

靳军莉, 颜鹏, 马志强, 等. 北京及周边地区 2013 年 1—3 月 PM<sub>2.5</sub> 变化特征. 应用气象学报, 2014, 25(6): 690-700.

# 北京及周边地区 2013 年 1—3 月 PM<sub>2.5</sub> 变化特征

靳军莉<sup>1)2)3)</sup> 颜 鹏<sup>3)\*</sup> 马志强<sup>4)5)</sup> 林伟立<sup>3)</sup> 刘宁薇<sup>6)</sup>  
马建中<sup>1)</sup> 张晓春<sup>3)</sup> 贾小芳<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院, 北京 100081) <sup>2)</sup>(中国科学院大学, 北京 100049)

<sup>3)</sup>(中国气象局气象探测中心, 北京 100081) <sup>4)</sup>(中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

<sup>5)</sup>(京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089) <sup>6)</sup>(中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016)

## 摘 要

2013 年 1—3 月北京及周边地区雾、霾高发, 气候特征异于常年。利用 2013 年 1—3 月北京及周边地区 6 个地面观测站观测资料, 研究 PM<sub>2.5</sub> 和黑碳(BC)的质量浓度、区域分布特征及气象要素的影响情况。结果表明: 北京及周边地区 PM<sub>2.5</sub> 污染呈区域性高值、污染局地积累以及由南向北输送的特征。北京上甸子站在雾、霾与清洁期间 BC 与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的比值分别为 7.1% 和 10.3%, 雾、霾期间低于清洁期间; 而河北固城站在雾、霾与清洁期间 BC 与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的比值分别为 17.5% 和 11.9%, 雾、霾期间明显高于清洁期间。二者相反的比值特征反映在清洁的下游地区雾、霾过程中二次生成的气溶胶所占比例较污染的上游地区偏高。

**关键词:** 雾和霾; PM<sub>2.5</sub> 质量浓度; 黑碳; 区域变化特征

## 引 言

大气气溶胶通过对辐射的散射和吸收作用对地球的辐射平衡产生直接影响, 同时也可作为云凝结核在成云过程中发挥作用, 进而影响云的光学特性和生命周期, 对区域和全球的气候变化产生间接影响<sup>[1-2]</sup>, 气溶胶亦会损害人体健康<sup>[3]</sup>。随着我国城市化和经济的快速发展, 污染物的排放不断增加, 区域型大气细颗粒物污染日趋严重, 雾、霾天气频繁出现, 导致城市 and 区域空气质量恶化和大气能见度降低<sup>[4-5]</sup>。雾、霾天气已经被认为是一种新的气象灾害<sup>[6]</sup>。

华北地区是我国雾、霾出现频率较高地区<sup>[7-8]</sup>, 该地区集中了北京、天津等超大城市以及唐山、石家庄等工业发达地区, 是气溶胶及其气态污染物的高排放源区。观测试验表明: 华北地区同时受到城市和工业污染排放以及矿物质输送沙尘的影响, 低层大气污染物浓度高、氧化性强、更易形成霾云或雾、

霾<sup>[9-10]</sup>。对京津冀地区近 30 年的霾天气特征研究亦表明京津冀范围内霾天气具有明显的区域性特征<sup>[11]</sup>。对污染物区域输送的研究发现, 环北京地区污染物存在明显的输送通道, 西南—东北走向的输送可导致区域内大部分城市大气污染加重<sup>[12]</sup>。对北京及周边地区气溶胶光学特性观测发现, 雾和霾期间气溶胶光学特性与非雾、霾时段有显著不同, 雾、霾期间散射、吸收系数和单次散射反照率均远高于雾、霾过后的清洁时段。雾、霾天气中, 相比于黑碳(black carbon, BC)等一次排放的气溶胶, 二次气溶胶的产生及其对消光的贡献有较大增加, 且乡村地区相比城市区域二次气溶胶含量增加更强、气溶胶具有更强的散射性<sup>[13-15]</sup>。

2013 年 1—3 月我国出现持续的大范围雾、霾天气。其中, 1 月中旬北京及周边地区出现了能见度不足 1000 m、局部能见度小于 100 m 的天气; 北京、河北等地多次出现 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日平均值超过 500 μg·m<sup>-3</sup> (空气污染指数超过 500), 极值浓度超过了已有文献报道的观测结果<sup>[4, 14-16]</sup>, 引起了极

2014-04-16 收到, 2014-09-05 收到再改稿。

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(2011CB403402)

\* 通信作者, email: yanpeng@cma.gov.cn

大关注,有关该时段雾、霾发生频率、大气颗粒物时段浓度水平等也有一些报道<sup>[17-19]</sup>。然而针对该期间,尤其是重污染期间大气细颗粒物的区域分布和输送特征、细颗粒物中一次和二次气溶胶的相对贡献情况及研究工作的报道不多。为此,本文选取华北地区6个不同观测站点2013年1—3月PM<sub>2.5</sub>及部分BC质量浓度的观测资料,并结合多站气象观测资料等进行分析,研究重度雾、霾过程中北京及周边地区不同站点的颗粒物浓度水平、区域分布和输送特征,以及气溶胶理化和光学特性的变化特征及其与气象条件的关系;通过比较污染和清洁站点BC与PM<sub>2.5</sub>质量浓度的比值变化,了解在雾、霾过程和清洁过程中PM<sub>2.5</sub>源自一次排放或二次形成的相对贡献。

## 1 观测简介

### 1.1 站点分布

BC及PM<sub>2.5</sub>质量浓度数据来自2013年1—3月北京、天津、河北等地6个地面观测站,6个观测站分布如图1所示。北京上甸子站(40°39'N,

117°07'E,海拔为293.3 m)是华北区域大气本底观测站,位于北京市东北部的密云县,距北京市区直线距离约110 km。该站位于西南—东北走向山谷的北侧,站点周边的主要经济活动为农业和果木栽培,方圆30 km范围内较少受人为污染影响,较好地代表了华北地区的大气背景状态。北京宝联站(39°56'N,116°17'E)位于北京市西三环路和西四环路间的海淀区宝联体育公园内。天津站(39°04'N,117°12'E)位于天津河西区,属于居民与交通混合区。石家庄站(38°01'N,114°25'E)和太原站(37°55'N,112°28'E)分别位于河北省石家庄和山西省太原市区。河北固城站(39°08'N,115°48'E)位于河北省保定定兴县,距北京西南约110 km,为华北平原腹地农村站点,是污染物向北京输送的西南通道上具有较好指示意义的观测站点,且具有较好的区域代表性<sup>[20]</sup>。天津、河北和山西是北京东南和西南方向污染排放较高的区域<sup>[21]</sup>,其污染物的排放对北京地区空气质量有显著影响<sup>[22]</sup>。

