现，近半世纪以来，日照时数以及太阳辐射在全中国范围内呈现下降趋势，并且提出这种变化是由于云量的增加引起的 (Kaiser and Qian, 2002; Qian et al., 2003; Che et al., 2005)。然而，有研究表明，自 20 世纪后半叶以来，中国地区的总云量呈显著减少趋势 (Kaiser, 2000; Sun et al., 2000)。Qian et al. (2006) 提出，云量减少而到达地面的太阳辐射以及蒸发量反而下降的原因可能是污染物增加导致霾天数增多，使得到达地面的太阳辐射减少。中国大陆能见度的变化也从另一个角度验证了这一观点 (Chang et al., 2009; Deng et al., 2012; Wu et al., 2012)。Che et al. (2007) 和 Zhang et al. (2012b) 指出，中国大陆的能见度呈显著下降趋势，这种现象在华北平原和中国东部尤为明显。在京津冀地区，能见度的变化分为 3 个阶段：1998 年前，能见度呈显著下降趋势；1998～2006 年之间，能见度的年平均值在一定范围内小幅波动；而在 2006～2008 年，能见度呈增加趋势 (Zhao et al., 2011)。大气能见度与霾的发生、空气质量以及

PM2.5、硫酸盐和硝酸盐浓度有密切的关系 (Wu et al., 2007；Zhao et al., 2009；Lin et al., 2012)。

关于我国霾的长期变化趋势，有许多学者利用气象台站的观测资料对霾日数进行了统计分析。对于使用长期气候资料进行霾的统计，需要有统一的定量标准，不能直接使用天气现象记录，使用地面观测的天气现象资料分析霾天气非常不客观（吴兑等，2010；赵普生等，2011）。国际上广泛使用的定义霾日数的方法有两种：一种是日均值法，在排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘和烟幕等其它能导致低能见度事件后，定义日均能见度小于 10 km，日均相对湿度小于 90%的情况为一个霾日；另一种是使用 14:00（北京时间，下同）实测值（或 12:00 实测值），定义能见度小于 10 km、相对湿度小于 90%并排除其它能导致低能见度事件的情况为一个霾日（吴兑等，2010；Ding and Liu，2013）。

我国学者对霾系统性的研究主要从 21 世纪初开始，统计研究表明霾日数呈东多西少的分布，主要的高值区集中在长江中下游、华北和华南这 3 个经济比较发达的地区（高歌，2008；Ding and Liu，2013；孙彧等，2013）；且我国霾日数还具有季节变化特征，一般冬季较多，春秋季次之，夏季最少（Che et al.，2009；吴兑等，2010；Ding and Liu，2013；符传博和丹利，2014）。在华北平原，80 年代霾日数较多，且在 80 年代后期迅速增加，在 90 年代达到峰值，之后霾日数处于平稳波动状态，直至 2005 年又开始增加（高歌，2008；Che et al.，2009；Quan et al.，2011；Ding and Liu，2013；Fu et al.，2014）。虽然采用不同研究资料和时段，所得结果不尽相同，但大部分研究认为，1950 年代北京的年均霾日数较多，而后逐渐减少；1970 年代以后北京的能见度急剧恶化导致霾日迅速增加；2000 年以后到北京奥运会前后，霾日数持续下降，但近几年又有所反弹（吴兑等，2010，2014）。此外，需要指出的是，近年来越来越多的研究表明华北平原地区夏季的霾日数呈增加趋势（Fu et al.，2014；廖晓农等，2014），这种现象可能与盛夏的“桑拿天”有关（吴兑等，2010，2014）。

综上所述，根据气象台站资料对霾日数的统计结果来看，从 2000 年以后，京津冀地区的霾日数呈现出了下降趋势，近几年有所反弹（吴兑等，2014）。引起霾日数的这种年际变化的具体原因尚未明了，可能是气候波动以及人为排放变化的共同结果，特别是奥运会前后霾日数的减少，一方面由于北京市采取的污染控制措施，另一方面与奥运会期间利于污染物扩散的天气形势密不可分（谢付莹等，2010）。

3 霾的天气学特征

在污染源基本稳定的前提下，空气质量的优劣主要由天气形势和气象条件控制。天气形势决定了气象要素的分布和变化，也决定了大气的扩散能力和稳定程度；风速、风向和相对湿度等气象条件对污染物的扩散有很大影响（Ji et al.，2012；张小曳等，2013；王跃思等，2014）。城市重污染事件发生的主要原因是不利于污染物扩散的天气条件，且污染事件发生频率的年际变化对天气尺度的环流具有较强的敏感性(Vukovich, 1995; Flocas et al., 2009)。有学者对我国污染天气发生时的天气系统进行了分类（苏福庆等，2004b；王喜全等，2007；王莉莉等，2010）；在华北地区出现严重污染时，地面天气受低压控制的情况出现得较多（孟燕军和程丛兰，2002；谢付莹等，2010）。但地面天气形势并不是大气污染形成的唯一决定因素，污染形成还必须要有适当的高、低环流系统配置。当 500 hPa 上空为偏西气流，850 hPa 出现暖平流或受暖舌影响时，华北地区比较容易发生重度污染，其中低空 850 hPa 的暖平流发展明显对于污染天气产生及其维持最重要的作用就是有利于逆温层的形成（谢付莹等，2010）。京津冀重污染天气过程期间，北京及其以南地区常以弱偏南风为主，且北京西南部地区经常出现小尺度辐合型流场（董芬等，2013）。

周宁芳等（2008）分析了我国 2006 年冬半年霾的天气特征，发现霾主要发生在中阻塞、南支槽和纬向型 3 种不同的环流形势下；霾天气发生时的气象要素分布存在南北区域性差异，华北地区 24 h 负变温时，霾更容易发生。孟燕军和程丛兰（2002）使用北京地区 1998～2001 年的气象资料和大气污染物环境监测资料对影响北京地区的地面天气形势进行了综合分析，将北京地区的地面天气形势分为两大类 18 种（表 1）：有利于污染物扩散的地面天气形势可以使京津冀地区出现大风天气或产生较大的降水，有利于大气污染物的清除；不利于污染物扩散的地面天气形式主要特点是地面气压场

较弱，地面和低空风速较小，常伴有较强的辐射逆温或低空逆温，逆温厚度大，低层大气层结稳定。廖晓农等（2014）对比分析了北京地区冬夏季持续 6 d 的 2 个霾过程形成和维持机制的异同，指出冬夏季的霾具有不同的特征，是由不同的大气环流型引起的；冬季霾过程出现在高空西北气流、低层多短波活动的背景下，其形成和维持的主要机制是边界层内有逆温层、地面弱风场、底层湿度逐渐增大；而在夏季持续性霾天气中，气溶胶起了重要作用，在副热带高压长时间控制下对流层低层盛行偏南风，霾过程低层没有逆温，但是北京上空一直维持超过 200 J kg^{-1} 的对流抑制能量，同样限制了污染物的垂直扩散。

表 1　影响污染物扩散的北京地面天气形势分类（孟燕军和程丛兰，2002）

Table 1　Classification of surface synoptic conditions that affects pollutant dispersion over Beijing (Meng and Cheng, 2002)

有利扩散	不利扩散		
	高压类	均压类	低压类
冷高压前部	高压后部	均压场	低压带
冷锋后部	高压底部	鞍形场	冷锋前部
高压前部	弱高压		两高间
河套低压前部			华北地形槽
高压			华北小低压
回流			华北小倒槽
			华北倒槽

