

北京地区 SO_2 、 NO_x 、 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 变化特征的城郊对比分析

刘洁^{1,2}, 张小玲¹, 徐晓峰¹, 徐宏辉³

(1. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2. 浙江省气象局, 杭州 310002; 3. 浙江省气象科学研究所, 杭州 310017)

摘要: 2006-01-01 ~ 2006-12-31 在北京上甸子区域大气本底站和城区宝联环境观测站连续观测了 SO_2 、 NO_x 、 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度, 分析了北京城区和郊区的季节变化及日变化的差异, 并结合风向讨论了城区污染对于大气本底的影响. 结果表明, ① NO_x 、 SO_2 浓度在采暖季城郊差异最大, 城区是本底的 4~6 倍, 城郊 O_3 有一致的浓度变化. 本底站 $\text{PM}_{2.5}$ 在 4、5 月达到 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上, 是年平均的 2~3 倍; ② NO_x 和 SO_2 的日变化在城区表现为双峰型, 在 09:00 前后和 22:00 前后形成高值, 郊区表现为单峰型, 在 22:00 前后出现高值. 郊区 O_3 的日变化峰值滞后于城区大约 2 h. $\text{PM}_{2.5}$ 日变化规律表现得较不规则; ③ 西南风条件下本底各污染物浓度明显受城区输送影响而升高, 东北风条件下干洁气团的影响比较明显.

关键词: 对比; NO_x ; O_3 ; 上甸子; 本底

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)04-1059-07

Comparison Analysis of Variation Characteristics of SO_2 , NO_x , O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ Between Rural and Urban Areas, Beijing

LIU Jie^{1,2}, ZHANG Xiao-ling¹, XU Xiao-feng¹, XU Hong-hui³

(1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. Zhejiang Meteorology Bureau, Hangzhou 310002, China; 3. Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310017, China)

Abstract: The concentrations of SO_2 , NO_x , O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ were observed continuously at Shangdianzi atmospheric background monitoring station and Baolian urban environmental monitoring station from 2006-01-01 to 2006-12-31. The difference of seasonal variation and diurnal variation between rural and urban areas was analyzed. And the relationship between wind direction and pollutant concentration at background station was discussed. The results showed that. ① The difference of NO_x and SO_2 concentrations between rural and urban was most prominent in winter. The concentrations in urban had 4-6 times more than that in rural. The variation trends of O_3 were similar in urban and rural. $\text{PM}_{2.5}$ was more than $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in April and May in rural, which was 2-3 times more than annually average. ② The diurnal variation of NO_x and SO_2 showed two peaks, one around 09:00 and the other around 22:00. That showed one peak around 22:00 in rural. The rural ozone daily peak was 2 h later than the urban. The diurnal variation of $\text{PM}_{2.5}$ was not regular. ③ The pollutant concentrations seemed obviously high when southwest wind prevailed and brought the polluted air from urban. Contrarily, that was very low when northeast wind prevailed and brought the clean air.

Key words: comparison; NO_x ; O_3 ; Shangdianzi; background

SO_2 、 NO_x 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 由于其对大气光化学反应的贡献及对人体健康的影响效应是研究城市空气质量所关注的焦点^[1~5]. O_3 ($\text{NO}_2 + \text{O}_3$) 能够反映区域及局地大气氧化性特征, 关于 O_3 来源及变化规律的研究也逐渐引起重视^[6]. 大气边界层结构^[7]、天气条件^[8~10] 以及污染源^[11,12] 对污染物的生成和传输起着重要作用. 围绕北京地区的大气环境, 针对特殊天气条件^[13]、重污染过程^[14,15] 以及特定季节^[16~18], 利用单点观测资料或飞机航测资料, 已经获得了具有代表性的北京城区的污染特征.

目前关于北京城区与郊区空气质量变化情况的对比分析尚不多见, 本研究利用上甸子区域本底站

及城区宝联观测站作为郊区和城区的代表性站点, 讨论了在不同季节 SO_2 、 NO_x 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 以及 O_3 变化特征的差异, 并分析了造成差异的原因, 同时初步探讨了在不同风向条件下城区污染对郊区清洁地区空气质量的影响, 以期今后研究北京地区污染物分布的城郊差异及污染物的传输及转化提供依据.

