

北京奥运时段河北香河大气污染观测研究

潘月鹏,王跃思*,胡波,刘全,王迎红,南卫东

(中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

摘要:为监测评估周边地区大气污染对北京的可能影响,2008 年 6~9 月北京奥运时段,在北京东南方向河北香河开展了大气污染物 SO_2 、 NO_x 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的连续在线观测.结合地面气象资料和 HYSPLIT 轨迹模式探讨了污染物的来源与传输过程.结果表明,香河地区大气污染较为严重,上述污染物观测期间日均最高值(日均值 $\pm$ 标准差)分别达到 $84.4(13.4 \pm 15.2)$ 、 $43.3(15.9 \pm 9.1)$ 、 $23(82 \pm 38)$ 、 $184(76 \pm 42)$ 和 $248(113 \pm 52) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.特别在奥运会开幕前后的 7 月 20 日~8 月 12 日之间出现了 2 次持续污染过程,导致 O_3 和 PM_{10} 分别超过国家二级标准 46 h(超标率 9%)和 11 d(46%), $\text{PM}_{2.5}$ 则超过美国 EPA 标准 18 d(75%).奥运时段 8~9 月的大气污染物日均值较 6~7 月日均值有明显降低, SO_2 从 $27.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 $5.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, NO_x 从 $18.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 $13.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, O_3 从 $96 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 $80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 从 $90 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 $60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{10} 从 $127 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 $106 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 统计(月为单位)日变化为双峰型,峰值分别出现在 07:00 和 20:00 左右;臭氧呈单峰型,峰值出现在 14:00~16:00 之间.香河地区大气污染受局地排放和外源输送共同影响,持续的偏南气流易造成污染物积累,而偏北气流有利于污染物扩散,降水可明显清除大气中的污染物质.通过计算 7 月 20 日~8 月 12 日香河和北京奥运村 $\text{PM}_{2.5}$ 小时平均浓度之间的超前相关系数,发现香河超前北京 6~10 h 时相关性较大($0.57 < r < 0.65$, $p = 0.01$),最大相关系数出现在超前 8 h,表明上述时间段内香河实时观测数据对北京大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染超标事件可能具有预警作用.

关键词:北京奥运会;大气污染; SO_2 ; NO_x ; O_3 ; $\text{PM}_{2.5}$; PM_{10} ;香河

中图分类号:X511;X513 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)01-0001-09

Observation on Atmospheric Pollution in Xianghe During Beijing 2008 Olympic Games

PAN Yue-peng, WANG Yue-si, HU Bo, LIU Quan, WANG Ying-hong, NAN Wei-dong

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

Abstract: There is a concern that much of the atmospheric pollution experienced in Beijing is regional in nature and not attributable to local sources. The objective of this study is to examine the contribution of sources outside Beijing to atmospheric pollution levels during Beijing 2008 Olympic Games. The observations of SO_2 , NO_x , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} were conducted from June 1 to September 30, 2008 in Xianghe, a rural site about 70 km southeast of Beijing. Sources and transportation of atmospheric pollution during the experiment were discussed with surface meteorology data and backward trajectories calculated using HYSPLIT model. The results showed that the daily average maximum (mean $\pm$ standard deviation) concentrations of SO_2 , NO_x , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} during observation reached $84.4(13.4 \pm 15.2)$, $43.3(15.9 \pm 9.1)$, $23(82 \pm 38)$, $184(76 \pm 42)$ and $248(113 \pm 52) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. In particular, during the pollution episodes from July 20 to August 12, the hourly average concentration of O_3 exceeded the National Ambient Air Quality Standard II for 46 h (9%), and the daily average concentration of PM_{10} exceeded the Standard for 11 d (46%); $\text{PM}_{2.5}$ exceeded the US EPA Standard for 18 d (75%). The daily average concentrations of SO_2 , NO_x , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} decreased from 27.7, 18.6, 96, 90, 127 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ in June-July to 5.8, 13.2, 80, 60, 106 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ during Olympic Games (August-September), respectively. The typical diurnal variations of NO_x , $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} were similar, peaking at 07:00 and 20:00, while the maximum of O_3 occurred between 14:00 to 16:00 local time. The findings also suggested that the atmospheric pollution in Xianghe is related to local emission, regional transport as well as the meteorological conditions. Northerly wind and precipitation are favorable for diffusion and wet deposition of pollutants, while sustained south flows make the atmospheric pollution more serious. The lead-lag correlation analysis during the pollution episodes from July 20 to August 12 showed that there are about 6-10 h ($0.57 < r < 0.65$, $p = 0.01$) of hourly average $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing lagging Xianghe, reaching the maximum at 8 h, which indicates that the real-time atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ database of Xianghe might provides early warning for the Beijing $\text{PM}_{2.5}$ pollution events.

Key words: Beijing 2008 Olympic Games; atmospheric pollution; SO_2 ; NO_x ; O_3 ; $\text{PM}_{2.5}$; PM_{10} ; Xianghe

SO_2 、 NO_x 、 O_3 和 PM 是影响城市大气环境质量的重要污染物,由于它们在大气光化学中的作用及其生态环境和人体健康效应而引起了科学家和公众的普遍关注^[1-9].京津冀地区大气污染具有明显的

收稿日期:2009-03-05;修订日期:2009-04-29

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:潘月鹏(1981~),男,博士研究生,主要研究方向为大气化学,E-mail: pyp@dq.cern.ac.cn

* 通讯联系人,E-mail: wys@dq.cern.ac.cn

复合型和区域性特征^[10,11],这导致仅在局地进行排放源控制往往难以改善空气质量.比如 2005 年底北京城区 SO_2 、 NO_x 和 PM_{10} 这 3 种污染物的年排放量比采取十一阶段紧急措施之前分别削减了 73%、16% 和 50%,但大气中相应污染物浓度只分别降低了 60%、15% 和 21%^[12].模拟结果表明北京至少 20% 的 PM_{10} 和 SO_2 来自周边地区^[13],而 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 外源贡献的比例可能超过 30%^[2],这给北京奥运期间的大气环境提出了严峻挑战.为监测评估奥运期间周边地区大气污染对北京的可能影响,在北京及周边地区建立了实时观测和预警网络(河北香河是其中的观测点之一),以期在北京奥运期间空气质量保障措施的实施提供科学支持.

