

苗蕾, 廖晓农, 王迎春, 等. 2016. 北京 2005—2014 年  $PM_{2.5}$  质量浓度的演变特征. 气象, 42(8): 954-961.

# 北京 2005—2014 年 $PM_{2.5}$ 质量浓度的演变特征<sup>\* 1</sup>

苗 蕾<sup>1,2</sup> 廖晓农<sup>1,2</sup> 王迎春<sup>3</sup> 赵春生<sup>4</sup>

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

3 北京市气象局, 北京 100089

4 北京大学物理学院, 北京 100871

**提 要:** 利用 2005—2014 年北京宝联(城区)和 2006—2014 年上甸子本底站(郊区)的  $PM_{2.5}$  质量浓度监测结果揭示了其长时间的演变特征。结果表明, 2005—2007 年北京地区  $PM_{2.5}$  污染最重, 2008 年以后  $PM_{2.5}$  年平均浓度明显降低, 中度以上污染日数减少, 但是 2013—2014 年有加重趋势。城区秋、冬季平均浓度最高, 春季和夏初次之。然而, 近年来春、夏季污染有减轻的趋势, 高浓度值出现的时间越来越向秋、冬季集中, 从而导致季节性差异变大。春季沙尘天气是其影响因素之一。上甸子春、夏季的  $PM_{2.5}$  平均浓度高于秋、冬季, 与城区不同。但 2011 年以后城郊差异逐渐变小, 表明污染事件的区域性特征增强。北京城区中度污染日数年平均为 30 d, 重度污染为 26 d, 严重污染为 4.7 d。污染日数月际变化明显并且月分布具有年际差异。2013—2014 年, 中度污染日数减少, 严重污染日数增加,  $PM_{2.5}$  年平均浓度与秋、冬季重污染过程的相关性增大。上甸子中度以上污染日数是城区的 1/3。持续性重污染过程多发生在秋、冬季。2008—2014 年以后中度以上污染持续超过 3 d 的过程每年平均发生 1.9 次, 重度以上污染 0.6 次。绝大多数严重污染只持续 2~3 d。重度以上污染日多出现在污染过程的中后期, 因此遇不利气象条件提前采取减排措施将有可能减少重污染发生的频次。

**关键词:**  $PM_{2.5}$  质量浓度, 中度以上污染日数, 持续性污染事件, 年际变化, 季节差异, 长时间变化规律

**中图分类号:** P427, X513

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.08.005

## Evolution Characteristics of $PM_{2.5}$ Mass Concentration in Beijing During 2005—2014

MIAO Lei<sup>1,2</sup> LIAO Xiaonong<sup>1,2</sup> WANG Yingchun<sup>3</sup> ZHAO Chunsheng<sup>4</sup>

1 China Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Beijing Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

3 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089

4 School of Physics, Peking University, Beijing 100871

**Abstract:** The  $PM_{2.5}$  mass concentration data from Baolian Atmospheric Composition Monitoring Station, which represents urban area, in 2005—2014 and the data from Shangdianzi BAP-Station, which represents rural area, from 2006 to 2014 are used to analyze its long-term temporal evolvement in Beijing. The results show that the  $PM_{2.5}$  pollution was the severest during 2005—2007. Since 2008, the annual mean mass concentration and the days of moderate pollution or over have been reduced, but the situation became worse from 2013 to 2014. The average mass concentration in urban area was the highest in winter and autumn, and took the second place from spring to the early of summer. However, in recent several years, such pollution tends to be reduced somewhat in spring and summer. At the same time, high mass concentration

\* 国家科技支撑计划项目(2014BAC16B04)和国家级雾霾监测与预报团队共同资助

2015 年 7 月 30 日收稿; 2016 年 6 月 1 日收修定稿

第一作者: 苗蕾, 主要从事环境气象研究. Email: miaolei620@126.com

通信作者: 廖晓农, 主要从事强对流和雾-霾天气研究. Email: cristinlxn@126.com

was found more often in autumn, which enlarges the seasonal gap. One impact factor is the sand-dust weather in spring. At Shangdianzi Station, the rural area, the annual mean mass concentration is higher in spring and summer, different from that in urban area. But since 2011, the above difference has become much smaller. This indicates that the regional pollution takes place more commonly. On average, there are 30 pollution days at moderate level, 26 days at severe level and 4.7 days at extreme level every year. However, there is some monthly and annual discrepancies of this characteristic. Besides, the moderate pollution cases decreased while severe ones increased in 2013 and 2014. Therefore, the annual mean mass concentration has higher relationship with the severe pollution events in winter and autumn. The moderate or severe pollution days in Shangdianzi are only 1/3 of that in urban area. Moreover, the persistent pollution event appears in winter and autumn normally. The annual average times of pollution events which last at least 3 days are 1.9 for moderate level and 0.6 for severe level during 2008—2014. Most extreme events could cover 2 to 3 days only. Based on the statistics, the mass concentration often reaches severe grade or above after the middle stage of the event. So, it might reduce the possibility of severe pollution by controlling emission in advance when the meteorological condition is not favorable for the diffusion of pollutants.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub> mass concentration, pollution days of moderate level or above, persistent pollution event, annual variation, seasonal difference, long-term variation

