

夏秋季石家庄大气污染变化特征观测研究

杜吴鹏^{1,2}, 王跃思^{1*}, 宋涛¹, 辛金元¹, 程一松³, 吉东生¹

(1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 北京市气象局气候中心, 北京 100089; 3. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050021)

摘要:研究了石家庄夏秋季节大气污染状况及 2008 奥运前后大气污染物浓度变化特征. 2007 和 2008 年夏秋季节, 使用全自动在线观测仪器对石家庄大气环境质量进行连续监测, 目的是阐明奥运期间石家庄污染物减排对当地大气环境的改变, 探讨石家庄地区产生的大气污染物对北京及周边地区可能的影响. 结果表明, 除了氮氧化物, 其他污染物均有超标情况出现, 其中夏秋季节 O_3 浓度较高, 小时最大浓度值平均 (O_3 -Max) 分别为 (177.2 ± 63.0) 和 $(105.8 \pm 61.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, NO 和 NO_2 在夏秋季节的浓度分别为 (4.5 ± 4.0) 、 $(32.7 \pm 12.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 (21.5 ± 16.9) 、 $(60.5 \pm 16.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, SO_2 浓度分别为 (72.0 ± 27.5) 和 $(92.0 \pm 44.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度达到 (102.3 ± 47.6) 、 $(153.3 \pm 58.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 (95.8 ± 50.0) 、 $(147.4 \pm 67.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 奥运期间各类污染物浓度显著下降, NO_x 、 O_3 -Max、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分别为 (43.8 ± 15.0) 、 (142.0 ± 54.9) 、 (52.4 ± 18.8) 、 (76.7 ± 35.1) 和 $(116.5 \pm 38.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 分别较 2008 年监测期间平均值降低 34.6%、22.8% 和 21.0%. 本研究系统分析了夏秋季节石家庄大气污染状况, 为评估当地大气污染控制措施提供了科学依据.

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

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)07-1409-08

Characteristics of Atmospheric Pollutants During the Period of Summer and Autumn in Shijiazhuang

DU Wu-peng^{1,2}, WANG Yue-si¹, SONG Tao¹, XIN Jin-yuan¹, CHENG Yi-song³, JI Dong-sheng¹

(1. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Climate Center, Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China; 3. Center for Agricultural Resources Research Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Atmospheric pollutants and their concentration change characteristics during Beijing Olympics in Shijiazhuang were studied. Air quality was measured by automatic on-line continuous monitoring equipments in summer and autumn of 2007 and 2008. The objectives of this study were to identify the effect of pollutants decrease on atmospheric environment, and develop the potential influence to Beijing and surrounding areas. The results show that the pollutants concentration often exceeds state criterion except nitrogen oxides, O_3 concentration in summer and autumn is higher, averaged hourly maximum concentration (O_3 -Max) is (177.2 ± 63.0) and $(105.8 \pm 61.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, the concentrations of NO and NO_2 are (4.5 ± 4.0) , $(32.7 \pm 12.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and (21.5 ± 16.9) , $(60.5 \pm 16.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ respectively, SO_2 concentration is (72.0 ± 27.5) and $(92.0 \pm 44.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} concentrations reach to (102.3 ± 47.6) , $(153.3 \pm 58.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and (95.8 ± 50.0) , $(147.4 \pm 67.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Generally, pollutants declined obviously in Olympics period, the concentrations of NO_x , O_3 -Max, SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} are (43.8 ± 15.0) , (142.0 ± 54.9) , (52.4 ± 18.8) , (76.7 ± 35.1) and $(116.5 \pm 38.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, and the reduction ratio of SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} are 34.6%, 22.8% and 21.0% compared with the whole monitoring period in 2008. The actuality of atmospheric pollution in summer and autumn was analyzed systematically, and which provided scientific evidences for evaluating the control measures of pollutants emission.

Key words: Beijing Olympics; Shijiazhuang; atmospheric pollution; NO_x ; O_3 ; SO_2 ; $\text{PM}_{2.5}$; PM_{10}

近年来, 我国大气环境呈现出区域污染的特性, 某一地区的大气污染受其特定的地理环境和大气环境背景影响, 可通过中远距离输送影响其它地区^[1-3]. 石家庄地处河北省中南部, 是我国重要的工业基地之一, 大气污染比较严重, 有关研究表明太行山沿线的石家庄等地区产生的大气污染物在西南风作用下极易对北京的空气质量产生影响^[4,5]. 较高浓度的 O_3 、 NO_x 、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 不仅造成城市大

气环境污染, 而且严重危害人体健康, 并间接对区域气候产生一定的影响. 近年来, 国内外许多科学家对该类大气污染物进行了大量研究^[6-14]. 其中, Lee

收稿日期: 2009-09-07; 修订日期: 2009-12-15

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); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA06A301)

作者简介: 杜吴鹏 (1981 ~), 男, 博士, 主要研究方向为大气环境和应用气候, E-mail: duwupeng@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