能见度观测数据来自北京顺义站(40°08'N,116°15'E)和天津开发西区站(39°04'N,117°32'E)。

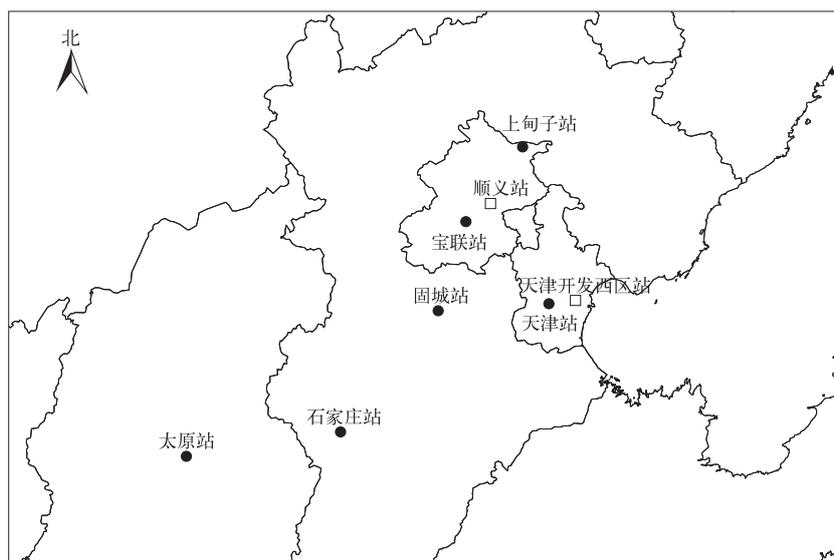


图1 北京及周边地区观测站分布

(黑色圆点表示该站提供气象数据、PM<sub>2.5</sub>和部分黑碳质量浓度数据;  
空心方框表示该站仅提供气象数据)

Fig. 1 Distribution of stations in Beijing and surrounding areas  
(stations with black dots provide meteorological data, PM<sub>2.5</sub> and black carbon mass concentration data; stations with hollow box provide meteorological data only)

### 1.2 观测方法与观测仪器

宝联站和上甸子站采用美国R&P公司的

R&P 1400a,天津站采用R&P 1405颗粒物监测仪连续观测量大气PM<sub>2.5</sub>质量浓度,它们采用锥管振

荡微天平 (Tapered Element Oscillating Microbalance, TEOM) 方法进行颗粒物浓度的测量。仪器每两周检查流量和滤膜负载率,当滤膜负载率超过 30% 时更换滤膜。进气管路附加加热装置,维持恒温 50℃。固城站、石家庄站和太原站采用德国 Grimm 公司 Grimm 180 空气颗粒物监测仪。该仪器使用激光散射原理进行颗粒物测量,进气管路采用 Nafion 分子渗透膜技术进行除湿,并保持测量过程相对湿度小于 40%,以减少水汽对观测的影响。研究表明:TEOM 测量方法对进气管路的加热会导致颗粒物里面挥发性有机物的损失,因此在富含挥发性有机物及在高相对湿度的环境中,TEOM 测量结果会低于 Grimm 180<sup>[23]</sup>。

BC 质量浓度使用 AE31 型黑碳仪 (Magee Scientific Co., 美国) 进行观测,通过测量石英滤膜上采集的气溶胶颗粒物对 7 个波段 (370, 470, 520, 590, 660, 880 nm 和 950 nm) 透射光的衰减变化计算 BC 质量浓度。

相对湿度、风向风速采用自动气象站数据,顺义站与天津开发西区站分别使用中国气象局华云升达 DNQ1 型前向散射能见度仪和芬兰 Vaisala PWD20 自动观测能见度仪。

以上观测均遵循中国气象局大气成分业务观测规范,定期进行进气管路的清洗维护,流量校准和零点、光源稳定性等检查,更换滤膜。

BC 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的观测数据均为每 5 min 1 组,经过多观测要素协同相关判断、连续性和孤点极值排除等方法进行数据质量控制后,计算得到小时平均和日平均值 (小时或日内有效样本数不低于 75%)。温度、相对湿度、风向、风速以及能见度观测数据来源于中国气象局气象探测中心数据共享平台,所有资料均为每小时 1 组,且经过了严格的质量控制。

## 2 结果与分析

### 2.1 雾、霾期间气象要素的变化特征

目前气象上定义日平均能见度小于 10 km、日平均相对湿度小于 90% 并排除降水等其他因素导致低能见度事件的情况为 1 个霾日;日平均能见度小于 10 km,日平均相对湿度大于 90% 并排除降水等其他因素导致低能见度事件的情况为 1 个出现轻雾日<sup>[16,24-26]</sup>。由于在污染地区雾、霾天气过程相互影响并相互转换,目前尚不能准确区分雾、霾出现时段,故统一用雾、霾过程来描述<sup>[13]</sup>。根据顺义站与天津开发西区站气象要素以及能见度观测结果,选取两站同时满足上述气象学雾、霾定义的时段,2013 年 1—3 月北京及周边地区共划分了 8 次雾、霾过程 (图 2 和表 1,时间为北京时,下同)。

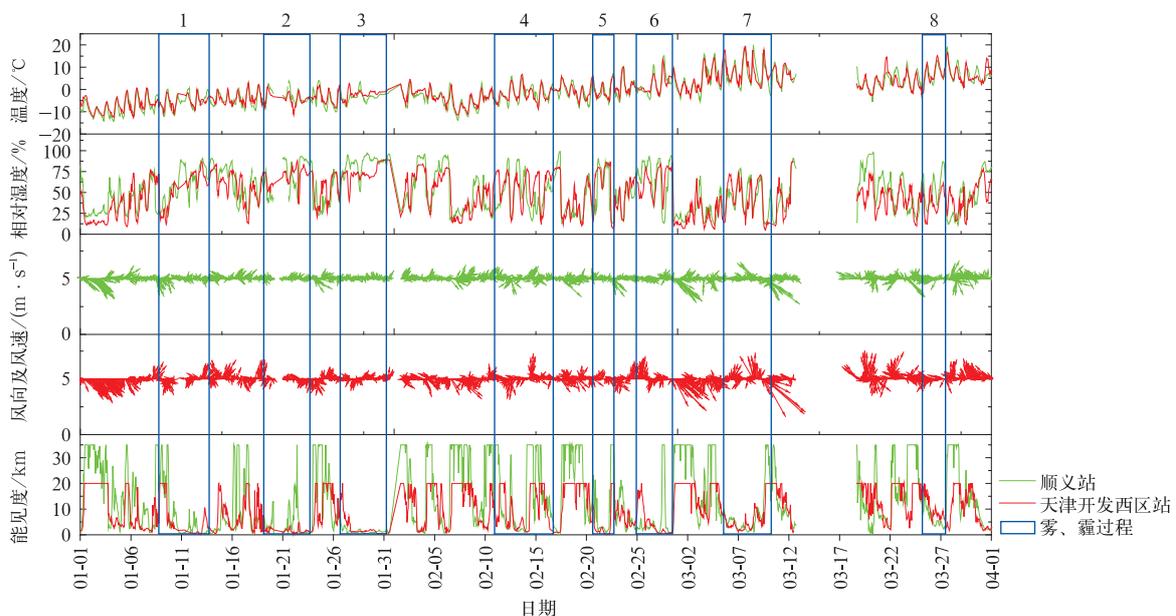


图 2 2013 年 1—3 月北京及周边地区地面气象要素与能见度的逐时变化

Fig. 2 Hourly variations of surface air temperature, relative humidity, wind speed and visibility in Beijing and surrounding areas from January to March in 2013