香河距北京市东南 70 km(图 1),位于北京和天津 2 个超大城市大气污染物的传输通道^[13]和缓冲地带上,在区域大气污染研究中具有重要的战略作用,尤其夏季盛行东南风时,香河独特的地理位置使其成为北京大气污染预警系统中不可或缺的平台.目前对香河地区大气氧化性、气溶胶组成和光学厚度等开展了一些有意义的研究^[14-17],但对近地面 SO_2 、 NO_x 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 等大气污染物的综合研究还较少.本研究的主要目标是阐明北京奥运时段华北地区减排背景下香河地区大气污染物的浓度水平、来源和变化规律,探讨香河在北京奥运时段大气污染预警中的作用.研究结果有利于深刻认识京津城市群之间大气污染物的相互输送规律,可为区域大气污染控制措施的制定提供参考.

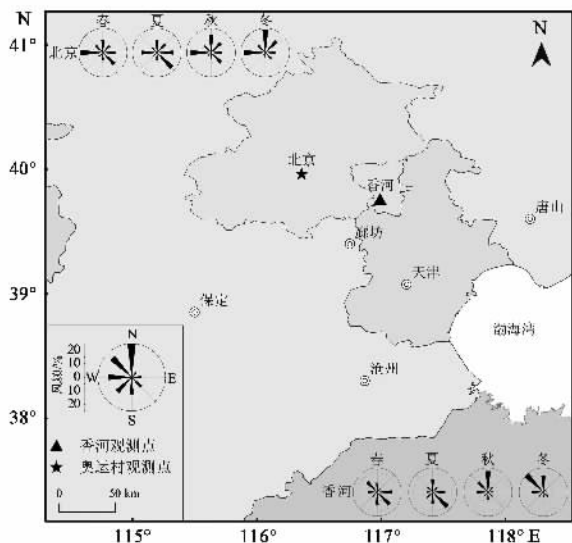


图 1 观测点位置与风频示意

Fig. 1 Measurements location and wind frequency

1 材料与方法

1.1 观测站点和时间

香河隶属河北省廊坊市,属暖温带大陆性季风气候,多年平均气温 11.5°C ,多年平均降雨量近 600 mm,降雨主要集中在夏季,无霜期 179 d 左右.观测点设在中国科学院大气物理研究所香河大气综合观测试验站(39.75°N , 116.95°E),站点海拔高度 15 m,所处位置地形平坦,受局地环流影响较小,周围为居民区,无高大建筑物和明显的局地排放源.采样点设在办公楼 4 楼楼顶(距地面 15 m).观测时间为 2008 年 6 月 1 日~2008 年 9 月 30 日.

1.2 观测方法和设备

SO_2 采用高精度脉冲荧光分析仪进行观测(美国热电公司 43CTL), NO - NO_2 - NO_x 采用高精度化学发光法测试(美国热电公司 42CTL), O_3 观测仪器为紫外光度法分析仪(美国热电公司 49C),颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 使用环境颗粒物监测仪测量(美国热电公司 TEOM Series 1400a).采样口距地面高度为 17 m,气体观测采用共进气系统进样,颗粒物观测为独立进样系统.污染物采样频率为 5 min,同步气象数据由香河大气综合观测试验站提供.文中使用的奥运村数据在观测方法和时间上与香河一致,观测点设在鸟巢西北 1 km 中国科学院遥感应用研究所办公楼 5 楼楼顶.

1.3 气流轨迹分析

利用美国海洋与大气管理局(NOAA)空气资源实验室(ARL)提供的混合型单粒子拉格朗日综合轨迹(HYSPLIT)模式^[18]和 NCEP GDAS 数据计算每日 08:00 到达香河气团的后向轨迹,每隔 6 h 计算 1 次,后推时间 48 h,起始高度 500 m.对后向轨迹进行聚类分析(K-Means)后判断气团的主要来源和途经区域,该方法已成功应用于北京地区 O_3 的来源分析^[19].

2 结果与讨论

2.1 污染物总体变化特征

图 2 给出了观测期间大气污染物和气象要素的逐日变化情况,其中污染物浓度为日均值,数据的间断是由于仪器故障或停电关机造成的缺测以及因无效数据剔除或数据质控出现的空缺; $\text{PM}_{2.5}$ ~ PM_{10} 数据为 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的差值(下同);降雨量为每日 08:00 的 24 h 累计值;风向和风速为日平均矢量风速和风向.

图 2 所示观测期间风向集中在 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$, 即盛行东南风(0° 为北风), 风速 $< 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 观测期间累计降水 343 mm, 共有 30 d 观测到 24 h 降水量超过 1 mm, 其中 7 月降水最为频繁, 降雨量近 160 mm. 从图

2 可以看出每次降水之后, 污染物均出现明显降低, 表明湿沉降在大气污染物清除中具有较高的效率. 为分析污染物总体变化特征, 将每个月污染物浓度的统计特征列于表 1.