等^[15]通过卫星和地基观测指出源自俄罗斯森林大火排放的烟雾气溶胶通过长距离输送加重了韩国等地区的空气污染,Zelm等^[16]详细阐述了欧洲大气中的细粒子和臭氧对人体健康的影响;在研究方法方面,Wang等^[17]利用数值模拟方法模拟了台湾南部严重污染事件大气中PM₁₀浓度,Streets等^[18]对北京奥运期间的空气质量进行了模拟并指出区域污染物输送对北京大气污染物浓度有明显的贡献,Sun等^[19]对北京采暖期间SO₂在大气中的垂直分布进行了观测,王希波等^[20]详细阐述了兰州市主要大气污染物浓度的季节变化和时空分布,刘洁、安俊琳等^[21~23]利用观测资料详细分析了北京大气中SO₂、O₃、NO_x和CO浓度变化及NO、NO₂和O₃的浓度相关性特征。

2007与2008年中国科学院开展了北京奥运大气环境监测与预警行动计划,建立了京津冀大气环境监测与预警观测网,对大气污染物(O₃、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、SO₂、PM₁₀及CO)进行实时监测,为奥运会的空气质量提供了及时准确的监测与预警评估数据,也为北京和周边区域的大气污染防治措施提供了科学依据和参考。特别是在2008年奥运会期间,北京及周边地区执行了严格的污染物限排措施,石家庄地区也采取了积极的扬尘污染控制、机动车污染控制、工业污染治理和燃煤污染治理等多项工作^[24],分析夏秋季节石家庄地区大气污染物变化特征及探讨华北地区2个特大城市的大气环境相互关系,对研究区域大气污染具有一定的借鉴作用。

本研究的目的是和意义主要是利用2007年和2008年夏秋季节石家庄大气环境监测数据,给出石家庄市典型大气污染物特点,评估该地区夏秋季节的大气污染现状,以期对石家庄的大气污染监测与治理提供科学依据。本研究的创新性在于对比分析了2008年奥运会前后各时段石家庄地区污染物变化特征,定量给出当地污染物减排措施对石家庄大气环境质量的影响,并讨论了石家庄地区的大气污染可能对北京地区的影响。

1 材料与方法

1.1 观测站点和时间

石家庄观测站位于中国科学院石家庄农业现代化研究所办公楼顶,东经114.52°,北纬38.02°,测站海拔64 m,该观测站位于石家庄市,代表了石家庄市典型的大气环境状况,同时对影响北京地区最为显著的西南方向污染物输送具有很好的代表

性。该地区大气环境监测实验起止时间为2008年6~10月,另外在2007年8~9月还进行了短期观测,以便于与2008年的观测结果进行对比。为了将该地区污染物浓度水平与相关空气质量标准作比较,现给出国家空气质量二级标准,其中O₃小时标准为200 μg·m⁻³,NO₂日均值标准为120 μg·m⁻³,SO₂日均值标准为150 μg·m⁻³,PM₁₀日均值标准为150 μg·m⁻³,国内当前没有PM_{2.5}标准,本研究参考WHO IT1规定的PM_{2.5}日平均值75 μg·m⁻³ [4 25]。

1.2 观测方法和设备

实验观测的大气污染物有NO_x、O₃、SO₂、PM_{2.5}和PM₁₀,采用美国Thermo-fisher公司空气质量环境监测设备,定期对仪器进行标定,以保证数据的准确性。①NO_x观测使用TE42i化学发光NO-NO₂-NO_x分析仪,最低检测限为0.5 μg·m⁻³,零漂<0.5 μg·(m³·d)⁻¹,跨漂:±1%·d⁻¹。②O₃观测使用TE49i紫外光度法O₃分析仪,最低检测限为2.0 μg·m⁻³,零漂<2 μg·(m³·d)⁻¹,跨漂<1%·(7 d)⁻¹。③SO₂观测使用TE43i脉冲荧光SO₂分析仪,最低检测限为5.7 μg·m⁻³,零漂<2.9 μg·(m³·d)⁻¹,跨漂:±1%·d⁻¹。④PM_{2.5}和PM₁₀观测使用RP1400a环境颗粒物监测仪,最低检测限:0.06 μg·(m³·h)⁻¹,质量分辨率:0.1 μg·m⁻³,精度:±1.5 μg·(m³·h)⁻¹。仪器的标定系统由111型零空气发生器(TEI 111),146型多点校准仪(TEI, 146i)和49iPS型标准校准仪组成。标准气体由国家标准物质中心提供,原始数据记录为1 min平均值,文中使用数据为质控后小时平均值。

2 结果与讨论

2.1 污染物变化特征分析

从石家庄污染物逐日浓度变化图中可以看到(图1),其臭氧浓度呈现明显的季节变化特征,6~10月日平均浓度为(64.0±33.9) μg·m⁻³,小时最大浓度平均达到(148.6±71.5) μg·m⁻³,夏秋季节臭氧浓度随时间逐渐降低,6~7月浓度最高,日平均浓度达到(88.6±27.2) μg·m⁻³,小时最大浓度平均为(190.0±62.2) μg·m⁻³,经常超过国家空气质量二级标准,6~7月共有27 d超标,超标率达44.3%。8月臭氧浓度略有降低,其中小时最大浓度平均为(152.5±57.9) μg·m⁻³,超标率降低到25.8%,特别是奥运期间,仅有4 d超标。秋季在太阳光强减

