

张宏, 刘子锐, 胡波, 等. 2011. 北京能见度变化趋势及冬季一次典型污染过程分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 620–628. Zhang Hong, Liu Zirui, Hu Bo, et al. 2011. Analysis of trends of visibility and its characters during air seriously polluted days in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 620–628.

北京能见度变化趋势及冬季一次典型污染过程分析

张宏 刘子锐 胡波 王莉莉 王跃思

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 为了探索北京地区大气能见度变化规律, 对 2005~2009 年能见度的监测资料进行了分析。结果表明, 北京地区能见度年均值为 10.17 km, 并呈现逐年上升趋势, 增长率为 $0.69 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ (决定系数 $R^2 = 0.99$, 显著性水平 $p < 0.01$), 同时霾天数则逐年下降, 细颗粒物浓度的降低是能见度好转的主要原因。能见度的季节变化特征表现为春季最高, 冬季次之, 夏季最低。能见度与气象要素的相关和偏相关关系表明能见度与相对湿度呈显著负相关关系, 与地面风速的相关关系时正时负, 表明风速对能见度的影响具有两面性。大气颗粒物 (PM_{2.5}) 的快速累积增长是造成大气能见度急剧降低的重要原因, 通过相关性分析发现两者之间存在显著的幂指数关系 ($R^2 = 0.93$, $p < 0.01$); 要保持较高的能见度 ($> 10 \text{ km}$), 北京需将 PM_{2.5} 控制在 $30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以内, 而 PM_{2.5} 质量浓度的进一步降低将大幅度提高能见度。天气形势分析显示当华北地区处于锋后的高压控制时, 北京地区受偏北风影响, 地面风速较大, 大气扩散条件有利于污染物的稀释和扩散, 致使大气颗粒物质量浓度较低, 大气能见度较高; 而当华北地区处于高压均压场时, 地面风速较小, 大气层结稳定不利于污染物的扩散, 局地源累积以及区域输送的共同影响, PM_{2.5} 逐渐累积, 浓度持续上升, 导致大气能见度持续降低。研究的结果提示提高北京地区大气能见度, 需要控制的首要污染物为 PM_{2.5}。

关键词 大气能见度 气象要素 PM_{2.5} 天气形势

文章编号 1006-9585 (2011) 05-0620-09 **中图分类号** X131; X513 **文献标识码** A

Analysis of Trends of Visibility and Its Characters during Air Seriously Polluted Days in Beijing

ZHANG Hong, LIU Zirui, HU Bo, WANG Lili, and WANG Yuesi

State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The visibility rules in Beijing were analyzed on the basis of historic data from 2005 to 2009, it showed that the annual mean visibility in Beijing was 10.17 km in the past five years and experienced a significant increasing trend, approximately $0.69 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2 = 0.99$, $p < 0.01$), and at the same time haze days decreased rapidly in the past four years. The decreased annual concentrations of PM_{2.5} (aerodynamic diameter $\leq 2.5 \mu\text{m}$) were the main reason for the increased visibility. Visibility was the best in spring, better in winter and the worst in summer. In order to understand the causes of the low visibility in Beijing, the characteristics of the low visibility through a selected

收稿日期 2009-12-23 收到, 2011-06-01 收到修定稿

基金项目 中国科学院知识创新工程重大项目 KZCX1-YW-06-01, 国家重点基础研究发展规划项目 2007CB407303, 国家高技术研究发展计划项目 2006AA06A301

作者简介 张宏, 男, 1970 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为大气物理与生态环境。E-mail: zhangh@dq.cern.ac.cn

通讯作者 王跃思, E-mail: wys@dq.cern.ac.cn

case in which the visibility rapidly changed to low visibility was analyzed. In this analysis visibility showed a negative correlation with relative humidity and a positive or negative correlation with wind speed, which suggested that the influence of wind speed to visibility was two-sidedness. The analysis also suggested that high concentration of aerosol particles (PM_{2.5}) was a major cause for the visibility degradation. There was a significant anticorrelation between the concentrations of aerosol and the ranges of visibility ($R^2=0.93$, $p<0.01$), which indicated that the concentration of PM_{2.5} should firstly be controlled below $30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ to keep a good visibility ($>10 \text{ km}$) in Beijing, and the further reduction in aerosol concentrations will lead to an acceleration in improvement in visibility due to the non-linear relationship between aerosols and visibility. According to the diagnostic analysis result of environment process with weather pattern, PM_{2.5} and visibility had good relationship with the synoptic situation evolution. When the North China region was influenced by the high pressure gradient field after the front, the area of Beijing was affected by northerly winds. With a strong surface wind, atmospheric conditions favored for the diffusion of pollutants, resulting a lower concentration of particulate matter and a higher visibility. By contrast, when a mainland high pressure covered this area, the ground wind speed was weak and not conducive to the diffusion of pollutants. With accumulated local source and regional transportation, PM_{2.5} accumulated day after day from the valley value to the peak value, while the visibility decreased constantly. This study suggested the primary pollutant which should be controlled was PM_{2.5} to increase the visibility in Beijing.