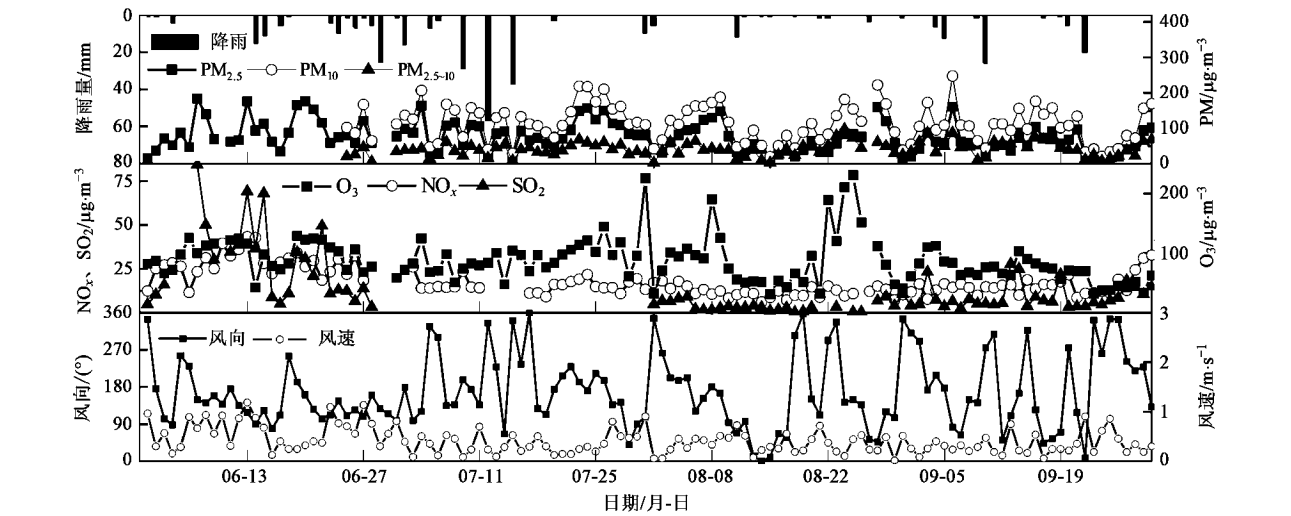


图 2 污染物浓度和气象要素逐日变化

Fig.2 Daily variation of observed atmospheric pollutants and meteorology parameters

表 1 大气污染物浓度日均值描述性统计/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 1 Summary statistics of daily average concentrations of atmospheric pollutants/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

污染物	6~9月 ¹⁾	6月	7月	8月	9月	国家二级标准 ²⁾
SO ₂	13.4±15.2(84.4)	27.7±22.9(84.4)	/	3.7±2.9(10.6)	9.2±7.2(27.7)	150(500)
NO	1.4±1.7(13.6)	1.3±1.0(4.0)	1.8±1.8(6.3)	1.0±0.9(3.4)	1.6±2.0(13.6)	
NO ₂	14.5±8.6(41.0)	26.5±7.5(41.0)	11.2±6.3(22.2)	10.6±3.6(16.9)	13.2±3.0(18.8)	120(240)
NO _x	15.9±9.1(43.3)	27.8±7.8(43.3)	13.0±7.2(26.2)	11.5±3.7(18.1)	14.9±4.9(31.1)	
O ₃	82±38(230)	98±24(130)	94±34(226)	92±54(230)	68±22(112)	(200)
PM _{2.5}	76±42(184)	91±47(184)	89±38(164)	66±40(161)	59±33(161)	
PM ₁₀	113±52(248)	/	127±50(219)	107±54(222)	105±52(248)	150

1) 统计数据为 Mean±SD(Max) 2) 标准限值为日平均(1 h 平均)

从图 2 可以看出, 观测期间 SO_2 的污染并不严重(仅 6 月中旬前小时均值出现了短暂的超标现象), 日均值未超过国家二级标准. 观测期间 SO_2 日均浓度最高值为 $84.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均 $13.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 低于北京地区 2007 年夏季平均浓度^[1]. SO_2 浓度受天气条件影响强烈^[4], 并且季节差异明显, 冬春采暖期受燃煤的影响时浓度较高^[17]. 夏季由于湿度大, 在降水清除与转化作用的影响下 SO_2 浓度一般低于其它季节^[20]; 加之奥运期间的源控制, 香河地区 SO_2 在奥运期间(8~9 月, 下同)的日均值($5.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)明显低于奥运前(6~7 月日均值, 下同)的 $27.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

观测期间 NO_2 污染较轻, 小时均值达到了国家二级标准; 日均浓度变化范围为 $5.8 \sim 41.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,

平均 $14.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 由于 NO 浓度相对较低, NO_x 浓度与 NO_2 相近(表 1). 从图 2 可以明显看出, 奥运期间 NO_x 日均浓度与奥运前相比明显降低, 其浓度由 $18.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 $13.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 这是奥运期间机动车控制的体现, 也可能与其本身的季节变化有关^[20].

香河地区 O_3 污染严重, 观测期间 O_3 小时均值超过国家二级标准 33 d, 超标率为 23%, 小时均值最高达 $330 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 6 月 O_3 日均浓度的均值为 $98 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (表 1), 略高于 2005 年的观测结果^[14, 17]; 7~8 月与 6 月比较接近, 维持在一个较高的浓度水平, 但从 9 月开始出现了明显降低, 许多研究结果都证实了这种季节变化趋势^[20, 21], 因为 O_3 是一种典型的光化学产物, 它的季节变化受到紫外辐射强度变化的影响^[14]. 奥运期间 O_3 日均浓度($80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)与奥运

前 ($96 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 相比有所下降, 但极高值较多, 日均浓度最高达到 $230 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 2)。

观测期间 PM_{10} 日均值超过国家二级标准的天数高达 79%, 最高值达到 $248 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。奥运期间 PM_{10} 平均 $106 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于北京地区 2007 年同期观测结果^[1], 和奥运前的 6 月 ($127 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 相比也明显下降, 这与香河地区在奥运期间加大了颗粒物排放源的控制有关^[22]。与其它季节相比, 夏季 PM_{10} 受降水清除等影响一般较低^[23]; 但香河地区 6~9 月 PM_{10} 污染并不乐观, 从全年的角度来看, 香河地区颗粒物污染十分严重。

观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度变化于 $13 \sim 184 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均 $76 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超过美国 EPA 标准 (日均限值 $65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的天数达到 43%, 即接近一半时间出现了明显的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染, 最高值达到 $184 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。但奥运期间 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较轻 (平均 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 明显低于奥运前 ($90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。

为分析粗 ($\text{PM}_{2.5-10}$) 细粒子 ($\text{PM}_{2.5}$) 对 PM_{10} 的贡献, 计算了 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 比值 ($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$)。观测期间 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 平均值为 0.6, 说明 PM_{10} 的质量浓度主要集中在 $\text{PM}_{2.5}$ 以下; 同时 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 在各月之间变化较小, 表明粗、细粒子对 PM_{10} 贡献相对稳定。7 月 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 较高 (0.7), 意味着细粒子对 PM_{10} 的贡献高于粗粒子。这可能是由于夏季光化学反应强烈, 大量的硫酸盐、有机碳等二次气溶胶的生成增加了 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度^[24], 加之降水对粗粒子的有效冲刷作用大于细粒子, 导致 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 增加; 而在春冬季节, 沙尘和土壤颗粒等粗粒子是 PM_{10} 的主要组成部分, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 会明显较低, 如北京沙尘暴期间和美国西部干旱地区都曾观测到 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 在 0.4 左右^[25]。