对8次雾、霾过程中能见度和相对湿度的统计(表1)表明,前3次过程能见度较低、相对湿度较高,尤其是第2次雾、霾过程中观测到仅为33 m的最小能见度,是2013年1—3月能见度的最低值;而第7次过程、第8次过程能见度相对较高(均超过1000 m)、相对湿度较低(低于80%),显示出以霾为主的特点。总体而言,2013年1—3月雾、霾过程出现频繁、持续时间长,且PM<sub>2.5</sub>质量浓度水平高,如北京城区的宝联站以及河北石家庄站的PM<sub>2.5</sub>质量浓度日平均值最高分别为396  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和579  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,远高于文献报道的北京及周边地区强雾、霾过程的细颗粒物浓度水平<sup>[13-14]</sup>。

表1 2013年1—3月北京及周边地区8次雾、霾过程能见度和相对湿度的变化

Table 1 Visibility and relative humidity in 8 fog and haze events in Beijing and surrounding areas from January to March in 2013

雾、霾过程	时段	最小能见度/m	最大相对湿度/%
第1次	01-09—14	223	89
第2次	01-19—24	33	90
第3次	01-27—31	262	93
第4次	02-11—17	426	89
第5次	02-21—23	520	88
第6次	02-25—28	401	89
第7次	03-05—10	1076	75
第8次	03-25—27	1952	74

在排放变化相对稳定的情况下,不利于大气污染物扩散的气象条件,如稳定的低层大气及低风速是形成雾、霾天气的重要原因<sup>[27-29]</sup>。大气稳定度可综合考虑温度递减率与风速进行判定<sup>[30]</sup>,本研究使用NCEP再分析资料(时间分辨率为6 h)计算了北京及周边地区2006年—2013年的1—3月地面平均风速和低层大气垂直方向两个高度层的温度差(1000 hPa与925 hPa两层高度温度差,温差越小表明低层大气越稳定)。结果表明:2013年1月北京及周边地区地面风速为2007年以来最低(2.3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),2月和3月地面风速略高于1月(分别为2.3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和2.4  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),也基本低于其他年份同期水平;2013年1月、2月和3月低层大气温度差均为2006年以来同期最低,1000 hPa与925 hPa两层高度温度差分别为1.8 $^{\circ}\text{C}$ 、2.6 $^{\circ}\text{C}$ 和3.0 $^{\circ}\text{C}$ 。其中,1月的两层高度温度差与往年相比下降最为显著,比出现在2011年的最高值(3.3 $^{\circ}\text{C}$ )低1.5 $^{\circ}\text{C}$ (图3)。较低的地面风速不利于大气污染物的水平扩散,低层稳定的大气层结不利于污染物的垂直扩散,这是2013年1—3月北京及周边地区地面颗粒物、污染物高度积累、雾和霾高发的重要气象原因。对京津冀地区1980—2008年近30年能见度变化特征的统计研究认为,由于北京地区冬季、天津和河北地区春季的风速更高,相对湿度更低,因此,能见度

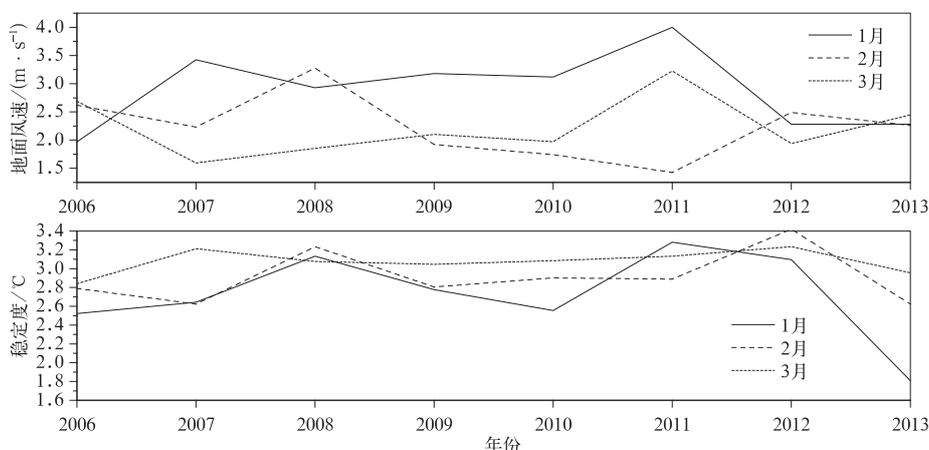


图3 2006—2013年的1—3月北京及周边地区地面风速与大气稳定度(1000 hPa与925 hPa温度差)

Fig. 3 Variations of the surface wind speed and atmospheric stability (temperature difference between 1000 hPa and 925 hPa) in Beijing and surrounding areas for January—March from 2006 to 2013

相对更好<sup>[31]</sup>。然而,2013年冬季北京及周边地区气象要素特征与之前相比有显著变化,成为常态,表明

北京及周边地区冬、春季也将出现多雾、霾的现象,必须引起足够的重视。

## 2.2 PM<sub>2.5</sub>质量浓度水平及区域性变化特征

为了更直观地表现北京及周边地区 2013 年 1—3 月 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度水平及区域性变化特征,按照站点地理位置由北向南将 6 个站点自上而下排列,并给出各站 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日平均值变化(图 4)。图 4 显示,雾、霾期间北京及周边地区 PM<sub>2.5</sub> 污染具有明显的区域性高值特征。1 月 6 个站点 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日平均值均高于 2 月和 3 月,即 1 月的 PM<sub>2.5</sub> 污染最重;尽管 6 个站点的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化并不完全一致,但 8 次雾、霾过程中 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度均出现较高水平,显示出了区域 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度高值的特征。其中,石家庄站 1 月 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日平均值高于  $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的天数为 29 d,最大值为  $579 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,而我国国家环境空气质量标准(GB3095—2012)规定的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日平均值二级标准是  $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,超标严重。