Key words visibility, meteorological factors, PM_{2.5}, weather pattern

1 引言

大气能见度是反映大气透明度的一个指标, 大气能见度指白炽灯发出色温为 2700 K 的平行光束的光通量, 在大气中削弱至初始值的 5% 所通过的路径长度 (中国气象局, 2003)。大气能见度是衡量城市空气质量的重要指标, 与人们的日常生活密切相关, 低能见度对居民出行有着显著影响, 如交通堵塞, 航班延误等, 此外低能见度还可能造成严重的交通事故。作为一个百万级人口的大城市, 北京的大气能见度一直是人们关注的焦点。由于空气污染的加剧, 北京大气能见度自 20 世纪 80 年代起逐年下降 (Chang et al., 2009), 而引起能见度下降的主要原因是大气颗粒物特别是细颗粒物污染的加剧 (宋宇等, 2003), 并且与颗粒物的化学成分有密切关系 (Tao et al., 2009), 硫酸盐和硝酸盐等是引起能见度下降的最主要的细粒子成分 (Lee and Sequeira, 2002)。此外大气能见度还与风速、空气湿度等气象要素以及降水、沙尘等天气现象密切相关 (王淑英等, 2003)。为改善空气环境, 保障 2008 年北京奥运会期间空气质量, 最近几年北京市政府出台了多项措施加强对空气污染物的控制, 包括污染物的源控制, 调整能源结构等 (北京市环保

局网站: <http://www.bjepb.gov.cn> [2009-12-10])。因此分析北京最近几年能见度的变化趋势, 探讨能见度与颗粒物以及气象要素之间的关系不仅可以正确评价这些措施的影响, 而且可以为今后空气污染控制措施的实施提供重要的参考依据。

2 材料与方法

2.1 采样地点及方法

本文分析采用的能见度以及相关的气象数据 (空气温度、相对湿度、风向和风速) 由位于北京首都机场附近的气象观测站提供 (<http://www.wunderground.com> [2009-10-31]), 该站点的气象数据常年服务于首都机场, 因此数据质量可靠。气象站位于北京市顺义区航平西路 ($40^{\circ}07' \text{N}$, $116^{\circ}59' \text{E}$), 处于北京城区东北角, 与城区中心直线距离约 20 km。大气颗粒物质量浓度 PM₁₀ (空气动力学粒径小于等于 $10 \mu\text{m}$) 和 PM_{2.5} (空气动力学粒径小于等于 $2.5 \mu\text{m}$) 采用美国 Rupprecht & Patashnik 公司生产的两台 rp1400a 进行测定, 最低检测限为 $0.06 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$, 质量分辨率为 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 精度为 $\pm 1.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$, 采样频率为 5 min。采样点位于中国科学院大气物理研究所 ($39^{\circ}58' \text{N}$, $116^{\circ}22' \text{E}$) 325 m 气象观测塔东 60 m 的办公楼二楼楼顶, 距地面约 10 m。

该采样点介于北京三环路和四环路之间,距北三环路 1 km,其北侧 150 m 是城市交通主干道北土城西路,东距八达岭高速公路 200 m,与机场气象站直线距离约 20 km。Zheng et al. (2005) 对北京地区 5 个站点 PM_{2.5} 的监测结果表明:首都机场附近的 PM_{2.5} 与城区相差不大,冬季尤其相差无几 (PM_{2.5} 质量浓度:首都机场为 $69.35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;城区为 $65.63 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。因此在随后的个例分析中,本文近似认为首都机场附近与大气物理研究所附近大气颗粒物 PM_{2.5} 的变化趋势一致。

2.2 数据处理

利用 2005 年 1 月 1 日至 2009 年 10 月 31 日北京大气能见度和大气颗粒物 (PM₁₀ 和 PM_{2.5}) 日均值分析北京市最近 5 年能见度和颗粒物质量浓度变化趋势。计算年均值时,2009 年缺失的 11 月份和 12 月份的数据由 2005~2008 年对应月份的平均值代替。为了消除自然事件对能见度的影响,观测期间降雨、降雪天的数据均删除 (Doyle and Dorling, 2002)。研究表明当相对湿度大于 90% 时,硫酸铵等二次气溶胶粒子对太阳光的反射率会增加 5 倍以上 (Malm and Day, 2001),造成大气能见度的急剧下降,为了消除高湿度对能见度的影响,分析时剔除日平均相对湿度大于 90% 的观测数据。5 年数据的剔除率为 18%,不影响对观测期间能见度变化趋势的分析。为研究北京能见度演变特征,即由静稳天气的出现导致能见度逐渐下降,随着降雪过程的出现,能见度逐渐升高,文中选取 2008 年 12 月 4~12 日作为典型个例进行分析,其能见度以及相关的气象数据为小时均值,由首都机场附近的气象观测站提