2.2 污染物统计日变化特征

为进一步理解污染物的时间变化规律, 以月为单位计算了每日不同时刻各污染物浓度的平均值, 即污染物的统计日变化特征 (图 3)。

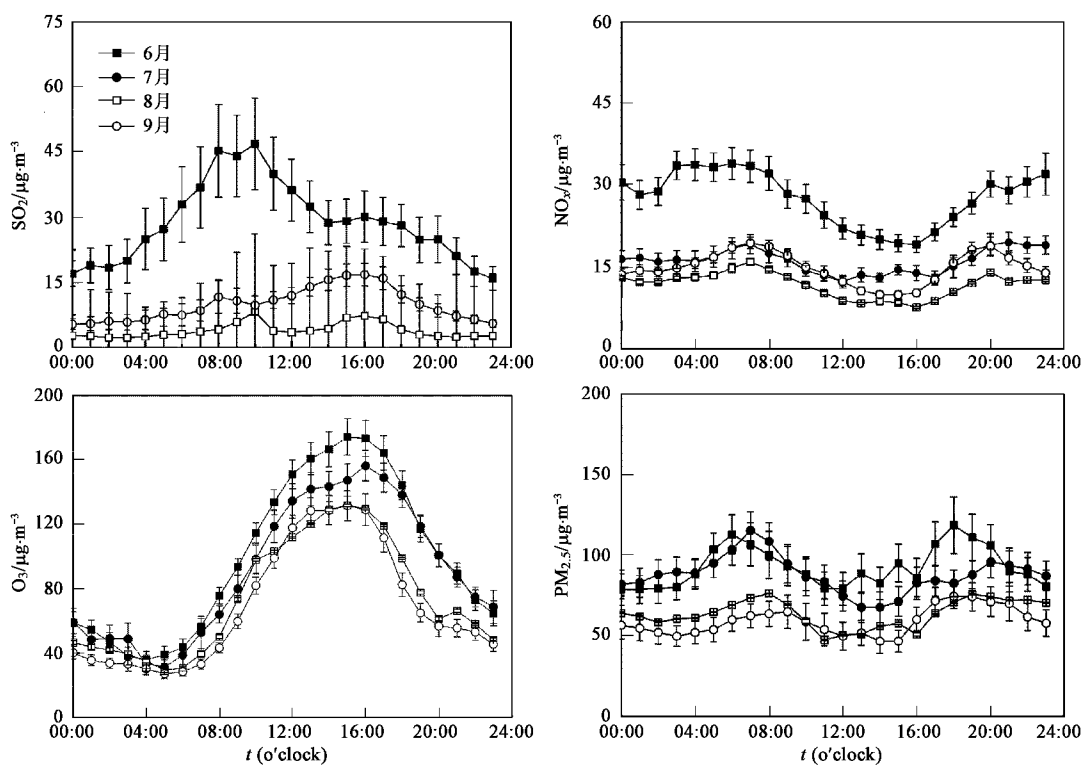


图 3 污染物浓度的日变化

Fig.3 Diurnal cycles of atmospheric pollutants

如图 3 所示, SO_2 各月的日变化趋势没有明显的一致性 (7 月数据缺失), 6 月呈单峰变化, 峰值出现在 08:00 左右, 8~9 月全天浓度较低, 日变化比较平缓, 没有明显的峰值。

NO_x 具有双峰型日变化特征, 峰值出现的时间分别在 07:00 和 20:00 前后。早晨的峰值与城市“早高峰”对应, 是交通繁忙期机动车尾气的大量排放所致。夜间峰值反映了稳定边界层深厚, 污染物发生累

积.白天湍流扩散加强且光化学反应强烈使得 NO_x 保持较低浓度.

O_3 呈明显单峰日变化,峰值出现在 14:00 ~ 16:00 之间,与 NO_x 出现低值的时段相对应,此时光化学反应强烈, NO_x 持续消耗产生 O_3 ;而夜晚 O_3 在逆温层中被 NO 等还原性物质消耗,在缺少累积过程的情况下迅速下降,至 05:00 降到最低值.

$\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{2.5-10}$ 和 PM_{10} 日变化趋势一致,均为双峰型(图 3 中仅给出了 $\text{PM}_{2.5}$),峰值出现的时间与 NO_x 相近.统计分析表明 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{2.5-10}$ 和 PM_{10} 均与 NO_x 具有明显相关性(r 为 0.57、0.69、0.67, $p = 0.01$)表明它们峰值形成的机制可能相同.早晨的峰值是机动车高流量引起的扬尘所致,晚上则与稳定边界层深厚有关,此时大气层结稳定,不利于扩散.受局地源排放、气粒转化及区域输送等诸多因素

的影响^[20], $\text{PM}_{2.5}$ 在白天 2 个峰值过渡期间的变化不如 NO_x 平缓.

2.3 污染物来源

为探讨香河大气污染物的可能来源,计算了各污染物不同风向的平均浓度(图 4).可以看出, SO_2 和 PM 受风向的影响非常明显,东南风气流影响下的浓度是西北方向的 2~3 倍;东北偏东风和西南偏南风时 PM 浓度也较高,表明这 2 个方向上也有 PM 的输送. NO_x 表现出与 SO_2 和 PM 类似的特征,只是在不同风向上的差异要小. O_3 与风向关系与以上污染物均不相同,它在西南偏南方向气流影响下浓度较高,东南偏南风次之,东北和西北气流影响下较为洁净.总体上,偏南风向时各污染物浓度高于偏北气流,表明偏南气流易造成香河地区污染物积累,而偏北气流有利于污染物的扩散和清除.