## 引 言

PM<sub>2.5</sub>是悬浮在空气中的细微粒子。根据《环境空气质量标准》(GB 3095—2012;环境保护部国家质量监督检验检疫总局,2012),在二类环境空气功能区(包括居住区、商业交通混合区、文化区、工业区和农村地区)空气质量二级(良好)的PM<sub>2.5</sub>年平均质量浓度限值为 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。近年来,政府相关部门加大了大气污染综合防治的力度,但是环保部门公布的数据表明,2013—2014年北京及周边一些城市的PM<sub>2.5</sub>年均浓度仍然在 $70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。由于PM<sub>2.5</sub>对人类的健康有很大影响(郭新彪等,2013),因此大气污染防治已成为全社会关注的焦点。

防治大气污染的基础是全面了解污染的程度及其演变规律。统计结果显示,细颗粒物已逐渐成为我国一些城市的首要污染物(张霖琳等,2014;黄鹂鸣等,2002),其质量浓度分布具有明显的季节变化。通常冬季污染最重、夏季最轻(杨复沫等,2002;朱易等,2004;徐敬等,2007;孙玫玲等,2008;Zhao et al, 2009;洪也等,2010;孟绍阳等,2012;张智胜等,2013;柯馨姝等,2014;王占山等,2015;花丛等,2015)。但是,福州市春季的浓度却高于其他季节(王宏等,2014)。陈媛等(2010)的研究也表明,2005年2月至2006年5月期间北京春季污染最重,秋季次之,夏季和冬季相近,与Zhao等(2009)的统计结

果不同。邓利群等(2011)分析了2008年7月至2009年4月北京北部城区的监测结果指出,浓度的季节分布为春季>夏季>冬季>秋季。李旭芳等(2011)则认为除冬季外,7—9月也是PM<sub>2.5</sub>质量浓度较高的时段。王京丽等(2004)发现2001年北京夏季的PM<sub>2.5</sub>质量浓度最高。北京上甸子大气本底站(代表北京较清洁的郊区)2005—2007年春季的浓度居各季节之首(Zhao et al, 2009)。上述差异反映了在不同城市、同一城市不同年代、同一城市城郊之间污染物排放和气象条件的不同与变化。因此,从大气污染防治的角度来讲,有必要开展基于长时间序列的统计分析。与借助AQI或API反映空气质量长期变化(马雁军等,2005;李小飞等,2012)不同,Lü等(2015)基于北京2000—2012年PM<sub>2.5</sub>的监测资料分析指出该期间年均浓度下降,季节变化减小,秋、冬季的平均浓度降低。那么,近两年北京PM<sub>2.5</sub>污染是否发生了变化?此外,目前京津冀地区空气重污染预警主要根据日均浓度的水平及其维持时间设定阈值,基于长时间序列的污染日分级和污染过程持续性的分析比较缺乏。

本文利用2005—2014年北京海淀宝联(代表城区)和2006年以来上甸子大气本底站(代表郊区)的监测结果分析了PM<sub>2.5</sub>年均浓度的长期演变特征、日均浓度月分布(季节分布),讨论了城区和郊区中度、重度和严重污染日数的年际、月际(季节)变化和中度以上污染持续的时间、年均发生的频次等。本文得到的结果将为深入分析北京地区PM<sub>2.5</sub>污染的

影响机制奠定基础,同时也将有助于科学、合理地采取减排措施进而降低重污染事件发生的频次。

## 1 资料及处理方法

北京市气象局所属的宝联和上甸子两个大气成分监测站从 2005 年开始  $PM_{2.5}$  观测,其中宝联测站位于北京市海淀区宝联公园内,可代表城区,本文使用了其 2005—2014 年  $PM_{2.5}$  质量浓度小时平均值;上甸子是大气本底站,位于北京市东北部的密云县,测站海拔高度 287 m,代表北京较清洁地区的情况。由于该测站 2005 年缺测较严重,本文采用了 2006 年以后的监测结果。

目前,国际上广泛用于测定  $PM_{2.5}$  的方法主要有 4 种(冯进,2014)。宝联和上甸子均采用美国 R&P 公司生产的 1400a TEOM 微量振荡天平环境颗粒物监测仪,由于测量过程对采样气流的加热会导致半挥发性物质损失,在不作补偿的情况下其测量结果一般较其他方法偏低(Liu et al,2015)。Liu 等(2015)认为此类仪器测定的质量浓度补偿率可以定为 30%。考虑到测量值偏低属于仪器的系统性偏差,而且比较稳定,基本不会影响对  $PM_{2.5}$  长期演变趋势的定性讨论,而且目前对于补偿率究竟定为多少尚无定论,因此本文仍然采用了原始测量数据,但在讨论污染日数时将下限定为中度污染。

本文将日界定为 00 时,若某日小时浓度连续缺测超过 8 个时次,则剔除该日;否则对缺测时次进行插值处理。对两个测站全部数据分析表明,出现长时间连续缺测时前后时次的  $PM_{2.5}$  小时浓度一般低于  $35 \mu g \cdot m^{-3}$ ,因此删除该日记录不会影响本文中中度及以上污染日数的统计结果。当小时浓度明显偏高并超过  $2\sigma$  时,若非沙尘日、烟花爆竹集中燃放期,则认为该值为奇异高值,采用与缺测时次相同的处理方法。

