

2008年奥运期间华北区域大气污染物本底浓度变化与分析

吴丹, 辛金元, 孙扬, 王跃思*, 王普才

(中国科学院大气物理研究所 LAPC, 北京 100029)

摘要: 为了解华北区域的大气背景状况, 评估污染源限排对区域空气质量的影响以及污染物输送在区域污染中的作用, 在2008年奥运期间(6~11月), 对华北区域兴隆大气本底监测站主要污染物 NO_x 、 SO_2 、 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 进行了连续在线观测, 对不同时间段的污染物的浓度水平和日变化特征进行了比较分析, 结合地面气象资料和后向轨迹模式初步探讨了污染物的区域传输过程, 并对区域不同站点的污染情况进行了初步比较。结果显示, 2008年夏季兴隆本底站 NO_x 、 SO_2 、 O_3 与 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度分别为 8.4、10.5、126.0 和 59.8 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 秋季平均浓度分别为 11.7、17.2、97.5 和 30.7 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。奥运时段(2008-08-08~2008-08-24), 兴隆 NO_x 、 SO_2 、 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度分别为 6.6、6.8、100.5 和 33.3 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 较奥运时段前后平均浓度分别降低了 29.0%、46.9%、18.6% 和 36.5%, 与 2007 年奥运时段同期观测结果相比, NO_x 浓度下降了 62.5%, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降了 29.0%, 奥运时段华北区域空气质量明显改善。在污染物限排之前, 兴隆主要污染物的日变化形势都是夜间浓度低, 白天浓度不断升高, 在傍晚 17:00~20:00 之间达到峰值, 显示了污染物区域输送在兴隆的累积, 而污染源排放控制期间污染物白天的积累过程明显减弱, 区域输送的污染物含量降低, 这些结果表明北京及周边地区污染源的联合控制取得了明显效果。兴隆夏秋季节主要受偏南方向的季风影响, 在此方向上对应的污染物浓度值最高, 偏南方向上的区域污染输送对兴隆影响较大。将京津冀区域不同站点间的污染物浓度进行比较分析发现, 华北区域夏秋季 NO_x 和 SO_2 污染较轻, O_3 污染不容乐观, $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重, 需要引起足够重视。

关键词: 2008 北京奥运; 华北区域大气本底站; NO_x ; SO_2 ; O_3 ; $\text{PM}_{2.5}$

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)05-1130-09

Change and Analysis of Background Concentration of Air Pollutants in North China During 2008 Olympic Games

WU Dan, XIN Jin-yuan, SUN Yang, WANG Yue-si, WANG Pu-cai

(LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: To understand the atmospheric background in North China and evaluate the effect of pollutant emission control as well as the influence of contaminant transportation in the regional pollution, during the 2008 Olympic Games, concentrations of four main air pollutants were observed from June to November at Xinglong station which is the regional background station of North China. We compared the concentrations and diurnal variations in different periods, analyzed the pollution transportation using the ground meteorological data and the backward trajectory model and compared the concentrations between different observation stations in Northern China. The results indicated that the concentrations of NO_x , SO_2 , O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ in summer were 8.4, 10.5, 126.0 and 59.8 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ respectively and in autumn were 11.7, 17.2, 97.5 and 30.7 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ respectively. During the period of Olympic (2008-08-08-2008-08-24), the concentrations of NO_x , SO_2 , O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ were 6.6, 6.8, 100.5 and 33.3 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and reduced 29.0%, 46.9%, 18.6% and 36.5% respectively compared to the average concentrations of the period before and after Olympic Games. The concentration of NO_x has reduced 62.5% and the $\text{PM}_{2.5}$ has reduced 29.0% compared to the same term of Olympic in 2007. The air quality has obvious improvement in North China during the Olympic Games. Before the emission control, the concentrations of pollutants were lower in the night and became higher gradually in the daytime and reached the peak values in 17:00~20:00 which can indicate the accumulation of regional pollution transportation in Xinlong. In the emission control period, the accumulation of pollutants in afternoon was obviously weakened and the transportation of pollutants was lower which can reveal the obvious effect of the emission control in Beijing and peripheral areas. The atmosphere in Xinglong was mainly influenced by the monsoon from south direction in summer and autumn and the pollution of Xinglong was seriously influenced by the regional pollution in the south direction. Compared the concentrations between different stations, we can conclude that in summer and autumn the pollutions of NO_x and SO_2 are relatively lower, the pollution of O_3 is not allowed to be optimism and the pollution of $\text{PM}_{2.5}$ is very serious which should be paid enough attentions.

收稿日期: 2009-06-24; 修订日期: 2009-11-04

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(973)项目(2007CB407303)

作者简介: 吴丹(1983~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气化学, E-mail: wudan04@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

to.

Key words: 2008 Olympic Games; regional background station of North China; NO_x ; SO_2 ; O_3 ; $\text{PM}_{2.5}$

大气本底的观测研究是大气化学观测的重要内容,它反映某一时期一定区域环境质量的初始状态,对区域环境质量评价与环境污染趋势预测预报有着重要意义^[1]. 在 20 世纪 50 年代,发达国家开始进行大气本底的监测,世界气象组织(WMO)于 1989 年建立了全球大气观测系统(GAW)^[2,3],对全球大气本底进行观测,目前我国有瓦里关、上甸子、临安和龙凤山及南极洲的中山站 5 个 GAW 观测站点. 2002 年中国科学院开始建立中科院大气本底监测网络,包括鼎湖山、贡嘎山、兴隆、长白山和阜康 5 个站^[4,5],兴隆站代表华北地区的大气本底情况,在过去的几年里对站点的关键气态污染物、温室气体和辐射特性以及气象条件等^[6~8]进行了一些观测和研究. 第 29 届奥运会在京举办期间,北京市的天气保障和空气质量受到了国内外的密切关注,为保障北京市的空气质量,北京和周边省市都出台了相关的政策和规定,例如车辆限行、工业结构调整、加油站改造、建筑工地限制、严禁焚烧秸秆等. 此时对华北区域大气污染物的本底浓度进行监测,对评估污染源控制措施效果,研究大气污染物在区域的传输和相互影响具有重要意义.