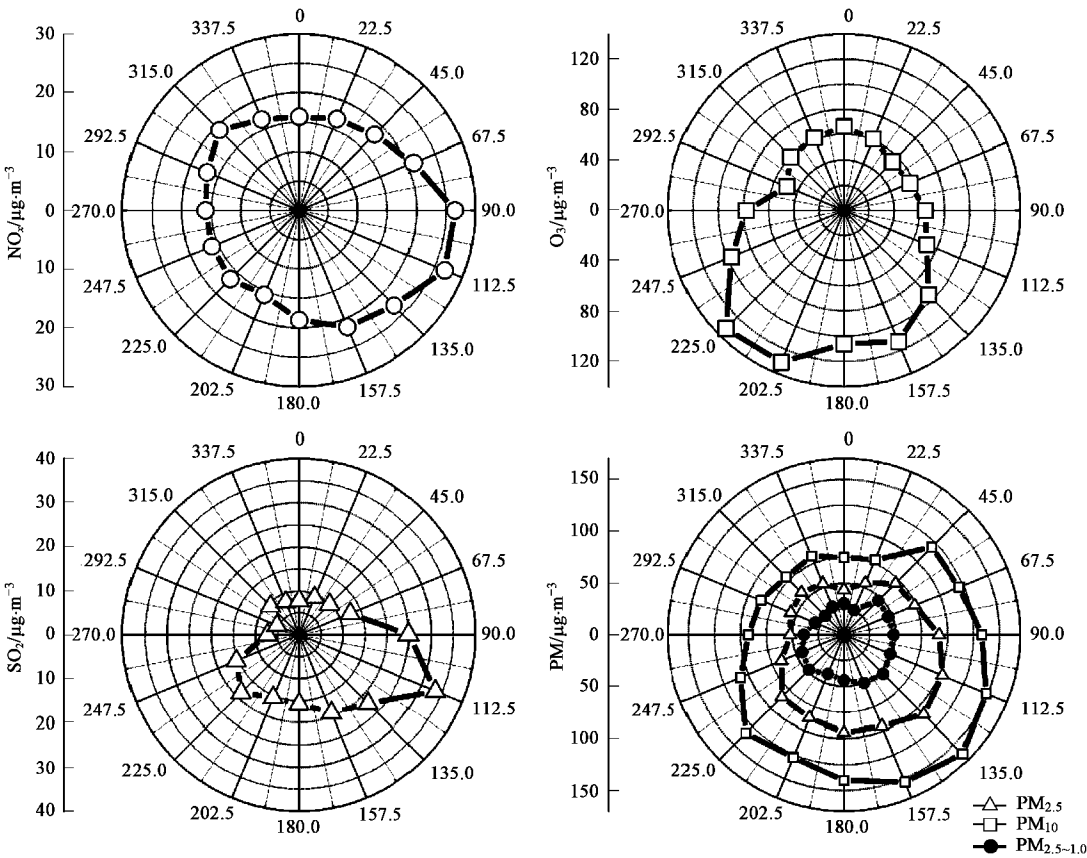


图 4 污染物浓度与风向的关系
Fig.4 Relationship between atmospheric pollutants and wind direction

利用 HYSPLIT 轨迹模式结合聚类分析追溯了观测期间污染物可能的源区,发现到达香河的高空气团可分为 6 个主要方向,它们分别途经了不同的区域,如图 5(a)所示.由于香河 $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重且

$\text{PM}_{2.5}$ 区域传输性较强,分别选取观测期内 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最重和最轻的 5 d 作为典型案例,将其后向轨迹列于图 5(b),其中日期后括号内的数字为 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度.

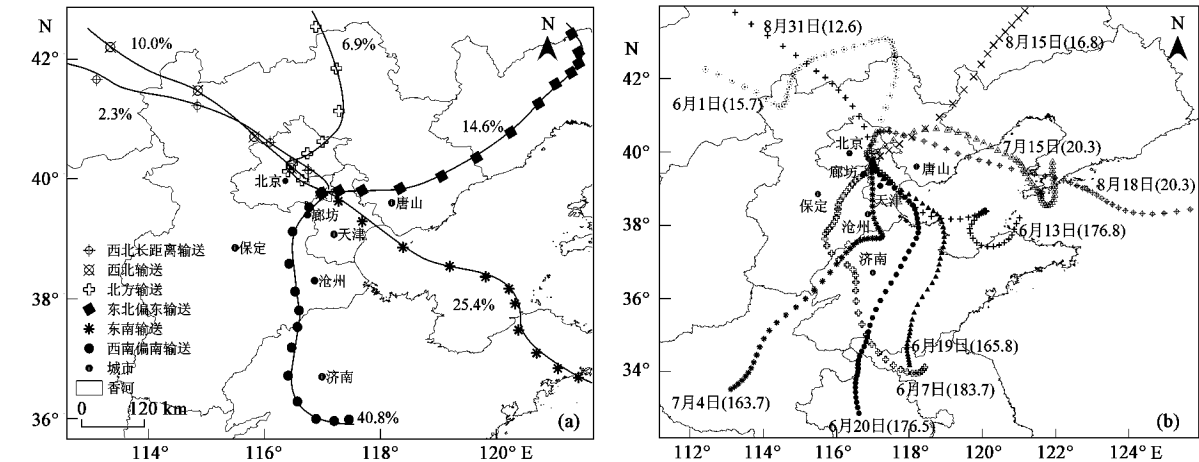


图 5 观测期间香河后向轨迹经过的区域示意

Fig.5 Air mass backward trajectories for Xianghe from June to September 2008

由图 5(a)可以看出 40.8% 的气流来自西南偏南方向,在到达香河之前经过了山东济南、河北廊坊等地 25.4% 的气流途经天津,而经过辽宁和唐山的气团也占到 14.6%。以上气流途经地多为污染严重的区域^[26],加之香河北面和西面受群山阻挡,污染物容易累积而出现高值(图 4),这种现象在以前的研究中多有发现^[13,27,28]。从图 5(b)也可以看出 $PM_{2.5}$ 污染最严重的 5 d 均受偏南气团影响,日均浓度都高于 $150 \mu g \cdot m^{-3}$ 。

图 5(a)还显示了来自北方和西北方向气团的比例分别为 6.9% 和 10.0%,另有 2.3% 的气团来自西北方向长距离的输送,其源区可追溯到新疆和蒙古国境内。尽管这些气流经过了北京,但香河西北风时并未观测到污染物浓度高值(图 4),表明观测期间北京对香河大气污染的影响不明显。其主要原因可能是强劲干冷的西北风能迅速将污染物清除,且西北风主要来自相对清洁的内蒙古和山区,本身携带的污染物浓度也较低^[12,29],如图 5(b)中受偏北气流影响时 $PM_{2.5}$ 日均浓度低于 $20 \mu g \cdot m^{-3}$ 。