## 2 北京城区 $PM_{2.5}$ 浓度和中度以上污染日数的长期演变特征

### 2.1 $PM_{2.5}$ 质量浓度的统计特征

宝联测站(以下简称为北京城区) $PM_{2.5}$  污染在 2008 年以后明显减轻(图 1),但是 2013—2014 年有加重的趋势。2005—2007 年是近 10 年  $PM_{2.5}$  浓度较高的时段,其中 2006 年污染最重,年平均浓度达

到峰值。此后明显下降,2008—2014 年  $PM_{2.5}$  年平均浓度较 2006 年(近 10 年最大值)降低了近  $30 \mu g \cdot m^{-3}$ (图 1a)。而且,日均值也呈逐渐减低趋势(图 1b)。然而,2013 年的年均值有所上升,虽然 2014 年略降,但是两年的平均浓度仍然高于 2008 年以来的平均值(图 1a)。

平均而言,北京城区秋、冬季一般污染最严重,近几年季节差异呈增大趋势(图 1a)。进入 10 月以后  $PM_{2.5}$  质量浓度明显增加,11 月达到峰值(年最大值),整个供暖季浓度维持在较高水平;年内的第二个峰值出现在 6 月。比较而言,春、夏季的平均浓度低于秋、冬季。尽管日均浓度的月分布有年际差异,但是除 2007 年(出现在 6 月)和 2008 年(出现在 5 月)外其他年份污染最重的月份均出现秋、冬季,与采暖导致污染物排放增加有关。此外,近几年日均浓度季节性差异变大,表现为春、夏季浓度降低,高值出现的时间越来越向秋、冬季集中,例如:2014 年春、夏季日均值很低,2 和 10 月浓度最高,说明秋、冬季的污染过程对浓度年均值的贡献率在增大。上述特征与 Lü 等(2015)基于 2000—2012 年监测得到的统计结果不同,反映了  $PM_{2.5}$  质量浓度月分布的新变化。

日均浓度 10 年平均浓度分布表明,一年中易出现  $PM_{2.5}$  峰值浓度的主要时段分别是 1 和 2 月的中下旬、4 月底至 5 月初、6 月下旬和 10 月上旬(图 1c)。近 10 年的平均浓度极大值出现在 1—2 月,是春节期间集中燃放烟花爆竹与供暖等日常排放叠加的结果(姚青等,2016);6 和 10 月主要受收获季节秸秆燃烧的影响。通过普查天气现象观测发现,2005—2014 年 4 月 27 日至 5 月 3 日期间沙尘天气出现的统计概率较高,从而导致  $PM_{2.5}$  质量浓度明显升高。此外,从多年平均的日均浓度也可以看到,除几个峰值外,供暖季对年均值的贡献也较大。上述分析表明,北京城区  $PM_{2.5}$  峰值浓度的分布具有一定的规律性,因此可以通过采取减少烟花爆竹燃放和秸秆燃烧等人类活动对空气质量的影响,在改善供暖能源结构的同时遇不利气象条件尽可能地减少日常排放量等措施,避免出现多因素叠加导致的重污染过程,以达到削减污染过程的峰值、降低年均浓度的目的。

### 2.2 中度以上污染日数和污染的持续性

按照我国环保部门的规定,当  $PM_{2.5}$  质量浓度日均值在  $116 \sim 150 \mu g \cdot m^{-3}$  时为中度污染日;151

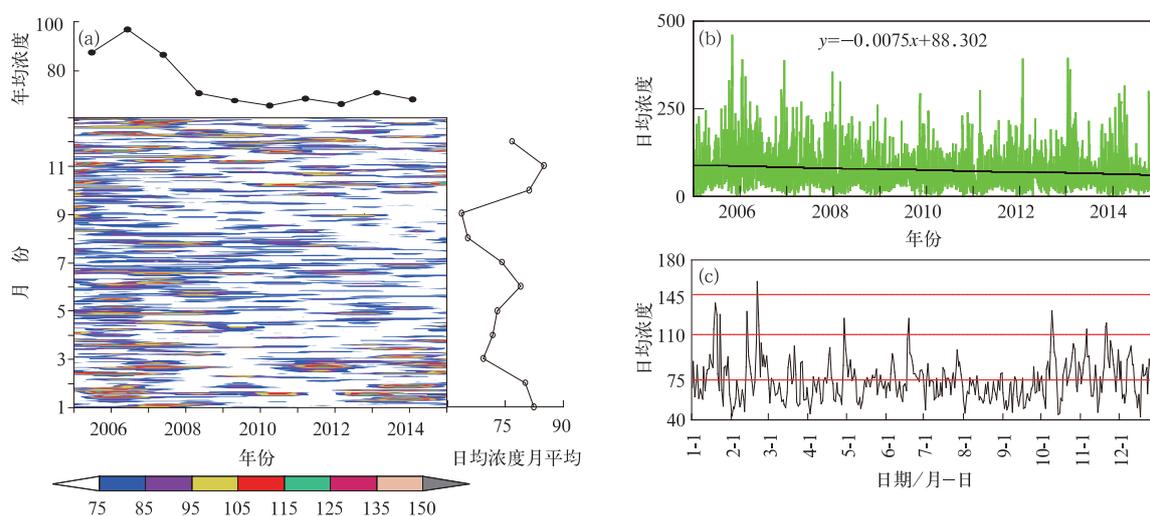


图 1 宝联 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度(单位:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 时间演变  
(a) 年均浓度(顶端曲线)、日均浓度月平均值(右侧曲线)和日均浓度分布,  
(b) 日均浓度的逐年分布, (c) 日均浓度 10 年平均值

