

# 北京一次严重雾霾过程气溶胶光学特性与气象条件

王 朔<sup>1,2</sup>,赵卫雄<sup>1</sup>,徐学哲<sup>1,2</sup>,张启磊<sup>1,2</sup>,钱晓东<sup>1,2</sup>,方 波<sup>1</sup>,王 静<sup>4</sup>,张为俊<sup>1,3\*</sup> (1.中国科学院安徽光学精密机械研究所,安徽 合肥 230031; 2.中国科学技术大学研究生院,安徽 合肥 230026; 3.中国科学技术大学环境科学与光电技术学院,安徽 合肥 230031; 4.南京信息工程大学大气物理学院,江苏 南京 210044)

**摘要:** 对北京地区 2013 年 10 月 2~7 日一次严重雾霾过程中的气溶胶光学特性开展研究,分析了气象条件对雾霾过程的影响,并结合 HYSPLIT 模型分析污染物的来源.结果表明,在污染天气中气溶胶光学厚度、Ångström 波长指数、细模态体积尺度谱峰值浓度远高于清洁天.10 月 5 日雾霾最为严重,440nm 波长处气溶胶光学厚度高达 3.89.在雾霾发生前后,单次散射反照率日均值随波长增大而增大,而在 10 月 5 日,单次散射反照率值随波长增加先增大后减小,在 675nm 波长处达到最大值 0.965.雾霾过程中大气气溶胶以强散射型细粒子为主,人为因素贡献较大,且受气象条件影响明显.

**关键词:** 气溶胶; 雾霾; 光学特性; 气象条件

**中图分类号:** X513 **文献标识码:** A **文献编号:** 1000-6923(2016)05-1305-08

**Analysis of aerosol optical properties and meteorological parameters in a severe haze-fog episode in Beijing.** WANG Shuo<sup>1,2</sup>, ZHAO Wei-xiong<sup>1</sup>, XU Xue-zhe<sup>1,2</sup>, ZHANG Qi-lei<sup>1,2</sup>, QIAN Xiao-dong<sup>1,2</sup>, FANG Bo<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>4</sup>, ZHANG Wei-jun<sup>1,3\*</sup> (1.Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2.Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3.School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 4.School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China). *China Environmental Science*, 2016,36(5): 1305~1312

**Abstract:** Results of aerosol optical properties research during a severe haze-fog episode from 2 October to 7 October 2013 in Beijing were studied. The meteorological effects on the haze-fog process were investigated, and the pollution sources were analyzed with the Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model. The values of aerosol optical thickness (AOT), Ångström wavelength exponent (AE), and the peak of aerosol volume size concentration in fine mode in polluted days were much higher than that of clean days. The daily average single scattering albedo (SSA) increased with the increasing of wavelength in the earlier and later period of the intensive haze-fog episode. On October 5, the most serious haze process was happened and the AOT of wavelength 440nm was raised as much as 3.89. The SSA firstly increased and then decreased with the increasing of wavelength. The maximum SSA value was 0.965 at the wavelength of 675nm. During the haze-fog episode, fine particles with strong scattering characteristics were dominated which was mainly contributed by human factors, and was significantly influenced by meteorological parameters.

**Key words:** aerosol; haze-fog process; optical properties; meteorological parameters

大气气溶胶是悬浮在大气中的固态和液态颗粒物的总称,粒子的空气动力学直径多在 0.001~100 $\mu\text{m}$  之间.气溶胶的来源可分为自然源和人为源,自然源主要有土壤、海洋、火山和生物圈等,人为源主要包括生物质燃烧和化石燃料的燃烧等过程<sup>[1]</sup>.20 世纪以来,随着社会工业化进程的空前快速发展,我国大部分地区都面临着

严重的大气污染所引起的能见度下降,这是因为大气中较高浓度气溶胶对太阳辐射的强吸收和散射作用,Horvath<sup>[2]</sup>研究表明,气溶胶粒子对大气

收稿日期:2015-09-30

基金项目:国家自然科学基金(41330424);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406039);安徽省杰出青年科学基金(1508085J03)

\* 责任作者, 研究员, wjzhang@aiofm.ac.cn

光学性质的影响可达 99%;由于不同类型、不同粒径气溶胶的吸收和散射能力在不同波长处有很大差别<sup>[3-4]</sup>,在不同地区不同天气条件下气溶胶光学特性变化情况也十分复杂<sup>[5-8]</sup>.