2013 年 1 月，我国中东部地区持续遭遇霾污染，北京市污染尤为严重，为此北京市气象台发布北京气象史上首个霾橙色预警。研究指出，此次霾发生时，东亚冬季风异常偏弱，中纬度地区高空以纬向环流为主，天气系统较弱；对流层中层的异常南风有利于水汽向中国东部输送，同时 500 hPa 的高压异常抑制了对流的发展；而地面不利于污染物扩散的低压场或弱气压场在一段时期内稳定控制着华北地区，导致区域气压梯度小，风速小，对流层低层逆温层的存在使得大气近地层更加稳定（张小曳等，2013；张人禾等，2014；王跃思等，2014）。此外，还有学者对霾消散时的天气形势做了分析，王跃等（2014）通过分析 2013 年 2 月的一次重霾天气过程提出，当北京地面受弱高压场或弱低压场控制时，容易发生爆发性重霾污染；均压场控制则会形成多天持续污染；而当北京处在高压前部，较强的偏北风可快速将污染物疏散清除。

4　首要污染物的来源解析

霾污染的频发是不利扩散的天气条件与污染物大量排放共同作用的结果 (Liu et al., 2013)，这一部分我们将关注霾污染过程中的首要污染物 PM2.5 的时间变化特征及来源。

4.1　北京 PM2.5 质量浓度的时间变化特征

图 1 给出了 1999 年以来北京城区的 PM2.5 质量浓度变化图，可以发现 PM2.5 浓度总体呈现出逐年下降的趋势。2013 年北京全市空气中 PM2.5 年平均浓度值为 89.5 μg m^{-3} (http://www.bjepb.gov.cn/ bjepb/323474/324034/324735/index.html2014-11-03])，超过国家标准 156%，空气污染的形势十分严峻。

北京地区近地面的 PM2.5 质量浓度还存在一些季节变化特征和短期的时间变化特征（贺克斌等，

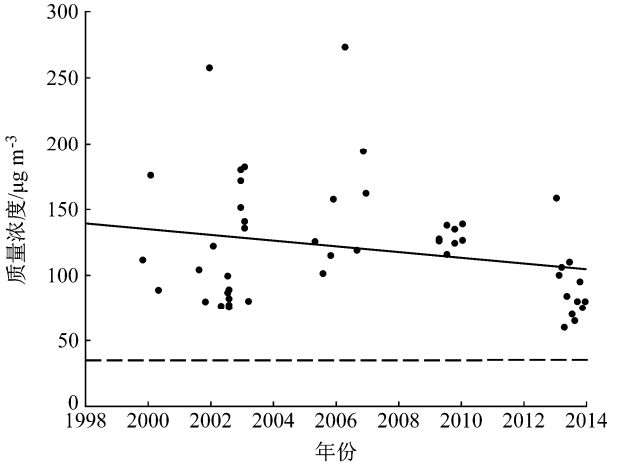

图 1　1999～2014 年北京城区采样点 PM2.5 质量浓度年际变化。数据点为采样的季节平均或月平均值，实线给出了散点图的趋势线，虚线代表我国将在 2016 年开始正式实施的 PM2.5 年平均浓度标准（35 μg m^{-3}）。数据来源： He et al., 2001; Dan et al., 2004; Sun et al., 2004; Duan et al., 2006; Wang et al., 2011; Zhou et al., 2012; Zhang et al., 2013; Zhao et al., 2013a; 2013 年北京市环境公报 (http://www.bjepb.gov.cn [2014-11-03])；曹军骥, 2014; Huang et al., 2014

Fig. 1　Interannual variation in PM2.5 mass concentration from Beijing urban sites during 1999–2014. The data points indicate the seasonal or monthly average of samples, while the solid line indicates the linear tendency and the dashed line indicates an instructive annual average PM2.5 concentration standard (35 μg m^{-3}) which will be put into effect in China in 2016. Data sources: He et al., 2001; Dan et al., 2004; Sun et al., 2004; Duan et al., 2006; Wang et al., 2011; Zhou et al., 2012; Zhang et al., 2013; Zhao et al., 2013a; 2013 Beijing environmental state bulletin (http://www.bjepb.gov.cn [2014-11-03])；Cao, 2014; Huang et al., 2014

2011；曹军骥，2014），冬季的浓度较高，秋季次之，夏季和春季则相对较低 (San Martini et al., 2015)，这些特征与季节性的污染排放和气象因素有关。贺克斌等（2011）基于对多个观测点多年连续的高分辨率颗粒物质量浓度与化学组成数据及气象数据的分析研究，发现北京地区近地面的大气颗粒物呈现周期性的锯齿型时间变化规律（图 2）：颗粒物质量浓度在最初的 1～2 d 内维持在较低的水平，在接下来的若干天内不断升高，在最后的半天或更短的时间内，迅速降低至初始的浓度水平。这种锯齿型污染过程每年大约会出现 60 次，每次持续时间 4～10 d 不等，平均周期为 5～7 d，这种周期性的形成与消散与中尺度天气学过程有关（贺克斌等，2011）。京津冀地处中纬度，极地大陆气团与热带海洋气团在此交汇，并形成对流层锋面或近地锋面。侵袭京津冀地区的锋面以冷锋为主，暖锋较少。大气颗粒物浓度在锯齿型污染过程结束时迅速下降就是由冷锋过境所致，冷锋过后的大风降温天气带来相对清洁的干冷空气，将京津冀的污染物在几个小时内迅速清除；随后几天冷空气的影响逐渐减弱，进而转为南方或东南风，又会周而复始开始下一个污染过程。

此外，颗粒物的质量浓度还存在日周期变化。北京地区的颗粒物质量浓度的日周期变化呈现双峰分布，颗粒物质量浓度常常会在上午和夜间出现峰值（Zhao et al.，2009；贺克斌等，2011）。这种日周期变化或者规律性地叠加在锯齿型污染过程上，或者以平坦的形式独立存在。日周期变化（双峰分布）主要由本地排放主导，大气边界层在一天内的自然消长以及局地大气边界层环流（山谷风和海陆风）的日周期变化和本地人为排放的相互叠加导致了这一现象的出现（贺克斌等，2011；Quan et al.，2014）。上午颗粒物峰值主要由交通早高峰和人为排放引起，夜间持续时间较长的峰值是由人为排放和夜间不利扩散的稳定大气边界层共同作用形成，下午颗粒物浓度谷值的出现则是因为大气边界层高度抬升对大气的稀释和扩散作用。

4.2 北京 PM2.5 的源解析

对于霾成因机制研究的一个重要的方面是源解析，只有对来源有准确的认识，才能为污染的控制提供科学依据。最简单的颗粒物来源识别方法是标识物法，如可以用 Al 和 Na 元素分别作为陆地和海洋物质的标识物；此外，为了区分不同区域和不同排放条件下的同类源的影响，标识物之间的比值也常常被用来进行源解析（曹军骥，2014）。近年来，随着气溶胶监测技术的发展，大气中各类污染源排放颗粒物的质量浓度及全化学物种信息已经可以较为准确地被测定出来，因此结合数理统计方法和受体模型，可以实现对污染来源的类型和贡献的定量判断。表 2 总结了近年来北京地区 PM2.5 来源的一些研究结果，可以发现二次污染物、生物质燃烧、交通排放、工业排放、沙尘、燃煤及建筑物扬尘等对 PM2.5 具有重要的贡献（Zheng et al.，2005；Zhang et al.，2007；Song et al., 2007；Wang et al.，2008；Yu et al.，2013；Zhang et al.，2013；曹军骥，2014；Huang et al.，2014；Liu et al.，2014），人为排放是造成京津冀地区污染的主要原因。