Fig. 1 The temporal evolvement of PM<sub>2.5</sub> mass concentration (unit:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) at Baolian Station  
(a) annual average (line at top), monthly average of daily mean concentration (line in the right side)  
and daily mean concentration, (b) annual distribution of daily mean concentration,  
(c) decadal average of daily mean concentration

~250  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  为重度污染日;超过 251  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  时为严重污染日。2005—2014 年北京城区中度以上污染年平均日数为 60.7 d,出现的平均概率为 16.6%。在年均浓度较高的 2005—2007 年概率超过 20%,其中 2006 年最高,达到 28%,2008 年以后污染日数减少,概率降低至 11%~15%。此外,中度以上污染具有一定的持续性(图 1a 和 1b)。持续时间在 2 d 及以上的污染过程年平均出现 15.6 次;3 d 及以上的过程出现 7 次;超过 3 d 的过程出现 3.7 次。2008 年以后分别为 8、3.6 和 1.9 次,并且 67% 的过程分布在 10—12 和 1—2 月。最长的污染过程发生在 2011 年的 2 月,连续 9 d PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日均值超过 115  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

进一步分析表明,北京城区的中度污染日数总体呈现减少趋势(图 2a)。近 10 年,中度污染年平均日数 30 d,2006 年最多(46 d),2006—2010 年逐年下降,减少幅度达 50%。2005—2014 年的最小值出现在 2013 年,仅 13 d;2014 年的中度污染日数为 20 d,是 2005 年以来的第二低值。此外,城区中度污染日数月际变化明显,并且月分布存在年际差异。从图 2a 可以看到,中度污染平均日数的月际变化呈 4 峰分布。4 个峰值分别出现在 6、12、3 和 9 月,8 月日数最少。但是,各年的分布不尽相同。2005—2009 年多峰分布的特征明显,年度最大值出现的月份比较分散。2010 年以后,4—9 月污染日数减少,

中度污染日主要出现在冬半年,最大值集中分布在 1、11 和 12 月。

2005—2009 年重度污染日数明显减少,此后在较低的水平上小幅波动(图 2b)。近 10 年,年平均重度污染日为 10 d,年际差异较大,最多的年份达到 44 d(2006 年),最小值近 12 d(2012 年)。月平均重度污染日为 1~3 d,月际变化呈 3 峰分布。10—12 月的日数明显多于其他月份,另外 2 个峰值分别出现在 4 和 6 月,8 月日数最少。2009 年以后春、夏季的污染日数总体呈现减少趋势,冬半年是重度污染发生的主要季节,与中度污染日的分布特征相同。

近 10 年,严重污染日数的年际变化特征为:先降后升,秋、冬季出现严重污染的概率明显高于其他季节(图 2c)。2005—2007 年严重污染发生频率相对较高,污染日数为 7~11 d。2008—2012 年,严重污染日数在 3 d 左右,2008 和 2012 年无严重污染日。从 2013 年开始严重污染日数增多,2014 年为 9 d,仅次于 2006 年,是近 10 年的第二高值,但是严重污染日的日均浓度却呈降低趋势。宝联的严重污染日主要分布在 1—2 和 10—12 月,只有 2006 年 3 月以及 2007 年 4 和 6 月分别有 1 d 的日均浓度超过 250  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 2c)。由于 2013—2014 年中度污染日数减少、重度污染日数变化不大,因此严重污染日对年均浓度的贡献有所提高。

统计表明,北京城区持续性重污染过程多发生

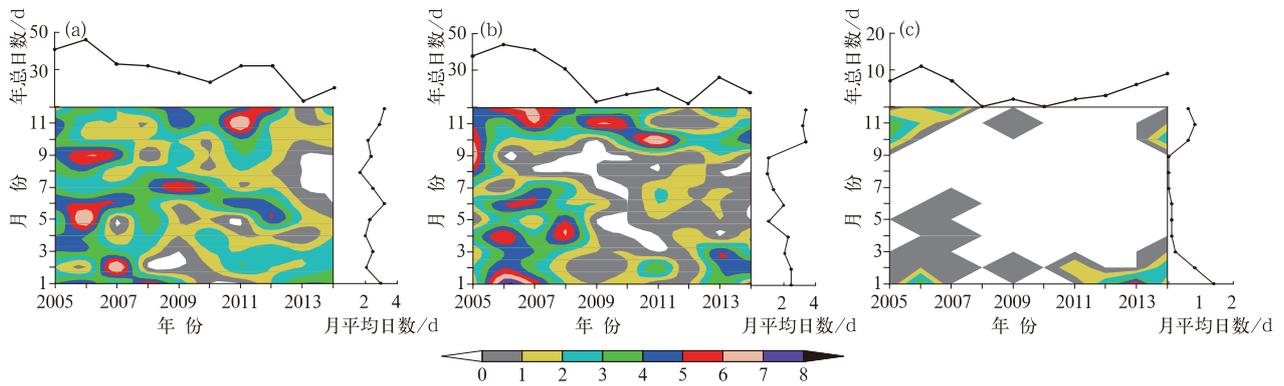


图 2 2005—2014 年宝联 PM<sub>2.5</sub> 日均浓度中度以上污染日数

(a) 中度污染, (b) 重度污染, (c) 严重污染

Fig. 3 Pollution days of PM<sub>2.5</sub> daily mean concentration of moderate pollution or above at Baolian Station during 2005—2014