本研究对奥运期间华北区域本底站兴隆站的大气环境监测结果进行了分析,初步揭示了奥运期间华北区域的大气本底状况和污染物浓度变化情况,反映了区域污染源控制对污染物浓度水平的影响,结合天气过程和气象要素进一步探讨了区域输送对兴隆污染物浓度变化的作用,并将污染物背景浓度与区域其它观测站点进行了对比分析,对华北区域的污染水平进行了初略评估.

1 材料与方法

1.1 采样点

兴隆站($117^{\circ}35'E$, $40^{\circ}23'N$, 海拔 960 m)是 2002 年中国科学院建立的 5 个大气本底观测站(鼎湖山、贡嘎山、兴隆、长白山、阜康)之一,位于长城北侧的河北兴隆县境内,燕山主峰南麓,在北京的东北方位,距北京约 110 km. 从大的空间尺度看,兴隆站位于华北地区人类活动的中心区域,其地形和气候具有典型的华北区域特征;从小的空间尺度看,兴隆站远离城市,坐落在偏僻的兴隆山区中,观测点位于中国科学院国家天文台兴隆基地内,四面环山,居

局地制高点,该处山势平缓,地形开阔,周围植被为灌木和草地,附近只有天文台少量观测人员生活,山脚有一条小的盘山公路以及居住在山谷中的少数居民,居民多以耕种和果树为生,测点方圆 20 km 内无排放污染物的工矿企业. 兴隆站独特的地理位置和生态环境,使其作为华北区域的背景观测站具有很好的科学依据.

1.2 监测仪器

奥运期间,对兴隆站主要大气污染物 NO_x 、 SO_2 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 进行了监测,仪器均采用美国热电公司生产的自动连续观测仪器. NO - NO_2 - NO_x 分析仪为 42C 和 42I 型,观测期间进行过仪器的更换和维修,采用化学发光法; SO_2 采用 43C 型和 43I 型分析仪,采用紫外脉冲光源提高光强,从而可检测较低浓度的 SO_2 含量; O_3 为 49C 型分析仪,采用通用紫外光度法技术及时间共享双光池系统; $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度采用 RP1400 环境颗粒物监测仪. $\text{PM}_{2.5}$ 采样仪器固定在屋顶平台,距地面约 5 m,气体采样仪器置于室内,采样头固定在屋顶. 仪器定期进行标定,保证数据可靠性.

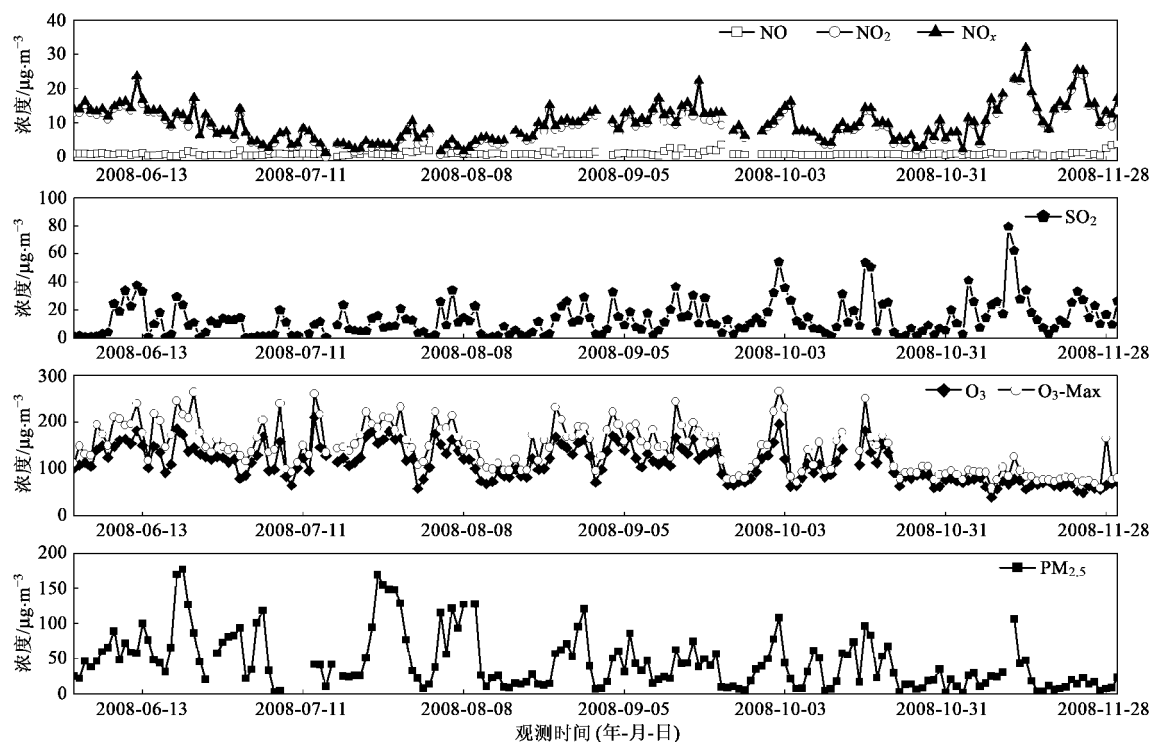
1.3 监测时间

为全面评估奥运期间的空气质量,对奥运前后的大气污染状况进行对比研究,污染物监测从 2008 年 6 月 1 日开始,到 2008 年 11 月 30 日结束,历时 6 个月,夏秋 2 个季度,包括了黄标车限行、单双号限行、奥运会、残奥会等时间段. 其中由于站点停电或雷雨天气等原因,有一些时间段的数据缺失. 仪器关机启动后,2 h 之内的数据视为无效数据不参加计算.