供。PM_{2.5} 为大气物理研究所办公楼楼顶同时期测定的小时均值,由仪器测定的 5 分钟数据平均得到。

3 结果

3.1 能见度年际变化趋势

2005~2009 年北京市能见度和霾天数变化趋势如图 1 所示。霾天由下述 3 个条件确定: (1) 日平均能见度 $< 10 \text{ km}$; (2) 日平均相对湿度 $< 90\%$; (3) 没有降雨事件 (Wu, 2005)。从图 1 中可以发现,2006 年是 2005~2009 年空气污染最严重的一年,年均能见度最低 (9.05 km),霾天数最多 (152 天)。从 2006 年开始,北京市空气质量逐渐好转,年均能见度逐步上升,霾天逐渐减少。2009 年北京市年平均能见度达到 11.19 km ,霾天则减少至 115 天。通过线性回归模型分析 2006~2009 年间能见度变化趋势的结果表明,最近 4 年北京年均能见度呈现显著的线性增长,年增长率为 $0.69 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ (决定系数 $R^2 = 0.99$,显著性水平 $p < 0.01$) (见表 1)。

3.2 能见度季节变化特征

分析北京各个季节 (春季: 3~5 月; 夏季: 6~8 月; 秋季 9~11 月; 冬季 12~2 月) 2005~2009 年能见度的平均结果表明: 春季能见度最高 (11.19 km), 冬季次之 (10.33 km), 而夏季能见度最差, 仅为 8.81 km 。线性回归分析的结果表明: 近年北京秋季大气能见度呈现显著的线性增长, 增长速率为 $0.40 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2 = 0.97$, $p < 0.05$) (见表 1)。其他 3 个季节没有表现类似的变化趋势。

表 1 2005~2009 年北京大气能见度年际及季节变化趋势分析结果

Table 1 Summary statistics of annual and seasonal mean visibility and change trends in Beijing during 2005 - 2009

	能见度/km					变化趋势				
	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	均值	标准偏差	/km · a ⁻¹	R ²	p
春季	11.18	9.51	12.21	10.56	12.49	11.19	1.22	nlt	nlt	nlt
夏季	8.77	8.24	7.98	7.85	11.19	8.81	1.38	nlt	nlt	nlt
秋季	9.98	9.12	9.62	10.07	10.29	9.82	0.46	0.40	0.97	<0.05
冬季	10.76	8.85	11.22	10.48	nd	10.33	1.03	nlt	nlt	nlt
年平均	10.58	9.05	9.77	10.28	11.19	10.17	0.81	0.69	0.99	<0.01

注: nd 表示无数据, nlt 表示无线性关系; 能见度年变化趋势计算的时期, 冬季为 2006~2008 年, 其他季节为 2006~2009 年。

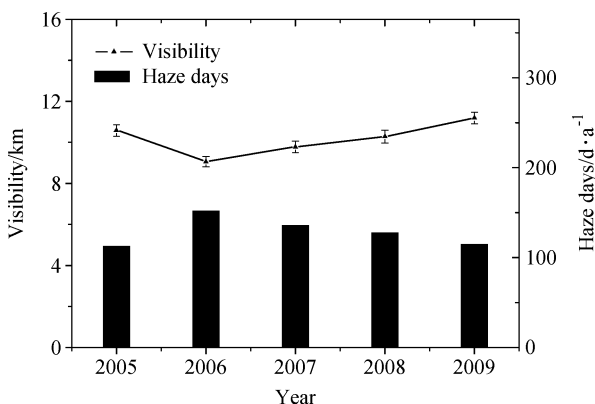


图1 北京市 2005~2009 年水平能见度及霾天数年际变化

Fig. 1 Variation for annual averaged horizontal visibility and haze days during 2005–2009

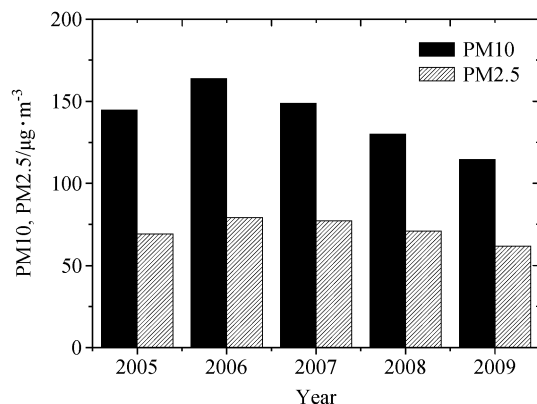


图2 北京市 2005~2009 年 PM10 和 PM2.5 年际变化

Fig. 2 Variation of annual PM10 and PM2.5 in Beijing during 2005–2009

4 讨论

4.1 能见度年际及季节变化成因

随着近年来北京市政府对污染物控制措施的加强,大气污染物的浓度逐年降低。北京市环保局监测的结果表明:2005~2009 年北京市气体污染物 SO_2 和 CO 的年均浓度以及 O_3 的超标天数逐年降低(北京市环保局网站: <http://www.bjepb.gov.cn> [2009-12-10]),同时本文的监测结果显示自 2006 年以来,大气颗粒物(PM10 和 PM2.5)质量浓度逐年降低(图 2)。相比较 2005 年,2006 年 PM10 和 PM2.5 均有不同程度的升高,这可能与临近奥运会,奥运场馆及附属设施等的建筑施工加强有关,具体原因有待于进一步的研究证实。比较图 1 能见度和图 2 颗粒物的年际变化趋势发现,大气能见度与颗粒物(PM10)尤其是细颗粒物(PM2.5)的变化趋势具有较好的一致性,两者的相关系数分别为 -0.91 和 -0.97 。大气能见度的降低与大气中污染气体和气溶胶粒子的散射和吸收效率有关(Madronich and Flocke, 1999),因此上述污染物浓度的降低导致能见度增加,改善了北京空气质量。

