

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0003

唐宜西, 张小玲, 徐敬, 等. 2016. 北京城区和郊区本底站大气污染物浓度的多时间尺度变化特征[J]. 环境科学学报, 36(8): 2783-2793

Tang Y X, Zhang X L, Xu J, et al. 2016. Multi-temporal scale variations of atmospheric pollutants concentrations in rural and urban areas of Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(8): 2783-2793

# 北京城区和郊区本底站大气污染物浓度的多时间尺度变化特征

唐宜西<sup>1</sup>, 张小玲<sup>1,2,\*</sup>, 徐敬<sup>1</sup>, 赵秀娟<sup>1</sup>, 马志强<sup>1</sup>, 孟伟<sup>1</sup>

1. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089

2. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

收稿日期: 2015-10-12 修回日期: 2015-12-26 录用日期: 2016-01-03

**摘要:** 利用北京城区海淀宝联站(HD)和上甸子本底站(SDZ)2005—2012连续8年的大气污染物( $PM_{2.5}$ 、 $O_3$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$ 和CO)浓度观测数据进行统计分析,揭示北京城区和郊区主要污染物浓度变化特征、超标情况及其差异。主要结论如下:①连续8年北京城区、郊区 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈缓慢下降趋势,但污染水平仍较高。海淀宝联站和上甸子本底站的 $PM_{2.5}$ 年均浓度从奥运前3年(2005—2007)的平均值 $87.1 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $53.4 \mu g \cdot m^{-3}$ 分别下降到奥运后5年(2008—2012)的平均值 $67.7 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $42.1 \mu g \cdot m^{-3}$ 。奥运后5年两站 $PM_{2.5}$ 年均浓度变化不大,其中城区维持在 $66 \sim 70 \mu g \cdot m^{-3}$ 的高浓度水平。城区 $PM_{2.5}$ 浓度为3级以上的超标日在四季的发生频率相当,4级和5级以上的超标日则多发生在秋、冬季;各季平均日变化趋势均为双峰双谷型,上下班交通高峰期对 $PM_{2.5}$ 浓度日变化有重要影响。②城区站 $O_3$ 年均浓度前5年(2006—2010)逐年下降,之后浓度开始回升,而本底站 $O_3$ 年均浓度在此期间变化不大,近6年(2007—2012)维持在 $72.4 \sim 76.3 \mu g \cdot m^{-3}$ 。城、郊 $O_3$ 平均日变化均呈单峰型,其中上甸子站峰值出现时刻晚于城区海淀宝联站。③2005—2012年北京城区其它气态污染物浓度( $NO_2$ 、 $SO_2$ 和CO)总体均呈缓慢下降趋势,但在2012年浓度有所反弹,城区站气态污染物在秋、冬季的平均浓度均显著高于春、夏季。

**关键词:** 北京城郊地区; 大气污染物; 污染特征; 年际变化; 季节分布; 日变化

文章编号: 0253-2468(2016)08-2783-11 中图分类号: X51 文献标识码: A

## Multi-temporal scale variations of atmospheric pollutants concentrations in rural and urban areas of Beijing

TANG Yixi<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoling<sup>1,2,\*</sup>, XU Jing<sup>1</sup>, ZHAO Xiujuan<sup>1</sup>, MA Zhiqiang<sup>1</sup>, MENG Wei<sup>1</sup>

1. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089

2. Institute of Urban Meteorology, Chinese Meteorology Administration, Beijing 100089

Received 12 October 2015; received in revised form 26 December 2015; accepted 3 January 2016

**Abstract:** Based on observed data of  $PM_{2.5}$  and gaseous materials ( $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$  and CO) at Beijing urban (HD) and background (SDZ) stations from 2005 to 2012, the multi-temporal scale (annual, seasonal, monthly and diurnal) variations of atmospheric pollutants concentrations in Beijing are analyzed. The results show that the annual mean concentration of  $PM_{2.5}$  decreases from  $87.1 \mu g \cdot m^{-3}$  and  $53.4 \mu g \cdot m^{-3}$  at HD and SDZ, respectively, from 2005 to 2007 to  $67.7 \mu g \cdot m^{-3}$  and  $42.1 \mu g \cdot m^{-3}$  from 2008 to 2012. Since 2008,  $PM_{2.5}$  annual concentration at HD maintains the high level of  $66 \sim 70 \mu g \cdot m^{-3}$  with slight changes. Frequencies of  $PM_{2.5}$  occurrences at Level III or above are similar during all four seasons at HD, while those at Level IV or above are much greater in autumn and winter. The diurnal variation of  $PM_{2.5}$  with two obvious peaks and troughs is effected by the rush hours. Generally, the annual mean concentration of  $O_3$  decreases from 2006 to 2010 and increases from 2011 to 2012 at HD. In comparison, the annual mean concentration of  $O_3$  at SDZ changes little, ranging from  $72.4 \mu g \cdot m^{-3}$  to  $76.3 \mu g \cdot m^{-3}$ . The average diurnal variations of  $O_3$  show single-peak type at Both HD and SDZ while the single peak at SDZ appears later than that in HD. Concentration of  $NO_2/SO_2/CO$  at HD decreases slowly during 2005—2012 and

**基金项目:** 国家科技支撑计划课题(No.2014BAC23B01,2014BAC23B03);北京市科技计划课题(No.Z141100001014013);公益性行业(气象)专项(No.GYHY201206015);国家自然科学基金项目(No.41305130)

**Supported by** the National Key Technology Research and Development Program of China(No.2014BAC23B01,2014BAC23B03), the Beijing Municipal Science & Technology Commission Project(No.Z141100001014013), the China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest(No. GYHY201206015) and the National Natural Science Foundation of China(No.41305130)

**作者简介:** 唐宜西(1987—),女,E-mail: yxtang@ium.cn; \* 通讯作者(责任作者),E-mail: xlzhang@ium.cn

**Biography:** TANG Yixi(1987—), female, E-mail: yxtang@ium.cn; \* Corresponding author, E-mail: xlzhang@ium.cn

begins to increase in 2012. All these concentrations are much higher in autumn and winter than those in spring and summer at HD.

**Keywords:** urban and background stations in Beijing; air pollutants; annual variation; seasonal variation; diurnal variation

## 1 引言 (Introduction)

北京作为典型特大规模城市,其快速发展背后的空气污染问题早已引起社会各界的重视.受城市化建设、产业结构、机动车保有量、能源耗费、污染源治理及气象条件等一系列复杂的人为或自然因素的相互影响,北京市大气污染在不同时期体现出不同特征.