2 结果与讨论

2.1 污染物浓度水平特征及奥运期间浓度变化

观测期间兴隆主要大气污染物浓度逐日变化如图 1,不同季节及监测期间总体平均浓度见表 1. 兴隆地处山区,根据国家环境标准环境空气质量功能区划分,应执行一级标准, NO_2 日均限值为 $80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, SO_2 日均限值为 $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, O_3 小时均值限值为 $160 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 国家环境标准没有规定 $\text{PM}_{2.5}$ 的环境限值,本研究采用 WHO 空气质量准则的过渡时期目标(IT. 1)规定的日均值 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 进行参考.



O₃-Max 表示 O₃ 每日小时平均值的最大值,下同

图 1 兴隆本底站污染物日平均浓度变化

Fig. 1 Daily variation of air pollutants at Xinglong background station

表 1 兴隆本底站 2007 和 2008 年污染物不同时间段浓度水平 (日均值计算) 统计/μg·m⁻³

Table 1 Average concentration of pollutants in different periods (calculated from daily average) in 2007 and 2008 at Xinglong background station/μg·m⁻³

时间段	NO _x	SO ₂	O ₃	O ₃ -Max	PM _{2.5}
2007 奥运同期时段 (8 月 8 日 ~ 8 月 24 日)	17.7 ± 3.1				46.9 ± 22.0
2008 奥运时段 (8 月 8 日 ~ 8 月 24 日)	6.6 ± 3.2	6.8 ± 6.5	100.5 ± 24.9	130.5 ± 36.3	33.3 ± 38.5
2008 奥运前时段 (6 月 1 日 ~ 8 月 7 日)	8.5 ± 5.0	10.7 ± 9.7	131.5 ± 31.4	171.0 ± 41.4	66.2 ± 44.9
2008 奥运后时段 (8 月 25 日 ~ 10 月 31 日)	10.2 ± 3.7	15.1 ± 12.5	115.4 ± 34.3	147.0 ± 48.6	38.6 ± 28.2
2008 夏季 (6 ~ 8 月)	8.4 ± 4.7	10.5 ± 9.4	126.0 ± 32.4	163.3 ± 42.7	59.8 ± 44.6
2008 秋季 (9 ~ 11 月)	11.7 ± 5.5	17.2 ± 14.5	97.5 ± 35.7	124.8 ± 50.0	30.7 ± 25.1
2008 监测期间平均	10.0 ± 5.3	13.8 ± 12.6	111.9 ± 36.9	144.3 ± 50.2	44.7 ± 38.6

NO_x 观测期间平均浓度为 10.0 μg·m⁻³, 其中 NO 浓度 1.0 μg·m⁻³、NO₂ 浓度 9.1 μg·m⁻³, NO₂ 占 NO_x 比例超过 85%; NO_x 浓度日变化明显, 最大值 31.9 μg·m⁻³, 最小值 1.2 μg·m⁻³; 夏季平均浓度 8.4 μg·m⁻³, 秋季 11.7 μg·m⁻³, 秋季 NO_x 浓度较高. 兴隆 NO₂ 浓度远低于国家 NO₂ 一级标准, 反映了其背景站点特征.

SO₂ 观测期间平均浓度 13.8 μg·m⁻³, 夏季平均浓度 10.5 μg·m⁻³, 秋季平均浓度 17.2 μg·m⁻³, 秋季浓度较夏季高, SO₂ 大部分时间浓度均低于一级标准, 只在秋季有 5d 超标, 但浓度远低

于国家二级标准 150 μg·m⁻³. 兴隆 NO_x 和 SO₂ 污染浓度水平较低, NO_x 和 SO₂ 浓度秋季都比夏季要高, 与 2005 年监测结果一致^[6]; 夏季空气对流强烈且降雨频繁, 不利于污染物累积, 而随着秋季到来, 区域内秋收秸秆焚烧, 以及气温下降居民燃煤和生物质燃烧取暖增加了 NO_x 和 SO₂ 的排放^[9].

观测期间, 兴隆 O₃ 浓度水平较高, 日小时均值最大值平均为 144.3 μg·m⁻³, 夏季 163.3 μg·m⁻³, 秋季为 124.8 μg·m⁻³, 小时均值最大值可达 266.0 μg·m⁻³, 臭氧污染严重. 夏季 O₃ 有 45 d 小时均值最大值超出国际一级标准, 秋季为 21 d; 夏秋季甚至分别有 21 d 和 6 d 小时均值最大值超出了国家二级

标准 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. O_3 为光化学反应产物, 浓度变化受到紫外辐射的影响^[10, 11], 从图 1 可以看到, 10 月下旬之后 O_3 浓度值维持在较低水平.

兴隆 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值变化范围为 $1.8 \sim 176.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 整个观测期平均浓度为 $44.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 夏季 $59.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 秋季 $30.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 一共有 26 d 超过 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超标率为 28.3%, 秋季有 6 d 超过目标值. 兴隆夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染比较严重, 秋季相对较轻, 与背景站点上甸子 2005~2007 年观测到的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度季节变化一致, 夏季浓度与之相当, 秋季浓度略低^[12].

为了解奥运期间区域污染源限排对污染物浓度的影响, 比较了兴隆奥运前后不同时间段污染物的浓度水平, 并与 2007 年奥运时段的观测结果进行了对比, 表 1 分别给出了不同时间段的浓度平均, 其中兴隆 2007 年奥运时段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度根据所观测到的 PM_{10} 浓度以 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10} = 0.68$ 转换得来^[13, 14]; O_3 因自身形成机制的原因, 在 10 月底浓度开始显著降低, 因此奥运之后的浓度平均只计算到 10 月 31 日. 奥运时段, 兴隆污染物浓度明显低于奥运前后浓度水平, NO_x 、 SO_2 、 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度分别为 6.6、6.8、100.5 和 $33.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 较奥运前后时段的平均浓度分别降低了 29.0%、46.9%、18.6% 和 36.5%.

由于污染物浓度随季节会有所变化, 而不同年份之间天气形势往往相差不大, 因此对不同年份相同时间段的浓度比较仍具有一定研究意义. 由于观测资料限制, 兴隆 2007 年奥运同期时段只有 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度值, 兴隆 2008 年 NO_x 浓度较 2007 年下降了 62.5%, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降了 29.0%. 可以看到, 2008 年奥运时段, 大气主要污染物浓度较奥运前后以及 2007 年同期都有较大幅度的降低, 说明北京及周边地区污染源联合控制对华北地区空气质量的改善效果显著.