前面讨论了不同风向污染物浓度及源区,但污染物浓度较高的风向若发生的频率较低,它对香河地区的影响仅限于特定时段。为合理评价局地源和外来源对香河地区大气污染的相对贡献,还需考虑风向出现的频率。对香河地面气象资料统计后得到主要风向是东南风(11.5%)和西北偏西风(8.6%),而静风出现频率(12.5%)接近于东南风。图 6 为上述 3 种主要风向条件下污染物的平均浓度。可见, $PM_{2.5 \sim 10}$ 和 PM_{10} 静风条件下浓度高于其它 2 个主要风向,反映了它们主要受局地源的控制;观测期间

$PM_{2.5 \sim 10}$ 和 PM_{10} 日均浓度与风速的负相关关系(r 为 -0.50 、 -0.48 , $p < 0.0001$)也证实它们主要来自局地源,因为局地污染物容易在风速较大时被清除从而呈现低浓度^[8,30],其它污染物与风速的关系不明显。 O_3 、 SO_2 和 $PM_{2.5}$ 东南风时浓度高于静风环境,表明香河东南方向的输送是这些污染物累积的主要途径; NO_x 各风向和静风时浓度差异不大,它同时受本地源和外来源的影响。

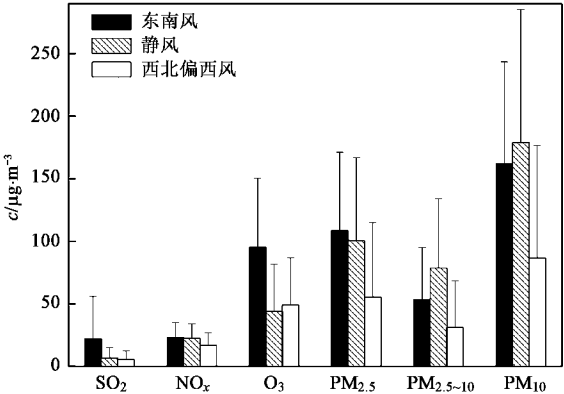
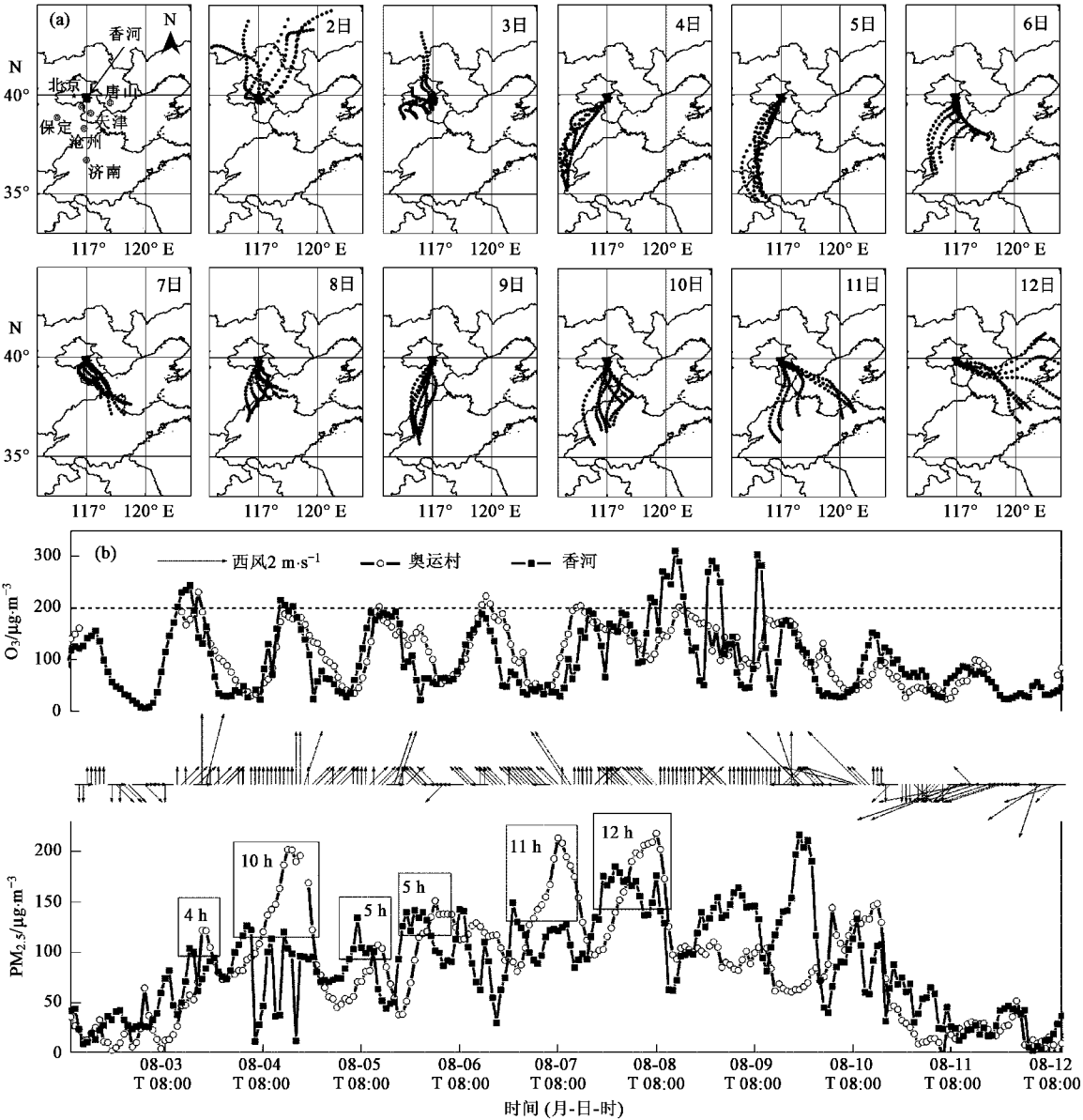