历史研究(谢绍东等,2000;张菊等,2006;Zhao *et al.*,2009;齐童等,2008;李令军等,2012;王艳芳等,2014)表明,早在20世纪90年代北京大气已呈现显著的煤烟型污染,尤其采暖季的 $\text{SO}_2$ 污染十分严重;90年代中期,由于机动车保有量的持续上涨, $\text{NO}_x$ 浓度迅速增长,北京呈现出煤烟型和机动车尾气型叠加的复合污染特征;1998年开始北京市政府积极施行大气污染治理和防控措施,空气质量恶化趋势得到控制并逐渐有所改善;21世纪初期北京市气态污染物浓度较前期均明显降低,但受沙尘型和静稳型天气等因素的影响,颗粒物浓度水平仍居高不下,是以 $\text{PM}_{10}$ 为首要污染物的大气重污染高峰期;2008年在经历了北京及周边省市为举办奥运采取高强度治理措施之后,北京市空气质量得到明显改善,奥运年之后随着污染源和控制措施的变化,大气污染物浓度下降趋缓.近年来,由于灰霾天气导致的低能见度重污染事件使得细颗粒物污染问题引起广泛关注(吴兑等,2014;Zhao *et al.*,2013;赵普生等,2012).与我国南方地区不同,北京地区霾天气除在秋冬采暖季频发以外,在盛夏季节也易发生(樊文雁等,2009;廖晓农等,2014).研究表明(Duan *et al.*,2006;吴兑等,2011;Li *et al.*,2010),霾天气的形成与大气中高浓度的细粒子密切相关,而大量的工业及机动车等污染源的排放、周边城市污染物的区域输送、持续静稳的天气形势以及特殊环山地形条件等(杨复沫等,2003;苏福庆等,2004;贺克斌等,2009)都是造成北京及京津冀区域高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要原因,由于细粒子消光作用对能见度有显著影响(Zhao *et al.*,2011;张宏等,2011;程穆宁等,2014),导致的低能见度霾天气严重影响社会交通运输和人们日常生活,此外对人体呼吸道及其他器官也能造成不容忽视的危害(白志鹏等,2006).此外,近地面 $\text{O}_3$ 污染成为环境问题的另一关注点.作

为地球生物的保护伞, $\text{O}_3$ 主要分布在平流层中阻止太阳紫外线辐射,但当近地面出现高浓度 $\text{O}_3$ 时便会对人体健康及植物生长造成伤害(单志强等,2003),由于 $\text{O}_3$ 的形成机理和影响因素较为复杂,其控制对策仍需加强研究和探讨.为提高大气环境保护标准,《环境空气质量标准》(GB3095—2012)增设了 $\text{PM}_{2.5}$ 作为空气质量评价项目,并规定了臭氧8h滑动平均极大值的浓度限值.目前研究多数针对北京重污染天气个例分析或是基于较短时间序列的 $\text{O}_3$ 或 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化特征研究(郭虎等,2007;Zhao *et al.*,2008;刘洁等,2008;张国文等,2012;Zhao *et al.*,2013;张小玲等,2014),对揭示北京大气污染物浓度长时间序列的演变特征较为缺乏.本文利用北京城、郊站连续8年的大气污染物浓度观测数据,按照最新空气质量标准揭示北京城区和郊区主要污染物浓度变化特征、超标情况及其差异,以期为今后北京市大气污染治理提供相关科学依据.

## 2 资料与方法 (Materials and methods)

本文所使用的大气污染物浓度观测数据包括 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 和CO浓度数据,观测时间从2005年1月1日至2012年12月31日,观测站地理位置如图1所示.海淀宝联站(Baolian)位于北京市

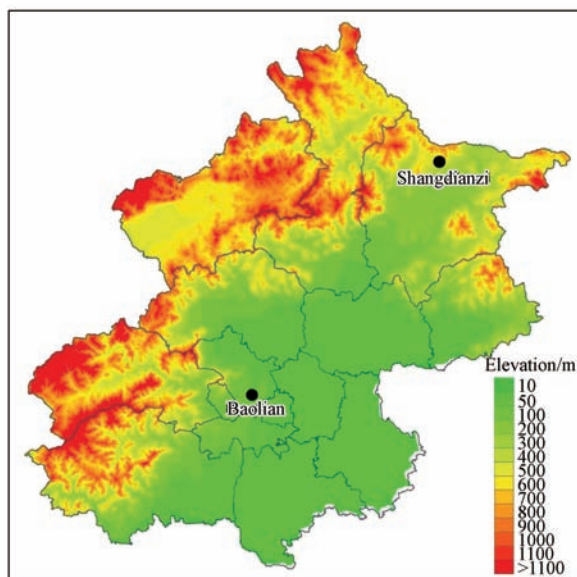


图1 城区海淀宝联站(Baolian)和上甸子区域本底站(Shangdianzi)地理位置图

Fig.1 Locations of urban and background stations

西三环和西四环之间的宝联体育公园内,附近无工业污染源,以居民和办公区为主,代表北京城区的情况;上甸子区域本底站(Shangdianzi)位于北京市东北部的密云县高岭镇上甸子村,距北京市区距离约 150 km,远离市区人群和主要公路,代表区域背景浓度或本底值.大气成分浓度观测均采用连续自动观测仪器(基本信息如表 1 所示),均有严格的观

测业务流程和规范对仪器进行正常的巡检、校准和标定以保证数据的质量可靠.本文所有污染物浓度的多时间尺度变化主要为以下 4 种:年际变化、季节变化、月变化和日变化.经过质量控制后的数据,在统计污染物浓度的平均日变化趋势时,均将除夕、正月初五、元宵节等烟花爆竹燃放率高的小时数据剔除后进行.

表 1 城区和上甸子本底站主要污染物观测仪器

观测点 观测项目	本底站(上甸子站)		城区站(宝联站)	
	测量仪器	测量间隔	测量仪器	测量间隔
NO <sub>2</sub>	TE42CTL 美国热电公司	5 min	EC9841 澳大利亚 Ecotech	5 min
SO <sub>2</sub>	TE43CTL 美国热电公司	5 min	EC9850 澳大利亚 Ecotech	5 min
CO	TE 48C 美国热电公司	5 min	EC9830 澳大利亚 Ecotech	5 min
O <sub>3</sub>	TE 49C 美国热电公司	5 min	EC9810 澳大利亚 Ecotech	5 min
PM <sub>2.5</sub>	R&P TEOM1400a	5 min	R&P TEOM 1400a	5 min

### 3 结果与讨论(Results and discussion)

#### 3.1 北京城、郊地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度的多时间尺度变化及污染特征

3.1.1 PM<sub>2.5</sub> 浓度的多时间尺度变化特征 2005—2012 年北京城区和本底站 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度整体呈下降趋势,均通过 95% 的置信度检验(数据略).图 2 所示,两站年均值从 2005 年的 83.8  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 45.9  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  分别下降到 2012 年的 69.3  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 40  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,下降比例分别为 17.3% 和 12.9%,但城区 2012 年相比 2011 年均值浓度略有回升.统计表明,城区和本底站的年均浓度从奥运前 3 年(2005—2007)的平均值 87.1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 53.4  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  分别下降到奥运后 5 年(2008—2012)的平均值 67.7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 42.1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .2008—2012 年期间两站的 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度变化均不大,城区维持在 66~70  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,约为国家二级标准(35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 的 2 倍,本底站年均浓度维持在 40~44  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,仍不达标.

对比 8 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度的季节平均浓度,城区站秋、冬、夏季浓度都相对较高,均超过 75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其中 2005 和 2006 年的秋冬季污染尤为严重,其月均最大浓度分别高达 138  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (2005 年 11 月) 和 141  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (2006 年 1 月).此外,从 PM<sub>2.5</sub> 浓度的长时间演变序列(图 2) 可见,2008 年以前春季也是北京地区 PM<sub>2.5</sub> 高浓度频发季,可能与春季沙尘影响有关.PM<sub>2.5</sub> 多年月平均浓度表明城区 6 月和 11 月浓度最高,而在冬、春季节交替的 3 月和夏、秋季节交替

的 9 月相对最低.上甸子与城区站的季节分布特征不尽相同,在 2008 年前,春季是上甸子 PM<sub>2.5</sub> 高浓度频发季,其 8 年月平均最大浓度出现在 2006 年 4 月(135.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );2008 年以后,上甸子 PM<sub>2.5</sub> 高浓度则频发在夏季,其中 6、7 月平均浓度相对较高,其次是在春季,而冬季的平均浓度较低.