除了 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度区域性高值特征外,1—3 月北京及周边地区气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度同时具有局地积累和由南向北的输送特征。由图 4 可以看出(如过程 1),与上甸子站和固城站相比,在分别位于其上风向的宝联站和石家庄站 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度在雾、霾开始期间增加更为显著,显示出在较大排放源附近污染物的局地积累。除 8 次雾、霾过程外,也存

在 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度水平较高的时段,如 1 月 1—10 日,石家庄站和固城站均出现了 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日平均值连续多日接近或超过  $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的现象,太原站有类似过程但浓度水平明显低于河北省两个站,而北京、天津各站的浓度变化很不明显,显示出该时段 PM<sub>2.5</sub> 污染主要是河北地区的局地污染,而非大范围的区域污染过程。另外,根据站点位置以及 PM<sub>2.5</sub> 污染出现的时间可看出多次雾、霾过程均呈现出由南向北滞后出现的现象,南部站点最先出现 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日平均值的升高过程,如太原站、石家庄站和固城站在 1 月初便出现 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日平均值超标并逐渐升高,而天津、北京地区这些相对位于北部的站点则于 10 日后始出现雾、霾。结合图 2 显示的雾、霾过程前地面多有南风系统影响,说明大气污染物是由南向北输送并导致区域性雾、霾发生的。此外需要注意的是,2013 年 3 月 9 日有沙尘过程影响华北中北部地区<sup>[32]</sup>,受此影响,第 7 次霾过程中河北、山西省站点的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度水平并不高。

表 2 给出了雾、霾过程 6 个站点的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度平均值和最大小时平均值。除上甸子站外,绝大多数站在雾、霾期间的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度平均值都超过  $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,最大值超过  $400 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。雾、

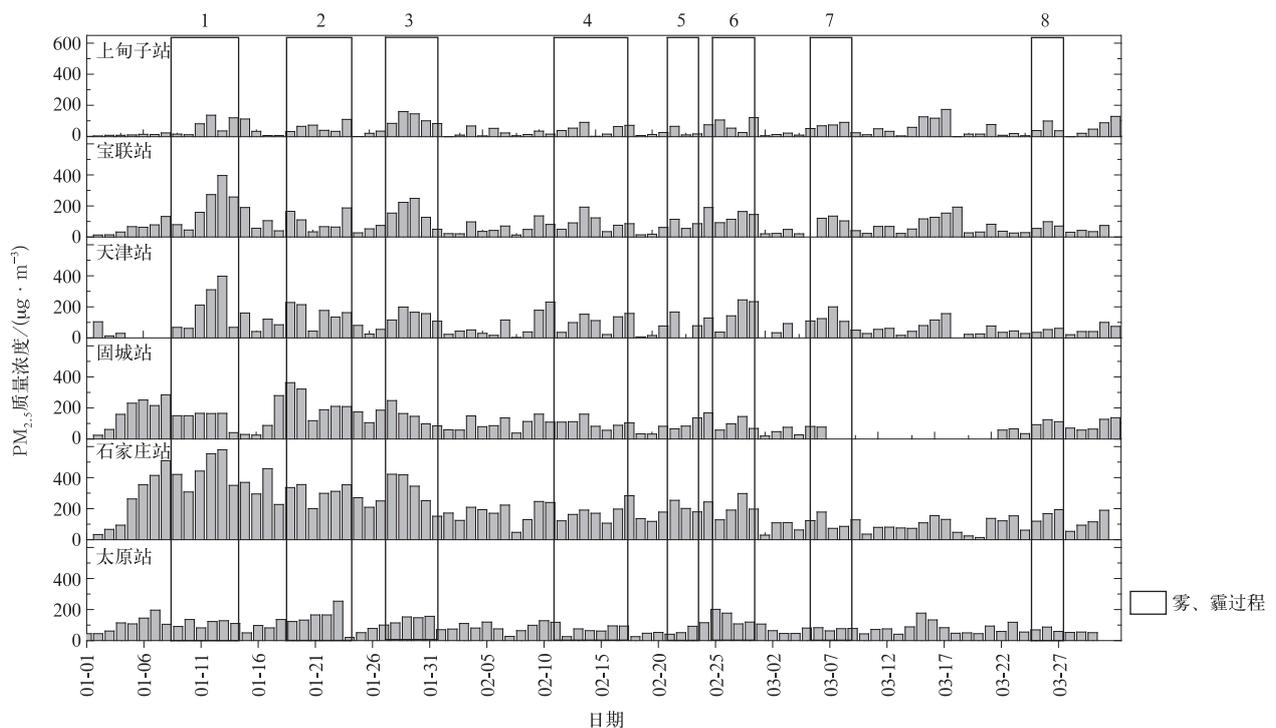


图 4 北京及周边地区 6 个站点 2013 年 1—3 月 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度逐日变化

Fig. 4 Diurnal variations of PM<sub>2.5</sub> mass concentrations at six stations in Beijing and surrounding areas from January to March in 2013

表 2 8 次雾、霾过程不同站点 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度平均值和最大小时平均值(单位:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )

Table 2 The mean and the maximum hourly mean of PM<sub>2.5</sub> for 8 fog and haze events at 6 stations(unit:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )

雾、霾过程	上甸子站		宝联站		天津站		固城站		石家庄站		太原站	
	平均值	最大小时平均值	平均值	最大小时平均值	平均值	最大小时平均值	平均值	最大小时平均值	平均值	最大小时平均值	平均值	最大小时平均值
第 1 次	60	306	192	630	202	494	160	391	434	750	123	273
第 2 次	60	174	109	444	157	406	262	478	345	579	195	362
第 3 次	98	303	170	314	157	253	155	332	306	560	125	276
第 4 次	50	172	111	580	123	568	109	269	190	348	123	304
第 5 次	55	164	122	457	101	228	101	252	201	334	99	269
第 6 次	80	349	178	342	235	356	107	194	247	386	113	410
第 7 次	64	308	142	292	121	357			116	510	75	205
第 8 次	84	257	141	250	74	219			90	203	79	194

霾期间,所有站点的最大小时平均浓度均超过了  $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,最大值为  $750 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。但各个站点 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度最高值的出现时间均不相同,这与不同站点所处地区大气污染源排放强度与当地天气条件的差异紧密相关,体现出局地污染的差异。

为了进一步分析 2013 年 1—3 月北京及周边地区雾、霾天气过程的区域性输送特征,本文对 6 个站

点的风向、风向频率与风速进行统计分析。图 5 是不同站点 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度风玫瑰图,剔除了风速低于  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的数据,并综合考虑了风向频率的影响,即每个风向区间 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度平均值乘相应的风向频率。