(a) moderate pollution, (b) severe pollution, (c) serious pollution

在供暖季。重度以上污染持续 2、3 和 3 d 以上的年平均次数分别为 6.2、3.1 和 1.4 次, 2008—2014 年分别为 2.6、1.3 和 0.6 次。2006 年 12 月连续 7 d 达到重度以上污染, 为近 10 年之最。2008 年以后重污染持续时间最长的过程为 4 d。2005—2014 年持续性严重污染过程共计 16 次, 其中持续 2 和 3 d 的过程分别为 10 和 5 次, 达到 4 d 的仅 1 次(2005 年 11 月)。由于重度污染日和严重污染日多出现在持续性污染过程的中后期, 因此在气象条件长时间不利于空气中污染物扩散的情况下, 提前采取减排措施将有可能减少严重污染发生的频次。目前, 北京市按照重度以上污染持续的时间启动不同等级的空气重污染预警, 上述结果对于制定科学、合理的预

警方案将有所帮助。

### 3 上甸子(郊区)PM<sub>2.5</sub> 质量浓度和污染日数的统计特征

#### 3.1 PM<sub>2.5</sub> 浓度

上甸子大气本底站的空气质量优于城区, 两者 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的年际变化趋势相似(图 3a 和 3b)。2006 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度最高, 此后递减。但是, 2012 年以后其空气质量变差, 2014 年的年均浓度为 2008 年以来最高。

上甸子站 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的月平均呈 3 峰分布

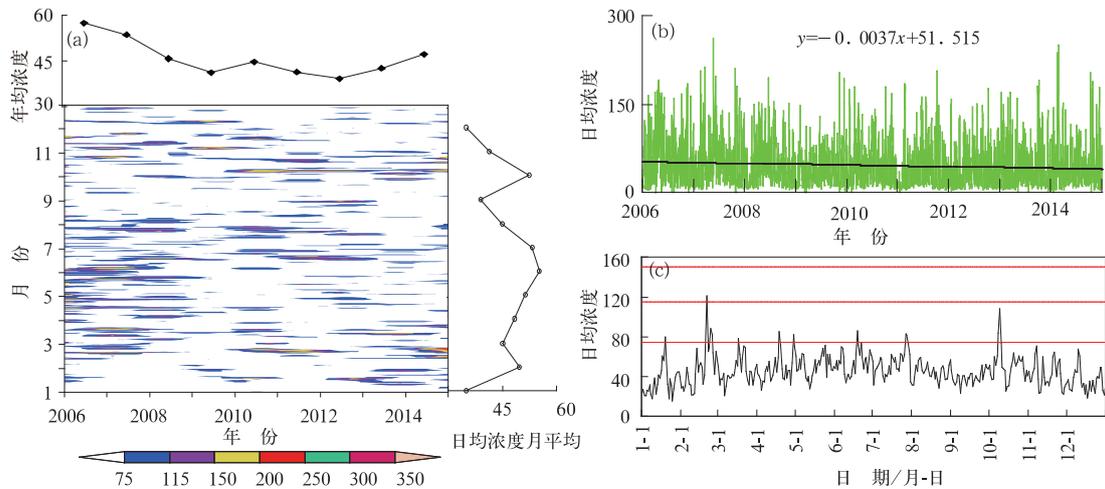


图 3 同图 1, 但为上甸子站

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for Shangdianzi Station

(图 3a)。3 个峰值分别出现在 2、6—7 和 10 月。上甸子春、夏季的平均浓度高于秋、冬季,与城区不同。对比 Zhao 等(2009)的研究结果发现,郊区日均浓度的季节分布也随时间发生着改变。2006—2010 年,春季和夏初 PM<sub>2.5</sub> 浓度最易偏高,其次是秋季。然而,从 2011 年开始秋、冬季逐渐成为污染易发季节,与城区的差异性减小,说明北京地区 PM<sub>2.5</sub> 污染的区域性趋于明显。

上甸子峰值浓度的分布与城区相似,其中 1—2 和 10 月较突出,3—8 月平均浓度较高且呈多峰分布是该测站日均浓度多年平均值演变的重要特征,也是与城区的重要差异(图 3c)。因此,导致郊区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度明显升高的机制与城区大致相同,但是为什么上甸子春、夏季浓度高于冬季而且存在多个峰值是一个值得研究的科学问题。