除季节分布不同外,两站 PM<sub>2.5</sub> 浓度日变化特征也不同(图 3).城区站 PM<sub>2.5</sub> 浓度的多年平均日变化趋势为明显双峰双谷型,即北京时间 9:00—10:00 和 21:00—22:00 出现峰值,在 6:00—7:00 和 15:00—16:00 出现谷值;上甸子本底站 PM<sub>2.5</sub> 平均日变化趋势则为单峰型,凌晨 5:00—6:00 达到最低值,随后缓慢上升,特别是夏季由于局地山谷风和偏南风输送的影响(徐敬等,2009),上午至傍晚浓度增加明显,在 19:00 前后出现峰值.城区白天的峰值与早上班高峰时段行驶车辆增多,污染源排放增大等人类活动有关,夜间的峰值与下班后出行车辆增多,大卡车夜间允许进城以及气象条件日变化(如边界层高度降低)等因素有关.由于郊区人为活动少,其主要受气象条件输送影响,因此白天 PM<sub>2.5</sub> 浓度波动幅度小,与城区白天 PM<sub>2.5</sub> 峰值时段形成鲜明对比.此外,城区站日变化特征还存在季节差异.其 PM<sub>2.5</sub> 白天峰值浓度在秋、冬季节低于夜间峰值浓度,而在春、夏季节相反,推断可能与秋、冬季节燃煤取暖排放量以及夜间边界层更低等因素共同影响有关.

综上分析,虽然连续 8 年城、郊 PM<sub>2.5</sub> 浓度整体呈下降趋势,但浓度水平仍偏高.由于受人类活动、



气象条件和源排放等因素影响,城区  $PM_{2.5}$  浓度的季节分布及日变化趋势不同于郊区本底站。

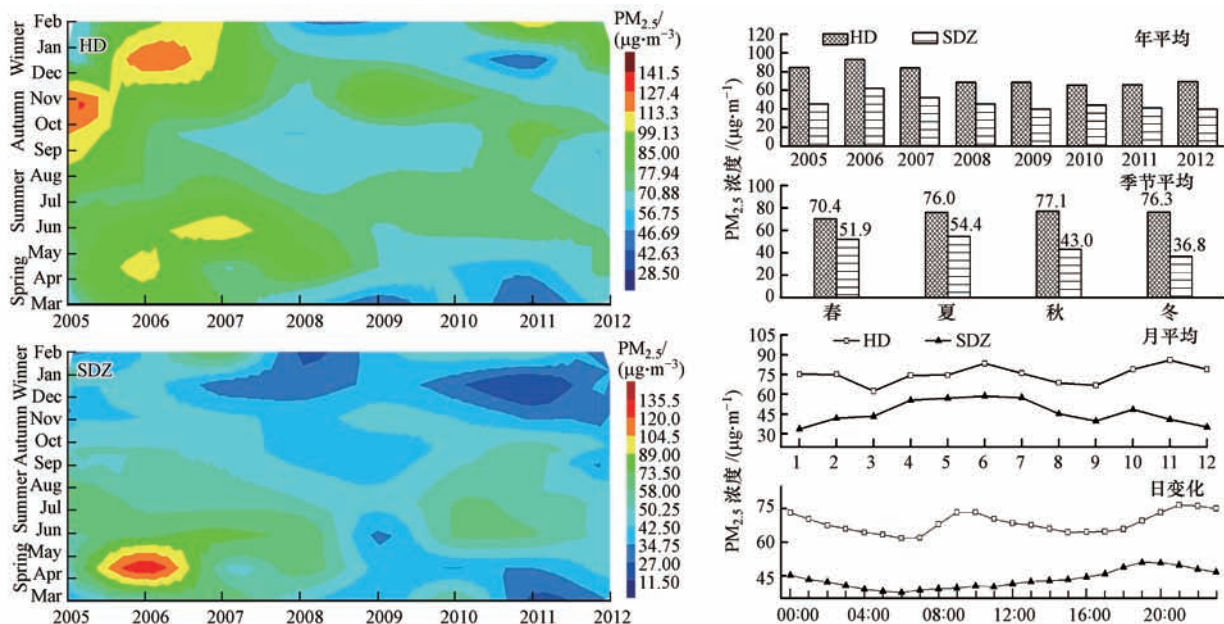


图2 2005—2012年北京城区站(HD)和本底站(SDZ)  $PM_{2.5}$  浓度时间演变及浓度平均年、季、月、日变化

Fig.2 Evolution of  $PM_{2.5}$  concentration and the average annual, monthly, seasonal and diurnal variations of  $PM_{2.5}$  at urban (HD) and background (SDZ) stations from 2005 to 2012

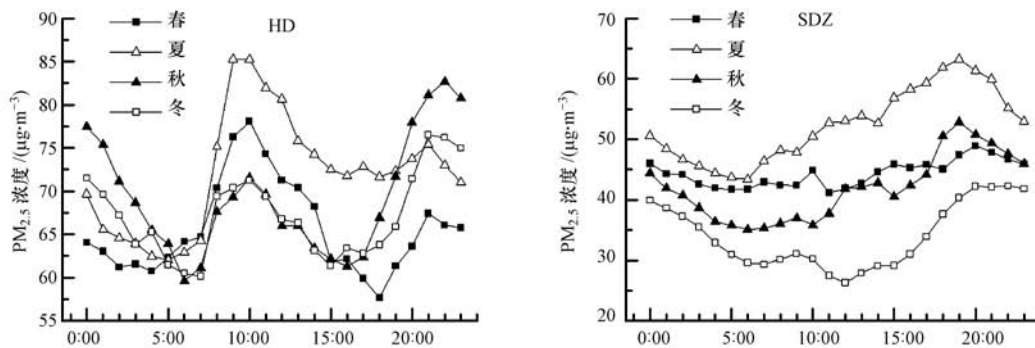


图3 2005—2012年北京城区站(a)和本底站(b)  $PM_{2.5}$  浓度四季平均日变化

Fig.3 Average diurnal variations of  $PM_{2.5}$  in different seasons at urban (a) and background (b) stations from 2005 to 2012

### 3.1.2 $PM_{2.5}$ 浓度超标日数的年际和季节变化特征

根据《环境空气质量标准》(GB30152012),统计城区和本底站  $PM_{2.5}$  日均浓度在各等级的频率.结果表明(图4),2005—2012年本底站  $PM_{2.5}$  浓度达标率优于城区站,两站  $PM_{2.5}$  超标率整体呈下降趋势(均通过95%的置信度检验),其中城区和本底站日均  $PM_{2.5}$  浓度为3级或以上等级(日均浓度大于  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 的污染日出现频率从奥运前3年(2005—2007)的平均值49.5%和25.1%分别下降到奥运后5年(2008—2012)的平均值34.2%和15.4%.奥运后5年北京城区  $PM_{2.5}$  浓度为3级或以上的超标日数变

化不大,超标率在31.9%~35.9%之间,占全年的三分之一以上;4级(日均浓度大于  $115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和5级(日均浓度大于  $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 或以上等级的超标日出现频率分别约为15%和5%左右.奥运后5年日均浓度高于  $250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的六级严重污染日共出现9天,少于奥运前3年(26天),其中2010年没有出现严重污染日.