通过对比不同风向对 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的影响发现,除石家庄站以外,其他 5 个站点的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓

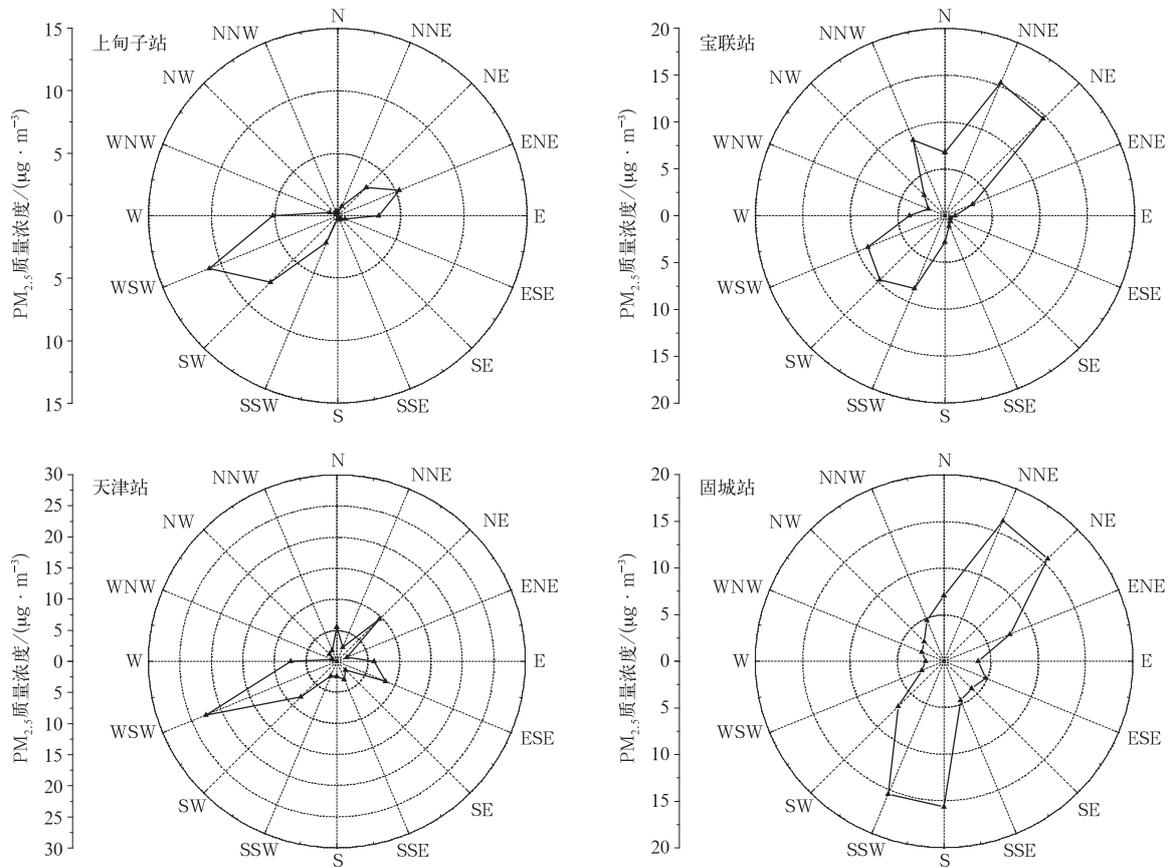
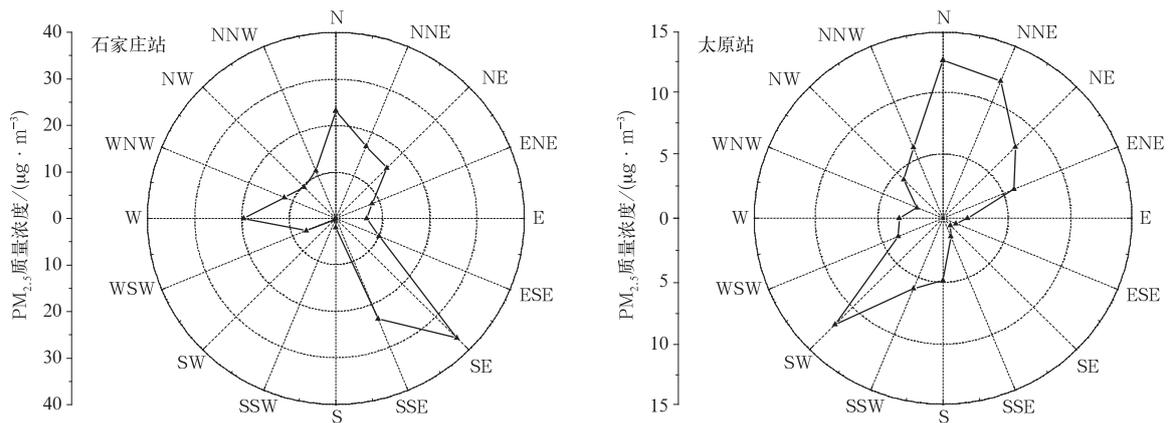


图 5 2013 年 1—3 月风向对北京及周边地区 6 个站点 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度影响

Fig. 5 Wind direction and PM<sub>2.5</sub> mass concentration at 6 stations in Beijing and surrounding areas from January to March in 2013



续图5

度风向玫瑰图均显示西南—东北走向的输送通道形态、呈现明显的西南—东北高值分布特征。上甸子站在 SW, WSW 和 W 风向时更易出现高的细颗粒物浓度,显示来自西南城区方向的污染物对该站的影响;宝联站在 SSW, SW, WSW 以及 NNE 和 NE 风向时平均  $PM_{2.5}$  质量浓度较高;天津站在 WSW 风向时大气细颗粒物浓度最高,同样显示来自西南的污染物输送对该站影响;固城站在 S, SSW 以及 NNE 和 NE 风向时均有较高的细颗粒物浓度,表明固城站同时受到石家庄、保定等西南方城市和廊坊等东北方向城市的污染影响,石家庄站则受到 SE 和 SSE 方向的衡水市较大影响,太原站受到 SW, WSW 以及 N, NNE 方向的污染影响较大。

### 2.3 雾、霾期间 BC 质量浓度及其与 $PM_{2.5}$ 质量浓度比值的变化特征

BC 是一次气溶胶的重要组成部分,主要与生物质燃烧、机动车以及工业燃烧废气等一次排放有关,为了反映几次雾、霾过程  $PM_{2.5}$  质量浓度与气溶胶一次排放和二次颗粒物生成的特点,本文分析了具有一次排放指示意义的 BC 及其在  $PM_{2.5}$  中的比例雾、霾过程前后的变化。