收稿日期: 2007-05-28; 修订日期: 2007-10-24

基金项目: 中国气象局气候变化专项 (CCSF2007-15); 北京区域气象科技创新基金项目 (BRMCCX200604); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2006CB403703)

作者简介: 刘洁 (1978 ~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气化学, E-mail: snowlj@126.com

1 材料与方法

图 1 显示了上甸子区域本底站及城区宝联观测站的地理位置. 上甸子本底站是 WMO-GAW 区域本底观测网络的成员之一, 位于北京市区东北方向密云县境内, 由于其作为本底观测站的特殊作用, 周边除附近村落的农事活动外不受其它人类活动影响, 并且在近距离内没有排污的工矿企业, 所处位置地形开阔, 受局地环流影响小, 气候及气象为典型华北区域特征. 城区宝联观测站设于城区人口密集的中心区域, 毗邻西三环, 位于昆玉河东岸的宝联体育公园内, 周边主要为居民区及办公区, 无局地污染源.

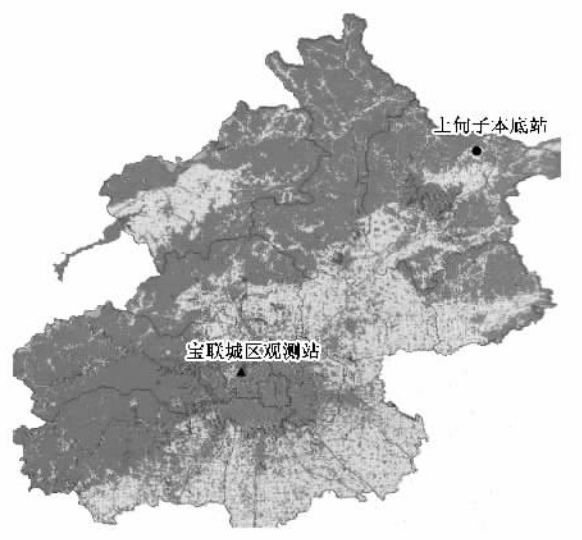


图 1 观测站点位置

Fig.1 Location of monitoring stations

上甸子本底站气体 SO_2 、 NO_x 、 O_3 观测所用仪器分别为美国 TE 公司的 C 系列仪器 43CTL、42CTL 和 49C, 城区宝联观测站则采用澳大利亚 Ecotech 公司的 98XX 系列仪器 EC9850、EC9841、EC9810. 2 个点 O_3 观测仪器均定期使用标准的 O_3 校准仪进行校准; SO_2 和 NO_x 仪器则采用零气发生器和气体稀释校准仪, 配合国家标物中心配制的标准气体, 定期进行校准. $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的观测均采用 R&P 公司的 TEOM1400a.

2 站采样进气口距地面高度为 5 m, 气体观测采用共进气系统进样, 而气溶胶观测采用独立进样管进样. 气体观测过程中的质量控制方法包括: ①在仪器进气口安装直径 47 mm、孔径 5 μm 的 Teflon 过滤膜以去除颗粒物对测量的影响, 该滤膜在城区站每周更换 1 次, 在本底站每 2 周更换 1 次; ②仪器每 3

个月进行 1 次多点校准, 进行维护前后以及仪器发生明显漂移时, 均进行多点校准; ③每天自动进行零点和跨度点的检查; ④定期进行仪器维护, 如清洗管路、更换过滤器等; ⑤根据零/跨检查结果及多点校准结果, 结合日常仪器状态记录, 对 5 min 平均值资料进行剔除和订正, 获得有效数据, 进而计算小时平均值和日平均值. $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度观测的质量控制方法包括: ①当用于测量的滤膜负载超过 30% 时则更换; ②定期对管路、切割头和泵进行检查和清洗, 并定期对流量进行校准.

2 结果与分析

2.1 季节变化特征

图 2 为城区和郊区几种污染物逐月平均浓度的对比. 由图 2 可以看出, SO_2 在非采暖季节 (4 ~ 10 月) 浓度很低, 城区和郊区都在 10×10^{-9} (体积分数, 下同) 以下, 城郊差异很小, 不超过 3×10^{-9} , 其中 7 月为 SO_2 浓度最低月份, 2 站月平均浓度均小于 1×10^{-9} , 主要是由于该季节源弱小、高湿度及降水对 SO_2 的去除和转化作用明显所致. 而在冬季的采暖季节 (1 ~ 3 月、11 ~ 12 月), 城区 SO_2 浓度明显升高, 1 月平均浓度接近 60×10^{-9} , 本底站的 SO_2 浓度略有升高, 但仍远远低于城区. NO_x 的年变化趋势与 SO_2 类似, 城区和郊区都为非采暖季节浓度较低, 在 7 月份达到最低, 而在采暖季节浓度较高, 本底站 NO_x 的浓度值全年均远低于城区, 最高值不超过 20×10^{-9} , 城区最低值为 30×10^{-9} 左右, 而最高值接近 120×10^{-9} . 城区 NO 也为采暖季远高于非采暖季, 但本底 NO 则全年均为较低水平, 约为 1×10^{-9} , 低至仪器的检测限, NO 主要为机动车和燃烧排放, 由此可见本底站周边没有相关的局地污染源. 城、郊 SO_2 、 NO_x 污染特征的差异表明了 SO_2 与 NO_x 的来源差异, 从观测结果推断, SO_2 主要来源于冬季燃煤取暖的排放, 因而非采暖季城郊差异不大, 而 NO_x 则主要来源于机动车及燃煤的共同排放, 夏季城区机动车的影响较为显著, 因此城郊差异较大.