本文关于大气能见度季节变化的研究结果与王淑英等(2003)分析北京 1990~2000 年能见度季节变化的结果一致,同样表现为春季最高,冬季次之,夏季最低。可能的原因是春季温度较低,冷空气活动频繁,平均风速较大,有利于污染物

的清除;同时春季也是北京沙尘天气出现频率最高的季节,沙尘天气会显著降低能见度,从表 1 可知,2006 年是 2005~2009 年春季能见度最低的一年,这可能与 2006 年春季沙尘天气出现频率最高有关。尽管受沙尘天气影响,2006 年春季能见度低于往年,但仍高于同年其它 3 个季节,表明沙尘天气不是影响能见度季节间差异的主要因素。夏季能见度降低可能与夏季易出现高温高湿的天气有关,较高的空气湿度和温度有利于二次气溶胶粒子如硫酸盐的形成,颗粒物的光散射系数增强,从而降低大气能见度。

从上述分析可知大气能见度的长期变化与大气污染物特别是细颗粒物浓度的变化关系密切,提高能见度北京地区需要控制的首要污染物为 PM2.5。而能见度较短时期内的急剧变化不仅和颗粒物的浓度变化有关,同时也与伴随的天气演变过程有关(Wu et al., 2005)。本文选取 2008 年冬季能见度急剧恶化的一个过程作为个例分析来研究低能见度下的污染特征及天气形势。

4.2 个例分析

个例分析选取的时间段为 2008 年 12 月 4~12 日,对大气能见度、颗粒物质量浓度(PM2.5)和气象条件进行了同步观测。个例分析期间的天气情况分别为:12 月 4~5 日为晴天,6~9 日为霾天,10 日有降雪,12 日为雾天。这段时间内北京大气能见度急剧下降,由一个清洁的大气环境(能见度 >19 km)(Gomez and Smith, 1987)迅速转变为一个能见度极低的大气环境(能见度 <3

km)。因此对这段时期能见度急剧变化原因的分析可以说明北京较低大气能见度环境下的典型污染特征及天气形势演变特征。

图 3 显示了个例分析期间大气能见度与空气温度、相对湿度、地面风速和风向以及 PM2.5 质量浓度的变化情况。从图中可以看出, 12 月 4 日大气能见度为 20 km, 而 12 月 7 日仅为 3.5 km, 3 天内大气能见度由 20 km 下降至 5 km 以下。本文将大气能见度较高的时间段定义为 Period I (12 月 4~5 日), 而能见度较低的时间段, 根据是否有降雪事件的发生分别定义为 Period II (12 月 6~9 日) 和 Period III (12 月 10~12 日)。

3 个阶段大气能见度, PM2.5 以及气象因子的统计特征见表 2。从表中可以看出, 在 Period I 时期, 大气能见度较高, 为 19.4 km, 属于清洁的大气环境; 而在 Period II 和 Period III 时期,

大气能见度降至 5 km 以下, 分别属于霾天和雾天。能见度较高的时期对应着较低的 PM2.5 质量浓度 ($< 5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 较高的风速 ($> 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 以及较低的相对湿度 ($< 25\%$), 主导风向为偏北风; 而在能见度较低的时期则对应着较高的 PM2.5 质量浓度 ($> 100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 较低的风速 ($< 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 以及较高的相对湿度 ($> 49\%$), 主导风向为偏南风。说明大气能见度的降低与上述因子间存在密切的联系。

为了确定 PM2.5 以及各气象要素对大气能见度的影响, 运用 SPSS 15.0 对 12 月 4~12 日大气能见度小时均值与同时期 PM2.5 和各气象要素小时均值作简单相关和偏相关分析, 计算其相关系数。相关性分析前对数据进行正态分布检验, 运用 Minitab 14.0 分析软件中 Box-Cox 变换的自然对数转换, 将非正态分布数据转换为正态分布。简

表 2 3 个阶段大气能见度、PM2.5 以及气象因子统计特征

Table 2 Average concentrations of visibility, PM2.5, and meteorological factors during the three periods in the case study

阶段	时间段	气温/ $^{\circ}\text{C}$	湿度	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	主导风向	PM2.5/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	能见度/km
Period I	12 月 4~5 日	-5.2 (0.5)	23.6% (1.0%)	6.6 (0.5)	偏北	4.1 (0.5)	19.4 (0.2)
Period II	12 月 6~9 日	-2.0 (0.5)	49.2% (1.6%)	1.6 (0.1)	偏南	121.8 (6.0)	4.9 (0.4)
Period III	12 月 10~12 日	-1.9 (0.4)	79.1% (2.1%)	1.6 (0.1)	偏南	118.0 (7.6)	3.8 (0.3)