表 3 给出了上甸子站和固城站在 8 次雾、霾过程中的 BC 质量浓度分布情况,两个站点在雾、霾过程中的 BC 质量浓度分别为  $5.2 \pm 4.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $19.0 \pm 12.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。雾、霾期间两个站点的 BC 质量浓度均出现升高,但后者明显高于前者,平均高出 2 倍。两个站点的 BC 质量浓度变化特征并不一致,上甸子站在第 1 次雾、霾过程中出现了冬季最大小时平均值  $21.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,而固城站则在第 2 次雾、霾过程中出现了冬季最大小时平均值  $65.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

经燃烧直接排放的 BC 粒子,通常处于细粒子

表 3 8 次雾、霾过程中上甸子站和固城站

BC 质量浓度平均值和

最大小时平均值(单位:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )Table 3 The mean and the maximum hourly mean BC for 8 fog and haze events at Shangdianzi and Gucheng stations(unit:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )

雾、霾过程	上甸子站		固城站	
	平均值	最大小时平均值	平均值	最大小时平均值
第 1 次	7.4	21.8	33.0	63.7
第 2 次	4.3	11.3	20.4	65.4
第 3 次	8.8	17.0	16.7	43.1
第 4 次	2.6	8.0	11.7	40.6
第 5 次	2.4	6.7	18.2	41.8
第 6 次	4.7	17.5	21.2	38.3
第 7 次	5.6	15.2	17.4	54.8
第 8 次	5.2	9.2	9.0	17.7

粒径范围,是  $PM_{2.5}$  的重要组成部分,BC 在  $PM_{2.5}$  中的比例一定程度上反映了一次排放和二次生成对  $PM_{2.5}$  的相对贡献,同时也部分反映了气溶胶光学散射和吸收对大气消光贡献的相对大小。表 4 是上甸子站和固城站在雾、霾过程以及雾、霾过程前后的清洁时段所对应的 BC 和  $PM_{2.5}$  平均质量浓度及 BC 与  $PM_{2.5}$  质量浓度的比值,其中 BC 与  $PM_{2.5}$  质量浓度的比值通过压轴回归分析方法(Reduced Major Axis Regression)<sup>[33]</sup>获得。压轴回归分析方法适用于存在测量误差的独立数据集的线性拟合,能利用多点的相关关系在一定程度上排除奇异值的影响<sup>[34]</sup>。回归分析中分别将 BC 质量浓度与  $PM_{2.5}$  质量浓度作为  $y$  与  $x$  变量、使用压轴回归分析方法进行线性拟合,拟合曲线的斜率为 BC 与  $PM_{2.5}$  质量浓度的比值,这种回归分析由于综合考虑了 BC 和  $PM_{2.5}$  质量浓度各自的测量误差,比直接用 BC 和

表 4 雾、霾过程及其前后清洁期间上甸子站和固城站 BC 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度平均值及 BC 与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度比值统计分析

Table 4 Statistic analysis of averaged BC, PM<sub>2.5</sub> mass concentration and their ratios for fog, haze and clear events at Shangdianzi and Gucheng stations

过程	上甸子站				固城站			
	BC 质量浓度/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	PM <sub>2.5</sub> 质量浓度/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	BC 与 PM <sub>2.5</sub> 质量浓度 比值/%	BC 与 PM <sub>2.5</sub> 质量浓度 相关系数	BC 质量浓度/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	PM <sub>2.5</sub> 质量浓度/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	BC 与 PM <sub>2.5</sub> 质量浓度 比值/%	BC 与 PM <sub>2.5</sub> 质量浓度 相关系数
雾、霾	9.0	139.2	7.1	0.77	24.1	195.7	17.5	0.66
清洁	0.9	9.4	10.3	0.63	3.5	29.9	11.9	0.53

PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的平均值相除获得的比值更趋于保守。

2013 年 1—3 月上甸子站在雾、霾与清洁期间 BC 与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的比值分别为 7.1% 和 10.3%，雾、霾期间的比值普遍低于清洁期间(图 6)，与已有研究得到的关于雾、霾天气有利于二次气溶胶的生成从而导致一次气溶胶 BC 在 PM<sub>2.5</sub> 中比例下降的

结论相一致<sup>[35-36]</sup>。固城站雾、霾期间与清洁期间 BC 与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的比值分别为 17.5% 和 11.9%，雾、霾期间的比值明显高于清洁期间，表明雾、霾期间的二次气溶胶在 PM<sub>2.5</sub> 中的比例要小于非雾、霾期间二次气溶胶在 PM<sub>2.5</sub> 中的比例，这与上甸子站的结果相反。

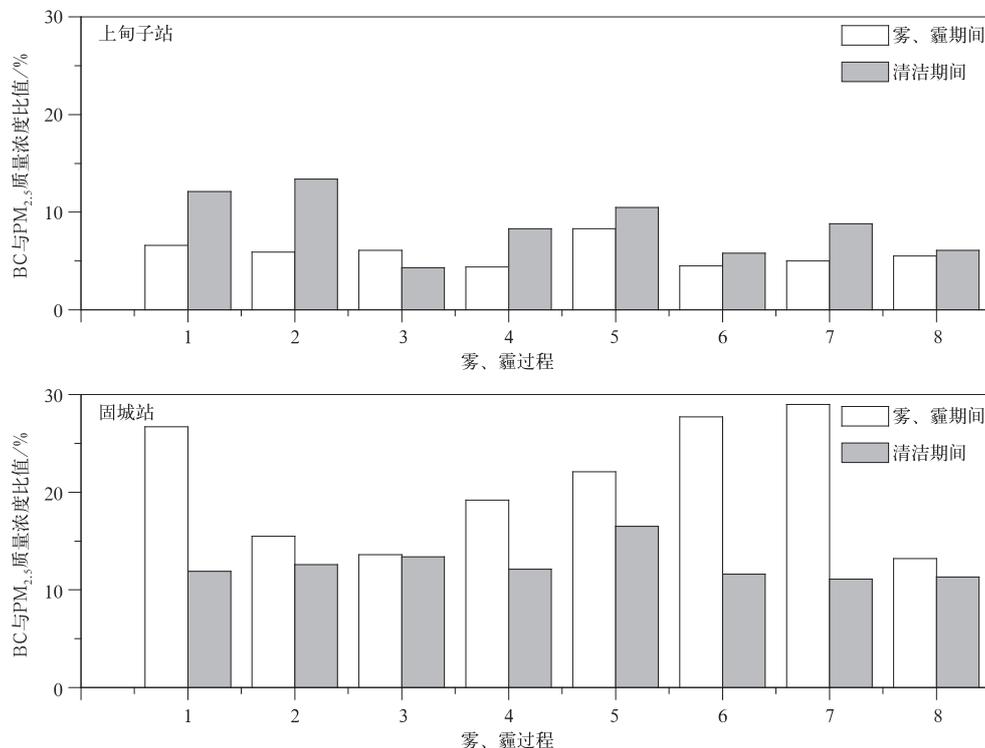


图 6 2013 年 1—3 月上甸子站和固城站 8 次雾、霾过程及雾、霾过程前后的清洁期间 BC 与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的比值