目前气溶胶光学特性的研究内容主要包括光学厚度(AOT)、Ångström 波长指数(AE)、单次散射反照率(SSA),复折射指数(CRI)等.近年来我国气溶胶光学特性方面的研究取得了很大进展.段婧等<sup>[7]</sup>对长江三角洲地区大气气溶胶 AOT 的分布特征和季节变化特点的分析结果表明,山区城市群 AOT 在春季达到峰值,而平原地区城市群 AOT 峰值出现在夏季,并且山区城市群的气溶胶光学厚度增加速度要小于平原城市群;Che 等<sup>[9]</sup>人对中国北部一次持续的区域污染过程研究发现,农村、郊区和城市站点的气溶胶光学属性和辐射特性的变化趋势一致,但数值有明显差别;而李霞等<sup>[10]</sup>对沙尘天气下气溶胶光学特性的研究发现,沙尘天气 AE 值接近于 0,以粗粒子为主,这与于兴娜等<sup>[8]</sup>在北京雾霾天气下气溶胶光学特性研究结果有明显不同;许万智<sup>[11]</sup>在北京观测期间发现人为活动对单次散射反照率的影响有明显的日变化,且 SSA 受相对湿度的影响较大;此外,徐政<sup>[12]</sup>研究发现济南霾天和非霾天条件下 SSA 日变化相似峰型,均呈现中午高、早晚低的变化趋势,但霾天 SSA 的值高于非霾天.综上所述,虽然气溶胶光学特性在不同地区有一些相似特征,但受污染源和气象条件的影响,即使在同一地区,不同污染过程中气溶胶光学特性也有很大变化.

雾霾事件的发生,除内在的大气污染源排放因素外,很大程度上依赖于气象条件<sup>[13]</sup>,这是因为大气对污染物的稀释扩散能力受气象条件影响非常明显,在不同气象条件下,同一污染源的排放所造成地面污染物浓度可有几十倍甚至上百倍的差别<sup>[14]</sup>.因此,研究气象条件对雾霾天气的影响,从而科学地预测、动态调控污染物排放以治理雾霾天气,是一项十分重要课题<sup>[15]</sup>.

本文利用 AERONET 提供的气溶胶光学特性观测数据和反演资料,分析北京地区一次严重雾霾过程中气溶胶体积尺度谱分布和光学厚度、

Ångström 波长指数、单次散射反照率、复折射指数等光学特征参量的变化规律,以及气象因子(风向、风速、相对湿度)和天气形势对雾霾过程的影响,并结合 HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model)模型分析雾霾前中后期气团后向轨迹.

## 1 方法

### 1.1 数据来源

AERONET(Aerosol Robotic Network)是由美国国家宇航局(NASA)建立并发展起来的,在全球范围的自动观测站点超过 600 个,且各站点的观测数据可以从 AERONET 网站下载(<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).AERONET 采用的观测仪器为法国 CIMEL 公司生产 CE318 系列全自动太阳光度计<sup>[16]</sup>,该仪器在可见光至近红外设有 8 个观测通道,仪器的视场角为 1.2°,太阳跟踪精度为 0.1°,它不仅能自动跟踪太阳做太阳直射测量,也可进行太阳主平面扫描、太阳平纬圈天空扫描,AERONET 提供的观测数据可靠性较高,AOT 的观测误差为 0.01~0.02,反演参数 SSA 的误差约为 0.03,复折射指数实部和虚部的误差分别为 0.04 和 0.4<sup>[17]</sup>.观测时间一般为每天 08:00~17:00,平均 10~15min 1 组数据.本文中气溶胶光学特性研究采用 AERONET 提供的气溶胶观测数据(如 AOT、AE 等)以及反演数据(如体积尺度谱分布、SSA、CRI 等).

此外,地面常规气象数据来源于 <http://www.wunderground.com>,每半小时记录一次天气状况;海平面气压为精度为 1°×1°的格点数据,来源于 NCEP/NCAR FNL 再分析资料.污染物扩散传输模式采用 HYSPLIT-4(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>),它是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的空间资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型,该模型具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程 and 不同类型污染物排放源的较为完整的输送、扩散和沉降模式,已被广泛地应用于多种污染物

在各个地区的传输和扩散的研究中<sup>[18]</sup>,本次研究中输入数据为 NCEP 的 GDAS 资料( $1^\circ \times 1^\circ$ ).

## 1.2 站点介绍

研究选取北京为对象,观测站点设于中国科学院大气物理研究所楼顶( $39.977^\circ\text{N}$ , $116.381^\circ\text{E}$ ),周围主要以交通污染为主.北京位于华北平原的西北侧,背靠太行山脉和燕山山脉,受到特殊地形的影响,在弱流场情况下,北京地区会出现空气滞留现象,导致污染物难以消散.北京秋冬季受到人为气溶胶影响较为明显<sup>[19]</sup>,在低气压、静稳的气象条件下,偏南风输送大量外来污染物进入北京地区,之后,随着风力减小,空气流动性变小,大气扩散能力很弱,北京地区内污染物不断积累,最终压在城市上空,可形成严重污染层<sup>[20-23]</sup>.