### 3.2 中度以上污染日数

上甸子中度以上污染发生概率为 5.6%,是宝联的 1/3。年平均中度污染日数 13.8 d,最大值为

26 d(2006 年),最小值仅 3 d(2009 年)。年度污染总日数的年际变化特征在 2009 年之前呈减少趋势;2010 年以后维持在 10 d 左右,变化幅度很小(图 4a)。6 月(最大值)、3—4 月和 10 月是平均中度污染日数较多的月份,该特征一直维持到 2011 年。2012 年以后,尽管仍然呈 3 峰分布,但是峰值出现的月份却有变化,春季的峰值有向 1—2 月偏移的趋势,春末和夏季的日数明显减少。

近两年上甸子重度污染日数明显增多,而且秋、冬季污染加重(图 4b)。2006—2014 年重度污染年平均日数 6.4 d,2009 年之前年总日数逐年减少,2009—2013 年在 3~5 d 小幅波动,到 2014 年陡增至 14 d,为近 10 年最大值。重度污染日数平均值月际变化有 4 个峰值,但是从图 4b 逐年变化可以看到主要是其受 2006 和 2007 年的影响较大。2009 年以后特别是 2013—2014 年绝大多数重度污染日出现在 10 和 1—2 月,其中 2014 年 2 和 10 月分别有 3 d 的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日均值达到 151~250  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,为 2006 年以来罕见。

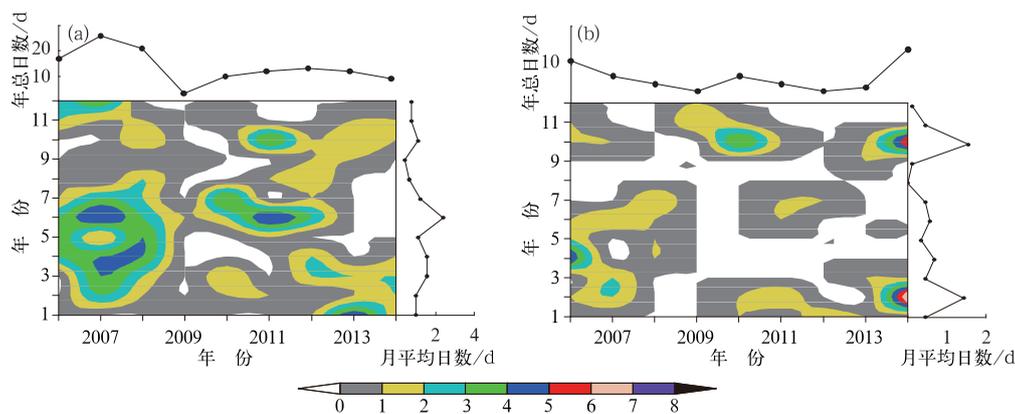


图 4 2006—2014 年上甸子 PM<sub>2.5</sub> 日均浓度中度以上污染日数

(a) 中度污染, (b) 重度污染

Fig. 4 Pollution days of PM<sub>2.5</sub> daily mean concentration of moderate pollution or above at Shangdianzi Station during 2006—2014

(a) moderate pollution, (b) severe pollution

2006—2014 年上甸子本底站只在 2007 年 5 月发生过一次严重污染,鉴于样本太少本文不讨论该测站的严重污染特征。

上述分析表明,上甸子本底站中度以上污染日数少于宝联,但是两个测站的年际和月际变化有许多相同之处,即:污染日数呈减少趋势,其中 4—9 月最明显,秋、冬季成为 2013 年以来中度以上污染发生的主要季节。此外,2013—2014 年重度及以上污

染出现的频次有所增加。这些特征反映了北京地区近 10 年中度以上污染日的演变规律。

## 4 讨论

如前所述,近年来北京地区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度分布的季节性差异增大,春、夏季污染有所减轻。夏初为华北平原的主要收获期之一,秸秆燃烧是影响空

气质量的重要因素(祝斌等,2005;唐喜斌等,2014;李阳等,2012;吴万宁等,2014;李瑞敏等,2015),因此北京市 2013—2017 年清洁空气计划明确将秸秆等生物质燃烧定为违法行为并加大了执法检查力度,2014 年 6 月下旬没有出现浓度峰值(图 1a),说明本地排放减少对降低收获期  $PM_{2.5}$  污染可能起到了一定的作用。

已有研究表明,除人类排放外沙尘天气也是导致  $PM_{2.5}$  浓度升高的因素(张志刚等,2009;马雁军等,2012)。北京地区的沙尘天气主要出现在春季(高庆先等,2002),当观测到浮尘或扬沙时, $PM_{2.5}$  的浓度与  $PM_{10}$  同步升高。统计了 2005—2014 年 3—5 月的沙尘日数(图 5),结果表明 2006 年的沙尘过程居近 10 年之首,达到 11 次;2008 年次之,共有 5 次沙尘天气。从图 2 可知,这两年 3—5 月中度以上污染日数明显多于其他年份,并且年度最大值出现在春季,而 2009 年以后沙尘过程每年为 1~3 次。计算得到近 10 年 3—5 月中度以上污染日数与沙尘日数的相关系数为 0.84。因此,北京地区  $PM_{2.5}$  质量浓度月分布的改变与春季沙尘天气减少有一定关系。