图 6 不同风向条件下污染物浓度比较

Fig.6 Comparison of atmospheric pollution at different wind directions

2.4 典型污染过程

奥运会开幕前后的 7 月 20 日 ~ 8 月 12 日之间在香河连续观测到 2 次污染过程(图 2),导致 O_3 和 PM_{10} 分别超过国家二级标准 46 H(超标率 9%)和 11 d(46%), $PM_{2.5}$ 则超过美国 EPA 标准 18 d(75%)。这 2 次污染过程特征相似,开始前均有一次降水过程,经过一段时间的积累结束于下一次降水。图 7 以 $PM_{2.5}$ 和 O_3 为代表给出了 8 月 2 日 08:00 ~ 8 月 12



(a) 为香河每日 08:00 24 h 后向轨迹 (b) 为香河和北京奥运村 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度及风向逐时变化

图 7 香河 8 月 2 ~ 12 日后向轨迹和污染物浓度与风向变化

Fig. 7 Variation of atmospheric pollutants and air masses back trajectories during Aug-2 to 12

日 08:00 污染物从生成到清除的过程,同时也给出了地面风向变化和高空气团来源。

如图 7(b) 所示,污染过程发生前的 8 月 1 日 48 h 降水量近 14.8 mm,湿沉降加之北风的清除导致 3 日之前污染物浓度较低。3 日之后风向开始转变,4 ~ 5 日地面观测到的风向为西南偏南风,图 7(a) 中的后向轨迹表明污染物来自西南方向石家庄和保定等污染较为严重地区,在有利风向的影响下香河地区的污染物开始累积。6 ~ 7 日风向转为东南偏南风,气团途经污染同样较重的天津和廊坊等地,使得香河污染程度居高不下。8 ~ 9 日,香河持续受到来

源于南面污染气团的影响,污染物累积到顶峰。10 日开始地面风向由东南偏东风逐渐转为对污染物扩散有利的北风和东北风,高空气团也来源于较为洁净的海洋,随之出现的连续降水(12 mm)对污染物进行了有效清除,11 日污染物明显到达低谷,12 日污染过程结束。

东南风时北京位于香河的下风向,因此上述污染过程很有可能影响到北京。实际上香河和北京整个观测期内地面主导风向一致,均为东南风(图 1),从图 5(a)也可以看出源自东南方向的气团占 1/4 强,表明观测期间北京的大气环境很大程度上受到

东南方向污染物输送的影响.图 7(b)给出了香河此次污染过程发生时北京奥运村的同步观测资料,可以看出除了 O_3 出现小时均值超标之外的 8~9 日,香河与北京 O_3 的变化基本一致,以明显的日变化为主.然而 $PM_{2.5}$ 的变化趋势却与 O_3 不同,日变化规律明显有别于香河 8 月 $PM_{2.5}$ 的统计特征(图 3),同时 $PM_{2.5}$ 的基线整体上呈现先上升后下降的趋势,这些现象都表明了外源输送对 $PM_{2.5}$ 的影响.结合地面风向和高空气团来源分析,可以认为香河观测到的上述污染过程体现了东南方向大气 $PM_{2.5}$ 途经香河向北京的输送,从而导致北京同期也出现了污染事件,但峰值出现的时间却有所差别.图 7(b)矩形框内的数字为污染物累积阶段(3~8 日)香河与北京 $PM_{2.5}$ 峰值出现时刻的小时差,可以看出香河 $PM_{2.5}$ 峰值出现的时间早于北京 4~12 h.通过计算 8 月 2~12 日香河和北京奥运村 $PM_{2.5}$ 小时平均浓度之间的超前相关系数(图 8),发现香河超前北京 6~10 h 时相关性较大($0.57 < r < 0.61$, $p = 0.01$),最大相关系数出现在超前 8 h($r = 0.61$);而在受到东南风的影响下的另 1 次污染过程(7 月 20 日~8 月 1 日)中同样发现超前 6~10 h 相关性较大($0.60 < r < 0.65$, $p = 0.01$),最大相关系数也出现在超前 8 h($r = 0.65$).由此可以看出在这 2 次污染过程中,香河地区实时观测数据能为北京大气 $PM_{2.5}$ 污染超标事件提供 8 h 左右预警.但由于观测期间类似的样本较少,对这一预警功能的适用性条件还需结合更多的污染过程作进一步的理论探讨和模式验证.

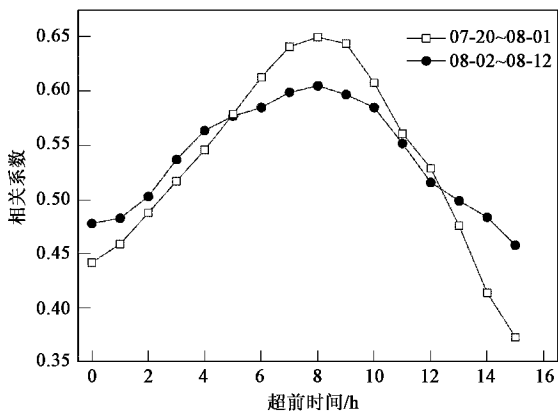


图 8 香河与北京 $PM_{2.5}$ 小时浓度的相关系数

Fig. 8 Correlation coefficients of hourly average $PM_{2.5}$ between Xianghe and Beijing

3 结论

(1) 香河地区大气污染较为严重,奥运会开幕前后 O_3 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 出现了 2 次持续污染过程,但奥运期间(8~9 月)观测到的污染物日均值均明显低于奥运前(6~7 月)。

(2) 香河地区 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 统计日变化特征相似,均为双峰型,夜间浓度高于白天,而臭氧呈现单峰日变化,白天浓度明显高于夜晚; SO_2 日变化特征不明显。

(3) 持续的偏南气流易造成香河地区污染物积累,而偏北气流和降水有利于污染物扩散和清除。

(4) 香河地区 7 月 20 日~8 月 12 日实时观测数据可能对北京大气 $PM_{2.5}$ 污染超标事件具有预警作用,但对这一预警功能的适用性条件还需进一步的理论探讨和模式验证。