2013 年 10 月 2~7 日北京出现该年最为严重的雾霾天气,在此之前北京有一次强雾霾过程,10 月 1 日的中雨对雾霾天气的改善有了很大贡献,10 月 2、3 日天气晴好,10 月 4 日雾霾开始形成,能见度明显下降,傍晚不足 2km,5、6 日早晚多为汽雾,中午多雾霾现象,严重时能见度不足 200m,7 日日出后天气转晴,能见度提高,雾霾过程结束.本文选取该次雾霾天气过程为研究对象,分析气溶胶的光学特性,以及气象条件对雾霾过程的影响.

## 2 结果与讨论

### 2.1 气溶胶光学特性

**2.1.1 日平均体积尺度谱分布** 图 1 为 10 月 2~7 日由 AERONET 观测数据反演得到的气溶胶粒子体积尺度谱分布,可以看出,雾霾过程期间气溶胶粒子体积尺度谱呈明显的双峰分布,10 月 2 日粗细模态的峰值均处于较低值,Guo 等<sup>[24]</sup>基于在线的粒谱和成分测量发现,该日有大量的新粒子生成,之后随着粒子的吸湿和碰并增长,粗细模态峰值均有不同程度增加;4 日粗细模态粒子体积浓度均有所增加,峰值浓度相当,细粒子体积尺度谱分布峰值对应的粒径增长到  $0.25\mu\text{m}$ ;5 日为雾霾最为严重时期,气溶胶粒子细模态峰值浓度明显增大,超过  $0.34\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ,粗模态峰值浓度相比于 4 日无明显变化,但粗细粒子尺度谱分布

峰值所对应半径均变小;7 日雾霾天气基本消失,天气晴好,气溶胶粒子体积浓度峰值明显下降,细模态体积浓度峰值下降到  $0.07\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$  以下.说明此次雾霾过程中的气溶胶粒子以细粒子为主,这与沙尘天气过程气溶胶粒子体积尺度谱分布有明显不同<sup>[25]</sup>.

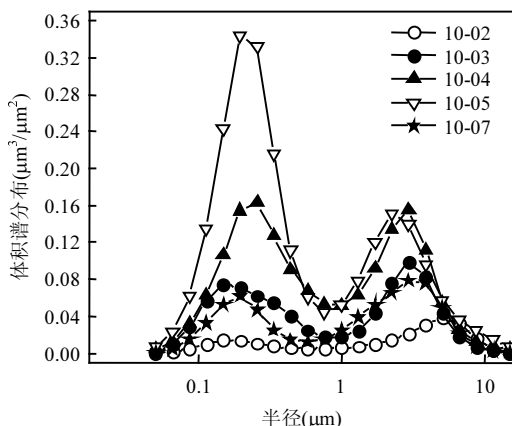


图 1 气溶胶粒子体积谱分布日平均变化

Fig.1 The daily average variation of aerosol volume size distribution

**2.1.2 光学厚度和 Ångström 波长指数的日变化** 气溶胶光学厚度是表征气溶胶粒子消光性质的一个重要参数,表示垂直大气柱气溶胶对太阳辐射衰减的能力,是评价大气污染程度的一个重要指标;Ångström 指数是表征气溶胶粒子大小的一个光学参数,其值越小说明粒子越大,反之则说明气溶胶粒子越小.图 2A 为 AERONET 观测到的气溶胶光学厚度(440nm)与 Ångström 波长指数(440~870nm)的日变化规律,可以看出,两者整体变化较为一致,均有先增大后减小的趋势,这主要是因为该次污染过程中的气溶胶粒子以细粒子为主,气溶胶的细粒子模态增大可使得光学厚度与 Ångström 波长指数出现较高值<sup>[26]</sup>.10 月 2 日天气晴好,全天光学厚度值低于 0.4,Ångström 波长指数明显增加;10 月 3 日,气溶胶粒子由核膜态( $<0.05\mu\text{m}$ )向积聚模态( $0.05\sim 2\mu\text{m}$ )过渡<sup>[24]</sup>,粒子数浓度减少,气溶胶光学厚度整体呈上升趋势,但其值低于 1.5;Ångström 波长指数早上呈上升趋势,10:00 之后变化较为平稳.10 月 4 日雾霾天气

过程开始发生,AOT 值有明显增大,全天光学厚度值在 1.8 以上,15:00 左右有最大值,Ångström 波长指数上午呈上升趋势,午后出现峰值.10 月 5、6 日雾霾最为严重,5 日全天光学厚度值高于 2.9,上午光学厚度有最大值,达 3.89,且 AOT 与 AE 有明显相反的变化趋势.10 月 7 日上午 9:00 前有雾霾,之后天气转晴,全天 AOT 小于 0.9.概括而言,雾霾天气下,气溶胶光学厚度和 Ångström 波长指数有较大值,且有明显的日变化特征.

图 2B 为 AERONET 反演得到的雾霾过程期间粗细粒子在 441nm 处的消光光学厚度,可以明显看出,此次污染事件气溶胶细粒子消光贡献远高于粗粒子,且细粒子消光贡献波动较为明显,呈现先增大后减小趋势,与光学厚度变化较为一致,而粗粒子光学厚度一直处于较低值,且无明显变化.