两站  $PM_{2.5}$  浓度超标日数在不同季节的分布存在差异.城区站  $PM_{2.5}$  浓度为3级及以上的超标日在各季出现频率(图5a)接近;而4级(图6a)和5级(图7a)及以上的超标日季节的分布则有变化.在

2005—2008 年期间,不仅秋、冬季,春季也是  $PM_{2.5}$  浓度容易出现 4 级及以上超标日的季节,这与受沙尘天气的频繁影响有关(张志刚等,2009);从 2009 年开始, $PM_{2.5}$  浓度为 4 级以上的超标日则主要出现在夏、秋、冬季,而 5 级及以上的超标日在夏季的出现频率减少(其中 2010 年夏季没有出现 5 级以上超标日),主要分布在秋、冬季.在此基础上,通过统计奥运后五年(2008—2012)连续三天  $PM_{2.5}$  浓度为 5 级以上的重污染过程发现,北京在秋冬季出现典型持续重污染天气的概率最高(除 2008 年发生一次

在春季外,其余均出现在秋冬季).与城区不同,上甸子站  $PM_{2.5}$  浓度为 3 级及以上的超标日(图 5b)在春、夏、秋季出现频率相对大于冬季.由于影响北京的沙尘路径主要为偏西和西北路径(陈跃浩等,2013),上甸子站容易受其影响导致浓度升高,其中 2006 年春季  $PM_{2.5}$  浓度的超标频率(图 5b、6b、7b)尤为突出.以上分析可见,北京地区  $PM_{2.5}$  浓度全年超标日数多,各等级的  $PM_{2.5}$  浓度超标日在四季分布有差异,因此要想有效治理北京地区的  $PM_{2.5}$  污染,需要有针对性的进行控制.

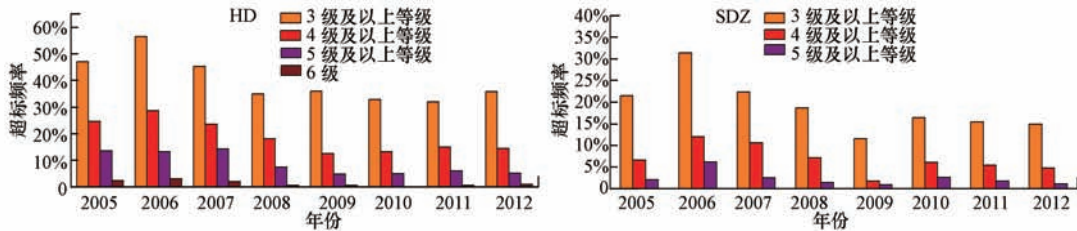


图 4 2005—2012 年北京城区站 (HD) 和本底站 (SDZ)  $PM_{2.5}$  逐年分级超标率

Fig.4 Frequency of  $PM_{2.5}$  in different levels at urban(HD) and background(SDZ) station from 2005 to 2012

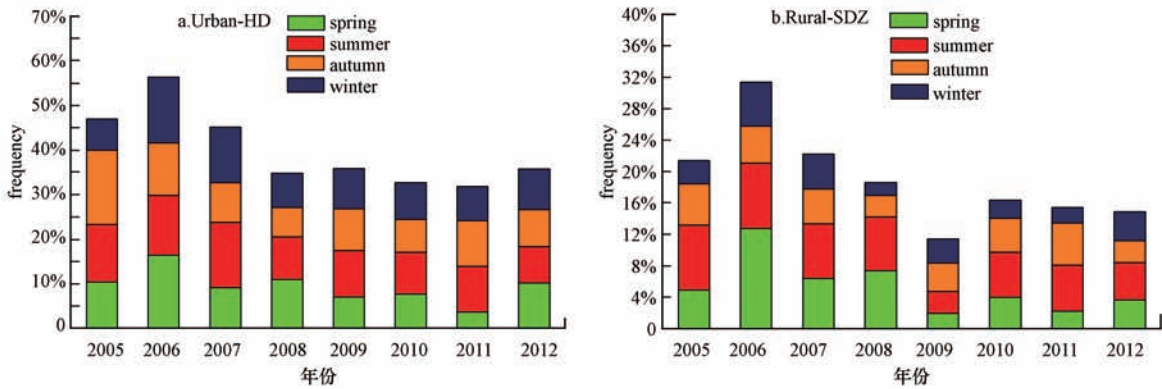


图 5 2005—2012 年北京城区站 (a) 和本底站 (b)  $PM_{2.5}$  逐年各季节 3 级以上超标率

Fig.5 Frequency of Level III or above of  $PM_{2.5}$  in different seasons at urban and background stations from 2005 to 2012

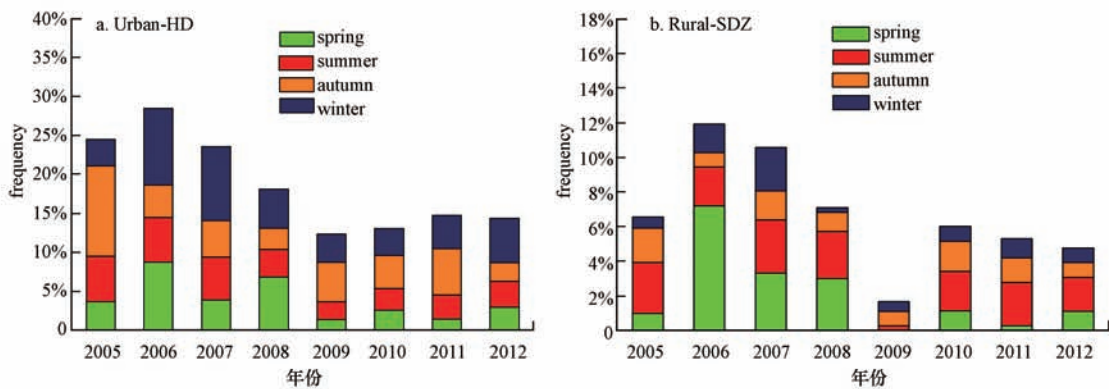


图 6 2005—2012 年北京城区站 (a) 和本底站 (b)  $PM_{2.5}$  逐年各季节 4 级以上超标率

Fig.6 Frequency of Level IV or above of  $PM_{2.5}$  in different seasons at urban and background stations from 2005 to 2012

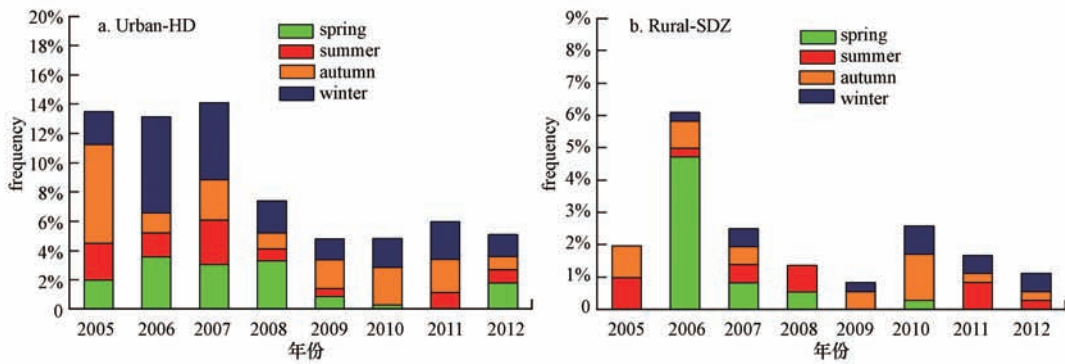


图 7 2005—2012 年北京城区站 (a) 和本底站 (b)  $PM_{2.5}$  逐年各季节 5 级以上超标率

Fig.7 Frequency of Level V or above of  $PM_{2.5}$  in different seasons at urban and background stations from 2005 to 2012