通过表 2 可以发现，不同学者对机动车排放贡献率的解析结果差异较大，就 PM2.5 质量浓度源解

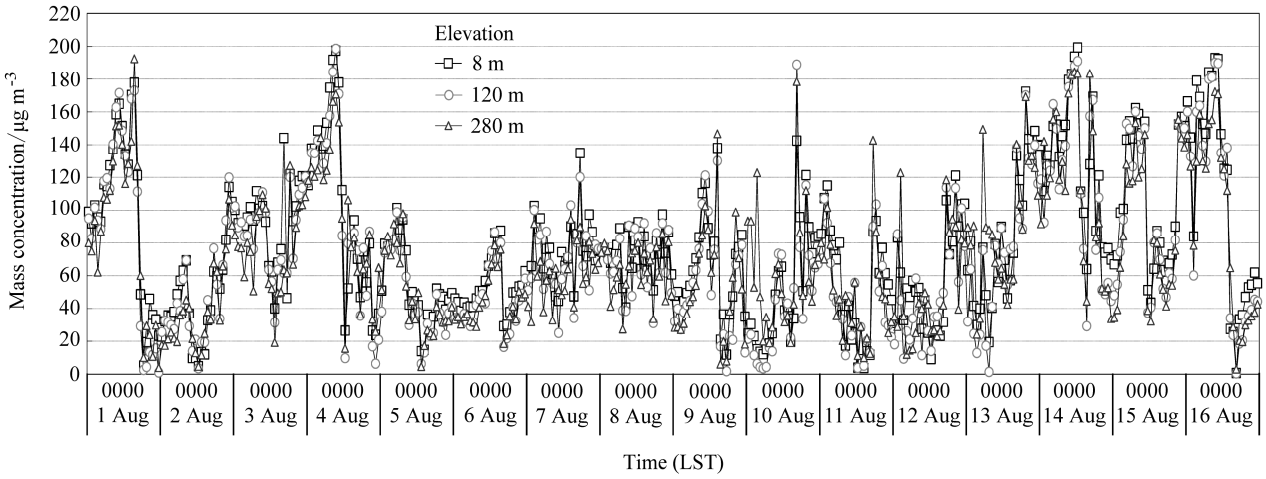

图 2 2009 年 8 月 1～16 日北京城区 PM2.5 质量浓度的时间序列（Sun et al., 2013）

Fig. 2 Time series of the PM2.5 mass concentration over the Beijing urban area during 1－16 Aug 2009 (Sun et al., 2013)

表 2 北京市不同年份 PM2.5 源解析结果

Table 2 Source apportionment of PM2.5 at Beijing urban sites

观测项目	污染源	解析结果				
		春季	夏季	秋季	冬季	年均
2013 年 (Huang et al., 2014) 质量浓度	交通				5.6%	
	燃煤				26.1%	
	生物质燃烧				5.6%	
	餐饮				1.6%	
	扬尘				10.0%	
	二次有机污染物				25.8%	
	二次无机污染物				25.3%	
2012～2013 年（北京市环保局）质量浓度	机动车					31.1%
	燃煤					22.4%
	工业生产					18.1%
	扬尘					14.3%
	其他					14.1%
2011 年 (Liu et al., 2014) 数浓度	本地交通源		19.2%			
	外地交通源		28.7%			
	化石燃料燃烧		9.4%			
	生物质燃烧		20.3%			
	二次硝酸盐		4.2%			
	二次硫酸盐+二次有机气溶胶		6.2%			
	积聚态气溶胶		9.0%			
	扬尘		2.9%			
2010 年 (Yu et al., 2013) 质量浓度	二次硫酸盐	22.0%	39.8%	28.1%	18.2%	26.6%
	机动车排放	16.9%	17.8%	16.6%	17.5%	17.1%
	土壤尘	19.2%	6.1%	9.9%	5.9%	10.4%
	道路尘	18.3%	12.7%	10.9%	8.7%	12.7%
	生物质燃烧	7.4%	11.8%	12.3%	13.1%	11.2%
	化石燃料燃烧	10.0%	4.5%	16.4%	32.0%	16.0%
	金属冶炼	6.2%	7.3%	5.8%	4.6%	6.0%
2009～2010 年 (Zhang et al., 2013) 质量浓度	土壤尘	23%	3%	18%	16%	15%
	燃煤	5%	1%	7%	57%	18%
	生物质燃烧	19%	6%	17%	7%	12%
	交通及垃圾焚烧	5%	4%	4%	2%	4%
	工业排放	14%	32%	42%	12%	25%
	二次污染物	34%	54%	13%	6%	26%

观测项目	污染源	解析结果				
		春季	夏季	秋季	冬季	年均
2004 年 (Song et al., 2007) 质量浓度	燃煤		11.3%		38.1%	
	二次硫酸盐		24.1%		8.6%	
	二次硝酸盐		8.1%		9.8%	
	生物质燃烧		12.8%		15.4%	
	机动车排放		15.0%		8.0%	
	道路尘		8.4%		7.3%	
	其他		20.3%		12.8%	
2001～2006 年 (Wang et al., 2008) 质量浓度	生物质燃烧					11.8%
	燃煤					16.7%
	工业排放					8.82%
	局地沙尘					8.82%
	非局地沙尘					6.86%
	二次硝酸盐					14.7%
	二次硫酸盐					12.7%
	机动车排放					5.88%
	其他					13.7%
2001～2003 年 (Zhang et al., 2007) 质量浓度	机动车					28%
	土壤尘					20%
	工业生产					5%
	生物质燃烧					12%
	燃煤					14%
	二次气溶胶					19%
	其他					2%
2000 年 (Zheng et al., 2005) 质量浓度	采油车和汽油车排放	4.7%	7.9%	7.9%	6.2%	6.5%
	植物碎屑	0.5%	0.8%	1.8%	0.5%	0.9%
	沙尘	36.5%	16.9%	10.9%	14.4%	21.7%
	生物质气溶胶	2.0%		12.6%	9.4%	5.4%
	燃煤	3.1%	2.4%	8.8%	15.5%	6.3%
	香烟烟雾	0.6%	0.8%	2.0%	1.2%	1.1%
	其他有机物	7.0%	13.5%	4.4%	24.5%	10.6%
	二次硫酸盐	11.7%	28.5%	14.1%	13.5%	16.7%
	二次硝酸盐	10.7%	5.5%	16.9%	8.1%	10.7%
	二次铵盐	5.7%	7.4%	6.8%	5.5%	6.4%
	其他	17.5%	16.3%	13.8%	1.2%	13.7%

析而言，不同研究结果显示交通源排放对其贡献从低于 10%至 28%不等 (Zhang et al., 2007; Yu et al., 2013)。此外，北京市环保局综合考虑了各个污染源的一次和二次污染的贡献，其官网公布的 2014 年最新的研究结果显示 PM2.5 的最大贡献因子为机动车（31.1%）。上述的研究解析得到的结果都是 PM2.5 在质量浓度中的贡献，而对于数浓度，Liu et al. (2014) 利用高时间分辨率的气溶胶数浓度监测数据解析发现北京地区夏季交通源的贡献可达 47.9%。关于源解析的结果间的差异可能与采样的地点、时间及分析的方法有关；不同研究在解析时所采用的源谱的不同，也会对最终的源解析结果有较大的影响，因此从中得出的机动车排放贡献率并没有可比性。另外，值得注意的是，上述研究在进行源解析时，并没有考虑机动车排放的气体生成二次气溶胶的贡献。因此，即使上述研究中有的机动车直接排放的 PM2.5 贡献不到 10%，但如果将二次气溶胶的贡献考虑在内，机动车带来的影响是不可