致谢:感谢首都师范大学张姗姗同学和中国科学院大气物理研究所香河大气综合观测实验站工作人员在观测期间给予的无私帮助,同时感谢美国海洋与大气管理局(NOAA)空气资源实验室(ARL)提供的 HYSPLIT 模式及其 READY 网站(<http://www.arl.noaa.gov/ready.html>)在计算气团后向轨迹时提供的支持。

参考文献:

- [1] Wang W X, Chai F H, Zhang K, *et al.* Study on ambient air quality in Beijing for the summer 2008 Olympic Games[J]. Air Qual Atmos Health 2008, 1(1): 31-36.
- [2] Streets D G, Fu J S, Jang C J, *et al.* Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games[J]. Atmos Environ 2007, 41(3): 480-492.
- [3] Sun Y, Wang Y S, Zhang C C. Measurement of the vertical profile of atmospheric SO_2 during the heating period in Beijing on days of high air pollution[J]. Atmos Environ 2009, 43(2): 468-472.
- [4] 颜鹏, 黄健, Draxler R. 周边地区对北京地面 SO_2 影响的初步研究[J]. 应用气象学报 2002, 13(s1): 144-152.
- [5] Chan C Y, Xu X D, Li Y S, *et al.* Characteristics of vertical profiles and sources of $PM_{2.5}$, PM_{10} and carbonaceous species in Beijing[J]. Atmos Environ 2005, 39(28): 5113-5124.
- [6] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production[J]. J Environ Manage 2009, 90(1): 512-518.
- [7] Xu J, Zhang Y H, Fu J S, *et al.* Process analysis of typical summertime ozone episodes over the Beijing area[J]. Sci Total Environ 2008, 399(1-3): 147-157.
- [8] Chaloulakou A, Kassomenos P, Spyrellis N, *et al.* Measurements of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particle concentrations in Athens, Greece[J]. Atmos Environ 2003, 37(5): 649-660.

- [9] Harrison R M ,Deacon A R ,Jones M R ,*et al.* Sources and processes affecting concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} particulate matter in Birmingham (UK) [J]. Atmos Environ ,1997 ,**31**(24) :4103-4117 .
- [10] Zhang Y H ,Hu M ,Zhong L J ,*et al.* Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004) : overview [J]. Atmos Environ ,2008 ,**42**(25) :6157-6173 .
- [11] 贺克斌 ,贾英韬 ,马永亮 ,等 . 北京大气颗粒物污染的区域性本质 [J]. 环境科学学报 ,2009 ,**29**(3) :482-487 .
- [12] 清华大学 ,北京市大气 PM₁₀ 和 O₃ 污染的控制战略和措施研究 [R]. 北京 :北京市环境保护局 ,2006 .14-22 .
- [13] 张志刚 ,高庆先 ,韩雪琴 ,等 . 中国华北区域城市间污染物输送研究 [J]. 环境科学研究 ,2004 ,**17**(1) :14-20 .
- [14] 马志强 ,王跃思 ,孙扬 ,等 . 北京市与香河县大气臭氧及氮氧化合物的变化特征 [J]. 环境化学 ,2007 ,**26**(6) :832-837 .
- [15] 杜睿 . 北京及周边地区大气边界层中花粉气溶胶的观测 [J]. 中国环境科学 ,2007 ,**27**(4) :477-481 .
- [16] 许黎 ,樊小标 ,石广玉 ,等 . 对流层平流层气溶胶粒子的形态和化学组成 [J]. 气象学报 ,1998 ,**56**(5) :551-559 .
- [17] Li C ,Marufu L T ,Dickerson R R ,*et al.* *In situ* measurements of trace gases and aerosol optical properties at a rural site in northern China during East Asian Study of Tropospheric Aerosols :An International Regional Experiment 2005 [J]. J Geophys Res ,2007 ,**112** ,D22S04 , doi :10.1029/2006JD007592 .
- [18] Draxler R R ,Rolph G D . HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>) [EB/OL]. Silver Spring MD :NOAA Air Resources Laboratory ,2003 .
- [19] 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 .
- [20] 刘洁 ,张小玲 ,徐晓峰 ,等 . 北京地区 SO₂、NO_x、O₃ 和 PM_{2.5} 变化特征的城郊对比分析 [J]. 环境科学 ,2008 ,**29**(4) :1059-1065 .
- [21] 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 .
- [22] 香河县环境保护局 . 县环保局采取四项措施确保奥运期间空气质量 [EB/OL]. <http://www.xhqlgk.lfgov.cn/huanbaoju/ShowArticle.asp?ArticleID=4129> ,2008-06-03 .
- [23] Aryal R K ,Lee B K ,Karki R ,*et al.* Seasonal PM₁₀ dynamics in Kathmandu Valley [J]. Atmos Environ ,2008 ,**42**(37) :8623-8633 .
- [24] Kocak M ,Mihalopoulos N ,Kubilay N . Contributions of natural sources to high PM₁₀ and PM_{2.5} events in the eastern Mediterranean [J]. Atmos Environ ,2007 ,**41**(18) :3806-3818 .
- [25] 何新星 ,王跃思 ,温天雪 ,等 . 2004 年春季北京一次沙尘暴的理化特性分析 [J]. 环境科学 ,2005 ,**26**(5) :1-6 .
- [26] 余环 ,王普才 ,宗雪梅 ,等 . 奥运期间北京地区卫星监测 NO₂ 柱浓度的变化 [J]. 科学通报 ,2009 ,**54**(3) :299-304 .
- [27] 徐祥德 ,周丽 ,周秀骥 ,等 . 城市环境大气重污染过程周边源影响域 [J]. 中国科学 (D 辑) 地球科学 ,2004 ,**34**(10) :958-966 .
- [28] 范清 ,程水源 ,苏福庆 ,等 . 北京夏季典型环境污染过程个例分析 [J]. 环境科学研究 ,2007 ,**20**(5) :12-19 .
- [29] 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 .
- [30] Rodríguez S ,Cuevas E ,González Y ,*et al.* Influence of sea breeze circulation and road traffic emissions on the relationship between particle number , black carbon , PM₁ , PM_{2.5} and PM_{2.5-10} concentrations in a coastal city [J]. Atmos Environ ,2008 ,**42**(26) :6523-6534 .