弱影响下,生成臭氧的光化学反应能力降低,使得9月和10月臭氧浓度明显减少,平均小时最大浓度仅为 $(105.8 \pm 61.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其中有7d浓度超标,超标率仅为11.5%,远低于夏季的超标率。

与臭氧的变化特征相反,夏秋季节石家庄地区氮氧化物浓度随时间逐渐升高,6~10月 NO 、 NO_2 和 NO_x 日平均浓度分别为 (11.3 ± 13.9) 、 (43.9 ± 19.8) 和 $(55.2 \pm 31.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,监测期间 NO_2 没有超过国家空气质量二级标准。夏季6~8月氮氧化物浓度较低,其中 NO 、 NO_2 和 NO_x 的平均浓度分别为 (4.5 ± 4.0) 、 (32.7 ± 12.4) 和 $(37.2 \pm 14.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,而秋季9~10月其浓度明显升高,三者的浓度达到 (21.5 ± 16.9) 、 (60.5 ± 16.9) 和 $(82.0 \pm 30.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,分别相当于夏季的4.8、1.8和2.2倍,这与秋季臭氧浓度的降低导致消耗的氮氧化物减少以及奥运后该地区对污染物排放的控制措施可能放宽有关。另外,夏季大气对流较强且降水较多,不利于污染物的累积,而秋季秸秆等生物质焚烧在一定程度上也会增加污染物的排放^[8]。

石家庄地区6~10月 SO_2 日均浓度为 $(80.2 \pm 36.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,监测期间共有7d超过国家空气质量二级标准,且超标日期全部出现在10月。从图1中可以看出,2008年夏秋季节其浓度变化呈现明显的先降低后升高趋势,其中8月 SO_2 浓度最低,平均 $(57.4 \pm 16.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其次是9月和7月,而6月和10月的 SO_2 浓度最高,这是因为奥运期间该地区对污染物的限排措施最为严格,大量化工厂、制药厂以及煤电厂等排放源被强制关闭或限产^[24-26],加上8月频繁的降水使污染物在大气中存在时间较短,虽然9月残奥会期间以及奥运前的7月也采取了一定的污染物限排措施,但其执行力度没有奥运期间严格,使得 SO_2 浓度较8月略高。奥运会和残奥会结束后的10月,石家庄采取的污染物限排措施相对较为宽松,大量污染物集中排放,一定程度导致该月 SO_2 浓度接近8月的2倍,日均值为 $(112.7 \pm 49.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,超标率达到22.6%。

石家庄地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度较高,可吸入颗粒物污染严重, $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度甚至经常超过 PM_{10} 国家空气质量二级标准^[27],其中奥运期间 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 分别有6d和5d超标。受天气及人为排放源的影响,该地区质量浓度日变化比较明显,2008年监测期间, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的日均浓度分别为 (99.4 ± 48.6) 和 $(150.7 \pm 62.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 的平均比

值为66%,粒子成分中细粒子占有较大比例,大气中较多的细粒子更易导致呼吸道疾病,危害人体健康。石家庄地区奥运期间采取了积极的大气污染物排放控制措施^[24-26],加上受到有利天气条件的影响,从图1中可以看出其质量浓度在奥运期间明显低于其他时段,但受特殊天气形势的影响,奥运期间的8月8日以及8月18~20日,该地区质量浓度有2个明显的高峰,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 在这4d的日均浓度值分别为 (127.6 ± 50.0) 、 (116.0 ± 30.4) 、 (133.9 ± 18.4) 和 $(128.4 \pm 28.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,而 PM_{10} 浓度则分别为 (180.3 ± 54.1) 、 (155.9 ± 37.9) 、 (172.7 ± 27.4) 和 $(157.0 \pm 40.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,均远高于奥运期间两者的平均浓度 (76.7 ± 35.1) 和 $(116.5 \pm 38.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

根据表1中各时段污染物浓度的统计结果,可以看出在监测期间 O_3 受季节变化影响较大,奥运前(6月1日~8月7日)浓度最高,平均达到 $(86.9 \pm 27.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,小时最大浓度平均为 $(187.5 \pm 63.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;8月8~24日奥运期间 O_3 浓度为 $(65.8 \pm 21.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,小时最大浓度为 $(142.0 \pm 54.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,较8月平均水平明显降低; NO_x 浓度在9月和10月最高,而在奥运前和奥运期间浓度较低; SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 受当地污染物限排措施的影响比较显著,其浓度在奥运期间最低,其中奥运期间 SO_2 浓度仅 $(52.4 \pm 18.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度为 (76.7 ± 35.1) 和 $(116.5 \pm 38.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,三者分别较2008年监测期间平均值低34.6%、22.8%和21.0%。

由于污染物浓度随季节会有所变化,而不同年份之间一定时期内的天气形势往往相差不大,因此对不同年份相同时间段间的浓度比较仍具有一定研究意义。与2007监测结果相比较,2008年同期各污染物浓度明显下降(2007年监测的污染物种类有 O_3 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$)。从图1和表1中可以看到,奥运期间 O_3 日均值及小时最大浓度基本低于2007年同期水平,奥运后期 O_3 浓度显著升高,略高于2007年同期水平。奥运期间 NO_x 日平均浓度低于2007年同期水平,到8月下旬差异逐渐缩小,直至9月初残奥会开始又逐渐低于2007年同期。与其它污染物类似,奥运期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度远低于2007年同期水平,而8月底之后这种趋势不太明显,如果排除天气形势的影响,这可能与奥运会后本地区对污染物排放源控制力度的减弱有关。