O_3 的月平均值均为郊区高于城区, 推断其原因是市区 NO 浓度较高, 抑制了臭氧的生成, 而郊区 NO_x 和 VOC 的比值更适合臭氧的生成. 城郊具有相同的变化趋势. 冬季浓度最低, 随着气温的上升及辐射量的增加, 在 6 月达到 1 个高值, 7、8 月浓度有所降低, 9 月达到另 1 个高值, 其原因可能是 6 月和 9 月为夏初和夏末, 气温较高, 但降雨量少, 晴朗天气

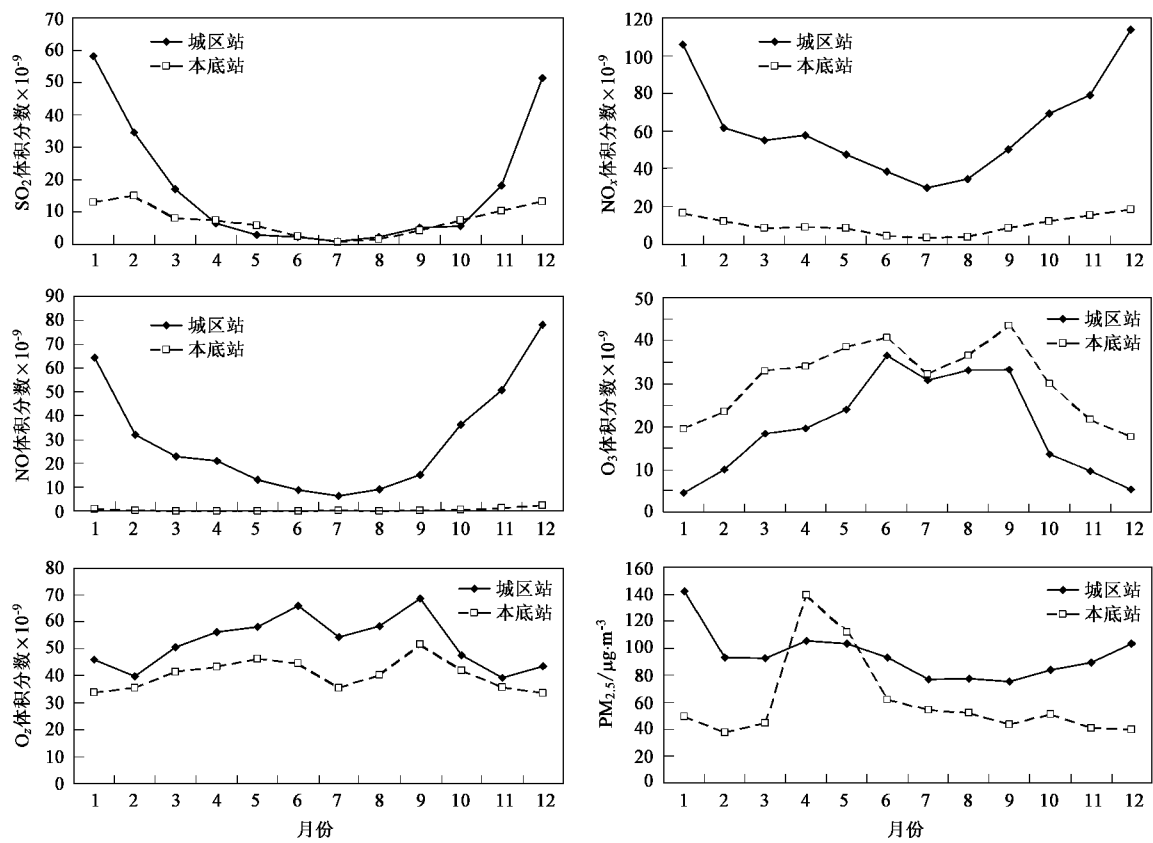


图2 SO₂、NO_x、NO、O₃、O₂、PM_{2.5}的逐月平均浓度对比

Fig.2 Monthly average of SO₂, NO_x, NO, O₃, O₂ and PM_{2.5} at urban and rural stations