忽视的。总体来说，机动车排放对 PM2.5 的贡献是不容小视的。除了机动车外，燃煤和工业生产也是重要的贡献源，尤其在冬季供暖期间燃煤量大幅提高。另外，在春季土壤尘的贡献也比较多，这与季节性的沙尘暴事件的发生有关。

5 污染物的区域输送及局地大气边界层过程

5.1 后向轨迹分析及污染物的区域输送

北京市环保局通过 2012～2013 年的研究发现北京市全年 PM2.5 来源中区域传输贡献占 28%～36%，本地污染排放贡献占 64%～72%。为了了解 PM2.5 污染源的区域输送特征，图 3 给出了京津冀地区 2009～2010 年四季采样期间的 48 h 后向轨迹分布图 (Zhang et al., 2013)，通过聚类分析发现京津冀地区可能的 PM2.5 区域输送主要是来自 4 个方向：西北（NW）、北（N）、东（E）和南（S）；其中，西北方向的轨迹还可以再细分为远距离输送类型（NW_f）和短距离输送类型（NW_s），分别代表输送气流的平均速度大于或小于等于 7 m s^{-1} 的两种情况。Zhang et al. (2013) 的研究发现全年分别有 44%和 34%的污染物区域输送是来自西北方向和南面，而来自东面和北面的相对较少，分别为 15%和 7%；就季节变化而言，春季的污染物区域输送主要是来自北方（30%）和南方（44%），夏季主要是南方（73%），秋季和冬季都主要是以西北方向的 NW_f 类型输送为主，约为 50%和 88%。另外，还发现冬季仅有 12%的后向轨迹是来自东部，但这些个例对应的北京地区监测到的平均 PM2.5 浓度却高达 209 μg m^{-3}，这说明北京地区冬季的重污染事件与来自东部（大连、沈阳、天津、唐山等）的污染物区域输送有关；而在春季，北京地区的霾污染事件往往与来自南面的污染物输送有关。徐祥德等（2005）研究发现北京大气污染过程观测到的气态颗粒物的排放源可以追溯到北京南部周边地区河北、山东及天津等地，也表现了大气污染的区域输送特征。Tao et al. (2012) 结合卫星遥感和地面观测资料对 2009～2011 年华北平原的区域性霾过程进行分析，发现远距离输送的沙尘和水汽对区域性霾天气的形成也有重要的贡献。

Li et al. (2013) 利用三维区域化学输运模式对 2011 年春季中国东部的两次区域性霾污染过程进行了模拟研究，研究发现大气颗粒物可以在中国东部远距离输运，在合适的天气条件下长江三角洲城市群排放的污染物可以沿华北平原和山东半岛向北输运到辽宁中部，进而形成中国东部区域性的霾污染事件。Li et al. (2013) 的研究还发现上述污染

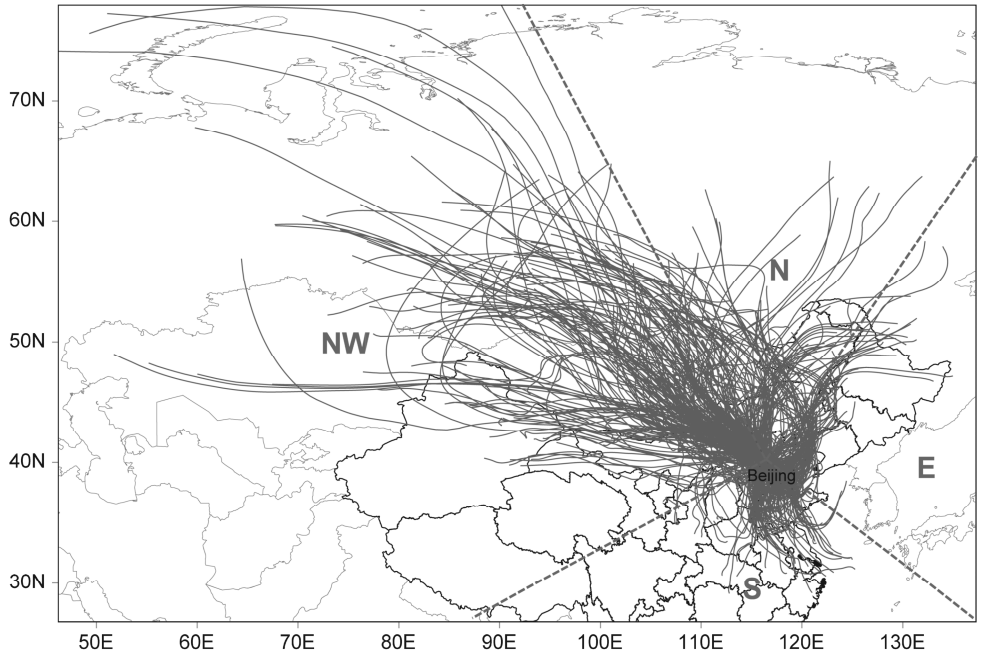

图 3 2009～2010 年京津冀地区 48 h 后向轨迹分布：追踪的起点为（39.99°N，116.30°E），高度为 100 m（Zhang et al., 2013）

Fig. 3 48-h air mass backward trajectories over the Beijing−Tianjin−Hebei area at 100 m elevation during the sampling periods during 2009–2010 with the emission located at (39.99°N, 116.30°E) (Zhang et al., 2013)

物的区域输送主要是发生在对流层的底部 0～1.5 km 的高度范围内，因此区域性霾的形成及维持与大气边界层内的大气运动过程密切相关。王自发等（2014）利用数值模式对 2013 年 1 月我国中东部的持续强霾天气进行研究，发现在静稳天气条件下京津冀地区仍旧存在显著的区域输送，并直接造成京津冀地区 PM2.5 浓度的累积，来自区域外的跨城市群输送对京津冀 PM2.5 浓度贡献为 20%～35%，区域内输送的贡献为 26%～35%，二者之和与局地污染源贡献相当。

综上所述，大量的研究表明，区域输送对京津冀地区霾事件的形成和维持有不可忽视的影响。京津冀地区的大气污染不再局限于一时一地，针对重污染天气的预警以及应急控制需要考虑区域背景下的大气污染排放总量的优化。

5.2 局地大气环流及大气边界层过程

大气污染气体和颗粒物排入大气，其演化过程决定于各种尺度的大气过程，首先是受大气边界层湍流活动的支配。大气边界层是直接受地表影响最强烈的低层大气，其厚度决定了污染物扩散的有效空气体积（张碧辉等，2012），较低的边界层高度和其顶部盘踞的强逆温层阻断上下层流动的关联，有利于近地面大气维持静稳状态和霾天气的出现（张鑫等，2006；Zhao et al., 2013b）。