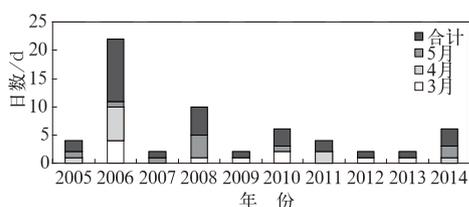


图 5 2005—2014 年 3—5 月北京沙尘日数

Fig. 5 Sand-dust days in Beijing in March, April and May during 2005—2014

春、夏季是北京地区降水天气的多发季节,雨水的湿清除作用有利于空气质量的改善(杨东贞,2005;蒲维维等,2011;刘子锐等,2011;江瑶等,2015)。然而,2005—2014 年春、夏季降水量和降水日数与中度以上污染日数的相关系数分别为-0.46 和 0.49,相关性并不显著,说明降水不是导致近年春、夏季污染减轻的关键影响因素。

除上述讨论外,仍然有一些科学问题值得进一步研究:(1)气象条件究竟在  $PM_{2.5}$  浓度月/季节分布特征的改变中起了什么作用?(2)在大气污染综合防治力度加大的背景下,为什么 2013 年以来北京城区的严重污染日数不降反升?(3)上甸子本底站

的空气质量为什么变差?导致其  $PM_{2.5}$  浓度月分布与城区不同的机制是什么?(4)在更小的时间尺度上  $PM_{2.5}$  浓度的演变特征及其在不同季节、不同程度污染条件下的异同及其影响因素?上述研究需基于高时间和空间分辨率的、地面与高空结合的气象观测/探测资料来开展。

## 5 结 论

本文采用 2005—2014 年北京海淀宝联测站(代表城区)和 2006—2014 年密云上甸子大气本底站(代表郊区)的  $PM_{2.5}$  监测资料分析了细颗粒物污染的时间演变,得到以下结论:

(1)2005—2007 年是近 10 年北京地区  $PM_{2.5}$  污染最严重的时段,从 2008 年开始明显减轻,日均浓度下降、中度以上污染日数减少。但是,2013—2014 年城区平均浓度高于 2008—2014 年的平均值,而且上甸子的年均浓度也升高。

(2)城区  $PM_{2.5}$  浓度 10 年平均值秋、冬季最高,春季至夏初次之。浓度的季节分布差异在近 2~3 年趋于明显,表现为春、夏季污染有减轻的趋势、高浓度值出现的时间越来越向秋、冬季集中,这可能是除减少排放外导致年均浓度降低的原因之一。因此,秋、冬季的污染事件对年均值的贡献率增大,是大气污染防治的重点季节。2009—2014 年 3—5 月沙尘天气减少是影响因素之一。上甸子春、夏季浓度高而且呈多峰分布,与城区不同。然而从 2011 年开始,城郊差异减小,说明北京地区  $PM_{2.5}$  污染的区域性在增强。

(3)城区年平均中度以上污染日数为 60.7 d。其中,中度污染为 30 d,重度污染为 26 d,严重污染为 4.7 d。中度以上污染日数月际变化明显,并且月分布存在年际差异。2005—2009 年,6、12、3 和 9 月日数最多,8 月最少。2010 年以后,主要分布在冬半年,4—9 月日数明显减少。2013—2014 年中度污染日数减少、严重污染日数增加,因此年均浓度与重污染事件的相关性增大。上甸子中度以上污染日数为城区的 1/3,其演变趋势与城区有许多相似之处。

(4)持续性重污染过程主要发生在秋、冬季。近 10 年持续时间超过 3 d 的中度以上过程年平均 3.7 次,重度以上污染 1.4 次;2008—2014 年分别为 1.9 和 0.6 次。绝大多数严重污染持续时间在 2~3 d。重度和严重污染一般出现在持续性污染过程的中后

期,因此在秋、冬季节遇不利气象条件提前采取合理的减排或限排措施,可降低重污染事件发生的频次。

本文揭示了北京地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度时间变化的一些主要规律并分析了日均浓度月分布变化与沙尘和降水天气的相关性,其他影响机制将另文讨论。