2.2 奥运期间污染物浓度日变化特征

为进一步了解奥运期间本底站污染物浓度的变化特征, 分别计算了 NO_x 、 SO_2 、 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 在 4 个时间段的日变化 (图 2), 分别为 2008 年 6 月 1~30 日, 代表污染物限排之前的情况, 7 月 20 日~9 月 20 日为北京车辆单双号限行时间, 这时周边区域也执行了一些污染限排措施, 8 月 8 日~8 月 24 日为奥运时段, 污染源限排措施最为严格, 10 月 1~31 日代表污染限排结束后的情况. 不同时间段污染物浓度水平差异明显, 除 SO_2 , 污染物在 6 月的日变化曲线明显高于其它时间段; 奥运时段, 4 种主要污染物的日变化浓度水平都最低, 反映了奥运时段区域大气质量的良好状况.

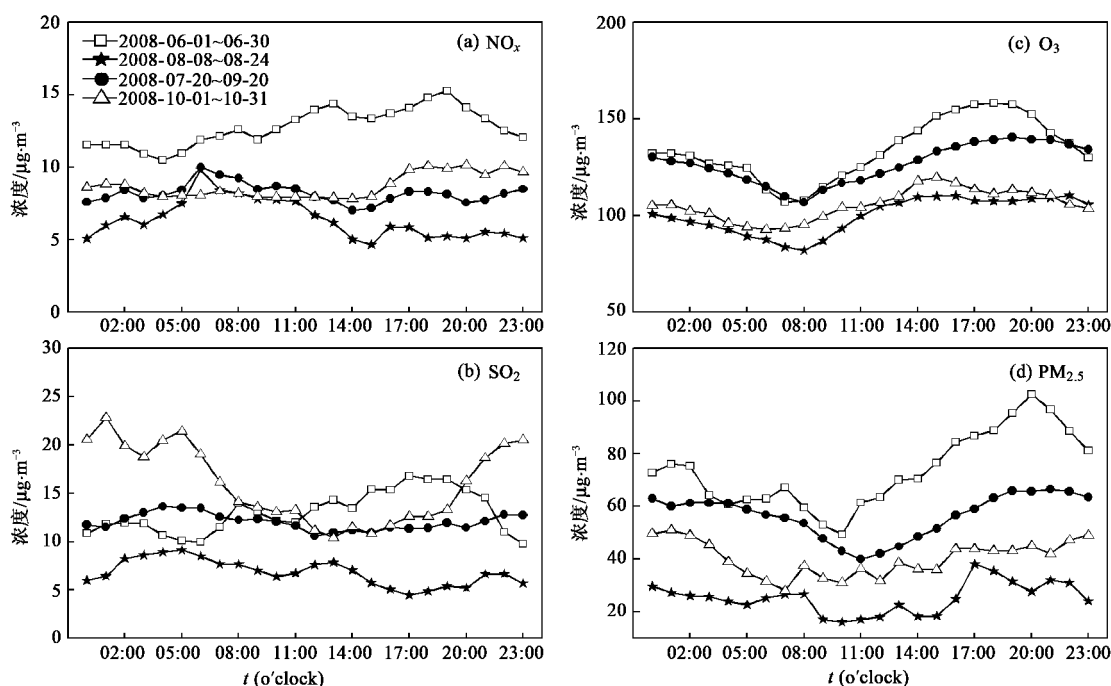


图 2 2008 年兴隆本底站奥运期间不同时间段污染物浓度日变化

Fig. 2 Diurnal variation of air pollutants in different periods at Xinglong background station in 2008

NO_x 在 6 月白天浓度比夜间高,夜间由于气体干沉降^[15]及与 O_3 等大气氧化剂的反应^[16],浓度不断降低,08:00 上升达到一个小高峰,为早间人为活动的影响,09:00 浓度值下降,可能是因为混合层的发展导致污染物稀释,之后浓度逐渐上升,中午由于对流扩散,浓度有一定降低,在 19:00 达到峰值,之后快速降低, NO_x 浓度在白天表现出随时间不断积累的趋势。 SO_2 在 6 月的日变化与 NO_x 相似,白天浓度高于夜间,夜晚浓度降低,08:00 表现出小高峰,之后污染物浓度有所起伏,随时间表现出逐渐升高的趋势,在 17:00 达到 1 d 中的最高值。由于兴隆站附近并没有大的 NO_x 和 SO_2 源排放,污染物随时间的积累应该是下午随着边界层对流的发展,风速变大,区域输送的结果。限行结束后, NO_x 和 SO_2 浓度日变化特征发生了明显变化,白天浓度低,从傍晚开始浓度开始增大,在夜间浓度高,特别是 SO_2 夜间浓度非常高;10 月天气已经转凉,夜间温度低,观测点周围居民的燃煤和生物质取暖增大了夜间 NO_x 和 SO_2 的排放^[9]。车辆单双号限行期和奥运时段, NO_x 和 SO_2 变化特征较奇特,在凌晨出现早高峰, NO_x 峰值异常显著,之后浓度逐渐降低,下午略有起伏,但积累趋势不明显。污染物在凌晨的高峰值,可能是北京地区车辆限行,增加了兴隆周边绕行车辆的数目,具体原因需要进一步分析。