居多,因而到达地面的辐射量相对较高,有利于臭氧的形成,7、8月为盛夏,气温达到最高,但北京地区雨季来临,阴雨天气增多,使得到达地面的紫外辐射减弱而使生成臭氧的光化学反应减弱。O₃夏季城郊浓度差别较小,而冬季差别较大。O₂为城区高于郊区,推断其原因是城市的机动车排放了高浓度的NO_x,导致城区O₂较高,而郊区则缺乏NO_x源。与O₃类似城郊都在夏初和夏末达到高值,本底站O₂年变化幅度较小,而城区年变化幅度较大,由此推断城区大气氧化性明显高于郊区,在本底站大气氧化性具有稳定性,而城区随污染季节特征的不同而有所变化。与O₃变化相反,城郊夏季O₂浓度值差别较大,而冬季差别较小。根据Clapp等^[6]的研究推断夏季城区大气氧化性主要表现为由于局地排放或环流所导致的局地性特征,与大气本底差异较大,而冬季其表现为由于大范围的燃烧活动而导致的区域性特征。

PM_{2.5}城区浓度远高于本底,城区最高值出现在1月(冬季采暖季节),次高值出现在4月(春季沙尘

季节),其它月平均浓度在80~100 µg/m³。而本底站各月浓度相差不大,基本在40~60 µg/m³范围内变化,但在大区域内扬沙、浮尘出现频繁的4月和5月浓度急剧增高,月平均值高于城区。其原因可能由于影响北京地区的沙尘路径主要为偏西路径和西北路径,有时也有东北路径,通常沙尘过程由北向南会逐渐减弱,因而对上甸子的影响会大于对城区的影响,从地面气象观测记录中也能够看出春季经常出现本底站观测到浮尘而城区没有观测到的情况,但关于沙尘对城郊影响的差异还需要结合具体的天气过程进行个例分析进而得出其影响机制。

2.2 日变化特征

按照气象学上季节的划分,将1 a分为春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)和冬季(12、1和2月)。从图3中看出,在城区和郊区,不同季节SO₂的日变化不同。冬季本底站为单峰型日变化,而城区站则为明显的双峰型变化,城区和本底均在22:00前后出现1个峰值,可能是由于夜间大气湍流作用减弱而采暖燃烧活动加强、近地层污染物发生累积所致,峰值过后凌晨的污染物浓度逐渐降低,这

与凌晨人类活动的大幅度减少密切相关.城区在 09:00 前后还出现 1 个明显的峰值,可能由于早上机动车高峰及城市人类活动密集所致,本底站由于远离交通密集区并且人烟稀少,因而未出现此峰值.春季和秋季城区仍然是明显的双峰型变化,2 个峰值分别出现在上午和夜间,只是日较差减小,而本底站

也有 2 个峰值出现,上午的峰值比城区滞后 1~2 h,另 1 个峰值出现在 18:00 前后.由于春季和秋季上旬子主导风向为西南风和西南偏西风,因而上午的峰值可能由于城区输送所致,而傍晚的峰值则可能与周边村庄的炊事活动有关.夏季城区和郊区的日变化较为一致,都是在 14:00 前后出现 1 个峰值.