3.2 北京城、郊地区  $O_3$  浓度的多时间尺度变化及污染特征

3.2.1  $O_3$  浓度的多时间尺度变化特征 近年来,  $O_3$  污染早已引起科研学术者的关注. 在盛夏湛蓝天空情况下,  $O_3$  常常取代  $PM_{2.5}$  成为首要污染物悄然影响人们的生活环境, 研究表明 (王雪松等, 2009; 漏嗣佳等, 2010; 耿福海等, 2012; ) 其浓度主要与发生光化学反应的气象条件和前体物  $NO_x$ 、VOCs 的浓度等有关. 由于上甸子本底站 2005 年的  $O_3$  数据缺测较严重, 基于保持数据的准确性和有效性考虑, 剔除了其 2005 年的监测数据. 统计结果表明两站  $O_3$  年均浓度在 2006—2012 年期间整体变化趋势不明显, 均未

通过显著性检验 (数据略). 城区 (图 8 所示) 在 2007—2010 年期间地面  $O_3$  浓度逐年降低, 年均浓度从 2007 年的  $53.1 \mu g \cdot m^{-3}$  下降至 2010 年的  $34.4 \mu g \cdot m^{-3}$ , 但从 2011 年开始回升, 至 2012 年  $O_3$  年均值反弹为  $53.4 \mu g \cdot m^{-3}$ ; 本底站  $O_3$  浓度的变化特点不同于城区站, 在此期间其年均浓度在  $72.4 \sim 76.3 \mu g \cdot m^{-3}$  之间小幅范围波动. 两站  $O_3$  浓度的季节分布一致, 均是夏季最高, 冬季最低. 两站多年的  $O_3$  月平均浓度均在 6 月最高, 7 月次之, 其中城区站和本底站月均最大浓度分别出现在 2007 年 6 月 ( $122.7 \mu g \cdot m^{-3}$ ) 和 2010 年 7 月 ( $164.4 \mu g \cdot m^{-3}$ ), 这是由于盛夏季节温度高、光照好利于光化学反应臭氧生成.

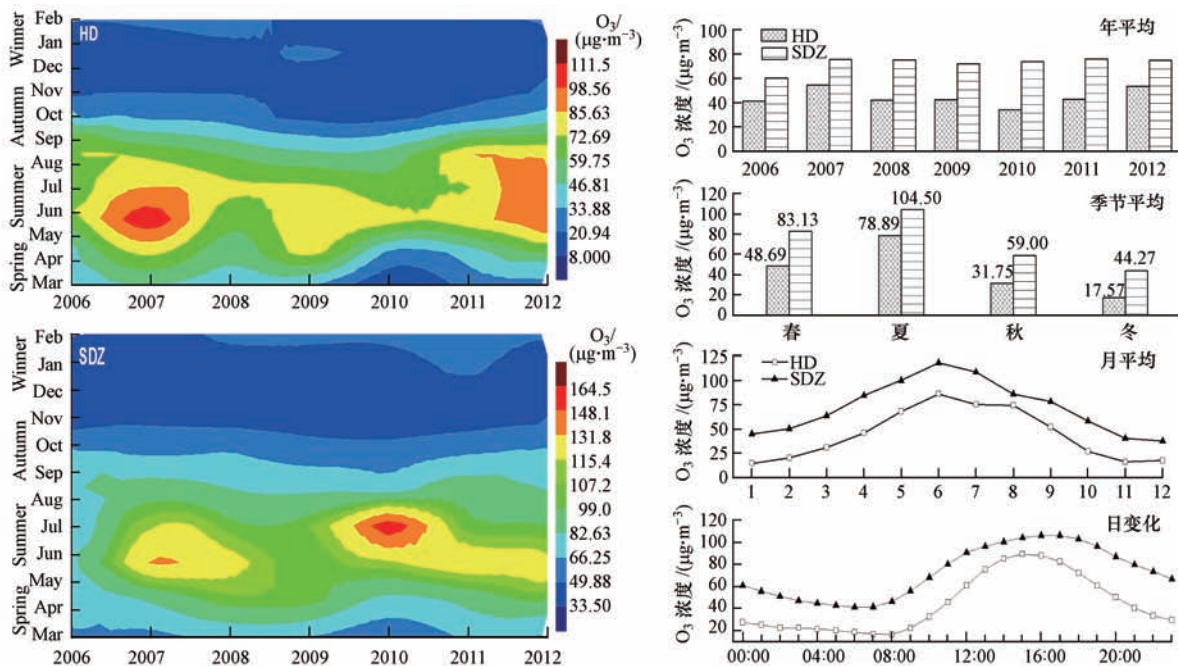


图 8 2006—2012 年城区站 (HD) 和本底站 (SDZ)  $O_3$  浓度时间演变及其平均年、季、月、日变化

Fig.8 Evolution of  $O_3$  concentration and the average annual, monthly, seasonal and diurnal variations of  $O_3$  at urban (HD) and background (SDZ) stations from 2006 to 2012



城区和本底站 O<sub>3</sub> 浓度平均日变化趋势(图 9) 相同,均为单峰型,但峰值出现时刻有差异.城区站峰值出现在午后 15 点至 16 点,位于下风向的本底站 O<sub>3</sub> 浓度峰值出现时刻约滞后 2 h,这与城区污染物向郊区输送存在时延有关(XU *et al.*, 2011).此外,两站 O<sub>3</sub> 浓度在各季的平均日变化特征也基本一致,其日变化峰值出现的时刻均在冬季最早,夏季最晚,而日较差幅度和峰值都在夏季最大.综上分

析,北京地区多年 O<sub>3</sub> 的年、季、月及小时平均浓度均为郊区高于城区.城、郊区的 O<sub>3</sub> 年际变化有差异,但季节分布和平均日变化趋势相同.由于城区 NO 浓度比较高,夜间滴定作用会消耗大量的臭氧,使得城区夜间臭氧浓度迅速下降从而低于本底地区,使得郊区站较城区站日变化稳定,表现为各季节的 O<sub>3</sub> 浓度日变化幅度均小于城区站.

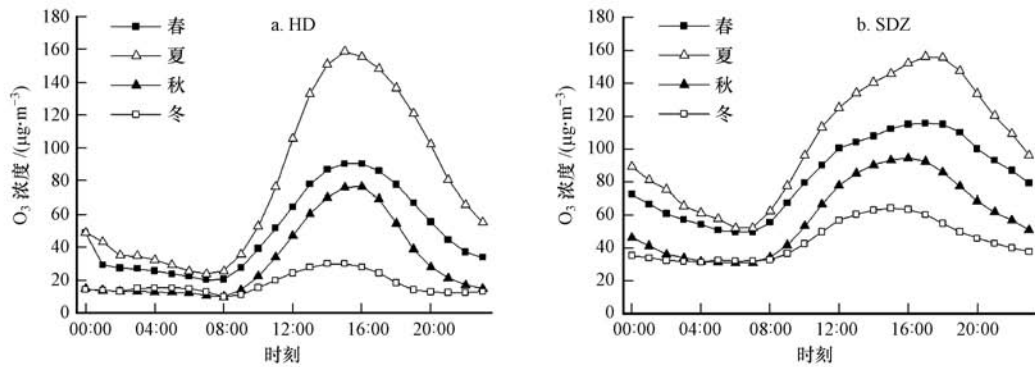


图 9 2006—2012 年北京城区站 (a) 和本底站 (b) O<sub>3</sub> 浓度四季平均日变化

Fig.9 Average diurnal variations of O<sub>3</sub> in different seasons at urban (a) and background (b) stations from 2006 to 2012

3.2.2 O<sub>3</sub> 浓度超标日数的年际和季节变化特征 统计表明(图 10a),2007—2012 年城区站 O<sub>3</sub> 浓度超标日

(8 h 滑动平均最大值大于 160 µg·m<sup>-3</sup>) 的出现频率从 2007 年的 18.6% 降至 2008 年的 7.7%, 2008 年