Fig. 6 Variation of ratio of BC and PM<sub>2.5</sub> mass concentration during fog, haze and clear events at Shangdianzi and Gucheng stations from January to March in 2013

冬季雾、霾期间与清洁期间，上甸子站 BC 与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度比值平均值低于固城站，与北京城区全年平均的 BC 与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的比值相近<sup>[37]</sup>，明显高于夏季北京郊区<sup>[38]</sup>，但低于北京城区冬季<sup>[39]</sup>

以及广州 2004—2007 年平均值<sup>[40]</sup>。上甸子站位于北京东北清洁地区，而固城站位于北京西南偏南的污染路径上，前者 BC 与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度比值低于后者，这一方面反映了影响上甸子和固城站的气溶胶

污染来源的不同,另一方面也反映了污染物输送过程中二次气溶胶生成情况的差异。局地排放对固城站的影响相对重要,但上甸子站局地源较少,主要来自北京城区等输送。BC与PM<sub>2.5</sub>质量浓度比值进一步说明,冬季北京及周边地区大范围雾、霾的出现是由于各个地区排放到大气中的一次气溶胶颗粒物由南向北输送,并伴随着二次气溶胶生成而造成的。

通常在雾、霾过程中BC和PM<sub>2.5</sub>质量浓度相关性要好于清洁期间,但也有相反个例,如上甸子站第2次和第8次雾、霾过程,以及固城站第6次和第8次雾、霾过程中BC和PM<sub>2.5</sub>质量浓度相关性低于其他雾、霾过程,且均低于清洁期间。以上现象体现了气象条件及二次气溶胶的生成效率对二者相关性影响程度的差异,有待进一步研究。

### 3 结 论

本文研究了北京及周边地区PM<sub>2.5</sub>质量浓度和黑碳(BC)质量浓度区域分布和输送特征及气象要素的影响,并对PM<sub>2.5</sub>源自一次排放或二次生成的相对贡献进行了初步探讨,得到如下结论:

1) 2013年1—3月北京及周边地区按照气象学雾、霾定义划分出8次雾、霾天气过程。冬、春季出现频繁的、持续时间长的雾、霾天气,异于常年的气候特征,与出现较低的地面风速和低层大气较稳定的气象条件紧密相关。

2) 2013年1—3月北京及周边地区气溶胶PM<sub>2.5</sub>污染以1月为最重,尽管多个站点的PM<sub>2.5</sub>质量浓度日变化不完全一致,但PM<sub>2.5</sub>污染呈局地积累和区域性高值的特点,以及在雾、霾发展过程中污染由南向北输送的特征。多个站点的PM<sub>2.5</sub>质量浓度风玫瑰图均呈现明显的西南—东北高的特征,与环北京地区西南—东北走向的输送通道相符合。

3) 2013年1—3月上甸子站和固城站在雾、霾过程中的黑碳(BC)质量浓度分别为 $5.2 \pm 4.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $19.0 \pm 12.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。雾、霾期间两个站点的BC质量浓度均升高,但变化特征并不完全一致,且后者的平均浓度约为前者的3倍。

4) 2013年1—3月上甸子站雾、霾期间与清洁期间BC与PM<sub>2.5</sub>质量浓度的比值分别为7.1%和10.3%,雾、霾期间低于清洁期间;固城站在雾、霾期间与清洁期间BC与PM<sub>2.5</sub>质量浓度比值分别为17.5%和11.9%,雾、霾期间明显高于清洁期间。

二者相反的比值特征反映了清洁的下游地区在雾、霾过程中,二次生成的气溶胶所占比例较上游的污染地区相对更高。

### 参 考 文 献

- [1] Sean T. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *J Atmos Sci*, 1977, 34: 1149-1152.
- [2] Joyce E P, Dong X Q, Yang C. Observational evidence of a change in radiative forcing due to the indirect aerosol effect. *Nature*, 2004, 427(6971): 231-234.
- [3] Arden C P III, Majid E, Douglas W D. Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States. *New England Journal of Medicine*, 2009, 360(4): 376-386.
- [4] 宋宇,唐孝炎,方晨,等.北京市能见度下降与颗粒物污染的关系. *环境科学学报*, 2003, 23(4): 468-471.
- [5] Chang D, Song Y, Liu B. Visibility trends in six megacities in China 1973—2007. *Atmos Res*, 2009, 94(2): 161-167.
- [6] Ma J Z, Xu X B, Zhao C S, et al. A review of atmospheric chemistry research in China: Photochemical smog, haze pollution, and gas-aerosol interactions. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 1006-1026.
- [7] 胡亚旦,周自江.中国霾天气的气候特征分析. *气象*, 2009, 35(7): 73-78.
- [8] 王继志,徐祥德,杨元琴.北京城市能见度及雾特征分析. *应用气象学报*, 2002, 13(增刊D): 160-169.
- [9] Ma J Z, Wang W, Chen Y, et al. The IPAC-NC field campaign: A pollution and oxidization pool in the lower atmosphere over Huabei, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(9): 3883-3908.
- [10] Ma J Z, Chen Y, Wang W, et al. Strong air pollution causes widespread haze-clouds over China. *J Geophys Res*, 2010, 115, D18024, doi:10.1029/2009JD013065.
- [11] 赵普生,徐晓峰,孟伟,等.京津冀区域霾天气特征. *中国环境科学*, 2012, 32(1): 31-36.
- [12] 陈朝晖,程水源,苏福庆,等.华北区域大气污染过程中天气型和输送路径分析. *环境科学研究*, 2008, 21(1): 17-21.
- [13] 颜鹏,刘桂清,周秀骥,等.上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性. *应用气象学报*, 2010, 21(3): 257-265.
- [14] 赵秀娟,蒲维维,孟伟,等.北京地区秋季雾霾天PM<sub>2.5</sub>污染与气溶胶光学特征分析. *环境科学*, 2013, 34(2): 416-423.
- [15] 边海,张裕芬,韩素芹,等.天津市大气能见度与颗粒物污染的关系. *中国环境科学*, 2012, 32(3): 406-410.
- [16] 吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等.珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究. *气象学报*, 2006, 64(4): 510-517.
- [17] Tao M H, Chen L F, Wang Z F, et al. A study of urban pollution and haze clouds over northern China during the dusty season based on satellite and surface observations. *Atmos Environ*, 2014, 82: 183-192.
- [18] 吕效谱,成海容,王祖武,等.中国大范围雾霾期间大气污染特征分析. *湖南科技大学学报:自然科学版*, 2013, 28(3): 104-