兴隆 O_3 日变化特征明显,不同时间段的变化趋势基本相似,浓度都从 00:00 逐渐降低,在 07:00 ~ 08:00 达到 1 d 中的最低值,午后浓度逐渐升高,傍晚过后,浓度又开始降低。减排前, O_3 的日变化幅度较大,峰值出现在 18:00,峰值出现时间与在泰山顶^[17]的研究结果和温天雪等^[7]、马志强^[18]在兴隆的研究结果一致,并没有像北京等城市地区^[11],出现在辐射最强的中午时间,这与夏季盛行风向的影响,兴隆 O_3 浓度受到偏南方向城市输送有关,峰值出现时间滞后^[18]。减排期间, O_3 浓度在下午的上升过程平缓,可能是因为区域污染的控制导致区域输送强度减弱造成的,峰值出现时间推后到 19:00。奥运时段, O_3 浓度午间出现峰值,之后浓度下降,说明下午的区域输送强度很弱,但夜间在 22:00 达到最高值,这一峰值的出现还需要进一步的分析探讨。减排结束后, O_3 浓度在下午没有表现出强烈的区域输送,这与整个区域太阳辐射减弱 O_3 浓度降低有关,午间(14:00 ~ 16:00)的高值应来自于兴隆局地光化学反应,傍晚(19:00)较低的高值可能来自于

较弱的区域输送。

减排前, $\text{PM}_{2.5}$ 日变化幅度较大,夜晚浓度逐渐降低,07:00 ~ 08:00 略有升高,与早间人为活动有关,在 10:00 ~ 11:00 达到 1 d 的最低值;之后随着对流发展、风速增大,周边区域污染物逐渐向山区输送,细粒子浓度也随之上升,在 20:00 达到 1 d 中的最大值 $102.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,污染物积累过程明显。减排期间, $\text{PM}_{2.5}$ 在下午的累积过程明显变缓,21:00 达到最大值 $66.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。奥运时段, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化较复杂,但 1 d 之内的变化幅度较小。减排结束后, $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度水平较低,日变化非常平缓,夜间浓度要高于白天,最高值出现在 01:00,可能是当地居民夜间燃煤取暖,排放细粒子增多的原因^[19]。

从污染物在不同时间段的日变化情况可以看到,兴隆污染物日变化受污染源排放变化的影响显著,在实施源排放控制措施之后,污染物在下午的累积过程明显减弱,显示区域输送的污染物含量降低。

2.3 奥运期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化与气象要素的关系

兴隆作为区域背景站点,本地污染源排放很低,受到区域输送影响显著。由于 $\text{PM}_{2.5}$ 在大气中寿命长,输送距离远^[20],本研究以 $\text{PM}_{2.5}$ 为对象,探讨了兴隆受区域输送的影响。图 3 为兴隆夏秋季节风向频率分布图以及不同风向上 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均浓度分布。可以看到,夏秋季节兴隆主要受到偏南季风影响。夏季 SSW 方向风向频率最高,临近区域风向频率也较高,频率随着远离 SSW 方向而逐渐降低,东南方向风频比西南方向要高。对比 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布,其分布与风向频率基本一致,SSW 方向上 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高,临近区域对应着较高浓度,其中 NNE 方向浓度较大,可能是受到这一方向上 101 和 112 国道交通的影响。秋季风向频率较夏季有一定变化,SSW 方向上风频仍然最高,其次为 WSW,西南方向上的风频较东南方向高,由于季风方向的变化,WNW 方向上的风频有很大提高。秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布较夏季也有一定变化,SSE 方向对应着最高浓度,临近区域特别是西南方向,浓度较高。可以看到,夏秋季节兴隆 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度受到偏南气流输送影响严重,对 NO_x 、 SO_2 和 O_3 不同风向上的浓度变化分析也发现,偏南气流对应着污染物的较高浓度(图略)。兴隆南方位上对应着北京、天津、石家庄、唐山等重要京津冀区域污染城市。奥运期间,这些重点污染城市都采取了不同程度的污染控制措施,对华北区域空气质量的改善起到了一定作用。