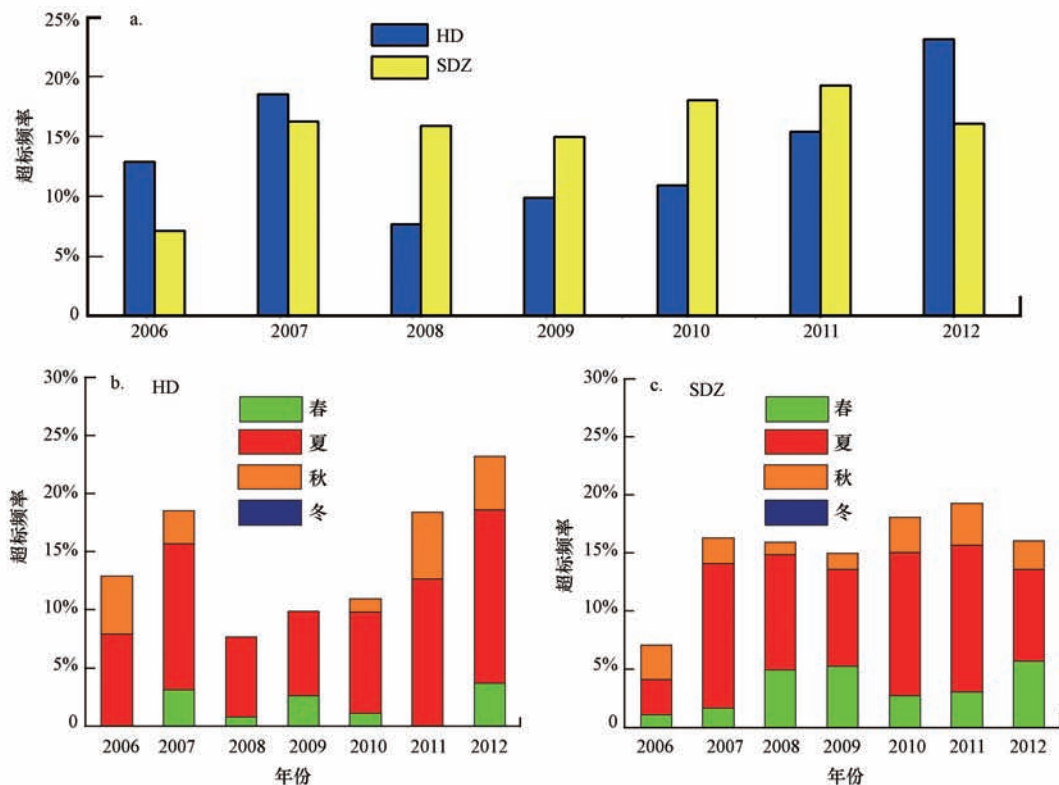


图 10 2006—2012 年北京城区站 (HD) 和本底站 (SDZ) O<sub>3</sub> 8 h 滑动平均浓度逐年 (a) 及各季 (b,c) 超标率

Fig.10 Nonattainment frequency of (a) annual and (b,c) seasonal 8 h averaged ozone from 2006 to 2012 at urban(HD)and background(SDZ)stations

以后  $O_3$  超标率逐年上升, 到 2012 年超标率高达 23.2%. 与城区站不同, 2007 年以后本底站  $O_3$  浓度超标日的发生频率在 15%~19% 之间小幅范围内波动. 两站  $O_3$  超标日均在夏季发生频率最高, 而在冬季无超标日 (图 10b). 从 2008 年开始, 上甸子本底站春季出现  $O_3$  超标日的频率高于城区站. 值得注意的是, 2008—2010 年城区站  $O_3$  年均浓度为逐年下降 (图 8), 而  $O_3$  超标频率却逐年上升 (图 10a), 这是由于空气质量标准规定  $O_3$  浓度 8 h 滑动平均的最大值超过  $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  即为超标日, 而  $O_3$  高浓度集中分布在夏季午后时段, 因此  $O_3$  的平均浓度不能准确反映

空气质量.

### 3.3 其他气体污染物浓度的多时间尺度变化特征

通过单因素方差分析表明, 北京城区站和本底站的  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$  年均浓度存在显著差异 (数据略). 2005—2012 年, 城区站  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$  年均浓度整体均呈下降趋势, 分别通过 99%、99%、90% 的置信度检验 (数据略). 图 11 所示, 城区站  $\text{NO}_2$  年均浓度在 2005—2008 年期间均超过国家二级标准 ( $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 之后从 2009 年开始至 2012 年均达标;  $\text{SO}_2$  年均浓度仅在 2005 年超标 ( $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 之后逐年下降, 但在 2012 年均值浓度回升; 连续 8 年