注: 括号内为对应的标准误。

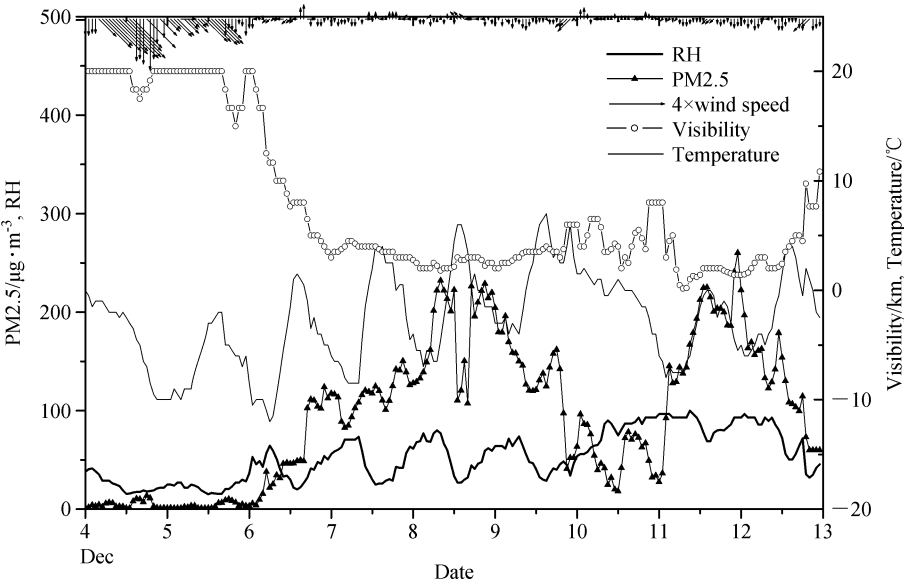


图 3 2008 年 12 月 4~12 日北京大气能见度、空气温度、相对湿度 RH (%)、地面风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和风向以及 PM2.5 小时浓度变化趋势
Fig. 3 Measured time series of the visibility, temperature, relative humidity (%), surface wind speed ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), wind direction, and PM2.5 concentration from 4 Dec to 12 Dec 2008 in Beijing

表 3 大气能见度与 PM2.5 以及地面气象要素间的简单相关与偏相关分析
Table 3 Pearson and partial correlation coefficient of visibility and PM2.5 and meteorological elements

	Pearson 相关			偏相关		
	相关系数	概率 p	样本数	偏相关系数	概率 p	自由度
PM2.5	-0.867	0.000	216	-0.449	0.000	210
相对湿度	-0.311	0.000	216	-0.428	0.000	210
温度	-0.723	0.000	216	0.032	0.639	210
地面风速	0.595	0.000	216	-0.157	0.022	210
气压	0.783	0.000	216	0.326	0.000	210

单相关和偏相关分析结果见表 3。由 Pearson 相关系数可以看出，大气能见度与平均风速和地面气压呈显著正相关关系，而与 PM2.5、相对湿度和温度呈显著负相关关系。Pearson 相关分析不仅显示两个变量之间相互影响（包括直接和间接影响）的程度，而且包含了其它相关变量的影响。因此要单独考察两个变量间的相关程度时，需要控制其它变量的影响，此时需要进行偏相关分析。表 3 的结果显示，在不受其它因素影响的情况下，大气能见度仍与相对湿度呈显著负相关，相关系数为-0.428。空气中水蒸气较丰富时，容易发生凝结而生成大量的小液滴，从而降低能见度（沈家芬等，2007）。在排除其它因素影响的情况下，地面风速与大气能见度的相关关系由显著正相关变为呈显著负相关，表明风速对能见度的影响是两方面的。首先当风速较小时，大气中气溶胶颗粒不易扩散，使得能见度降低；反之，风速相对较大时，有利于雾和气溶胶的扩散；但是当超过临界风速时，风又能吹起空气中的污染物，反而使得能见度降低。偏相关分析结果显示温度对大气能见度的变化无显著性影响，表明温度对大气能见度的影响是间接的。有研究显示（张利娜等，2008），温度对于冬季低能见度的影响是由于当大气温度降低至 0℃ 以下，冰面饱和水汽压低于水面饱和水汽压时，有利于雾的形成，从而降低大气能见度。在不受其它因素影响的条件下，PM2.5 和气压与大气能见度间仍分别存在显著负相关和显著正相关关系，相关系数分别为-0.449 和 0.326。为进一步分析 PM2.5 与大气能见度的定量关系以及区域天气形势对大气能见度的影响，本文下节将做进一步的讨论。

4.2.1 大气颗粒物 PM2.5

在大气能见度较高的第一个时期（Period I），

PM2.5 的质量浓度较低，浓度范围为 1.0~10.5 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，而在 Period II 和 Period III，PM2.5 急剧增加，均值大于 100 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，最大小时均值为 260.2 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，PM2.5 的高值对应着大气能见度的低值，表明能见度和 PM2.5 间存在较强的相关关系。进一步通过相关性分析显示，个例分析期间大气能见度和 PM2.5 存在显著的幂指数关系。图 4 显示了二者之间的相关关系式和相关系数（ $R^2=0.94$ ， $p<0.01$ ）。图中显示有 6 个数据点偏离模拟的幂指数曲线（虚线图形框内），分析数据表明这 6 个数据点的采样时间为 12 月 10 日 08 时（北京时间，下同）至 13 时，气象数据显示这段时间有降雪事件发生，降雪过程不仅会急剧降低大气能见度，同时对大气颗粒物的湿清除作用也会急剧降低 PM2.5 的质量浓度，从而影响能见度和 PM2.5 的模拟效果。剔除这部分数据后，能见度和 PM2.5 的相关性进一步提高，二者的相关系数达到 0.98 以上，这与上文分析两者的年际间相关系数接近。