2.2 各时段日变化特征分析

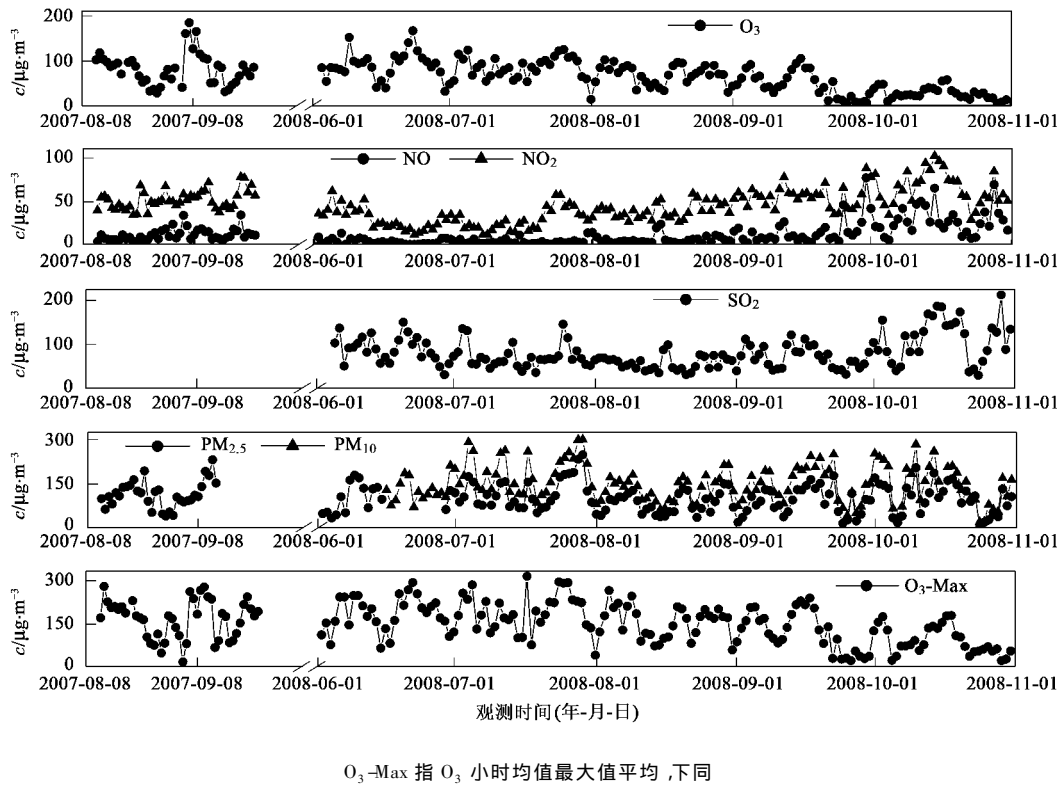


图 1 夏秋季石家庄 O₃、NO、NO₂、SO₂、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度逐日变化

Fig. 1 Concentration variation of O₃, NO, NO₂, SO₂, PM_{2.5} and PM₁₀ in summer and autumn at Shijiazhuang sites

表 1 石家庄 2007 和 2008 年污染物浓度水平特征统计 /μg · m⁻³

Table 1 Pollutants concentration statistics in 2007 and 2008 at Shijiazhuang/μg · m⁻³

时间	NO	NO ₂	O ₃	O ₃ -Max	SO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀
2007 观测时段 (08-12 ~ 09-25)	11.5 ± 7.0	51.9 ± 11.0	81.1 ± 35.6	166.7 ± 67.1		114.5 ± 45.3	
2008 奥运时段 (08-08 ~ 08-24)	6.0 ± 6.1	37.8 ± 10.3	65.8 ± 21.6	142.0 ± 54.9	52.4 ± 18.8	76.7 ± 35.1	116.5 ± 38.8
2008 奥运前时段 (06-01 ~ 08-07)	3.9 ± 3.2	30.2 ± 12.3	86.9 ± 27.7	187.5 ± 63.5	78.1 ± 28.1	110.1 ± 49.9	163.6 ± 61.2
2008 奥运后时段 (08-25 ~ 09-30)	13.0 ± 13.9	53.3 ± 11.9	52.5 ± 29.0	130.1 ± 68.4	69.3 ± 23.2	92.4 ± 43.7	150.7 ± 55.7
2008 夏季 (6 ~ 8 月)	4.5 ± 4.0	32.7 ± 12.4	81.7 ± 27.4	177.2 ± 63.0	72.0 ± 27.5	102.3 ± 47.6	153.3 ± 58.3
2008 秋季 (9 ~ 10 月)	21.5 ± 16.9	60.5 ± 16.9	37.9 ± 24.6	105.8 ± 61.7	92.0 ± 44.4	95.8 ± 50.0	147.4 ± 67.0
2008 监测期间平均	11.3 ± 13.9	43.9 ± 19.8	64.0 ± 33.9	148.6 ± 71.5	80.2 ± 36.6	99.4 ± 48.6	150.7 ± 62.1