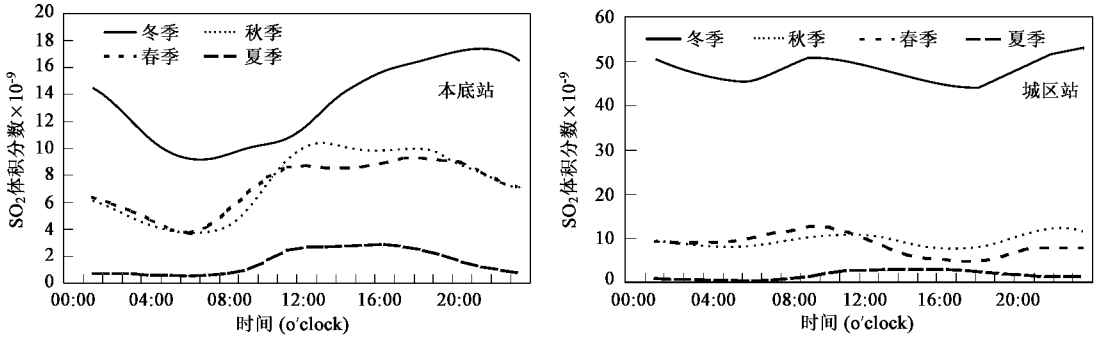


图 3 不同季节 SO_2 日变化的城郊对比
Fig.3 Diurnal variation of SO_2 in different seasons

从图 4 看出,城区和郊区 O_3 为单峰型日变化,夏季日较差最大而冬季日较差最小,城区的日较差大于郊区.城区的峰值出现在 14:00~16:00,季节差异不明显,而郊区峰值出现时间有所滞后,在 16:00~18:00,季节差异明显,冬季峰值出现最早,夏季峰值出现最晚.城区和郊区最低值均出现在日出之前.由本底站峰值出现的滞后性推断,城区的输送是本底地区 O_3 的重要来源.在东北风主导的冬季,风向不利于北京市区向本底站的输送,本底峰值出现在紫外辐射最强的 14:00 前后,与光化学反应最强的时段相吻合,由此推断冬季来源于输送的 O_3 较少,而夏季西南风主导,本底峰值滞后于城区约 2 h,此时推断输送作用较强.春季 O_3 日变化不规则,与春季风沙天气频繁,气体浓度受风力扩散影响较大有关. O_2 的日变化趋势与 O_3 几乎相同,只是在城区 O_2 日较差比 O_3 日较差明显减小,本底站则不明显,这反映了本底站大气氧化性的区域特征以及城区大气氧化性的局地特征.

NO_x 日变化的城郊差异较为明显,本底站在 22:00 前后出现 1 个峰值,在 14:00 前后出现最低值,城区站在 22:00 前后和 9:00 前后各有 1 个峰值,最低值在 14:00 前后.城区 NO_x 的日变化与 SO_2 类似,早晨的峰值是城市“早高峰”的明显体现,夜间峰值反映了湍流减弱及污染物的累积.最低值出现的时段与 O_3 最高值出现的时段相吻合,说明此时是

O_3 生成的化学反应最旺盛的时段. NO_x 不同季节日变化规律类似,只是冬季日较差最大而夏季日较差最小.

从图 5 可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 的日变化为双峰型的变化,2 个峰值分别出现在上午和夜间,但城区和郊区峰值出现的时间及峰的强弱有所不同.本底站春季和夏季夜间的峰值出现在 21:00 前后,上午的峰值则不明显,秋季夜间峰值提前至 19:00 前后,上午的峰值也不明显,冬季 2 个峰较为明显,分别在 9:00 前后和 22:00 前后.在城区春季和夏季上午的峰值非常明显,出现在 08:00~09:00,夜间的峰值则出现较晚,约为 01:00~02:00,秋季和冬季夜间峰值出现在 21:00 前后,而上午的峰值出现较晚,在 12:00 前后. $\text{PM}_{2.5}$ 与局地源排放、相对湿度、气粒转化以及远程输送等因素的综合作用相关,因此其日变化规律表现得较不规则.

2.3 本底站污染物浓度与风向的关系

上甸子本底站虽然代表区域大气本底特征,但其位于城市群中,不可避免的受到城市污染的影响,尤其是当气流运动有利于城区的污染物向本底地区输送时,影响就尤为明显.图 6 是不同风向时本底站各污染物浓度的平均值.可以看出,本底站 SO_2 和 NO_x 与风向的相关关系非常明显, SO_2 西南风时的浓度约为东北风时的 3 倍, NO_x 约为 2 倍.从图 6 还可明显看出,当气流来自西南方向时,本底站的污染