从图 4 可以看出，能见度为 10 km 时对应的 PM2.5 质量浓度约为 30 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ （图 4 中黑色圆点显示），因此反过来说当 PM2.5 质量浓度大于边界浓度（30 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ）时，北京就有可能处于较低的大气能见度（<10 km）。美国环保局于 2006 年 9 月颁布的新的颗粒物环境空气质量标准（NAAQS）对 PM2.5 质量浓度的指导标准为日均值小于 35 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，与本文的分析结果非常接近。同时，能见度和 PM2.5 的非线性关系表明，当 PM2.5 较高时，能见度对 PM2.5 的响应较弱，例如当 PM2.5 由 100 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加至 200 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时，能见度由 4.7 km 降至 1.6 km，此范围内 PM2.5 浓度上升导致能见度降低的速率 $[\Delta V/\Delta A]$ （V 代表能见度，A 代表 PM 2.5 质量浓度）为

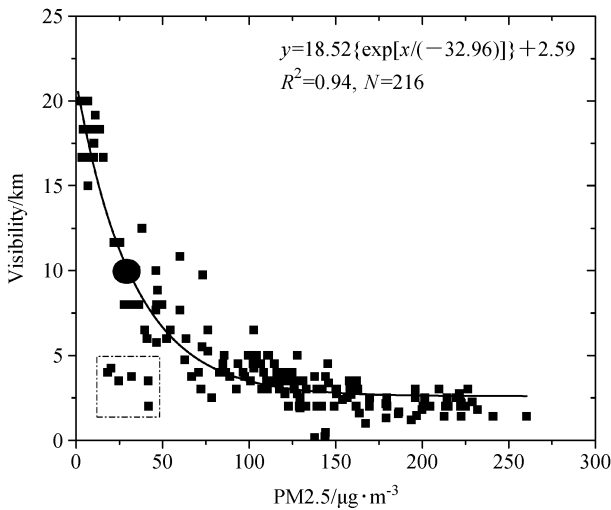


图4 大气能见度和PM2.5质量浓度相关性分析(2008年12月4~12日)。图中黑色的圆点代表大气能见度达到10 km时对应的PM2.5的质量浓度。虚线框内的点为降雪时刻对应的大气能见度和PM2.5质量浓度数据

Fig. 4 The correlation between visibility and aerosol concentration during 4 Dec to 12 Dec 2008. The solid dot indicates that the mean visibility reaches 10 km. The dots in the box are visibility and PM2.5 when snow falls

$-0.025 \text{ km} \cdot (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$; 而当PM2.5质量浓度较低时,能见度对PM2.5的响应较强,例如当PM2.5由 $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加至 $30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,能见度由18 km降至10 km,此范围内PM2.5浓度上升导致能见度降低的速率($\Delta V/\Delta A$)为 $-0.226 \text{ km} \cdot (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ 。能见度与PM2.5的这种非线性关系对于制定提高地区性大气能见度的策略具有重要的指导意义。本文的研究结果提示提高北京大气能见度可以分为两步:首先是制定PM2.5指导标准($\leq 30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),从而可以保持较高的能见度($\geq 10 \text{ km}$);其次对PM2.5的进一步控制将显著提高大气能见度。当然,本文获得的PM2.5边界浓度仅仅是冬季较短时间内的经验值,具体的PM2.5与能见度间的定量关系还需要进一步的研究证实。虽然近年来北京市政府加强了对空气污染物的控制,但颗粒物的控制主要是PM10,没有制定PM2.5的标准。本文的监测结果显示北京2005~2009年PM10和PM2.5的平均值分别为 $140.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $71.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,相比2005年、2009年PM10和PM2.5质量浓度的降低率分别为20.8%和10.4%;Zhao et al. (2009)对

北京2005~2007年PM2.5的监测结果也表明,近年来北京PM2.5质量浓度年际变化不大,年均值在 $84.5 \pm 6.1 \sim 93.5 \pm 7.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,而3年冬季PM2.5的平均值为 $91.1 \pm 14.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,与本文PM2.5的边界浓度($30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)相比,还存在着较大的差距。因此提高北京大气能见度需要进一步加强PM2.5主要排放源如化石燃料燃烧,二次硫酸盐和生物燃烧等的控制(Song et al., 2006)。