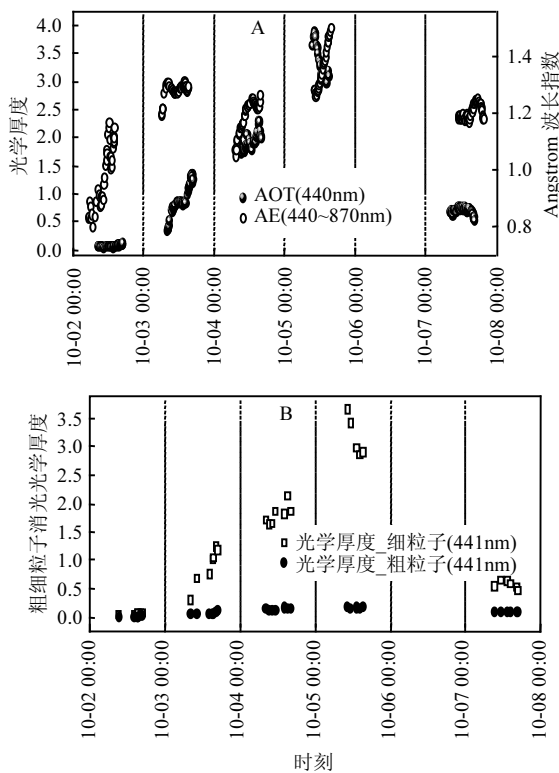


图 2 气溶胶光学厚度和 Ångström 波长指数日变化  
Fig.2 Daily variation of aerosol optical thickness and Ångström wavelength exponent  
A.气溶胶光学厚度(440nm)、Ångström 波长指数(440~870nm);B.粗  
细粒子消光光学厚度(441nm)日变化

2.1.3 单次散射反照率日变化 单次散射反照率反映了气溶胶粒子散射在总消光中所占比例,决定了气溶胶辐射强迫的正、负效应,其微小变化会对辐射强迫值产生很大影响,是评估气溶胶气候效应的关键参数之一.Dubovik 等<sup>[27-28]</sup>的研究表明,单次散射反照率的光谱特性不仅决定于气溶胶的类别,还和气溶胶的尺度大小有关,由图 3 可见,10 月 2 日由于光学厚度值低于 0.4,无法反演出 SSA 值.在雾霾发生前后(3 日和 7 日)以及雾霾开始发生(4 日),SSA 值随波长增大而增大,而在雾霾最为严重时(5 日),SSA 在 675nm 处有最大值 0.965,而后随波长递减,这与北京地区沙尘天气下气溶胶单次散射反照率的光谱特性不同<sup>[29]</sup>,主要是因为此次雾霾过程中的污染物主要以细粒子为主,气溶胶粒子在波长与气溶胶粒子尺寸相当时,散射能力最强.10 月 4 和 5 日在 440nm 处日平均 SSA 值分别为 0.946 和 0.952,高于南京典型雾霾期间的最大值 0.929<sup>[30]</sup>,远高于于兴娜等<sup>[8]</sup>选取的 2002~2008 年北京雾霾天气下气溶胶单次散射反照率的平均值(0.91),进一步说明此次雾霾过程期间污染物主要为强散射型气溶胶<sup>[31]</sup>.同时,Guo 等<sup>[24]</sup>成分测量结果表明,在雾霾较为严重的 10 月 5、6 日,有机物、硝酸盐、铵盐、硫酸盐等散射性成分有明显增多,黑碳等吸收性气溶胶所占比重较少;且在由清洁天气到污染天气转化过程中气溶胶粒子伴随有明显的稀释增长,从而导致了此次雾霾过程中较高的 SSA 值.

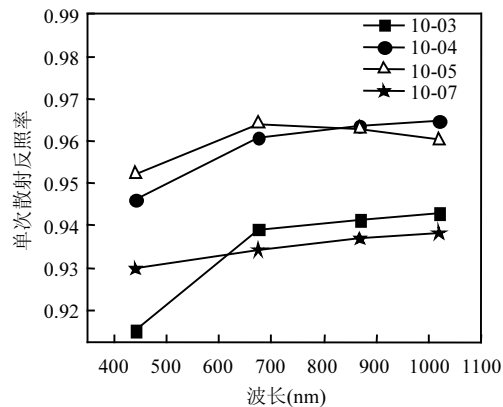


图 3 不同波长处单次散射反照率日均值变化  
Fig.3 Variation of daily average single scattering albedo in different wavelength