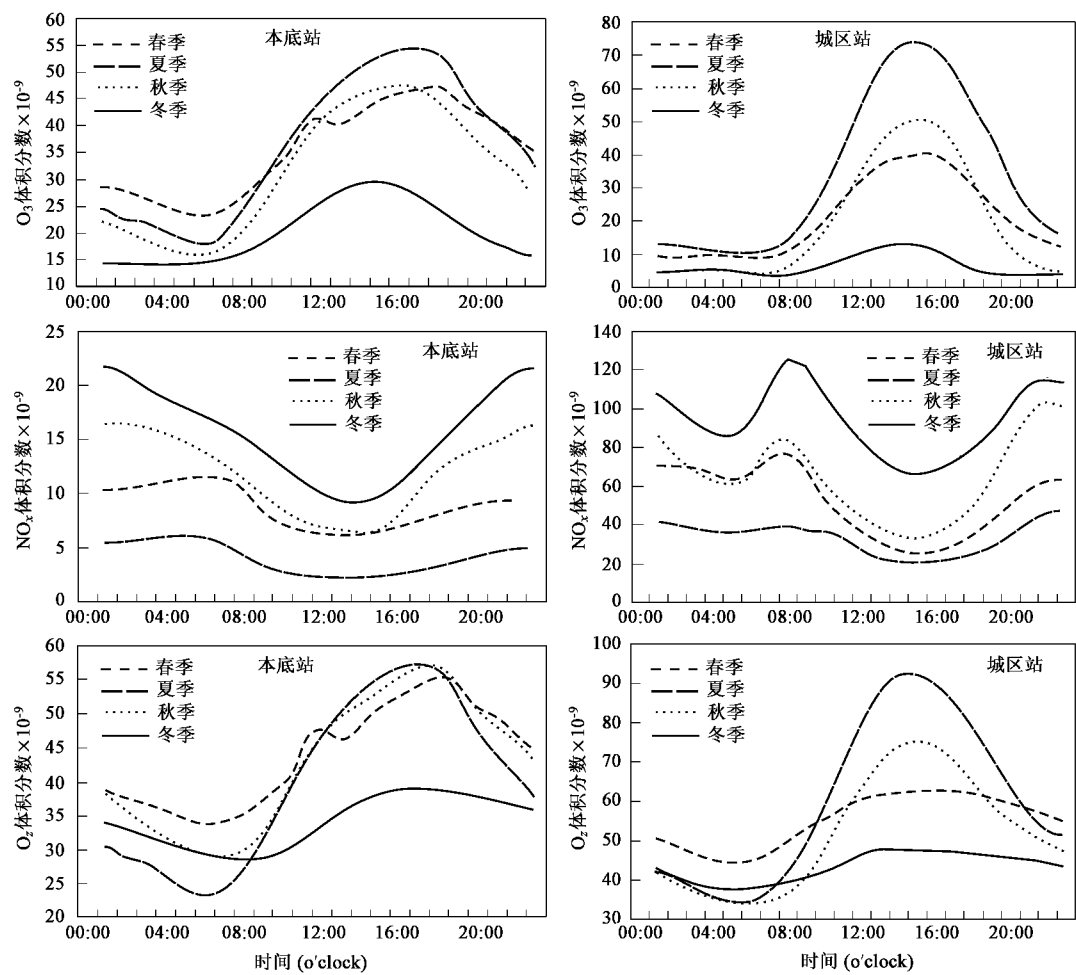


图 4 不同季节 O_3 、 NO_x 、 O_2 日变化的城郊对比

Fig.4 Diurnal variation of O_3 , NO_x and O_2 in different seasons

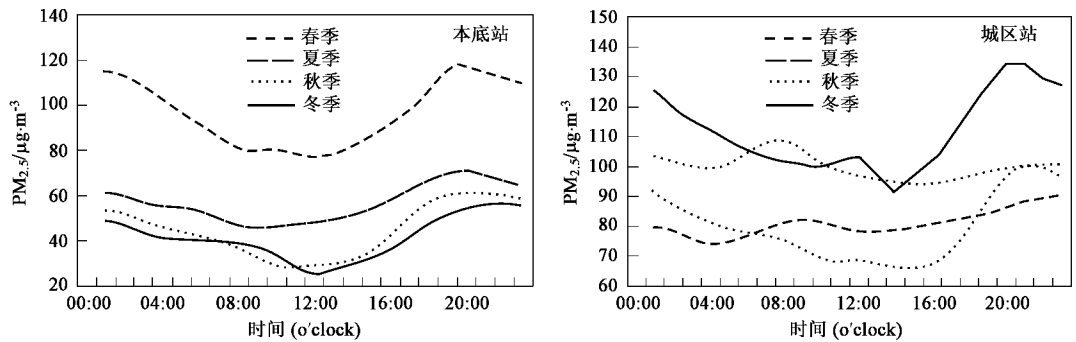


图 5 不同季节 $\text{PM}_{2.5}$ 日变化的城郊对比

Fig.5 Diurnal variation of $\text{PM}_{2.5}$ in different seasons

物浓度较高,而气流为来自东北方向携带清洁气团时,本底站的污染物浓度较低。 O_3 也表现出与 SO_2 和 NO_x 类似的特征,只是不同风向上的差异要小,这表明城区对本底 O_3 的输送是本底地区 O_3 的来源之一,但是由于 O_3 在传输过程中的复杂化学过程,使得这种传输作用表现的不如 SO_2 和 NO_x 那么明

显。 O_2 随风向的变化是几种污染物中最不明显的,由此可见, O_2 表征了大区域大气氧化性的稳定特征,受局地环流等条件影响较小。 $\text{PM}_{2.5}$ 也可以明显的看出西南气流影响下的浓度是东北气流影响时的 2 倍以上,因此推断城区对本底站颗粒物的输送是一个重要的来源,另外与其它气态污染物不同的是,