夏季、秋季和奥运期间石家庄污染物浓度日变化特征见图 2,可以看出,各时段 O₃ 日变化特征基本相同,均在 15:00 左右出现峰值,奥运期间臭氧峰值较夏季明显偏低,另外,早晨日出前后 06:00 ~ 07:00 臭氧浓度最低。

NO、NO₂ 呈现与 O₃ 明显不同的变化特点,表现出“早峰午谷”的特征,早晨 07:00 ~ 09:00 浓度最高,此时是上班早高峰,城市中机动车等交通工具排放的污染物较多,之后浓度快速下降,一方面由于其被大气中增加的臭氧光化学反应消耗,另一方面随着大气对流混合的增强,近地面氮氧化物快速扩散稀释,午后 15:00 ~ 16:00 浓度降至最低,18:00 之后其浓度又逐渐升高,且整个夜晚一直维持这种较

高的浓度状态,直至第 2 d 早晨达到峰值。秋季氮氧化物浓度明显高于夏季和奥运期间,且日变化较为剧烈,振幅较大。

SO₂ 的日变化特征与 NO₂ 相似,上午 09:00 ~ 10:00 浓度最高,之后随着空气对流混合加强以及早高峰过后机动车流量的减少致使 SO₂ 浓度逐渐降低,14:00 ~ 20:00 之间达到最小值,此后略有升高并相对维持稳定。另外,从图 2 还可以看到,夏季 SO₂ 日变化较为强烈,浓度较秋季有所偏低,奥运期间 SO₂ 浓度明显低于夏季和秋季平均水平。

PM_{2.5} 和 PM₁₀ 日变化特征相近,奥运期间质量浓度日变化较为平缓,较夏季和秋季偏低,值得注意之处是无论 PM_{2.5} 还是 PM₁₀,在 02:00 ~ 16:00 之间,秋

季的浓度低于夏季,而从 16:00 ~ 次日 02:00,秋季的浓度则高于夏季,这很可能与夏秋季节大气对流日变化、边界层高度等气象因子密切相关.从图 2 明显看到,夜间质量浓度较高,上午达到最高值,而午

后直至傍晚浓度最低,其中奥运期间质量浓度最小值出现时间较晚,较夏季和秋季平均推迟 2 h,这可能与奥运期间的天气形势及所采取的污染物临时限排措施有关.

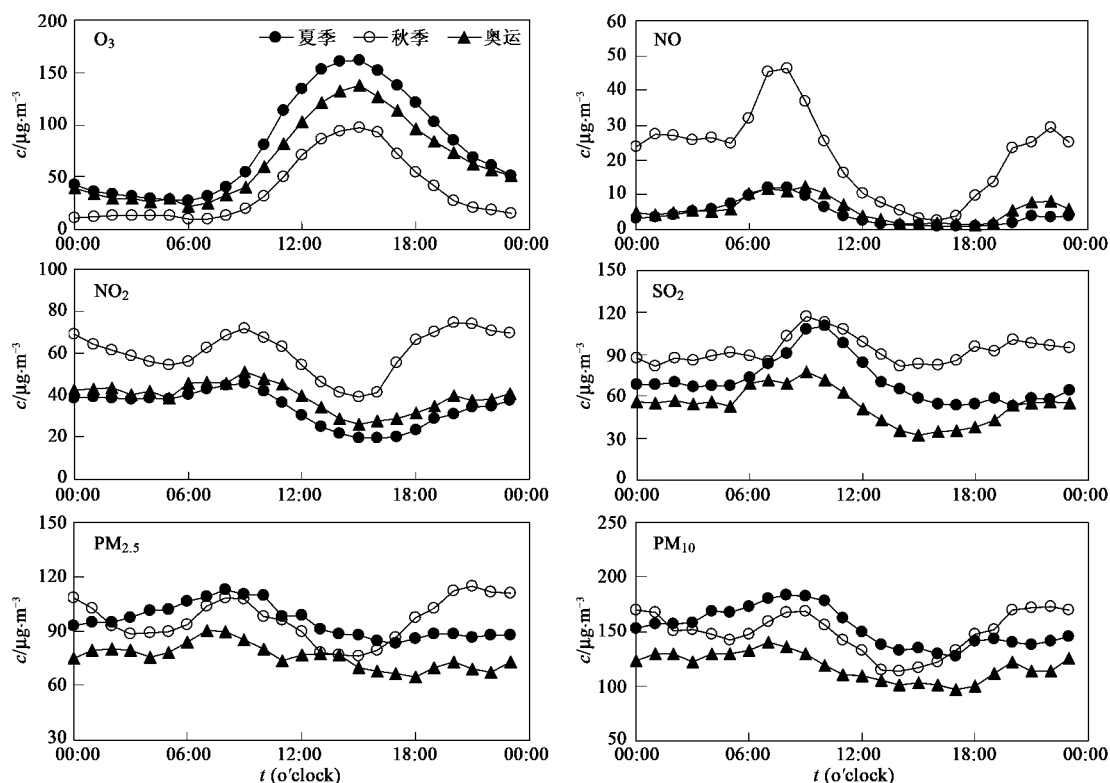


图 2 2008 年夏秋季及北京奥运期间石家庄 O_3 、 NO 、 NO_2 、 SO_2 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度日变化趋势