4.2.2 气象条件

个例分析期间北京大气能见度和PM2.5质量浓度的变化与区域天气形势间存在密切的联系。为了分析天气形势的影响,本文比较了3个时期代表天的天气图[天气图由国家气象局气象信息综合分析和处理系统(Meteorological Information Comprehensive Analysis and Processing System, MICAPS)分析得到]。从天气图上可以看出,在大气能见度较高的第一个时期(Period I)(图5),华北地区处于大陆强冷高压前部的高气压梯度区(即锋区),等压线密集,北京地区受偏北风影响,地面风速较大,平均风速达到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上(图3),大气扩散条件有利于污染物的稀释和扩散,致使大气颗粒物质量浓度较低(PM2.5日均值 $< 5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),同时期空气相对湿度为23.6%(表2),较低的空气湿度也有利于大气能见度的好转。

从12月6日开始,北京大气能见度急剧下降(Period II),从6日08时的天气图可以看出(图6),华北地区处于高压均压覆盖,风速较小,平均风速小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (表2),不利于污染物的扩散。图3显示PM2.5从谷值开始累积,浓度持续

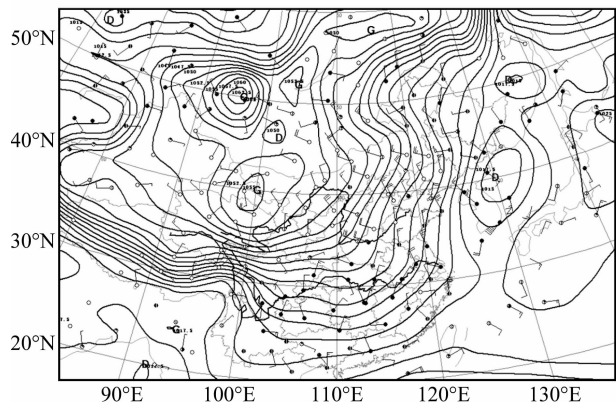


图5 2008年12月4日11时海平面气压

Fig. 5 Sea level pressure at 1100 LST 4 Dec 2008

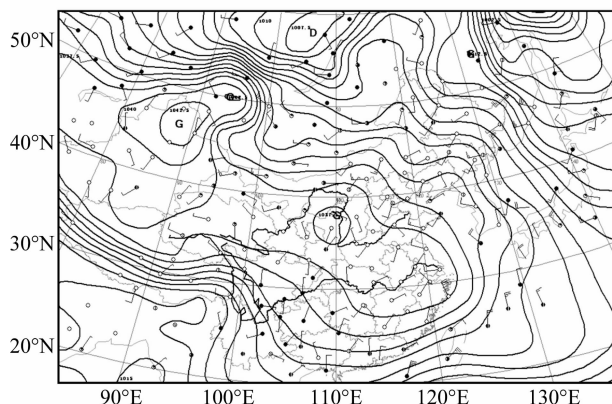


图6 2008年12月6日08时海平面气压

Fig. 6 Sea level pressure at 0800 LST 6 Dec 2008

上升,此过程属高压均压地方性风和静风累积阶段,主要是本地区源排放累积的结果。20时,华北大部分地区出现整齐的偏南风,属于高压后部的西南风。受西南风的影响,河北等地区的污染物向北京进行远距离输送并形成累积,此时,高压中心从华东地区移至海上,区域扩散条件差,污染物浓度仍然累积上升。

在 Period III, 大气能见度和 PM_{2.5} 的变化可分为两个阶段,在第一个阶段(12月10日),受降雪湿清除作用的影响,大气颗粒物质量浓度迅速降低,而降雪引起的相对湿度的增加也导致较低的大气能见度,此阶段大气能见度的降低主要受降雪及随后较高的空气湿度的影响。从第二个阶段(12月11~12日)开始,华北地区处于华南倒槽低压前均压控制(图7),尽管蒙古高压前部向东南移动,但此时华北区域污染物浓度处于累积增加状态。从图3可以看出,11日起PM_{2.5}质量浓度迅速增加并在晚上23点达到峰值(260.2 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),其后PM_{2.5}质量浓度有所降低,但是在12日上午11时达到第二个峰值(179.0 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。随着蒙古高压的移近,华北地区处于此高压前部锋区,风速增大,扩散条件有利于颗粒物的稀释和扩散,从12日上午11时开始,PM_{2.5}质量浓度逐渐降低,大气能见度逐步上升(图3)。

5 结论

通过分析2005~2009年北京大气能见度变化

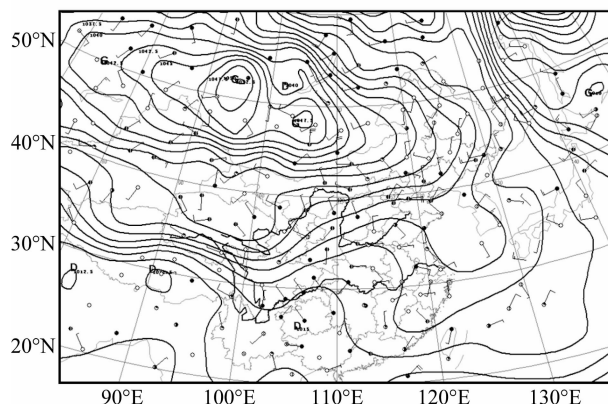


图7 2008年12月12日08时,海平面气压

Fig. 7 Sea level pressure at 08 LST 12 Dec 2008

趋势以及选取能见度急剧下降的典型个例分析,本文可以得出如下结论:

(1) 2006年是北京2005~2009年中能见度最低的一年,随后能见度呈现显著的线性增长,对空气污染物特别是细颗粒物排放控制措施的加强是大气能见度好转的直接原因;春季能见度最高,冬季次之,夏季最低;

(2) 相关和偏相关分析结果表明能见度与相对湿度呈显著负相关关系,与地面风速的相关关系时正时负。大气能见度急剧降低的过程伴随着大气颗粒物的快速累积增长,相关性分析显示两者之间存在显著的幂指数关系($R^2=0.93$, $p<0.01$),要保持较高的大气能见度($>10\text{ km}$),北京地区首先需要将PM_{2.5}的质量浓度控制在30 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,对PM_{2.5}质量浓度的进一步控制将大幅度提高大气能见度;

(3) 大气能见度和PM_{2.5}质量浓度的变化与区域天气形势密切相关。个例分析期间,当华北地区处于大陆高压梯度区时,北京地区受偏北风影响,地面风速较大,大气扩散条件有利于污染物的稀释和扩散,致使大气颗粒物质量浓度较低,大气能见度较高;而当华北地区处于高压均压覆盖时,地面风速较小,不利于污染物的扩散,北京地区受偏南风影响。受局地源累积以及区域输送的影响,PM_{2.5}从谷值开始累积,浓度持续上升,而大气能见度则表现为持续降低。

致谢 感谢刘广仁老师和张文老师等工作人员在实验过程中给予的帮助。

参考文献 (References)

- Chang D, Song Y, Liu B. 2009. Visibility trends in six megacities in China 1973–2007 [J]. *Atmos. Res.*, 94: 161–167.
- Doyle M, Dorling S. 2002. Visibility trends in the UK 1950–1997 [J]. *Atmos. Environ.*, 36: 3161–3172.
- Gomez B, Smith C G. 1987. Visibility at Oxford 1926–1985 [J]. *Weather*, 39: 379–384.
- Lee Y L, Sequeira R. 2002. Water-soluble aerosol and visibility degradation in Hong Kong during autumn and early winter 1998 [J]. *Environmental Pollution*, 116 (2): 225–233.
- Madronich S, Flocke S. 1999. The Role of Solar Radiation in Atmospheric Chemistry [M]. *Handbook of Environmental Chemistry*. Boule P. Ed. Heidelberg: Springer, 1–26.
- Malm W C, Day D E. 2001. Estimate of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity [J]. *Atmos. Environ.*, 35: 2845–2860.
- 沈家芬, 冯建军, 谢利, 等. 2007. 广州市大气能见度的特征及其影响因子分析 [J]. *生态环境*, 16 (4): 1199–1204. Shen Jiafen, Feng Jianjun, Xie Li, et al. 2007. Characterization of visibility and its effect factors in Guangzhou [J]. *Ecology and Environment* (in Chinese), 16 (4): 1199–1204.
- 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 2003. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系 [J]. *环境科学学报*, 23 (4): 468–471. Song Yu, Tang Xiaoyan, Fang Chen, et al. 2003. Relationship between the visibility degradation and particle pollution in Beijing [J]. *Acta Science Circumstantiae* (in Chinese), 23 (4): 468–471.
- Song Y, Zhang Y H, Xie S D, et al. 2006. Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing by positive matrix factorization [J]. *Atmos. Environ.*, 40: 1526–1537.
- Tao J, Ho K F, Chen L G., et al. 2009. Effect of chemical composition of PM_{2.5} on visibility in Guangzhou, China, 2007 spring [J]. *Particuology*, 7: 68–75.
- 王淑英, 张小玲, 徐晓峰. 2003. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析 [J]. *气象科技*, 31 (2): 109–114. Wang Shuying, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng. 2003. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 31 (2): 109–114.
- Wu D. 2005. A discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather [J]. *Meteorology*, 31: 1–7.
- Wu D, Tie X X, Li C C, et al. 2005. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. *Atmos. Environ.*, 39: 6568–6577.
- 张利娜, 张朝林, 王必正, 等. 2008. 北京机场高速公路能见度与大气动力和热力因子的诊断及物理分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (3): 260–272. Zhang Lina, Zhang Chaolin, Wang Bizheng, et al. 2008. The diagnose and ohysical analyses about the relationship between atmospheric visibility and the corresponding dynamical and thermodynamical factors in the Beijing airport expressway [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (3): 260–272.
- Zhao X J, Zhang X L, Xu X F, et al. 2009. Seasonal and diurnal variations of ambient PM_{2.5} concentration in urban and rural environments in Beijing [J]. *Atmos. Environ.*, 43: 2839–2900.
- Zheng M, Salmon L G., Schauer J J, et al. 2005. Seasonal trends in PM_{2.5} source contributions in Beijing, China [J]. *Atmos. Environ.*, 39: 3967–3976.
- 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京, 气象出版社, 17–20. China Meteorological Administration. 2003. *Surface Weather Observation Standards* [M] (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 17–20.