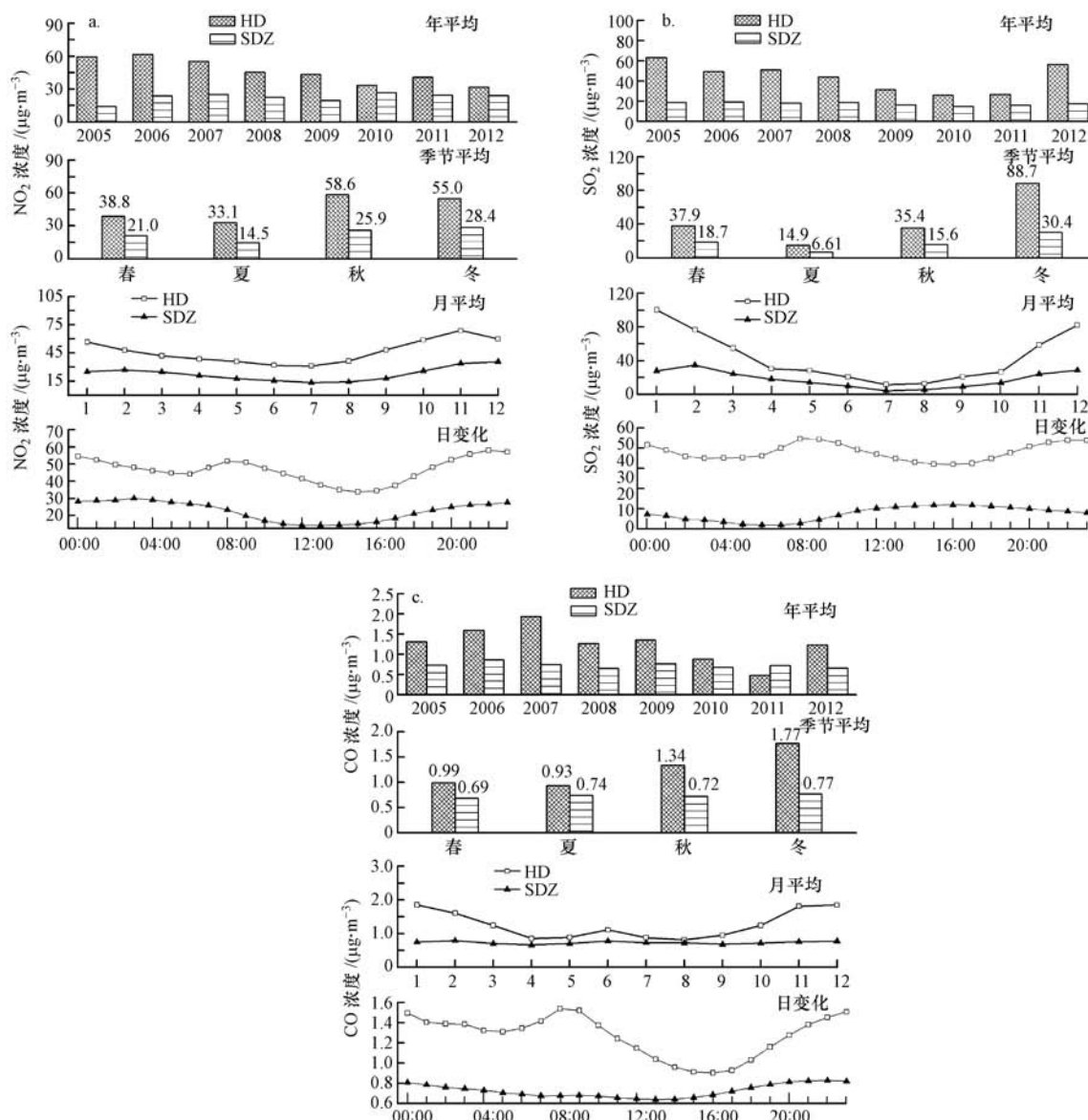


图 11 2005—2012 年北京海淀宝联站 (HD) 和上甸子站 (SDZ) 气体污染物浓度平均年、季、月、日变化 (a.  $\text{NO}_2$ , b.  $\text{SO}_2$ , c.  $\text{CO}$ )

Fig. 11 Annual, monthly, seasonal and diurnal variations of air pollutants (a.  $\text{NO}_2$ , b.  $\text{SO}_2$ , c.  $\text{CO}$ ) at urban (HD) and background (SDZ) stations from 2005 to 2012



CO 年均浓度均未超过国家二级标准( $4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).在此期间,本底站除 CO 年均浓度变化不明显外, $\text{NO}_2$ 和  $\text{SO}_2$ 年均浓度分别呈上升和下降趋势,分别通过 90%和 95%的置信度检验(数据略).

城区站  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、CO 的季节平均浓度均在冬季最高,夏季最低,其中  $\text{SO}_2$ 的季节浓度变化最大,其 8 年冬季的平均浓度约为夏季的 6 倍水平,这是由于冬季采暖燃煤是  $\text{SO}_2$ 至关重要的污染源.根据多年月平均值的统计结果, $\text{NO}_2$ 在 11 月平均浓度最高, $\text{SO}_2$ 、CO 月均浓度在 1 月最高.值得注意的是,夏季 6 月 CO 的平均浓度存在一个小峰值,这应该与秸秆燃烧有关(李令军等,2008).由于郊区人为活动少,污染源排放弱,本底站的上述气体污染物各季

节浓度变化较小.

图 12a、b、c 分别为北京城区和本底站气体污染物  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、CO 四季平均日变化曲线.城区站  $\text{NO}_2$ 浓度的四季平均日变化均呈双峰双谷型,其中峰值出现在 8:00—9:00 时和 22:00—23:00,谷值出现在 5:00—6:00 和 15:00—16:00. $\text{NO}_2$ 在各季白天的峰值浓度均低于夜间峰值,其日较差浓度在秋季最大,夏季最小.城区站的  $\text{SO}_2$ 浓度在各季的日变化趋势有不同,其在春、夏季的日变化不明显,而在秋、冬季的日变化趋势为典型的双峰双谷型,即在上午 9:00 和 23:00 左右出现峰值,在 6:00 和 15:00 左右出现谷值.其日变化幅度在冬季非常明显,秋季次之,而在春、夏季节的波动很小,再次表明北京秋

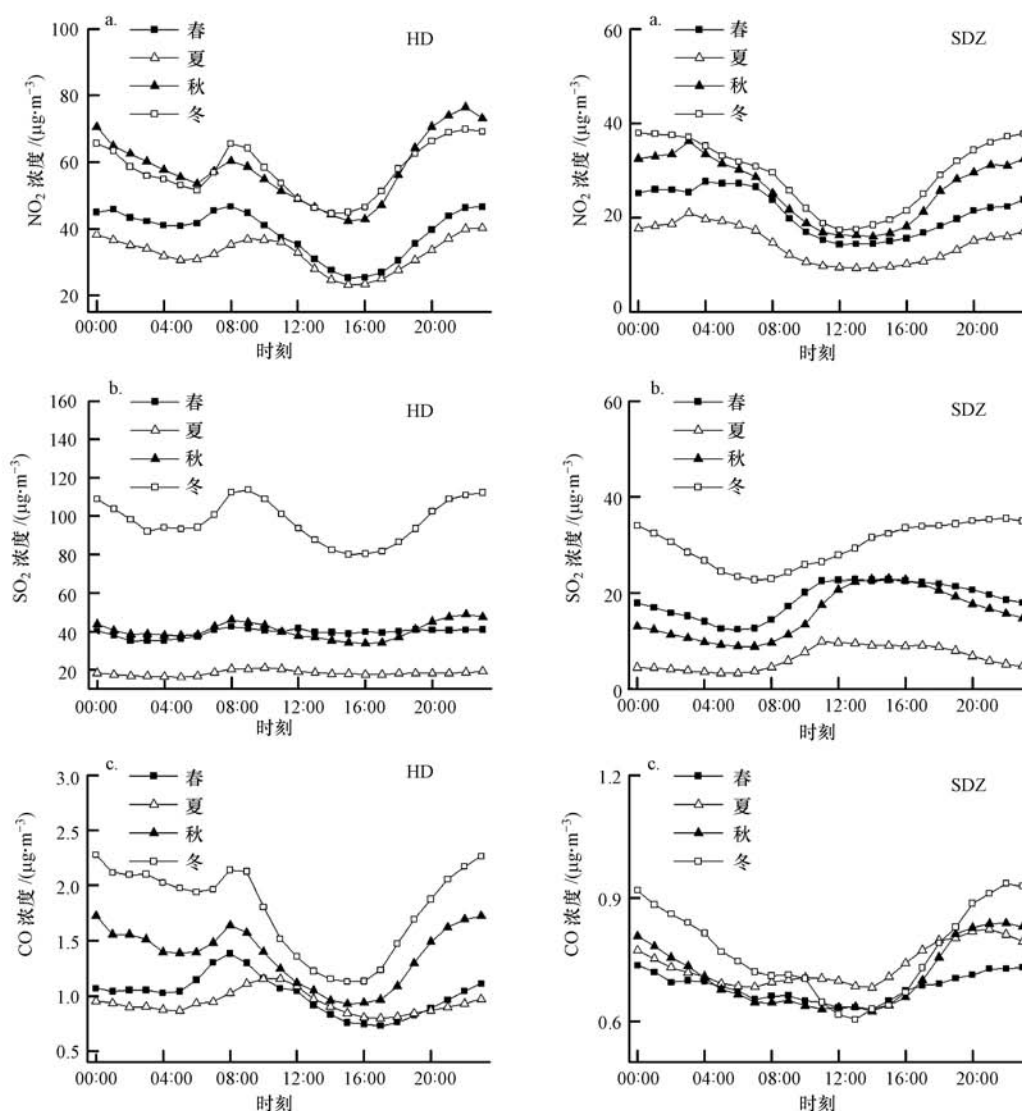


图 12 2005—2012 年北京城区站 (HD) 和本底站站 (SDZ) 气体污染物浓度四季平均日变化 (a.  $\text{NO}_2$ , b.  $\text{SO}_2$ , c. CO)

Fig.12 Diurnal variations of air pollutants (a.  $\text{NO}_2$ , b.  $\text{SO}_2$ , c. CO) in different seasons at urban (HD) and background (SDZ) station from 2005 to 2012

冬季采暖对  $\text{SO}_2$  浓度有关键的影响作用. 城区站 CO 在秋、冬季日变化均为双峰双谷型, 在春、夏季的日变化则为单峰单谷型, 其中在冬季的峰谷值差最大. 不同于城区站, 上甸子本底站的  $\text{NO}_2$  和 CO 浓度在四季的平均日变化曲线均为单谷型, 其中谷值出现在午后 13:00 前后, 而  $\text{SO}_2$  的日变化在各季为单峰单谷型.