- 110.
- [19] Wang L T, Wei Z, Yang J, et al. The 2013 severe haze over the southern Hebei, China: Model evaluation, source apportionment, and policy implications. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2013, 13(11): 28395-28451.
- [20] Lin W L, Xu X B, Ge B Z, et al. Characteristics of gaseous pollutants at Gucheng, a rural site southwest of Beijing. *J Geophys Res*, 2009, 114, doi:10.1029/2008jd010339.
- [21] Zhao B, Wang P, Ma J Z, et al. A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei Region, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(1): 481-501.
- [22] 徐祥德, 周丽, 周秀骥, 等. 城市环境大气重污染过程周边源影响域. *中国科学: D辑*, 2005, 34(10): 958-966.
- [23] Hans G, Delbert J E. Aerosol measurement: The use of optical light scattering for the determination of particulate size distribution, and particulate mass, including the semi-volatile fraction. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009, 59(1): 101-107.
- [24] 吴兑. 霾与雾的区别和灰霾天气预警建议. *广东气象*, 2004, 4(1): 1-4.
- [25] 吴兑, 吴晓京, 朱小祥. 雾和霾. 北京: 气象出版社, 2009.
- [26] 中国气象局. 霾的观测和预报等级. QX/T 113—2010. 2010.
- [27] 陈林, 王莉莉, 吉东生, 等. 广州亚运会期间鼎湖山站大气污染特征. *应用气象学报*, 2013, 24(2): 151-161.
- [28] 王淑英, 张小玲. 北京地区PM<sub>10</sub>污染的气象特征. *应用气象学报*, 2002, 13(增刊D): 177-184.
- [29] 蒲维维, 赵秀娟, 张小玲. 北京地区夏末秋初气象要素对PM<sub>2.5</sub>污染的影响. *应用气象学报*, 2011, 22(6): 716-723.
- [30] John L W. Estimating the Flammable Mass of a Vapor Cloud. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.
- [31] Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, et al. Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China. *Atmos Res*, 2011, 101(3): 711-718.
- [32] Tao M H, Chen L F, Wang Z F, et al. A study of urban pollution and haze clouds over northern China during the dusty season based on satellite and surface observations. *Atmos Environ*, 2014, 82: 183-192.
- [33] Andrew J B, van der Linde K. RMA: Software for Reduced Major Axis Regression. Java Version, 2004.
- [34] McArdle B H. The structural relationship: Regression in biology. *Canadian Journal of Zoology*, 1988, 66(11): 2329-2339.
- [35] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, et al. Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in haze-fog episodes in Beijing. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(10): 3148-3155.
- [36] 颜鹏, 郇宁, 张养梅, 等. 北京乡村地区分粒径气溶胶 OC 及 EC 分析. *应用气象学报*, 2012, 23(3): 285-293.
- [37] 张小曳, 张养梅, 曹国良. 北京 PM<sub>1</sub> 中的化学组成及其控制对策思考. *应用气象学报*, 2012, 23(3): 257-264.
- [38] 荆俊山, 张仁健, 陶俊. 北京郊区夏季 PM<sub>2.5</sub> 和黑碳气溶胶的观测资料分析. *气象科学*, 2011, 31(4): 510-515.
- [39] Dan M, Zhuang G S, Li X X, et al. The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM<sub>2.5</sub> in Beijing. *Atmos Environ*, 2004, 38(21): 3443-3452.
- [40] 吴兑, 毛节泰, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究. *中国科学: D辑*, 2009, 39(11): 1542-1553.

## Characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Beijing and Surrounding Areas from January to March in 2013

Jin Junli<sup>1)2)3)</sup> Yan Peng<sup>3)</sup> Ma Zhiqiang<sup>4)5)</sup> Lin Weili<sup>3)</sup> Liu Ningwei<sup>6)</sup>  
Ma Jianzhong<sup>1)</sup> Zhang Xiaochun<sup>3)</sup> Jia Xiaofang<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

<sup>3)</sup> (Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081)

<sup>4)</sup> (Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089)

<sup>5)</sup> (Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089)

<sup>6)</sup> (Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110016)

### Abstract

Frequent and serious haze and fog events happen from January to March in 2013 in Beijing and surrounding areas under special climate conditions, which are different from those in last decades. 8 haze and fog events during this period are defined in accordance with the meteorological definition. The observation-

al  $PM_{2.5}$ , black carbon (BC) concentration and the meteorological data at 8 stations in Beijing, Tianjin, Hebei and Shanxi are used to analyze the fine particle matter and BC pollution level and regional characteristics. The meteorological-parameter variation characteristic and its possible influence on transportation and dilution of atmosphere pollutants are investigated as well.

Extraordinarily high daily average  $PM_{2.5}$  concentrations (e. g. ,  $579 \mu g \cdot m^{-3}$  at Shijiazhuang Station) are found, much higher than former researches. Investigations indicate that even though the diurnal variation of  $PM_{2.5}$  concentration varies from station to station, there is a regional high concentration level of  $PM_{2.5}$  in Beijing and surrounding areas for average, which also has characteristic of local accumulation of air pollutants. Analysis on average surface wind speed and atmospheric vertical stability from NCEP reanalysis data in Beijing and surrounding areas from January to March since 2006 to 2013 are conducted, revealing remarkable feature of low surface wind speed and stable structure in lower part of atmosphere in 2013. During the development of fog and haze events, pollution transportation from south to north are observed. High values in south-west and north-east sectors in  $PM_{2.5}$  concentration wind rose correspond to atmospheric-pollutant transportation channel around Beijing.

Apart from  $PM_{2.5}$  concentration, BC variation characteristic and its proportion in  $PM_{2.5}$  at Shangdianzi Global Atmosphere Watch Regional Station (SDZ) of Beijing and Gucheng Station (GCH, a rural representative site) of Hebei are studied to enhance the understanding of distinguishing feature of aerosol pollution and its composition in this region. Sharing the similar escalation trend during haze and fog events at both stations, the BC concentration at SDZ is lower, roughly one third of it at GCH. The ratio of BC and  $PM_{2.5}$  mass concentration is of 7.1% during haze and fog events, and 10.3% during the clean days at SDZ. The ratio of BC and  $PM_{2.5}$  mass concentration during haze and fog events versus clean days are of 17.5% and 11.9% at GCH. The contrast values between haze and fog events versus clean days in different stations indicate a higher secondary aerosol proportion during haze and fog events in the down-wind northern area when compared to that in the polluted up-wind southern area in and around Beijing.

**Key words:** haze and fog;  $PM_{2.5}$  concentration; black carbon; regional variation characteristics