Fig. 2 Daily variation of O_3 , NO , NO_2 , SO_2 , $PM_{2.5}$ and PM_{10} during spring, autumn and Beijing Olympics in 2008 at Shijiazhuang site

2.3 奥运期间污染物浓度变化及消减特征

相较于 2007 年同期观测结果(表 2),2008 年 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 O_3 和 $PM_{2.5}$ 下降率分别为 22.1%、7.9%、10.5%、24.3% 和 22.6%, O_3 日小时最大浓度下降 13.7%.在奥运时段, NO 、 NO_2 、 NO_x 、 O_3 和 $PM_{2.5}$ 也均呈明显下降特征(表 3),其中 NO 、 NO_2 和 NO_x 下降约 10.7%、17.9% 和 17.0%, O_3 下降 29.3%, O_3 日小时最大浓度下降约 30.1%,而 $PM_{2.5}$ 下降幅度最大,达到了 37.9%.上述表明 2008 年观测期间石家庄空气质量较 2007 年同期有了明显改善和提高.

统计分析奥运前后大气污染物浓度变化特征(图 3),奥运期间 NO_x 和 O_3 浓度与奥运前后相比没有降低,而 SO_2 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度较奥运前后明显减小,其中奥运期间 SO_2 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度较奥运前时间段降低 32.8%、30.3% 和 28.8%,较奥运后时间段减少 24.3%、17.0% 和 22.7%,表明奥运

期间石家庄地区所采取的污染物限排措施对当地 SO_2 和颗粒物的影响比较显著,对大气环境的改善效果明显,而对本地 O_3 和 NO_x 则影响不大.另外,包括残奥会在内的奥运后时间段的污染物限排力度较奥运前相对严格,这也可从奥运后的污染物浓度较奥运前略低得到进一步证实(NO_x 除外,其受 O_3 浓度的夏秋季节性变化影响较大).

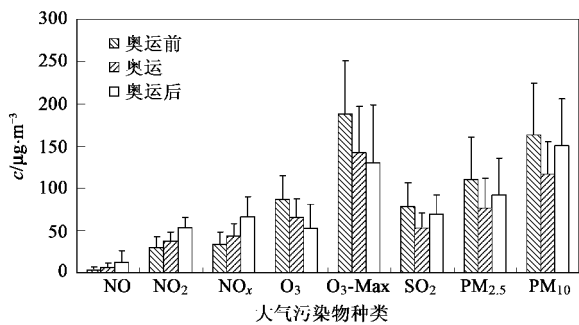
除了受季节因素影响较大的 O_3 外(进而影响到 NO_x 的浓度),与奥运前后和 2007 年同期污染物浓度相比较,奥运期间石家庄大气污染物浓度明显降低,造成污染物浓度显著下降的最主要原因,一方面因为奥运期间天气条件较好,污染物不易积累易于扩散,降低了污染物在大气中的累积速度和存在时间,另一方面则由于当地政府部门减排限排措施的加强^[24-26].随着本地源排放的减少,夏秋季节在频繁的西南风影响下输送到北京上空源于石家庄排放的大气污染物大为降低,为保证北京奥运会优良的空气质量做出了一定的贡献.

表 2 石家庄站 2008 与 2007 年同期监测对比 (08-08 ~ 09-25) / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
Table 2 Observation comparison between 2008 and 2007 (08-08 ~ 09-25) / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

项目	NO	NO ₂	NO _x	O ₃	O ₃ -Max	PM _{2.5}
2007 年	11.5 ± 7.0	51.9 ± 11.0	63.4 ± 15.8	81.1 ± 35.6	166.7 ± 67.1	114.5 ± 45.3
2008 年	9.0 ± 8.2	47.8 ± 12.7	56.7 ± 19.2	61.4 ± 24.2	143.8 ± 58.6	88.7 ± 42.0
升降 / %	-22.1	-7.9	-10.5	-24.3	-13.7	-22.6

表 3 石家庄站 2008 奥运时段与 2007 年同期监测对比 (08-08 ~ 08-24) / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
Table 3 Observation comparison in Olympics period between 2008 and 2007 (08-08 ~ 08-24) / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

项目	NO	NO ₂	NO _x	O ₃	O ₃ -Max	PM _{2.5}
2007 年	6.7 ± 2.7	46.0 ± 9.7	52.7 ± 11.4	93.0 ± 14.0	202.9 ± 32.7	123.5 ± 34.0
2008 年	6.0 ± 6.1	37.8 ± 10.3	43.8 ± 15.0	65.8 ± 21.6	142.0 ± 54.9	76.7 ± 35.1
升降 / %	-10.7	-17.9	-17.0	-29.3	-30.1	-37.9



奥运前:2008-06-01 ~ 2008-08-07, 奥运:2008-08-08 ~ 2008-08-24, 奥运后:2008-08-25 ~ 2008-09-30

图 3 奥运前后石家庄大气污染物浓度变化特征
Fig.3 Atmospheric pollutants variation characteristics for Pre-Olympics , Olympics and Post-Olympics