**2.1.4 复折射指数日均值变化** 气溶胶复折射指数与气溶胶的粒子组成、尺度大小以及形状有密切关系,是气溶胶最基本的光学参数,其实部和虚部分别代表气溶胶散射和吸收能力相对大小,实部值越大,虚部值越小,表明其散射能力越强,反之,吸收能力越强<sup>[32-34]</sup>。从图 4A 可以看出,整体上复折射指数实部值随波长增大有增加趋势,但在 870nm 处具有明显降低,与王静等<sup>[30]</sup>对南京一次雾霾的研究结果有所不同,这是因为两地气溶胶类别、尺度大小有很大区别。在王静等研究的雾霾过程中有粗模态粒子的导入和人为产生细模态气溶胶粒子的生成,使得实部值在雾霾爆发的 2d 呈现不同的变化;而在本次雾霾过程中主要以二次气溶胶为主,细模态粒子所占比重较大,峰值浓度约为粗粒子的 2.5 倍。在雾霾发生时复折射指数虚部值均明显降低(图 4B),在雾霾结束后开始升高,这主要是因为北京地区在 2013 年 10 月 2 日有大量新粒子生成,在雾霾发生过程中新粒子吸湿增长,同时有大量硫酸盐、硝酸盐气溶胶生成,使得气溶胶散射性增强<sup>[24]</sup>。

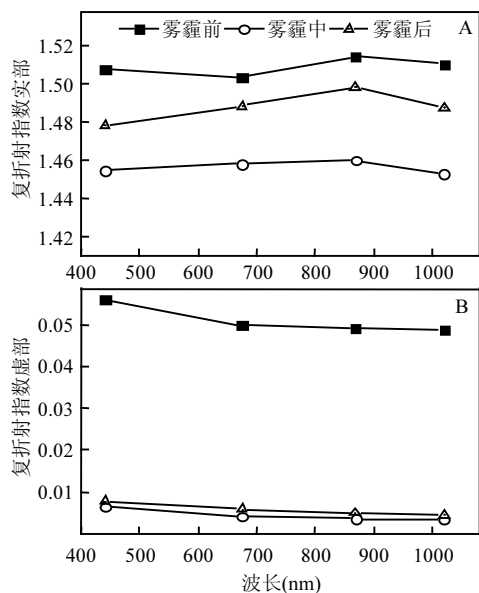


图 4 雾霾前中后期不同波长处复折射指数日均值对比  
Fig.4 Comparison of complex reflection index in different wavelength from the formation to removal of the haze-fog episode

A. 复折射指数实部; B. 复折射指数虚部; 雾霾前(10月2~3日)、雾霾中(10月4~6日)和雾霾后(10月7日)

## 2.2 气象条件对雾霾过程的影响

气象要素和天气形势为雾霾事件的发生提供一定条件,又是雾霾过程维持和发展的决定性因素,就单站点而言,气象条件如相对湿度、风速、风向等与雾霾过程有着明显的相关性<sup>[35]</sup>,张人禾等<sup>[13]</sup>指出,雾霾天气区域内的表面风速及其上空对流层中低层的水平风垂直切变对雾霾天气过程具有动力作用;对流层中低层的层结不稳定性以及近地面层的逆温状况和温度露点差对雾霾天气的演变可以产生热力影响。本文从气象要素和北京地区天气形势的演变分析此次雾霾事件的形成、发展和衰亡原因。

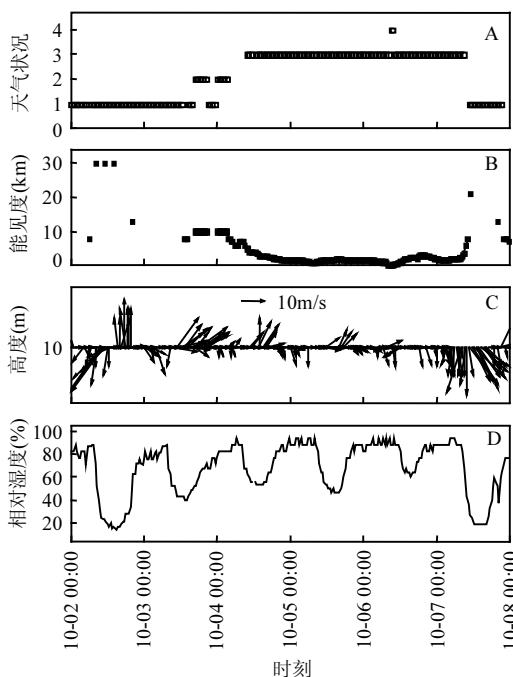


图 5 气象要素日变化

Fig.5 Daily variation of meteorological factors

A. 天气状况日变化(图中值为 1、2、3、4 分别对应晴天、多云、雾霾、小雨天气); B. 能见度日变化; C. 风向、风速日变化; D. 相对湿度日变化

**2.2.1 雾霾过程中气象要素的变化情况** Guo 等<sup>[24]</sup>对北京 2013 年 9 月 26 日至 11 月 13 日灰霾天气的研究结果表明,风速风向的变化与 PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化有很好的相关性。图 5 为 10 月 2~7 日天气状况、能见度、风向、风速、相对湿度的日变化情况(不严格区分雾、汽雾和雾霾,统