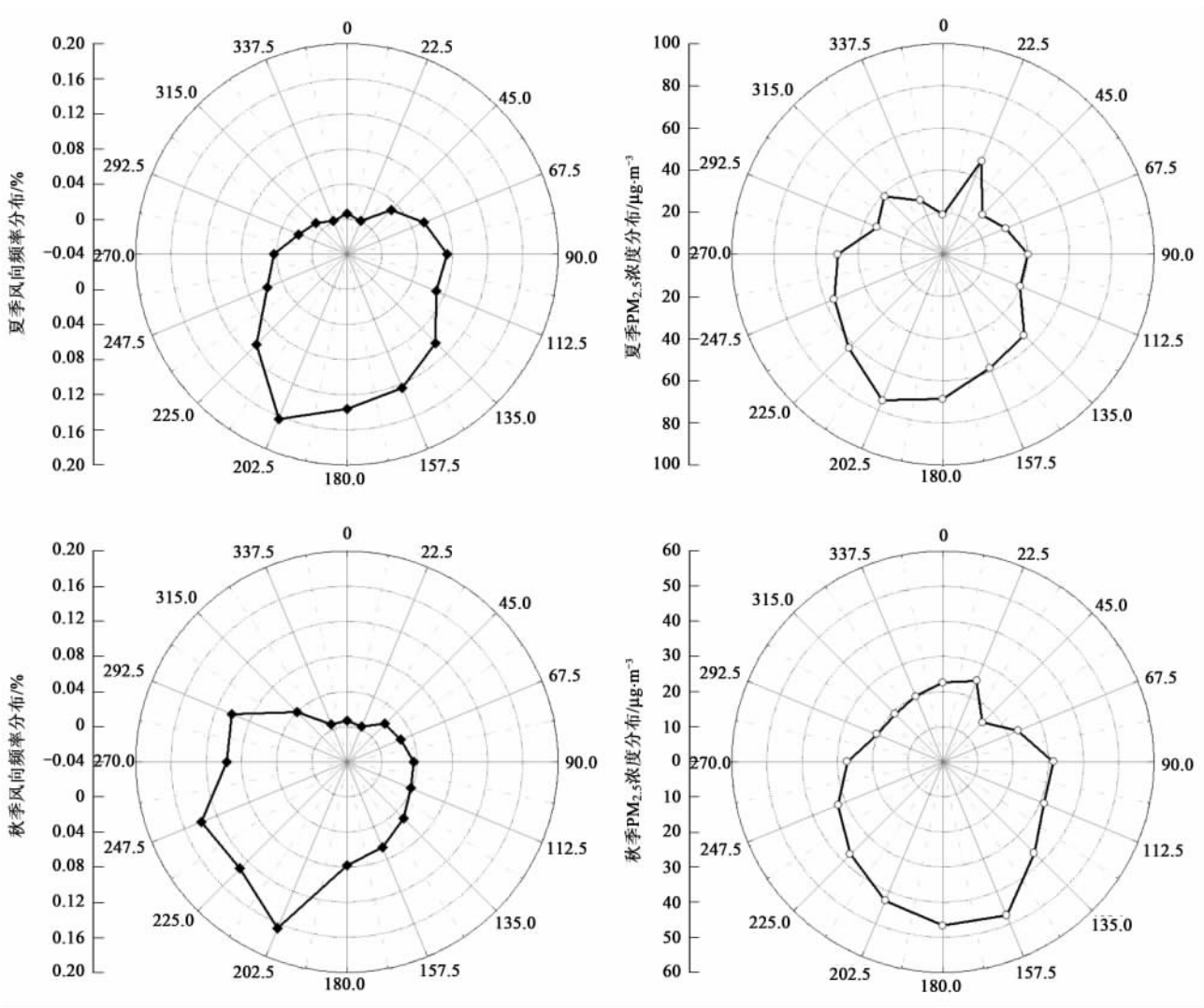


图3 兴隆本底站夏秋季节风向频率及PM_{2.5}浓度分布

Fig.3 Wind and PM_{2.5} concentration roses of Xinglong background station in summer and autumn

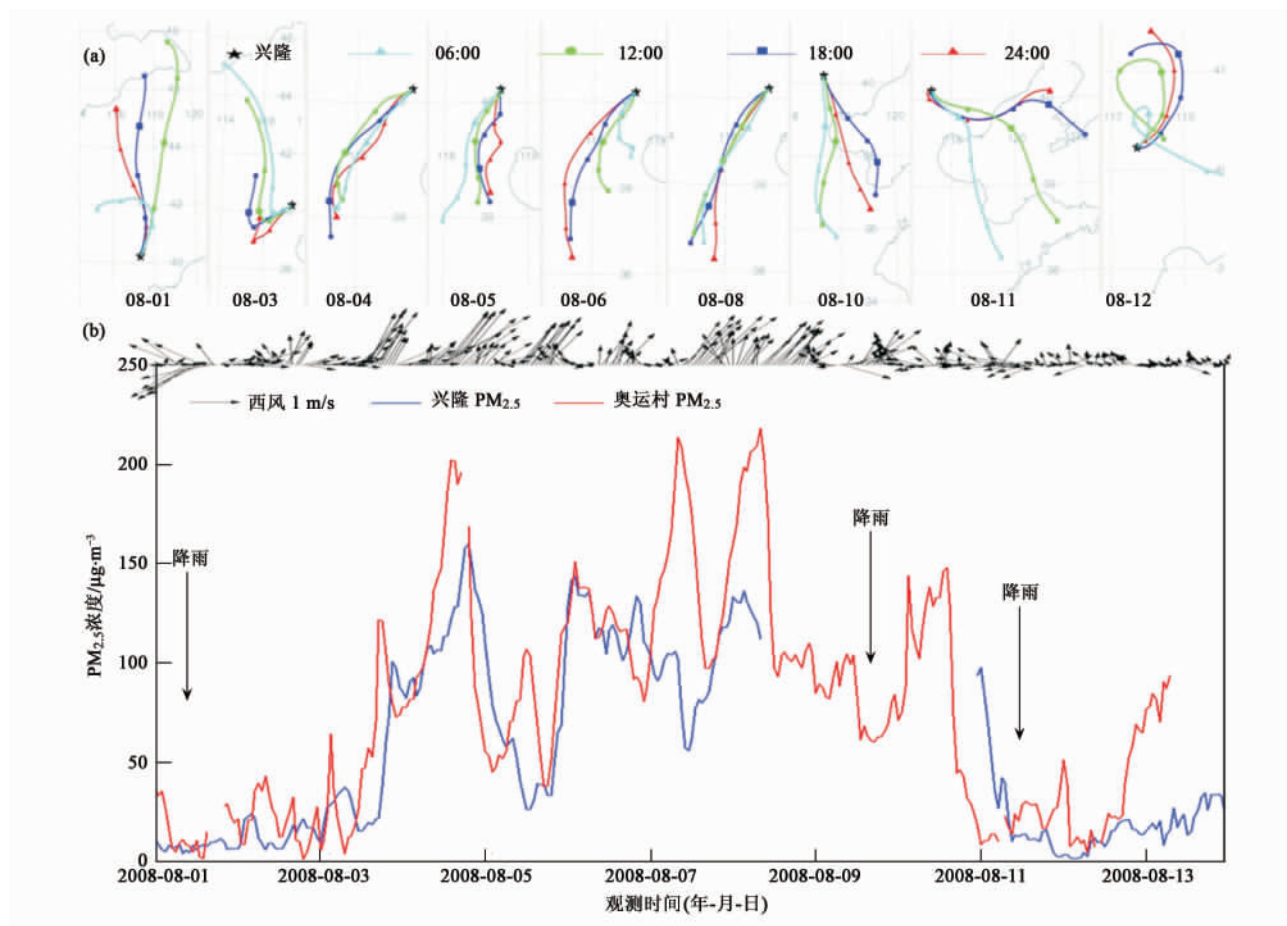
兴隆污染物浓度水平受到区域输送的强烈影响,而污染物的浓度演变和输送效率则取决于天气形势和气象条件的变化.对奥运开幕前一次典型污染过程的PM_{2.5}浓度和天气形势及气象条件进行了逐日分析,并与北京奥运村同期PM_{2.5}浓度进行对比,如图4,时间从8月1日00:00开始到8月13日23:00结束,历经了污染从低浓度逐渐累积到被清除的过程.对天气形势的分析主要采用后向轨迹方法(<http://www.arl.noaa.gov/>)来查看高空气团来向,分辨出区域受到了哪个方向的气团影响.后向轨迹方法在许多研究中被用来分析气团来向,研究不同来源的气团对区域污染的作用^[21~24].由于边界层高度一般在1 000~1 500 m左右,且高空天气形势图中850 hPa等压面天气图对应的高度一般在1 300 m左右,为了较真实地反映高空的气团轨迹同

时使高空气团能对地面产生影响,本研究选取兴隆地面以上1 500 m的高度做后向轨迹分析.计算时每隔6 h计算一次,后推时间为24 h.图4中给出了典型时间的气团轨迹,对于天气形势变化不大的日期,没有在图中一一给出.