**致谢:**衷心感谢京津冀环境气象预报预警中心的蒲维维、李梓铭和孙兆彬在本文撰写过程中提供的支持与帮助。

## 参考文献

- 陈媛,岑况, Norra S, 等. 2010. 北京市区大气气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及颗粒物溯源与追踪分析. 现代地质, 24(2): 345-354.
- 邓利群, 李红, 柴发合, 等. 2011. 北京东部城区大气细粒子与相关体污染研究. 中国环境科学, 31(7): 1064-1070.
- 冯进. 2014. PM<sub>2.5</sub> 监测技术的发展和测量数据的准确性的保障. 计量与测试技术, 41(2): 52-57.
- 高庆先, 苏福庆, 任阵海, 等. 2002. 北京地区沙尘天气及其影响. 中国环境科学, 16(5): 85-88.
- 郭新彪, 魏红英. 2013. 大气 PM<sub>2.5</sub> 对健康影响的研究进展. 科学通报, 58(13): 1171-1177.
- 洪也, 周德平, 马雁军, 等. 2010. 沈阳地区 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>1</sub> 质量浓度的分析. 环境科学与技术, 33(S1): 231-234.
- 花丛, 张碧辉, 张恒德. 2015. 2013 年 1—2 月华北雾、霾天气边界层特征对比分析. 气象, 41(9): 1144-1151.
- 环境保护部国家质量监督检验检疫总局. 2012. 环境空气质量标准. GB 3095—2012.
- 黄鹏鸣, 王格慧, 王荟, 等. 2002. 南京市空气中颗粒物 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 污染水平. 中国环境科学, 22(4): 334-337.
- 柯馨妹, 盛立芳, 孔君, 等. 2014. 青岛大气颗粒物浓度变化及对能见度的影响. 环境科学, 35(1): 15-21.
- 李瑞敏, 张世春, 王毅勇, 等. 2015. 三江平原作物收获期大气颗粒浓度特征. 中国环境科学, 35(3): 676-682.
- 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 2012. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析. 环境科学, 33(6): 1936-1943.
- 李旭芳, 初钧哈, 于令达, 等. 2011. 北京城区单监测点 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化特征. 北京师范大学学报(自然科学版), 47(3): 258-261.
- 李阳, 徐晓斌, 林伟立, 等. 2012. 基于观测的污染气体区域排放特征. 应用气象学报, 23(1): 10-19.
- 刘子锐, 孙扬, 李亮, 等. 2011. 2008 奥运和后奥运时段北京大气颗粒物质量浓度和数浓度对比研究. 环境科学, 32(4): 913-923.
- 马雁军, 崔劲松, 刘晓梅, 等. 2005. 1987—2002 年辽宁中部城市群大气污染物变化特征分析. 高原气象, 24(3): 428-435.
- 马雁军, 刘宁徽, 洪也, 等. 2012. 2011 年春季辽宁一次沙尘天气过程及其对不同粒径颗粒物和空气质量的影响. 环境科学学报, 32(5): 1160-1167.
- 孟绍阳, 贾小芳, 张仁健, 等. 2012. 2010 年长江三角洲临安本底站 PM<sub>2.5</sub> 理化特征. 应用气象学报, 23(4): 424-432.
- 江瑶, 汪婷, 沈利洪, 等. 2015. 2012 年苏州地区 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的时空变化特征分析. 热带气象学报, 31(1): 128-136.
- 蒲维维, 赵秀娟, 张小玲. 2011. 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, 22(6): 716-723.
- 孙玫玲, 穆怀斌, 吴丹朱, 等. 2008. 天津城区秋季 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度垂直分布特征研究. 气象, 34(10): 60-66.
- 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 等. 2014. 长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究. 环境科学, 35(5): 1623-1632.
- 王宏, 陈晓秋, 余永江, 等. 2014. 福州市 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 分布特征与气象条件关系的初步分析. 热带气象学报, 30(2): 387-391.
- 王京丽, 谢庄, 张远航, 等. 2004. 北京市大气细粒子的质量浓度特征研究. 气象学报, 62(1): 104-111.
- 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2015. 2013 年北京市 PM<sub>2.5</sub> 的时空分布特征. 地理学报, 70(1): 110-120.
- 吴万宁, 查勇, 王强, 等. 2014. 南京地区冬夏季大气重污染个例对比分析. 中国环境科学, 34(3): 581-587.
- 徐敬, 丁国安, 颜鹏, 等. 2007. 北京地区 PM<sub>2.5</sub> 的成分特征及来源分析. 应用气象学报, 18(5): 645-654.
- 杨东贞, 徐祥德, 刘晓端, 等. 2005. 密云水库区域大气-水-土污染过程复合相关源. 中国科学 地球科学, 35(S1): 195-205.
- 杨复沫, 贺克斌. 2002. 北京 PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化特征及其与 PM<sub>10</sub>、TSP 的关系. 中国环境科学, 22(6): 506-510.
- 姚青, 刘敬乐, 韩素芹, 等. 2016. 天津城区春节期间大气气溶胶污染特征和数浓度分布. 气象, 42(4): 443-449.
- 张霖琳, 王超, 刀谓, 等. 2014. 京津冀地区城市环境空气颗粒物及其元素特征分析. 中国环境科学, 34(12): 2993-3000.
- 张志刚, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 2009. 沙尘天气对北京大气重污染影响特征分析. 环境科学研究, 22(3): 309-314.
- 张智胜, 陶俊, 谢绍东, 等. 2013. 成都城区 PM<sub>2.5</sub> 季节污染特征及来源解析. 环境科学学报, 33(11): 2947-2952.
- 祝斌, 朱先磊, 张元勋, 等. 2005. 农作物秸秆燃烧 PM<sub>2.5</sub> 排放因子研究. 环境科学研究, 18(2): 29-33.
- 朱易, 胡衡生, 张新英, 等. 2004. 南宁市大气颗粒物 TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 污染水平研究. 环境污染与防治, 26(3): 176-178.
- Liu Zirui, Hu Bo, Wang Lili, et al. 2015. Seasonal and diurnal variation in particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) at an urban site of Beijing: Analyses from a 9-year study. Environ Sci Pollut Res, 22(1): 627-642.
- Lü Baolei, Zhang Bin, Bai Yuqi. 2016. A systematic analysis of PM<sub>2.5</sub> in Beijing and its sources from 2000 to 2012. Atmo Envir, 124: 98-108.
- Zhao Xiujian, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng, et al. 2009. Seasonal and diurnal variation of ambient PM<sub>2.5</sub> concentration in urban and rural environments in Beijing. Atmos Envir, 43(18): 2893-2900.