Liu et al. (2013) 对京津冀地区 2011 年 9 月的一次持续一周的重污染天气过程进行了研究发现在污染天气过程中，京津冀地区被高压系统控制，水平风速较低，而垂直方向上受高压系统的辐散下沉作用影响，不利于大气边界层高度的升高。在污染的开始阶段，整个地区晴朗无云，光化学反应活跃，水平风速较低，污染物开始积累，霾现象出现。霾与大气边界层高度间的反馈作用如图 4 所示，由于霾的作用，达到地面的太阳辐射减弱，造成地表白天的温度降低；这种反馈机制将会降低白天大气边界层的高度，不利于污染物的垂直扩散，为霾污染的持续发展提供有利条件（Liu et al., 2013；Quan et al., 2013；王自发等，2014）。另外，在重污染期间，气溶胶的吸湿增长过程及其表面的异相化学反应过程对污染的加剧和维持也有很大的贡献。

京津冀地区靠山临海，复杂地理环境的热力差异形成的局地大气环流（如山谷风、海陆风和城市热岛环流）会对该地区污染物的空间分布和时间演化起重要作用（徐祥德等，2005；Chen et al., 2009；

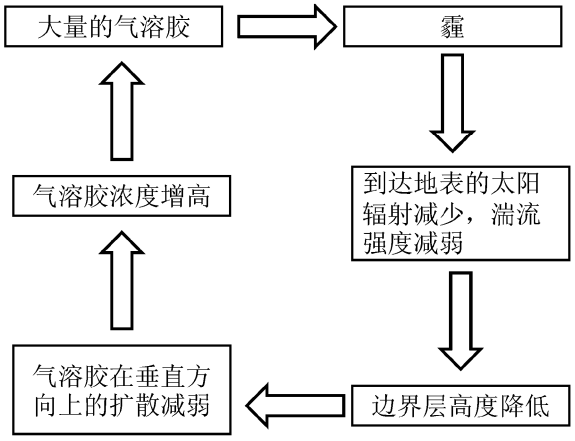

图 4 大气边界层演化过程与气溶胶浓度变化之间的正反馈机制示意图 (Quan et al., 2013)

Fig. 4 Schematic diagram of the positive feedback loop of aerosol accumulation and planetary boundary layer evolution (Quan et al., 2013)

Liu et al.，2009；吴兑等，2014；Miao et al., 2015a，2015b）。京津冀地区的山区与平原之间存在山谷风环流，白天谷风从平原吹向山区，偏南风为主，夜间为偏北风从山区吹向平原。在弱高压系统的控制下，受下沉气流影响，整个区域边界层高度都较低，不利于污染物的垂直输送，容易形成大范围污染；当霾污染出现后，到达地面的太阳辐射减少，有利于近地面逆温层的出现和维持，此外由于山地和平原间的热力差异减小，山谷风环流受抑制，有利于污染物在局地堆积。

Chen et al. (2009) 通过数值模式模拟和风廓线雷达的观测，发现北京地区受到山谷风环流的控制，近地面的南风可以将污染物带到北面的山区，而后山区烟囱效应的作用将污染物抬升并且突破边界层而输送到了自由对流层中，在高空北风背景风场的作用下，污染物被重新输送回城市上空，且该高空污染层有可能作为污染物的临时储库加重次日近地面的污染。Miao et al. (2015b) 通过数值模拟研究发现，若无强天气系统过境，京津冀地区局地的大气环流强度会强烈影响局地污染物的清除和积累；充分发展的谷风环流和海风环流有利于污染物的远距离输送从而减轻局地的污染，相反，在弱的局地大气环流的作用下，污染物只能在有限的空间内循环进而不断积累 (Lo et al., 2006；Wu et al., 2013；Sun et al., 2013)。

对于区域污染，京津冀地区地形的动力学因素也会起到很重要的作用。西侧、北侧的太行山、燕

山和军都山在北京地区形成了“弓状山脉”，会对冷空气活动起到阻挡和削弱作用，容易导致山前暖区的空气流动性较小，形成气流停滞区，污染物和水汽容易聚集从而有利于霾的形成。太行山的阻挡和背风坡气流下沉作用使得沿北京、保定、石家庄、邢台和邯郸一线的污染物不易扩散，形成一条西南—东北走向的高污染带，华北平原偏南气流的弱辐合作用也加重了京津冀地区的污染（任阵海等，2004；苏福庆等，2004a；张志刚等，2004；吴兑等，2014）。

此外，京津冀地区近 20～30 年的快速城市化改变了原有的下垫面特征，进而改变了局部的能量平衡、水循环过程、大气边界层结构、污染物传输和扩散规律（徐祥德和汤绪，2002；徐祥德等, 2005；彭珍和胡非，2006；徐阳阳等，2009；寿亦萱和张大林，2012；窦晶晶等，2014；Miao et al., 2015a, 2015b）。城市密集建筑物群、街区道路纵横、水泥路和高架桥等取代了自然地表，地表粗糙度发生了很大的变化，不仅使得城市风速减小，同时建筑物群和街道可导致湍流加强，也可形成显著的局地“狭管动力效应”(Baik et al., 2009; Miao et al., 2013)，水泥路代替自然绿地形成城市“干岛”、“热岛”环境，改变局地动力、热力结构及其特定的污染动力扩散条件（徐祥德和汤绪，2002）。徐祥德等（2005）研究发现北京市存在多尺度的城市热岛效应，这种城市热岛多尺度热力结构可导致城区气溶胶颗粒物传输及局部滞留、聚集等动力过程，进而使气溶胶颗粒物呈现非均匀分布特征。当天气形势稳定时，北京城区因为热岛效应而形成的辐合场会把郊区大气中的污染物向城区输送，并在城区积累造成比较严重的大气污染（徐祥德和汤绪，2002）。窦晶晶等（2014）通过分析 2008～2012 年北京城区的高密度自动气象站观测数据，发现城市化对近地面的湿度场和风场有显著的影响；尤其是城市下垫面大粗糙度使城区风速的减小及冬季人为水汽的释放形成的“湿岛”效应，都有可能加重供暖期间城区内的霾污染。

综上所述，京津冀地区独特的地理环境条件加上城市群的快速发展，形成了复杂的局地大气环流（徐祥德和汤绪，2002；Liu et al.，2009；Miao et al.，2015a，2015b），会对局地的污染过程产生重大的影响；同时，霾天气的出现也会对局地大气环流的强度产生影响，局地大气环流与霾污染间的相互反馈机制的解析将有助于理清重霾污染的演化机制。另外，大气边界层内气象要素的变化对大气颗粒物的产生和演变有显著的影响，这种大气边界层结构与大气污染变化间的耦合机制对重污染发生具有显著贡献，是重污染演变过程中不可忽视的关键因子（王自发等，2014；Quan et al.，2014）。

6 总结与展望

本文梳理了近年来有关京津冀地区霾的长期变化特征、天气学特征、污染物来源等方面的一些研究成果，发现总体来看 2000 年以后，京津冀地区的霾日数以及北京 PM2.5 质量浓度都呈现下降趋势，但京津冀空气污染的形势依然严峻。近年来京津冀地区的霾污染事件频发可以归结为不利天气条件及污染物大量人为排放共同作用的结果。虽然目前关于京津冀地区霾的成因机制研究已经取得了一些成果，但京津冀地区地理环境独特，区域城市群发展迅速，还有很多问题有待于进一步深入研究和探讨，在这里作一些粗略的展望。

6.1 霾成因机制的相关研究

关于霾成因机制的相关研究，首先要提高源解析结果的准确性，急需建立和完善我国本土的源谱。源谱是排放源中各种化学组分占颗粒物质量浓度的相对丰度。PM2.5 源谱对于建立 PM2.5 中各组分的排放清单、定性识别污染类型、源解析和探究 PM2.5 大气化学反应过程具有重要的意义。我国 PM2.5 源解析的研究中使用国外的源谱比较多，可能会导致一些误差。