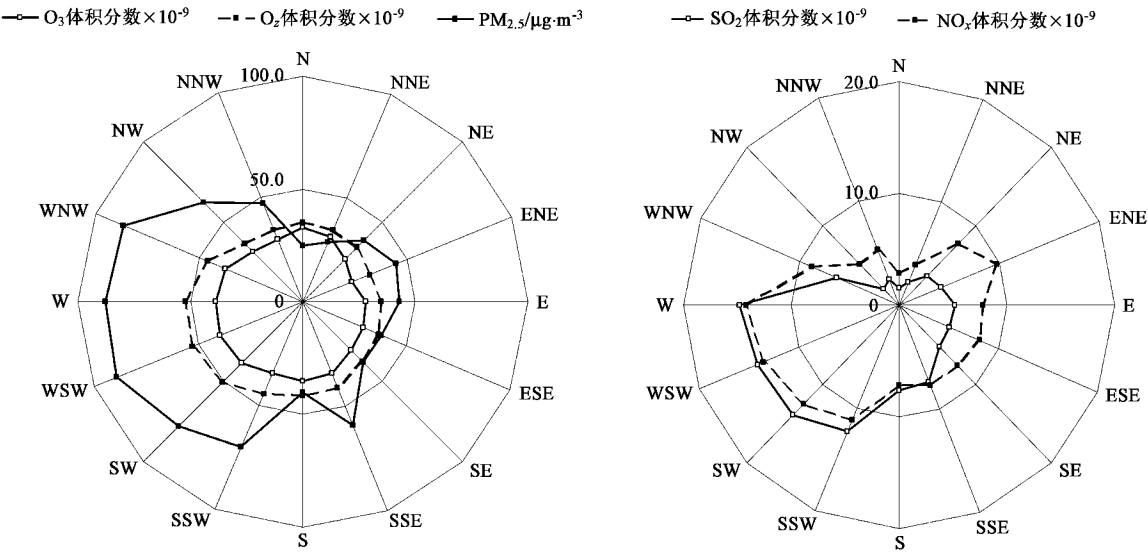


图 6 本底站风向与各污染物(SO₂、NO_x、O₃、O₂、PM_{2.5})浓度的关系

Fig. 6 Relationship between wind direction and concentrations of SO₂, NO_x, O₃, O₂ and PM_{2.5} in rural area

风向为西北偏西风时, PM_{2.5} 也出现了较高浓度, 这表明在春季西北气流的影响下本底站 PM_{2.5} 浓度与大尺度沙尘的传输密切相关.

通过上面的讨论可知, 北京城区的输送以及西北方向的输送是本底站污染物的重要来源, 根据地面气象观测资料的统计可知, 本底站全年出现频率最高的主导风向为西南偏西风(WSW, 13.3%)和东北偏东风(ENE, 16.6%), 静风(风速 < 1.0 m/s)出现频率也与主导风向较为接近(15.6%). 因此将出现频率最高的 3 种风向情况下的平均浓度进行对比绘于图 7.

PM_{2.5} 含量很低的干洁气团, 反之西南气流则带来了富含这 2 种污染物的污染气团. 表征大气氧化性的 O₂ 也具有相同特征, 只是静风时和东北风时浓度差别不大, 由此推断在这 2 种情况下, O₂ 能够代表本底氧化性特征, 而西南风时本底氧化性受到了城区污染的影响. NO_x 也是东北风时最低, 但西南风和静风时浓度接近, 静风时浓度略高, 由此推断 NO_x 的局地累积和远程输送对本底浓度的影响都很重要, 但本底 NO_x 浓度总体水平很低, 因此影响因素的差异不明显. 对 O₃ 来说西南风情况下浓度明显较高, 静风和东北风情况下浓度接近, 东北风时略高, 这也验证了输送是本底 O₃ 的重要来源.

以上关于风向与污染物浓度的关系主要为定性分析, 为了搞清输送途径、条件及协同作用的定量关系等, 还需结合轨迹模式、化学模式等进行进一步的个例分析来进行理论推断和验证. 同时, 以上的分析表明, 在进行污染物本底浓度特征的筛选时, 应考虑不同风向下污染气团所造成的影响, 应采取适当的方法将其影响加以剔除.