从图4中可以看到,在污染过程发生的前期,区域降水对污染物进行了有效清除,且受到偏北洁净气流的影响,对应兴隆观测到较大风速的东北风,兴隆和奥运村PM_{2.5}都维持在较低浓度水平,奥运村受局地源排放影响,有较小的峰值出现.3日开始,高空气流由偏北转为偏南,区域污染物受到西北燕山山脉阻挡,开始累积,3、4日到达兴隆的气团偏西南,在较大的风速下,北京PM_{2.5}浓度峰值很快传输到兴隆,滞后约4~5 h.5日兴隆主要受到西南偏南气流影响,气团未经过北京,对奥运村5日的小峰值

没有响应. 6~8 日受到持续偏南气流影响, 区域污染物浓度居高不下, 奥运村连续出现 $\text{PM}_{2.5}$ 超过 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的峰值, 但其对应时刻兴隆风速较小, 没有形成快速响应. 9 日区域发生降水过程, 北京有达 70 mm 的强降雨, 因为兴隆地势较高, 雷电频繁, 仪器关机, 没有监测数据, 在降雨影响下, 奥运村 $\text{PM}_{2.5}$

浓度有所下降, 但由于 10 日区域仍受偏南气流影响, 雨停后浓度又迅速回升, 直到 11 日又发生 20 mm 的降雨, 且高空气团来自东面较为洁净的海洋, 兴隆和奥运村 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降到低值, 12、13 日气团转为偏北, 兴隆为微弱东南风, 虽然奥运村 $\text{PM}_{2.5}$ 受局地源排放又有所升高, 但对兴隆影响较小.



(a) 1500 m 高度 6 h 间隔后向轨迹图, (b) 兴隆和北京奥运村 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化及兴隆地面风向变化

图 4 2008 年一次污染过程兴隆和北京奥运村 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及高空天气形势和地面气象条件变化

Fig. 4 Variation of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in Xinglong and Aoyuncun as well as the high altitude weather and ground meteorological conditions of one pollution process in 2008

2.4 兴隆本底站污染物浓度水平与区域其它站点对比分析

奥运期间, 京津冀区域共有 14 个观测站点同步进行观测, 选取了几个代表性站点, 对主要污染物浓度水平进行了对比 (表 2). 兴隆站 NO_x 浓度远低于其它站点, 反映了其背景站特征; 郊区和乡村浓度低, 城市站点浓度高, 说明人为源对 NO_x 的浓度贡献. SO_2 浓度兴隆最低, 其次为香河, 北京略高于兴隆和香河, 比郊区站沧州要低, 与北京市历年来实行的调控措施及奥运期间进一步的控制密切相关, 唐山和石家庄浓度则远高于其它站点, 反映了这 2 个

工业城市的燃煤消耗. 7 个站点中, 兴隆 O_3 平均浓度最高, 比其它站点高出近 $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 但小时均值最大值平均并不是最高, 且与其它站点浓度水平相差不大. 温天雪等^[7] 2006 年在兴隆和北京的短时对比观测结果也发现兴隆 O_3 浓度高于北京, 为北京的 2.2 倍; 张远航等^[25] 的研究表明, O_3 存在区域输送, 城市下风向浓度高于市区, 风向对 O_3 浓度分布有重要影响. 兴隆受到京津冀区域污染物输送影响严重, 而 O_3 与 NO 的氧化反应是其从大气中消除的重要途径^[26, 27], 兴隆 NO 浓度很低, 对 O_3 清除不

利,导致 O₃ 不断累积可能是兴隆 O₃ 维持高值的原因之一. PM_{2.5} 浓度 7 个站点中,兴隆站最低,其次为北京,香河、禹城和沧州浓度水平相当,唐山较高,石家庄最高;华北区域颗粒物污染非常严重,大部分站点 PM_{2.5} 日均值平均都超过了 75 μg · m⁻³,北京相对于其它城市站点的低值,可能与奥运期间的控制

措施有关. 综合以上分析,华北区域 NO_x 和 SO₂ 污染较轻,站点平均浓度都低于国家二级标准;O₃ 污染不容乐观,日小时均值最大值平均已超过或接近国家一级标准,小时均值最大值超出国家二级标准的情况时有发生(统计情况略);PM_{2.5} 污染严重,大部分站点已严重超标,需要引起足够重视.

表 2 2008 年奥运期间京津冀区域不同观测点主要污染物浓度对比/μg · m⁻³
Table 2 Comparison of concentrations between different stations in Beijing-Tianjin-Hebei area during the 2008 Olympic Games/μg · m⁻³

监测点	监测时间	NO _x	SO ₂	O ₃	O ₃ -Max	PM _{2.5}
兴隆(华北背景站)	06-01 ~ 10-31	9.0 ± 4.4	12.2 ± 11.1	120.9 ± 33.6	155.8 ± 46.3	49.6 ± 39.6
北京奥运村(城市站)	06-01 ~ 10-31	73.2 ± 48.7	15.2 ± 11.2	71.3 ± 37.4	145.5 ± 66.7	74.6 ± 49.4
香河(北京近郊)	06-01 ~ 10-21	20.1 ± 11.9	13.4 ± 15.3	82.0 ± 37.9	160.8 ± 63.2	81.8 ± 48.6
禹城(乡村站)	06-01 ~ 10-31	23.5 ± 14.5		64.0 ± 28.4	145.3 ± 52.4	85.6 ± 42.9
沧州(郊区站)	06-01 ~ 10-29	29.2 ± 12.4	17.4 ± 14.2	73.8 ± 26.9	149.2 ± 47.7	88.7 ± 48.7
唐山(城市站)	06-01 ~ 10-31	46.6 ± 19.0	47.2 ± 28.9	63.3 ± 28.9	136.7 ± 56.8	99.9 ± 54.8
石家庄(城市站)	06-01 ~ 10-31	56.2 ± 33.5	69.9 ± 46.3	63.8 ± 33.9	148.7 ± 71.6	102.5 ± 53.4

3 结论

(1)2008 年中国科学院兴隆大气本底站监测结果表明,夏秋季节,华北地区 NO_x、SO₂ 区域背景浓度较低,O₃ 与 PM_{2.5} 污染较重,污染物浓度逐日变化和季节变化明显. 奥运时段,区域大气本底污染物浓度显著降低,北京及周边地区污染源联合控制对华北地区空气质量的改善效果显著.