另外，在大气物理层面上，霾成因与气象要素有很大的关系，对霾天气过程中大气边界层理化特征特别是垂直结构变化及其与霾过程的交互作用机制进行深入解析，也是理清霾事件的成因和演化机制的关键。大气边界层中热动力物理过程与化学过程的交互作用机制是我国未来几年大气边界层研究的热点问题之一。在大气化学层面上，气态污染物和颗粒物之间存在复杂的相互作用和转化过程仍未被充分认识和阐明，这涉及到气相化学、气溶胶物理化学、液相化学和界面反应等前沿领域。

6.2 PM2.5 对健康的影响

PM2.5 对人体健康的影响，一直是国际上的科学研究热点，也是我国未来 PM2.5 研究的重要领域之一。PM2.5 相对于较粗的颗粒物而言，其在大气

中的悬浮时间更长，更易于进入人体支气管和肺泡，因而对人体健康的危害很大。有研究表明（Brook and Rajagopanlan，2010；曹军骥，2014），人体暴露于高浓度的 PM2.5 会引起肺功能下降、咳嗽、哮喘、呼吸困难等症状，会导致各种呼吸道疾病和心血管疾病，可能会增加患癌率和慢性病患者的死亡率。

6.3 气溶胶对气候的影响

工业革命以来，人类活动排放的大量气溶胶可能会对气候系统产生影响。首先，气溶胶物通过直接吸收和散射短波辐射，影响地气系统的能量收支平衡，此类作用称为气溶胶的直接气候效应（IPCC，2007）。另外，气溶胶还有可能通过改变云滴半径、云光学厚度、云生命周期等对气候产生间接效应。气溶胶的辐射强迫作用及气溶胶与云的相互作用，是目前气候变化研究中一个亟待解决的难题。

6.4 关于空气质量管理与控制的相关研究

2014 年 APEC 会议期间北京市采取了一系列空气质量保障措施，APEC 会期北京市空气质量总体较好，主要大气污染物排放量同比均大幅削减。这一方面是由于会议期间没有发生极端不利的气象条件，但也得益于保障措施带来的本地污染排放大幅减少以及周边联防联控协同减排。然而，APEC 期间的减排措施只是一个超常规的短期应急措施，治理京津冀地区的大气污染、改善空气质量是一个长期、复杂、艰巨的过程（张小曳等，2013）。我国目前在颗粒物污染治理上仍存在很多问题，亟需形成我国的颗粒物污染控制框架体系，为科学有效地治理颗粒物污染提供参考和依据（曹军骥，2014）。

参考文献（References）

Baik J J, Park S B, Kim J J. 2009. Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to a mesoscale model [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 48 (8): 1667–1681.

Brook R D, Rajagopanlan S. 2010. Particulate matter air pollution and atherosclerosis [J]. Current Atherosclerosis Reports, 12 (5): 291–300.

曹军骥. 2014. PM2.5 与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 428pp. Cao Junji. 2014. PM2.5 and the Environment in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 428pp.

Chang D, Song Y, Liu B. 2009. Visibility trends in six megacities in China 1973–2007 [J]. Atmospheric Research, 94 (2): 161–167.

Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, et al. 2005. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961–2000 [J]. Geophys. Res. Lett., 32 (6): L06803.

Che H Z, Zhang X Y, Li Y, et al. 2007. Horizontal visibility trends in China 1981–2005 [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (24): L24706.

Che H Z, Zhang X Y, Li Y, et al. 2009. Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981–2005 [J]. Theor. Appl. Climatol., 97 (3–4): 235–242.

Chen Y, Zhao C, Zhang Q, et al. 2009. Aircraft study of mountain chimney effect of Beijing, China [J]. J. Geophys. Res., 114 (D8): D08306–D08315.

Dan M, Zhuang G S, Li X X, et al. 2004. The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM2.5 in Beijing [J]. Atmos. Environ., 38 (21): 3443–3452.

Deng Z Z, Zhao C S, Ma N, et al. 2011. Size-resolution and bulk activation properties of aerosols in the North China Plain: The importance of aerosols size distribution in the prediction of CNN number concentration [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11: 3835–3846.

Deng J J, Du K, Wang K, et al. 2012. Long-term atmospheric visibility trend in Southeast China, 1973–2010 [J]. Atmos. Environ., 59: 11–21.

Ding Y H, Liu Y J. 2013. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity [J]. Science China: Earth Sciences, 57 (1): 36–46.

董芬, 王喜全, 王自发, 等. 2013. 北京地区大气污染分布的“南北两重天”现象 [J]. 气候与环境研究, 18 (1): 63–70. Dong Fen, Wang Xiquan, Wang Zifa, et al. 2013. A study of the north–south differences of the air quality in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (1): 63–70.

窦晶晶, 王迎春, 苗世光. 2014. 北京城区近地面比湿和风场时空分布特征 [J]. 应用气象学报, 25 (5): 559–569. Dou Jingjing, Wang Yingchun, Miao Shiguang. 2014. Fine spatial and temporal characteristics of humidity and wind in Beijing urban area [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 25 (5): 559–569.

Duan F K, He K B, Ma Y L, et al. 2006. Concentration and chemical characteristics of PM2.5 in Beijing, China: 2001–2002 [J]. Science of the Total Environment, 355 (1–3): 264–275.

Flocas H, Kelessis A, Helmis C, et al. 2009. Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area [J]. Theor. Appl. Climatol., 95 (3–4): 265–277.

符传博, 丹利. 2014. 重污染下我国中东部地区 1960–2010 年霾日数的时空变化特征 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 219–226. Fu Chuanbo, Dan Li. 2014. Spatiotemporal characteristics of haze days under heavy pollution over central and eastern China during 1960–2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 219–226.

Fu G Q, Xu W Y, Rong R F, et al. 2014. The distribution and trends of fog and haze in the North China Plain over the past 30 years [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 14: 16123–16149.

高歌. 2008. 1961–2005 年中国霾日气候特征及其变化分析 [J]. 地理学报, 63 (7): 761–768. Gao Ge. 2008. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961–2005 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 63 (7): 761–768.

高怡, 张美根. 2014. 2013 年 1 月华北地区重雾霾过程及其成因的模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 140–152. Gao Yi, Zhang Meigen. 2014. Numerical simulation of a heavy fog−haze episode over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in

Chinese), 19 (2): 140–152.

韩霄, 张美根. 2014. 2013 年 1 月华北平原重霾成因模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 127–139. Han Xiao, Zhang Meigen. 2014. Model analysis of haze formation over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 127–139.

He K B, Yang F M, Ma Y L, et al. 2001. The characteristics of PM2.5 in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 35: 4959–4970.

贺克斌, 杨复沫, 段凤魁, 等. 2011. 大气颗粒物与区域复合污染 [M]. 北京: 科学出版社, 452pp. He Kebin, Yang Fumo, Duan Fengkui, et al. 2011. Atmospheric Particulates and Regional Complex Air Pollution (in Chinese) [M] . Beijing: Science Press, 452pp.

Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, et al. 2014. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. Nature, 514: 218–222.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 996pp.

Ji D S, Wang Y S, Wang L L, et al. 2012. Analysis of heavy pollution episodes in selected cities of northern China [J]. Atmos. Environ., 50: 338–348.