称为雾霾,有云、多云和晴天多云统称为有云),在雾霾发生前(10月2日),相对湿度均值为50%,最大风速达22km/h;3日平均相对湿度较2日有所增加,风速减小,多为偏南风;4日雾霾天气过程开始发生,风速与前一天相比有所减小,湿度增大,相对湿度高达94%,傍晚能见度不足2km;10月5日早上能见度不足1km,相对湿度高达94%,风速较小,日出后为霾,相对湿度小于60%,入夜后随着湿度加大、风力减小,能见度进一步变差,此时北京的气象条件不利于污染物扩散和稀释,最终导致污染物长时间滞留空气中;10月6日早上8:30,出现浓雾,能见度不足200m,相对湿度高达96%,午后相对湿度降低到70%以下,多为静风;10月7日上午9:00前为汽雾,之后天气转晴,多偏北风,风速最大值达到19km/h,相对湿度早

上高达88%,午后降低到40%以下.综上所述,在雾霾发生前后,北京多受偏北大风的影响,白天相对湿度具有较低值,而在雾霾较严重时,北京地区多较弱的偏南风,空气滞留明显,且相对湿度日平均值较大.

**2.2.2 天气形势对雾霾过程的影响** 如图6所示,10月5日08:00,北京位于高压底部,周围等压线稀疏,下午14:00位于高压的底后部低压底部前部,盛行偏南风,输送南部工业城市污染物;6日08:00原位于北京西北部的低压中心继续向东移动,但北京尚未受到明显影响,雾霾依然很严重;10月7日08:00,位于北京西北部的低压移至北京东北部,另有一高压移至西北部,此时北京位于高压的底前部,低压的底后部,受到明显北部干洁冷空气的影响,污染扩散条件好,雾霾现象开始消失.

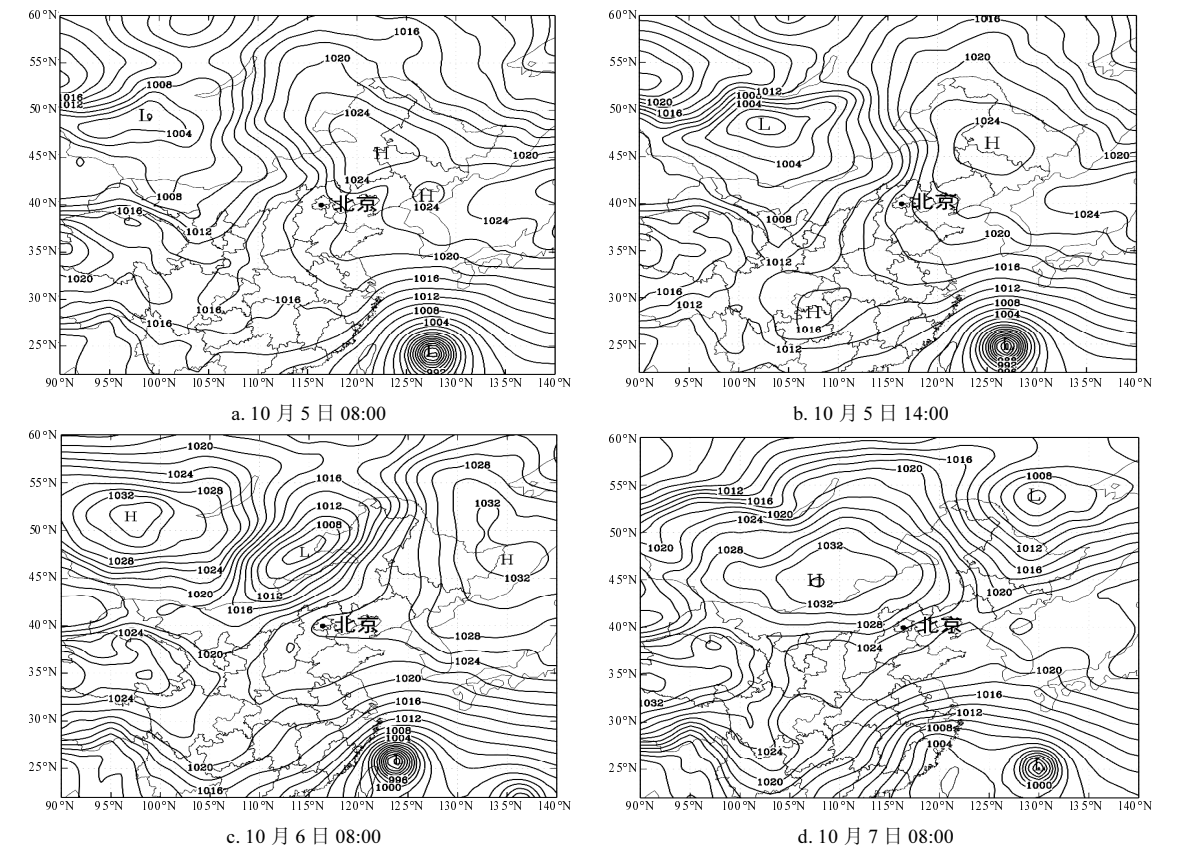


图6 北京地区10月5(08:00、14:00)、6(08:00)、7(08:00)日地面天气形势

Fig.6 The surface meteorological situation at 08:00 and 14:00 on October 5<sup>th</sup>, 08:00 on 6<sup>th</sup> and 08:00 on 7<sup>th</sup> in Beijing