2.4 石家庄大气污染对北京地区的影响探讨

通过图 4 中的后向轨迹可以看到,在北京奥运期间,特别是奥运会开幕与闭幕的 8 月 8 日与 8 月 24 日前后北京地区受偏西南方向气流影响较大,此时,石家庄地区产生的大气污染物,特别是在大气中存在时间较长、输送距离较远的 PM_{2.5}会对北京地区产生污染,加重北京的质量浓度水平.观测的 8 月 8 日位于中科院大气物理研究所的北京铁塔 280 m 和 120 m PM_{2.5} 平均浓度分别为 (132.9 ± 43.5) 和 (138.1 ± 49.8) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,颗粒物质量浓度较高,而此时石家庄的 PM_{2.5} 浓度为 (127.6 ± 50.0) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,也远高于奥运期间的平均水平.8 月 24 日北京铁塔 280 m 和 120 m PM_{2.5} 的平均浓度分别为 (52.1 ± 34.5) 和 (52.4 ± 36.6) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,石家庄观测点的浓度为 (98.7 ± 48.9) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,也高于奥运期间的平均水平.整个奥运期间北京铁塔 280 m 和 120 m 的 PM_{2.5} 浓度仅为 (44.6 ± 39.1) 和 (46.7 ± 40.4) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,受西南气流影响显著的 8 月 8 日和

8 月 24 日北京铁塔 280 m 处 PM_{2.5} 质量浓度是奥运期间平均浓度水平的 2.98 和 1.17 倍,120 m 处 PM_{2.5} 质量浓度水平是奥运期间的 2.92 和 1.12 倍.

图 4 显示了石家庄观测点与北京奥运村观测点在 2008 年 8 月 3 ~ 8 日以及 23 ~ 25 日 PM_{2.5} 浓度小时变化特征.8 月 3 ~ 8 日,华北地区处于一个明显的污染物累积增长过程,此时包括石家庄和北京在内的整个区域大气颗粒物浓度均较高,各地区排放的污染物相互混合相互影响,不同城市间 PM_{2.5} 的浓度相差不大,到奥运开幕当天污染物浓度积累到最大值,石家庄和北京的 PM_{2.5} 最高浓度分别为 212.2 和 218.2 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,此后在利于污染物扩散的天气过程影响下,两地区污染物浓度迅速下降.从图 4 中还可以看到,24 日前后北京地区主要受偏西南气流的影响,北京和石家庄大气中 PM_{2.5} 浓度变化具有同步性.23 日 12:00 ~ 24 日 00:00,随着石家庄观测点 PM_{2.5} 浓度的逐渐升高,监测到北京奥运村的浓度也逐步抬升,此后两监测点的质量浓度出现一定程度的下降并维持一段时间后又慢慢升高,到 24 日 15:00 石家庄的 PM_{2.5} 浓度达到 195.6 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,为本次污染过程中浓度最高值,而北京奥运村观测点在 7 h 后即 22:00 浓度达到最大值 (95.4 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).25 日凌晨之后,在有利于污染物扩散和沉降的天气背景下,伴随两站点质量浓度大幅度降低,本次污染物的累积和清除过程随之结束.综合以上分析,在偏西南气流作用下,石家庄的大气污染物浓度变化特征与北京地区具有一致性,所产生的大气污染物会对北京地区造成一定程度的影响,加大北京地区的污染程度.所以,奥运期间石家庄地区污染物限排,特别是对煤电厂、化工厂等大型污染源进行限制,对北京奥运期间大气环境的改善起到积极和有效的作用.

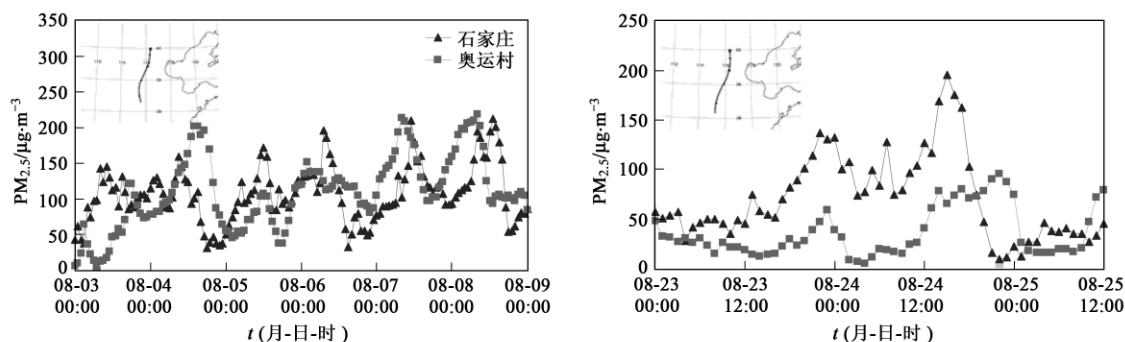


图4 石家庄与北京奥运村观测点2008年8月3~8日和23~25日 $PM_{2.5}$ 浓度小时变化特征及奥运村

观测点8日和24日08:00的24 h后向轨迹

Fig. 4 $PM_{2.5}$ hourly concentration variation during August 3~8 and 23~25 at Shijiazhuang and Beijing Olympics site, and the 24 hour backward trajectories at 08:00, August 8 and 28 for Olympics site

3 结论

监测结果表明,石家庄市夏秋季节呈现较严重的大气复合污染.夏季 O_3 与细粒子 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 超标严重.秋季 O_3 由于季节变化逐步降低,而细粒子污染仍较严重.石家庄地区工业源排放及机动车污染物排放量较大,氮氧化物与二氧化硫浓度相对较高,监测期间二氧化硫出现超标现象;随着秋季区域生物质燃烧和化石燃料燃烧的增加,氮氧化物与二氧化硫浓度呈上升趋势.2008北京奥运期间,石家庄地区大气污染临时管控措施实施效果显著,与2007年观测结果相比较,各类大气污染物均显著下降,为保证北京奥运会良好空气质量起到了积极作用和效果;然而,石家庄地区大气污染的长效治理仍任重道远.