(2)兴隆污染物日变化受污染源排放变化的影响显著. 兴隆 6 月大部分污染物浓度夜间低,白天浓度呈不断上升趋势,傍晚达到峰值,区域污染物在兴隆的输送累积表现明显;在污染源排放控制期间兴隆污染物白天的积累过程相较限排前的 6 月明显减弱,污染源排放控制的效果明显.

(3)观测期间兴隆偏南方向的风向频率最高,同时对应对着高浓度的 PM_{2.5},兴隆的大气状况受到南面方向的污染物区域输送的显著影响.

(4)华北区域 NO_x 和 SO₂ 浓度较低,O₃ 污染不容乐观,PM_{2.5} 污染严重,需要引起足够重视.

致谢:感谢兴隆站观测人员付国宏和柴文海同志的辛勤劳动以及中国科学院大气物理研究所温天雪博士、汪伟峰、潘月鹏同学和课题组其他成员所做的大量实验和分析工作.

参考文献:

[1] 杨龙元. 大气本底污染监测中的几个问题介绍[J]. 高原气象, 1990, 9 (3): 338-346.
[2] World Meteorological Organization. WMO operations manual for sampling and analysis techniques for chemical constituents in air and precipitation[R]. Geneva, Switzerland: WMO, 1974. 3-4.

[3] WMO WDCGG. World data center for greenhouse gases [EB/OL]. <http://gaw.kishou.go.jp/wdceg/products/bulletin.html>, 2009-11-04.
[4] 李伟, 孙扬, 程根伟, 等. 中国大气本底观测发展概述[J]. 山地学报, 2006, 24 (增刊): 324-329.
[5] 颜鹏, 李兴生, 罗超, 等. 我国地面 O₃、NO_x、SO₂ 背景值的观测研究[J]. 应用气象学报, 1997, 8 (1): 53-61.
[6] 白建辉, 王庚辰, 孟昭阳, 等. 华北洁净地区微量气体变化特征的初步研究[J]. 环境科学研究, 2006, 19 (6): 15-19.
[7] 温天雪, 王跃思, 徐宏辉, 等. 夏末秋初北京市区与背景区大气污染物的对比分析[J]. 环境科学研究, 2007, 20 (5): 7-11.
[8] 程红兵, 王木林, 温玉璞, 等. 我国瓦里关山、兴隆温室气体 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的背景浓度[J]. 应用气象学报, 2003, 14 (4): 402-409.
[9] Streets D G, Waldhoff S T. Present and future emissions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, CO[J]. Atmos Environ, 2000, 34: 363-374.
[10] Kleinman L I. Ozone process insights from field experiments-part II: observation-based analysis for ozone production[J]. Atmos Environ, 2000, 34: 2023-2033.
[11] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 NO、NO₂ 和 O₃ 浓度变化的相关性分析[J]. 环境科学, 2007, 28 (4): 706-711.
[12] Zhao X J, Zhang X L, Xu X F, et al. Seasonal and diurnal variations of ambient PM_{2.5} concentration in urban and rural environments in Beijing [J]. Atmos Environ, 2009, 43: 2893-2900.
[13] 李卫军, 邵龙义, 李金娟, 等. 北京大气中 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的污染水平特征研究[J]. 环境与可持续发展, 2006, (2): 18-20.
[14] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京 PM_{2.5} 浓度的变化特征及其与 PM₁₀、TSP 的关系[J]. 中国环境科学, 2002, 22 (6): 506-510.
[15] Wesely M L, Hicks B B. A review of the current status of

- knowledge on dry deposition[J]. *Atmos Environ*, 2000, **34**: 2261-2282.
- [16] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. *Atmos Environ*, 2000, **34**: 2063-2101.
- [17] 边智, 李杰, 王喜全, 等. 泰山春季臭氧污染特征[J]. *环境科学研究*, 2006, **19** (5): 36-39.
- [18] 马志强. 区域大气本底臭氧和氮氧化物观测与分析研究 [D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2008. 40-41.
- [19] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al*. The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China[J]. *Atmos Environ*, 2001, **35**: 4959-4970.
- [20] 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 夏季持续高温天气对北京市大气细离子(PM_{2.5})的影响[J]. *环境科学*, 2002, **23** (4): 33-36.
- [21] Lee S H, Akimoto H. Lower tropospheric ozone trend observed in 1989-1997 at Okinawa, Japan[J]. *Geophys Res Lett*, 1998, **25** (10): 1637-1640.
- [22] Hu M, He L Y, Zhang Y H, *et al*. Seasonal variation of ionic species in fine particles at Qingdao, China[J]. *Atmos Environ*, 2002, **36**: 5853-5859.
- [23] Kim Y P, Lee J H, Baik N J, *et al*. Summertime characteristics of aerosol composition at Cheju Island, Korea [J]. *Atmos Environ*, 1998, **32** (22): 3905-3915.
- [24] Tang G Q, Li X, Wang Y S, *et al*. Surface ozone trend details and interpretations in Beijing, 2001-2006[J]. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2009, **9** (2): 8159-8185.
- [25] 张远航, 邵可声, 唐孝炎, 等. 中国城市光化学烟雾污染研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, **34** (2/3): 392-400.
- [26] 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.
- [27] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 39-70.