2.2.3 污染物后向轨迹分析 气溶胶的后向轨迹模拟不仅能够解释污染物的来源以及气团的

运动方向,而且与光学厚度、单次散射反照率以及气柱中的含水量有密切关系,Xia 等<sup>[36]</sup>对北京地区 5 年的污染物后向轨迹进行聚类分析,指出移动较慢的气溶胶轨迹通常具有较高的光学厚度和单次散射反照率,以及较大的含水量。图 7 为北京站点 10 月 2 日 08:00~10 日 7 日 08:00 在 500m 高度处 24h 污染物后向轨迹模拟结果,可以看出,在污染天气(10 月 4、5、6 日)主要来自于偏南部工业污染较为严重的地区,气团移动缓慢,且 500m 高度处的污染物来源主要是大气底层,受到静稳天气的影响,气团垂直方向随时间波动不明显;而在大气较为清洁时期(10 月 2、3、7 日),影响北京地区的气团多来自西北向,气团移动速度较快。

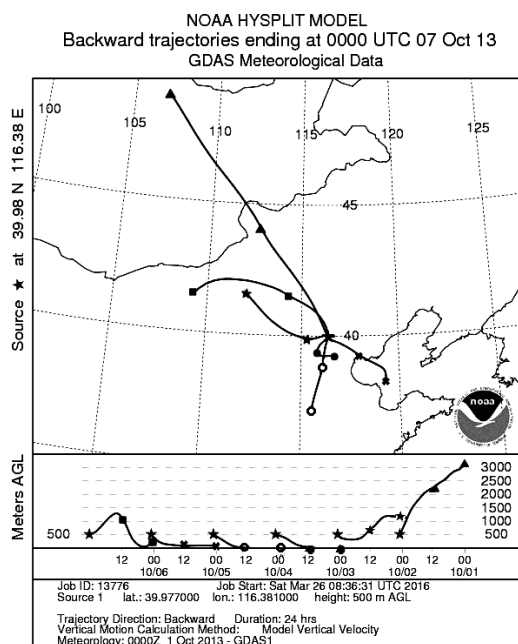


图 7 2013 年 10 月 2~7 日北京站点(39.977°N,116.381°E) 500m 高度处 24h 气团后向轨迹模拟

Fig.7 The 24h air backward trajectories arriving at 500m above ground level at Beijing(39.977°N, 116.381°E) from 2<sup>nd</sup> to 7<sup>th</sup> October 2013

### 3 结论

3.1 雾霾发生期间气溶胶体积尺度谱呈明显双峰分布,细粒子峰值浓度高于粗粒子;10 月 2~7 日气溶胶光学厚度与 Ångström 波长指数整体变化

趋势一致,均有先增大后减小的趋势,细粒子消光光学厚度远高于粗粒子,说明大量细模态粒子的产生是造成此次雾霾发生的主要原因。雾霾发生时单次散射反照率值增大,复折射指数虚部明显下降,说明此次污染过程中气溶胶粒子以强散射粒子为主。

3.2 雾霾发生期间早上和傍晚相对湿度较大,在 10 月 5、6 日,北京为静稳天气,周围等压线稀疏,多弱的偏南气流,大气扩散能力较弱;而在 10 月 7 日 8:00 北京地区周围等压线密集,受偏北大风的影响,开始由污染天气向干净天气转变。