#### 4 结论 (Conclusions)

1) 北京城区海淀宝联站  $\text{PM}_{2.5}$  及大部分气态污染物浓度 ( $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、CO) 比上甸子本底站的浓度高约 1.5~3.0 倍, 而  $\text{O}_3$  平均浓度比本底站低. 城区站和本底站在奥运后 5 年 (2008—2012) 的  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度相比奥运前 3 年 (2005—2007) 均有降低, 但从 2011 年开始城区站浓度有回升. 连续 8 年城区站气态污染物 ( $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、CO) 年均浓度均整体呈下降趋势, 但下降强度逐渐减缓, 甚至在 2012 年浓度出现反弹.

2) 城区站  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、CO 月均浓度高值主要出现在秋冬采暖燃煤季, 其平均日变化趋势均为双峰双谷型. 本底站  $\text{PM}_{2.5}$  月均浓度高值主要在夏季, 而  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、CO 季节平均浓度变化幅度不大, 其平均日变化趋势一般表现为单峰或单谷型. 两站  $\text{O}_3$  浓度均为冬低夏高和单峰型日变化趋势.

3) 北京大气污染正由煤烟型向煤烟与机动车尾气混合型转变, 呈现以  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  为主作为首要污染物的复合污染特征. 本文仅使用海淀宝联站和上甸子本底站为代表揭示北京城、郊区的主要污染物浓度多尺度时间变化特征, 而北京市大气污染的空间分布特征仍需进一步研究, 为今后北京市大气污染治理提供更具有针对性的科学依据.

**致谢:** 本文的研究工作得到中国气象局雾-霾监测预报创新团队和京津冀环境气象预报预警中心董璠、何迪在数据处理上的支持, 在此表示感谢.

**责任作者简介:** 张小玲 (1972—), 女, 研究员, 京津冀环境气象预报预警中心, 长期从事城市区域大气环境研究以及预报预警工作, 发表研究论文 50 余篇. E-mail: xlzhang@ium.cn.

#### 参考文献 (References):

谢绍东, 张远航, 唐孝炎. 2000. 我国城市地区机动车污染现状与趋势 [J]. 环境科学研究, 13(4): 22-25

张菊, 苗鸿, 欧阳志云, 等. 2006. 近 20 年北京城市城近郊区环境空气质量变化及其影响因素分析 [J]. 环境科学学报, 26(11):

1886-1892

Zhao X J, Zhang X L, Xu X F, *et al.* 2009. Seasonal and diurnal variations of ambient  $\text{PM}_{2.5}$  concentration in urban and rural environments in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 43: 2893-2900

齐童, 乔晓红, 王安娜. 2008. 北京市可吸入颗粒物污染分析—基于不同时间段的比较分析 [J]. 城市问题, 12: 93-97

李令军, 王英, 李金香, 等. 2012. 2000~2010 年北京大气重污染研究 [J]. 中国环境科学, 32(1): 23-30

王艳芳, 张俊. 2014. 奥运会对北京空气质量的影响: 基于合成控制法的研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 24(5): 166-168

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

Zhao X J, Zhao P S, Xu J, *et al.* 2013. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13: 5685-5696

赵普生, 徐晓峰, 孟伟, 等. 2012. 京津冀区域霾天气特征 [J]. 中国环境科学, 32(1): 31-36

樊文雁, 胡波, 王跃思, 等. 2009. 北京雾、霾天细粒子质量浓度垂直梯度变化的观测 [J]. 气候与环境研究, 14(6): 631-638

廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 2014. 北京地区冬夏持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析 [J]. 环境科学, 35(6): 2031-2044

Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* 2006. Concentration and chemical characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  in Beijing, China: 2001-2002 [J]. *Science of the Total Environment*, 355: 264-275

吴兑. 2011. 灰霾天气的形成与演化 [J]. 环境科学与技术, 34(3): 157-161

Li L, Wang W, Feng J L, *et al.* 2010. Composition, source, mass closure of  $\text{PM}_{2.5}$  aerosols for four forests in eastern China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 31(3): 405-412

杨沫沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 2003. 北京大气  $\text{PM}_{2.5}$  中微量元素的浓度变化特征与来源 [J]. 环境科学, 24(6): 33-37

苏福庆, 任阵海, 高庆先, 等. 2004. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统—边界层输送汇 [J]. 环境科学研究, 17(1): 21-33

贺克斌, 贾英韬, 马永亮, 等. 2009. 北京大气颗粒物污染的区域性本质 [J]. 环境科学学报, 29(3): 482-487

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: 711-718

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

程穆宁, 崔云霞, 陆春松, 等. 2014. 能见度与颗粒物质量浓度之间的关系 [J]. 环境科学与技术, 37(3): 146-151

白志鹏, 蔡斌彬, 董海燕, 等. 2006. 灰霾的健康效应 [J]. 环境污染与防治, 28(3): 198-201

单志强, 陈建华. 2003. 光化学烟雾的形成、危害及防治 [J]. 地质灾害与环境保护, 14(3): 36-38

郭虎, 付宗钰, 熊亚军, 等. 2007. 北京一次连续重污染过程的气象条件分析 [J]. 气象, 33(6): 32-36

Zhao X J, Zhang X L, Pu W W, *et al.* 2011. Scattering properties of the atmospheric aerosol in Beijing, China [J]. *Atmospheric Research*,

- 101(3):799-808
- 刘洁,张小玲,徐晓峰,等.2008.北京地区  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$  和  $\text{PM}_{2.5}$  变化特征的城郊对比分析[J]. 环境科学,29(4):1059-1065
- 张国文,陈义珍,刘厚凤,等.2012.北京  $\text{PM}_{2.5}$  污染特征的分析[J]. 江西农业学报,24(8):121-124
- Zhao P S, Dong F, He D, *et al.* 2013. Characteristics of concentrations and chemical compositions for  $\text{PM}_{2.5}$  in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13:4631-4644
- 张小玲,唐宜西,熊亚军,等.2014.华北平原一次严重区域雾霾天气分析与数值预报试验[J]. 中国科学院大学学报,31(3):337-344
- 徐敬,张小玲,赵秀娟,等.2009.夏季局地环流对北京下风向地区  $\text{O}_3$  输送的影响[J]. 中国环境科学,29(11):1140-1146
- 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[J]. 环境科学研究,22(3):309-314
- 陈跃浩,高庆先,高文康,等.2013.沙尘天气对大气环境质量影响的量化研究[J]. 环境科学研究,26(4):364-369
- 耿福海,刘琼,陈勇航.2012.近地面臭氧研究进展[J]. 沙漠与绿洲气象,6(6):8-14
- 王雪松,李金龙,张远航,等.2009.北京地区臭氧污染的来源分析[J]. 中国科学,39(6):548-559
- 漏嗣佳,朱彬,廖宏.2010.中国地区臭氧前体物对地面臭氧的影响[J]. 大气科学学报,33(4):451-459
- Xu J, Ma J Z, Zhang X L, *et al.* 2011. Measurements of ozone and its precursors in Beijing during summertime: impact of urban plumes on ozone pollution in downwind rural areas[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(23):12241-12252
- 李令军,王英,张强,等.2008.麦秸焚烧对北京市空气质量影响探讨[J]. 中国科学,38(2):232-242