Kaiser D P. 2000. Decreasing cloudiness over China: An updated analysis examining additional variables [J]. Geophys. Res. Lett., 27 (15): 2193–2196.

Kaiser D P, Qian Y. 2002. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954–1998: Indication of increased haze pollution? [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (21): 38-1–38-4.

Li J, Wang Z F, Huang H L, et al. 2013. Assessing the effects of the trans-boundary aerosol transport between various city clusters on regional haze episodes in spring over East China [J]. Tellus B, 65: 20052.

廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 2014. 北京地区冬夏季持续性雾霾发生的环境气象条件对比分析 [J]. 环境科学, 35 (6): 2031–2044. Liao Xiaonong, Zhang Xiaoling, Wang Yingchun, et al. 2014. Comparative analysis on meteorological condition for persistent haze cases in summer and winter in Beijing [J]. Environment Science (in Chinese), 35 (6): 2031–2044.

Lin M, Tao J, Chan C Y, et al. 2012. Regression analyses between recent air quality and visibility changes in megacities at four haze regions in China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 12: 1049–1061.

Liu S H, Liu Z X, Li J, et al. 2009. Numerical simulation for the coupling effect of local atmospheric circulations over the area of Beijing, Tianjin and Hebei Province [J]. Science in China (Ser. D: Earth Sciences), 52 (3): 382–392.

Liu X G, Li J, Qu Y, et al. 2013. Formation and evolution mechanism of regional haze: A case study in the megacity Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13: 4501–4514.

Liu Z R, Hu B, Liu Q, et al. 2014. Source apportionment of urban fine particle number concentration during summertime in Beijing [J]. Atmos. Environ., 96: 359–369.

Lo J C F, Lau A K H, Fung J C H, et al. 2006. Investigation of enhanced cross−city transport and trapping of air pollutants by coastal and urban land−sea breeze circulations [J]. J. Geophys. Res., 111: D14104.

孟燕军, 程丛兰. 2002. 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析 [J]. 气象, 28 (4): 42–47. Meng Yanjun, Cheng Conglan. 2002. Impact of surface synoptic situations on air pollution in Beijing area [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 28 (4): 42–47.

Miao Y C, Liu S H, Chen B C, et al. 2013. Simulating urban flow and dispersion in Beijing by coupling a CFD model with the WRF model [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 30 (6): 1663−1678.

Miao Y C, Liu S H, Zheng Y J, et al. 2015a. Numerical study the effects of topography and urbanization on the local atmospheric circulations over the Beijing−Tianjin−Hebei, China [J]. Advances in Meteorology, 2015: Article ID 397070, doi: 10.1155/2015/397070.

Miao Y C, Liu S H, Zheng Y J, et al. 2015b. Numerical study of the effects of local atmospheric circulations on a pollution event over Beijing−Tianjin−Hebei, China [J]. J. Environ. Sci., 30: 9–20.

彭珍, 胡非. 2006. 北京城市化进程对边界层风场结构影响的研究 [J]. 地球物理学报, 49 (6): 1608–1615. Peng Zhen, Hu Fei. 2006. A study of the influence of urbanization of Beijing on the boundary wind structure [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (6): 1608–1615.

Qian Y, Leung L R, Chan S J, et al. 2003. Regional climate effects of aerosols over China: Modeling and observation [J]. Tellus B, 55 (4): 914–634.

Qian Y, Kaiser D P, Leung L R, et al. 2006. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000 [J]. Geophys. Res. Lett., 33 (1): L01812.

Quan J N, Zhang Q, He H, et al. 2011. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11: 8205–8214.

Quan J N, Gao Y, Zhang Q, et al. 2013. Evolution of planetary boundary layer under different weather condition, and its impact on aerosol concentrations [J]. Particuology, 11 (1): 34–40.

Quan J N, Tie X X, Zhang Q, et al. 2014. Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012–2013 winter in Beijing, China [J]. Atmos. Envrion., 88: 83–89.

任阵海, 万本太, 虞统, 等. 2004. 不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送 [J]. 环境科学研究, 17 (1): 7–13. Ren Zhenhai, Wan Bentai, Yu Tong, et al. 2004. Influence of weather system of different scales on pollution boundary layer and the transport in horizontal current field [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (1): 7–13.

San Martini F M, Hasenkopf C A, Roberts D C. 2015. Statistical analysis of PM2.5 observations from diplomatic facilities in China [J]. Atmos. Environ., 110: 174–185.

寿亦萱, 张大林. 2012. 城市热岛效应的研究进展与展望 [J]. 气象学报, 70 (3): 338–353. Shou Yixuan, Zhang Dalin. 2012. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70 (3): 338–353.

Song Y, Tang X Y, Xie S D, et al. 2007. Source apportionment of PM2.5 in Beijing in 2004 [J]. Journal of Hazardous Materials, 146 (1–2): 124–130.

苏福庆, 高庆先, 张志刚, 等. 2004a. 北京边界层外来污染物输送通道 [J]. 环境科学研究, 17 (1): 26–40. Su Fuqing, Gao Qingxian, Zhang Zhigang, et al. 2004a. Transport pathways of pollutants from outside in atmospheric boundary layer [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (1): 26–40.

苏福庆, 杨明珍, 钟继红, 等. 2004b. 华北地区天气型对区域大气污染的影响 [J]. 环境科学研究, 17 (3): 16–20. Su Fuqing, Yang Mingzhen, Zhong Jihong, et al. 2004b. The Effects of synoptic type on regional atmospheric contamination in North China [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (3): 16–20.

Sun B, Groisman P Y, Bradley R S, et al. 2000. Temporal changes in the observed relationship between cloud cover and surface air temperature [J]. J. Climate, 13: 4341–4357.

孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 2013. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征 [J]. 气候与环境研究, 18 (3): 397–406. Sun Yu, Ma Zhenfeng, Niu Tao, et al. 2013. Characteristics of climate change with respect to fog days and haze days in China in the past 40 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 397–406.

Sun Y, Song T, Tang G Q, et al. 2013. The vertical distribution of PM2.5 and boundary-layer structure during summer haze in Beijing [J]. Atmos. Environ., 74: 413–421.

Sun Y L, Zhuang G S, Wang Y, et al. 2004. The air-borne particulate pollution in Beijing—Concentration, composition, distribution and sources [J]. Atmos. Environ., 38: 5991–6004.

Tao M H, Chen L F, Su L, et al. 2012. Satellite observation of regional haze pollution over the North China Plain [J]. J. Geophys. Res., 117 (D12): D12203.

Vukovich F M. 1995. Regional scale boundary layer ozone variations in the eastern United States and their association with meteorological variations [J]. Atmos. Environ., 29 (17): 2259–2273.

Wang H L, Zhuang Y H, Wang Y, et al. 2008. Long-term monitoring and source apportionment of PM2.5 / PM10 in Beijing, China [J]. J. Environ. Sci., 20: 1323–1327.

王莉莉, 王跃思, 王迎红, 等. 2010. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响 [J]. 中国环境科学, 30 (7): 924–930. Wang Lili, Wang Yuesi, Wang Yinghong, et al. Relationship between different synoptic weather patterns and concentrations of atmospheric pollutants in Beijing during summer and autumn [J]. China Environment Science (in Chinese), 30 (7): 924–930.

Wang S X, Xing J, Chatani S, et al. 2011. Verification of anthropogenic emissions of China by satellite and ground observations [J]. Atmos. Environ., 45 (35): 6347–6358.