3.3 北京站点 500m 高度污染物后向轨迹表明,雾霾严重时期气团来向为北京南部和东南部的污染城市,而在大气较为洁净时,多受西北向输送的气团影响。

3.4 晴天大气下大量新粒子生成和国庆期间人为因素产生的污染是此次雾霾事件的根源,大气中充足的水汽和持续静稳天气是雾霾形成和维持的重要因素。

### 参考文献:

- [1] 王明星,张仁健.大气气溶胶研究的前沿问题 [J]. 气候与环境研究, 2001,01:119-124.
- [2] Horvath H. Atmospheric aerosols, atmospheric optics and visibility [J]. Journal of Aerosol Science, 1994,25:23-24.
- [3] Chen Y, Bond T C. Light absorption by organic carbon from wood combustion [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010,10(4):1773-1787.
- [4] Wagner R, Ajtai T, Kandler K, et al. Complex refractive indices of Saharan dust samples at visible and near UV wavelengths: a laboratory study [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012,12(5):2491-2512.
- [5] 蔡子颖,郑有飞,胡 鹏,等.郑州地区大气气溶胶光学特性的地基遥感研究 [J]. 中国环境科学, 2009,29(1):31-35.
- [6] 齐 冰,杜荣光,于之锋,等.杭州市大气气溶胶光学厚度研究 [J]. 中国环境科学, 2014,34(3):588-595.
- [7] 段 婧,毛节泰.长江三角洲大气气溶胶光学厚度分布和变化趋势研究 [J]. 环境科学学报, 2007,28(4):537-543.
- [8] 于兴娜,李新妹,登增然登,等.北京雾霾天气期间气溶胶光学特性 [J]. 环境科学, 2012,32(4):1057-1062.
- [9] Che H, Xia X, Zhu J, et al. Column aerosol optical properties and aerosol radiative forcing during a serious haze-fog month over North China Plain in 2013 based on ground-based sunphotometer

- measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(4):2125–2138.
- [10] 李 霞,胡秀清,崔彩霞,等.南疆盆地沙尘气溶胶光学特性及我国沙尘天气强度划分标准的研究 [J]. *中国沙漠*, 2005,4: 488–495.
- [11] 许万智.北京地区气溶胶光学特性与辐射效应的观测研究 [D]. 北京:中国气象科学研究院, 2012.
- [12] 徐 政,李卫军,于阳春,等.济南秋季霾与非霾天气下气溶胶光学性质的观测 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(4):546–552.
- [13] 张人禾,李 强,张若楠.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(中文版)*, 2014, 44(1):27–36.
- [14] 蒋维楣,孙鉴泞,曹文俊,等.空气污染气象学教程 [M]. 北京:气象出版社, 2004.
- [15] 穆 穆,张人禾.应对雾霾天气:气象科学与技术大有可为 [J]. *中国科学:地球科学*, 2014,1:1–2.
- [16] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998,66(1):1–16.
- [17] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000,105(D8): 9791–9806.
- [18] Draxler R, Hess G. Description of the HYSPLIT4 modeling system [J]. 1997.
- [19] 丁一汇,柳艳菊.近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系 [J]. *中国科学地球科学*, 2014,44(1):37–48.
- [20] 陈丽芳.杭州市灰霾气候特征及与清洁过程的对比分析 [J]. *科技通报*, 2012,7:31–35.
- [21] 吴 蒙,范绍佳,吴 兑,等.广州地区灰霾与清洁天气变化特征及影响因素分析 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(8):1409–1415.
- [22] 张 勇.北京城市大气气溶胶光学特性观测研究 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2012.
- [23] 马敏劲,崔冬林,王式功,等.兰州市霾日的气候特征 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2009,6:56–61.
- [24] Guo S, Hu M, Zamora M, et al. Elucidating severe urban haze formation in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014,111(49):17373–17378.
- [25] Xia X, Wang P, Chen H, et al. Ground-based remote sensing of aerosol optical properties over north China in spring [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005,9(4):429–437.
- [26] 肖钟鑫,江 洪,陈 健,等.杭州市大气气溶胶光学特性研究 [J]. *环境科学学报*, 2011,31(8):1758–1767.
- [27] Dubovik O, Holben B N, Kaufman Y J, et al. Single scattering albedo of smoke retrieved from the sky radiance and solar transmittance measured from ground [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998,103(D24):31903–31923.
- [28] Dubovik O, Holben B N, Eck T, et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(3):590–608.
- [29] 郑玉琦,于兴娜,项 磊.东亚沙尘源区与下游地区气溶胶光学特性比较 [J]. *气象与环境学报*, 2014,30(2):67–73.
- [30] 王 静,牛生杰,许 丹,等.南京一次典型雾霾天气气溶胶光学特性 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(2):201–208.
- [31] 王 玲,李正强,李 莉,等.利用太阳-天空辐射计遥感观测反演北京冬季灰霾气溶胶成分含量 [J]. *遥感学报*, 2013,17(4): 944–958.
- [32] 韩 永,王体健,饶瑞中,等.大气气溶胶物理光学特性研究进展 [J]. *物理学报*, 2008,11:7396–7407.
- [33] 马井会,张 华,郑有飞,等.沙尘气溶胶光学厚度的全球分布及分析 [J]. *气候与环境研究*, 2007,2:156–164.
- [34] 张立盛,石广玉.硫酸盐和烟尘气溶胶辐射特性及辐射强迫的模拟估算 [J]. *大气科学*, 2001,2:231–242.
- [35] 赵子菁,魏永杰,张祥志,等.南京市霾天气与主要气象条件的相关分析 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(12):3570–3580.
- [36] Xia X, Chen H, Zhang W. Analysis of the dependence of column-integrated aerosol properties on long-range transport of air masses in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2007,41(36): 7739–7750.

**作者简介:** 王 朔(1993–),女,河南商丘人,中国科学院安徽光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事大气气溶胶物理化学特性研究。