致谢:感谢中国科学院大气物理研究所大气分中心工作人员在观测期间提供的帮助!

参考文献:

- [1] 任阵海,苏福庆,陈朝晖,等.夏秋季节天气系统对边界层内大气中 PM_{10} 浓度分布和演变过程的影响[J].大气科学,2008,32(4):741-751.
- [2] Hao J M, He K B, Duan L, et al. Air pollution and its control in China [J]. Front Environ Sci Engin China, 2007, 1(2): 129-142.
- [3] 马锋敏,高庆先,周锁全,等.北京及周边地区一次典型大气污染过程的模拟分析[J].环境科学研究,2008,21(1):30-36.
- [4] 吉东生.北京及周边地区大气污染联网观测与研究[D].北京:中国科学院大气物理研究所,2008.
- [5] 陈朝晖,程水源,苏福庆,等.华北区域大气污染过程中天气型和输送路径分析[J].环境科学研究,2008,21(1):17-21.
- [6] 叶芳,安俊琳,王跃思,等.北京近地层 O_3 、 NO_x 、CO及相关气象因子的分析[J].生态环境,2008,17(4):1425-1432.
- [7] Hao J M, Wang L T. Improving urban air quality in China:

Beijing case study [J]. J Air Waste Manage Assoc, 2005, 55(9): 1298-1305.

- [8] Streets D G, Waldhoff S T. Present and future emissions of air pollutants in China: SO_2 , NO_x , CO [J]. Atmos Environ, 2000, 34(3): 363-374.
- [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 SO_2 的垂直分布分析[J].环境科学,2006,27(3):408-414.
- [10] 殷永泉,李昌梅,马桂霞,等.城市臭氧浓度分布特征[J].环境科学,2004,25(6):16-20.
- [11] 郭建斌,陈珏.北京市空气污染季节变化规律研究及污染控制建议[J].生态环境学报,2009,18(3):952-956.
- [12] 章志芹,唐健,汤剑平.无锡空气污染指数、气象要素的周末效应[J].南京大学学报(自然科学版),2007,43(6):643-654.
- [13] 刘娜,谢绍东.中国不同经济区域大气污染总量分配方法的选择研究[J].北京大学学报(自然科学版),2007,43(6):803-807.
- [14] Qiu J H, Chen H B, Wang P C, et al. Recent progress in atmospheric observation research in China [J]. Adv Atmos Sci, 2007, 24(6): 940-953.
- [15] Lee K H, Kim J E, Kim Y J, et al. Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003 [J]. Atmos Environ, 2005, 39(1): 85-99.
- [16] Zelm R V, Huijbregts M A, Hollander H A, et al. European characterization factors for human health damage of PM_{10} and ozone in life cycle impact assessment [J]. Atmos Environ, 2008, 42(3): 441-453.
- [17] Wang W C, Chen K S, Wang S K, et al. Modeling atmospheric PM_{10} concentrations during severe pollution events in southern Taiwan [J]. Atmos Res, 2009, 92(2): 159-171.
- [18] 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): 480-49.
- [19] 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. 2.
- [20] 王希波, 马安青, 安兴琴, 等. 兰州市主要大气污染物浓度季节变化时空特征分析 [J]. *中国环境监测*, 2007, **23** (4): 61-65.
- [21] 刘洁, 张小玲, 徐晓峰, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2008, **29** (4): 1059-1065.
- [22] 安俊林, 李昕, 王跃思, 等. 北京气象塔夏季大气 O_3 、 NO_x 和 CO 浓度变化的观测实验 [J]. *环境科学*, 2003, **24** (6): 43-47.
- [23] 安俊林, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 NO 、 NO_2 和 O_3 浓度变化的相关性分析 [J]. *环境科学*, 2007, **28** (4): 706-711.
- [24] 河北省人民政府办公厅. 河北省奥运期间极端不利气象条件下空气污染控制应急措施 [EB/OL]. http://www.mysteel.com/gc/zhzx/hyjj/2008/08/01/074522_1843284.html.
- [25] 世界卫生组织. 世界卫生组织关于颗粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的空气质量准则 [M]. 日内瓦: 世界卫生组织出版社, 2005. 9-13.
- [26] 石家庄市政府. 河北石家庄出台措施确保奥运期间空气良好 [EB/OL]. <http://news.sohu.com/20071217/n254126873.shtml>.
- [27] 苏朝鹏, 徐全洪, 张义文, 等. 石家庄市市区大气环境质量监测研究 [J]. *中国科技信息*, 2006, (21): 32-33.