王喜全, 齐彦斌, 王自发, 等. 2007. 造成北京 PM10 重污染的二类典型天气形势 [J]. 气候与环境研究, 12 (1): 81–86. Wang Xiquan, Qi Yanbin, Wang Zifa, et al. 2007. The influence of synoptic pattern on PM10 heavy air pollution in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (1): 81–86.

王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 2014. 北京冬季 PM2.5 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 173–184. Wang Yue, Wang Lili, Zhao Guangna, et al. 2014. Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of PM2.5 heavy pollutions in Beijing during winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 173–184.

王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2014. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (1): 15–26. Wang Yuesi, Yao Li, Wang Lili, et al. 2014. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. Science China: Earth Sciences, 57 (1): 14–25.

王自发, 李杰, 王哲, 等. 2014. 2013 年 1 月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (1): 3–14. Wang Zifa, Li Jie, Wang Zhe, et al. 2014. Modeling study of regional severe hazes over Mid-Eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevent and control [J]. Science China: Earth Sciences, 57 (1): 3–13.

吴兑. 2006. 再论都市霾与雾的区别 [J]. 气象, 32 (4): 9–15. Wu Dui. 2006. More discussions on the differences between haze and fog in city [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (4): 9–15.

Wu D, Bi X, Deng X, et al. 2007. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pearl River Delta [J]. Acta Meteorologica Sinica, 21 (2): 215–223.

吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 2010. 1951–2005 年中国大陆霾的时空变化 [J]. 气象学报, 68 (5): 680–688. Wu Dui, Wu Xiaojing, Li Fei, et al. 2010. Temporal and spatial variation of haze during 1951–2005 in Chinese mainland [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (5): 680–688.

吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 2014. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件 [J]. 环境科学学报, 34 (1): 1–11. Wu Dui, Liao Biting, Wu Meng, et al. 2014. The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 34 (1): 1–11.

Wu J, Fu C B, Zhang L Y, et al. 2012. Trends of visibility on sunny days in China in the recent 50 years [J]. Atmos. Environ., 55: 339–346.

Wu M, Wu D, Fan Q, et al. 2013. Observational studies of the meteorological characteristics associated with poor air quality over the Pearl River Delta in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13: 10755–10766.

谢付莹, 王自发, 王喜全. 2010. 2008 年奥运会期间北京地区 PM10 污染天气形势和气象条件特征研究 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 584–594. Xie Fuying, Wang Zifa, Wang Xiquan. 2010. A study of the characteristics of the synoptic situations and meteorological conditions in PM10 air pollution episodes of Beijing during the 2008 Olympic Games period [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 584–594.

徐祥德, 汤绪. 2002. 城市化环境气象学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 284pp. Xu Xiangde, Tang Xu. 2002. Introduction of Urbanized Environmental Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 284pp.

徐祥德, 周秀骥, 施晓晖. 2005. 城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征 [J]. 中国科学（D 辑: 地球科学）, 35 (S1): 1–19. Xu Xiangde, Zhou Xiuji, Shi Xiaohui. 2005. The spatial structure and scale of the air pollution source's impact of the city cluster over Beijing [J]. Science in China (Ser. D: Earth Sciences) (in Chinese), 35 (S1): 1–19.

徐阳阳, 刘树华, 胡非, 等. 2009. 北京城市化发展对大气边界层特性的影响 [J]. 大气科学, 33 (4): 859–867. Xu Yangyang, Liu Shuhua, Hu Fei, et al. 2009. Influence of Beijing urbanization on characteristics of atmospheric boundary layer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 859–867.

Yu L D, Wang G F, Zhang R J, et al. 2013. Characterization and source apportionment of PM2.5 in an urban environment in Beijing [J]. Aerosol and Air Quality Research, 13: 574–583.

张碧辉, 刘树华, Liu H P, 等. 2012. MYJ 和 YSU 方案对 WRF 边界层气

象要素模拟的影响 [J]. 地球物理学报, 55 (7): 2239–2248. Zhang Bihui, Liu Shuhua, Liu H P, et al. 2012. The effect of MYJ and YSU schemes on the simulation of boundary layer meteorological factors of WRF [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55 (7): 2239–2248.

Zhang Q, Meng J, Quan J, et al. 2012a. Impact of aerosol composition on cloud condensation nuclei activity [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 12: 3783–3790.

Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. 2012b. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 12: 779–799.

张人禾, 李强, 张若楠. 2014. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (1): 27–36. Zhang Renhe, Li Qiang, Zhang Ruonan. 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. Science China: Earth Sciences, 57 (1): 26–35.

Zhang R J, Jing J, Tao J, et al. 2013. Chemical characterization and source apportionment of PM2.5 in Beijing: Seasonal perspective [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13: 7053–7074.

Zhang W, Guo J H, Sun Y L, et al. 2007. Source apportionment for urban PM10 and PM2.5 in the Beijing area [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (5): 608–615.

张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 2013. 我国雾—霾成因及其治理的思考 [J]. 科学通报, 58 (13): 1178–1187. Zhang Xiaoye, Sun Junying, Wang Yaqiang, et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 58 (13): 1178–1187.

张鑫, 蔡旭晖, 柴发合. 2006. 北京市秋季大气边界层结构与特征分析 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 42 (2): 220–225. Zhang Xin, Cai Xuhui, Chai Fahe. 2006. The analysis of the autumn atmospheric layer structure and characteristics of Beijing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 42 (2): 220–225.

张志刚, 高庆先, 韩雪琴, 等. 2004. 中国华北区域城市间污染物输送研究 [J]. 环境科学研究, 17 (1): 14–20. Zhang Zhigang, Gao Qingxian, Han Xueqin, et al. 2004. The study of pollutant transport between the cities in North China [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (1): 14–20.

Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, et al. 2011. Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Research, 101 (3): 711–718.

赵普生, 张小玲, 徐晓峰. 2011. 利用日均及 14 时气象数据进行霾日判定的比较分析 [J]. 环境科学学报, 31 (4): 704–708. Zhao Pusheng, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng. 2011. Comparison between two methods of distinguishing haze days with daily mean and 14 o'clock meteorological data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 31 (4): 704–708.

Zhao X J, Zhang X L, Xu X F, et al. 2009. Seasonal and diurnal variations of ambient PM2.5 concentration in urban and rural environments in Beijing [J]. Atmos. Environ., 43 (18): 2893–2900.

Zhao P S, Dong F, He D, et al. 2013a. Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM2.5 in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13: 4631–4644.

Zhao X J, Zhao P S, Xu J, et al. 2013b. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13: 5685–8696.

Zheng M, Salmon L G, Schauer J J, et al. 2005. Seasonal trends in PM2.5 source contributions in Beijing, China [J]. Atmos. Environ., 39 (22): 3967–3976.

中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 151pp. China Meteorological Administration. 2003. Standard of the Surface Observation about Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 151pp.

Zhou J M, Zhang R J, Cao J J, et al. 2012. Carbonaceous and ionic components of atmospheric fine particles in Beijing and their impact on atmospheric visibility [J]. Aerosol and Air Quality Research, 12: 492–502.

周宁芳, 李峰, 饶晓琴, 等. 2008. 2006 年冬半年我国霾天气特征分析 [J]. 气象, 34 (6): 81–88. Zhou Ningfang, Li Feng, Rao Xiaoqin, et al. 2008. Study on haze weather in China during winter-time of 2006 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (6): 81–88.