3 结论

(1) 北京 SO₂、NO_x、O₃ 的城郊差异和季节差异表明燃煤是 SO₂ 的主要排放源, NO_x 主要来源于机动车及燃煤的共同排放, O₃ 的浓度主要受辐射量影响. PM_{2.5} 总体来看城区浓度远高于郊区, 城区最高

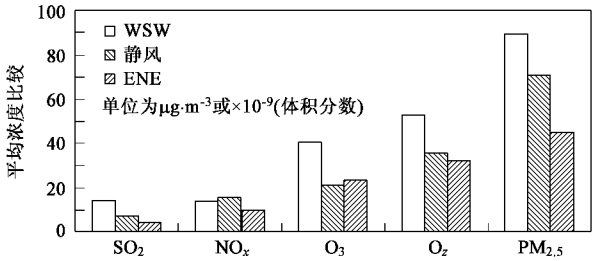


图 7 西南偏西风、东北偏东风以及静风情况下本底站各污染物的平均浓度比较

Fig. 7 Average concentrations of SO₂, NO_x, O₃, O₂, PM_{2.5} while wind direction is WSW, ENE or stationary

从图 7 可以看出, 对于 SO₂ 和 PM_{2.5}, 西南偏西风时浓度最高, 静风时次之, 东北偏东风时浓度最低, 由此推断出东北方向向本底站输送的是 SO₂ 和

值出现在冬季; 郊区最高值出现在春季, 主要受浮尘天气影响.

(2) NO_x 和 SO₂ 的日变化反映了机动车高峰等人类活动对大气的影 响. 郊区 O₃ 的日变化峰值滞后于城区, 反映了城区 O₃ 对郊区的输送. PM_{2.5} 日变化规律反映了局地源排放、相对湿度、气粒转化以及远程输送等因素的综合作用.

(3) 城郊 O₃ 的季节特征和日变化特征反映了郊区大气氧化性的区域特征以及城区大气氧化性的局地特征.

(4) 西南风条件下本底各污染物浓度明显受城区输送影响而升高, 东北风条件下干洁气团的影响比较明显, 城区的输送是本底污染物的重要来源, 但还需结合轨迹模式、化学模式等进行进一步验证.

致谢: 感谢徐敬工程师在研究过程中提供的资料分析方面的帮助, 感谢董璠、孟伟、何迪在观测仪器维护方面所做的工作.

参考文献:

[1] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(29): 4959-4970.

[2] 姚小红, 何东全, 周中平, 等. 北京城市大气中 NO_x、CO、O₃ 的变化规律研究[J]. 环境科学, 1999, **20**(1): 23-26.

[3] Wang T, Cheung V T F, Anson M, *et al.* Ozone and related gaseous pollutants in the boundary layer of eastern China: Overview of the recent measurements at a rural site [J]. Geophysical Research Letters, 2001, **28**(12): 2373-2376.

[4] Streets D G, Fu J S, Jang C J, *et al.* Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(3): 480-492.

[5] Gulliver J, Briggs D J. Personal exposure to particulate air pollution in transport microenvironments [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(1): 1-8.

[6] Clapp L J, Jenkin M E. Analysis of the relationship between ambient levels of O₃, NO₂ and NO as a function of NO_x in the UK [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(36): 6391-6405.

[7] Benjamin G, Jean-Claude R, Helene C, *et al.* Impact of vertical atmospheric structure on Beijing aerosol distribution [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(27): 5167-5180.

[8] Wang Y, Zhuang G S, Sun Y L, *et al.* The variation characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze, and clear days in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(34): 6579-6591.

[9] 孙扬, 王跃思, 刘广仁, 等. 北京地区一次大气环境持续严重污染过程中 SO₂ 的垂直分布分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 408-414.

[10] 徐晓峰, 张小玲, 李青春. 北京地区一次强沙尘天气过程的气象因子及空气污染状况分析[J]. 气象科技, 2003, **31**(6): 321-327.

[11] 王雪松, 李金龙. 人为源排放 VOC 对北京地区臭氧生成的贡献[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(6): 501-505.

[12] Song Y, Zhang Y H, Xie S D, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing by positive matrix factorization [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(8): 1526-1537.

[13] Xie S D, Yu T, Zhang Y H, *et al.* Characteristics of PM₁₀, SO₂, NO_x and O₃ in ambient air during the dust storm period in Beijing [J]. Science of the Total Environment, 2005, **345**(1-3): 153-164.

[14] Zhang Q, Zhao C S, Tie X X, *et al.* Characterizations of aerosols over the Beijing region: a case study of aircraft measurements [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(24): 4513-4527.

[15] Wang T, Ding A J, Gao J, *et al.* Strong ozone production in urban plumes from Beijing, China [J]. Geophysical Research Letters, 2006, doi: 10.1029/2006GL027689.

[16] 李昕, 安俊琳, 王跃思, 等. 北京气象塔夏季大气臭氧观测研究[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(4): 353-357.

[17] 刘小红, 洪钟祥, 李家伦, 等. 北京气象塔秋季大气 O₃, NO_x 及 CO 浓度变化的观测实验[J]. 自然科学进展, 2000, **10**(4): 338-342.

[18] 徐峻, 张远航. 北京市区夏季 O₃ 生成过程分析[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(6): 973-980.