

2015年“九三阅兵”期间北京市空气质量分析

王占山¹,李云婷¹,张大伟^{1*},陈添²,魏强¹,孙彤卉¹,王步英¹,潘锦秀¹,崔继宪³,皮帅¹(1.北京市环境保护监测中心,大气颗粒物监测技术北京市重点实验室,北京 100048; 2.北京市环境保护局,北京 100044; 3.北京工业大学环境与能源学院,北京 100124)

摘要: 为研究区域性大气污染物减排措施对北京市空气质量的影响,结合地面观测的气象参数、常规污染物和 PM_{2.5} 化学组分,对“九三阅兵”期间北京市的空气质量进行分析。结果表明,阅兵期间北京市北风平均风速、温度、相对湿度和地面气压等气象要素水平与相邻时段相比较为接近,但北风频率偏高,整体大气扩散条件略有利。阅兵期间 SO₂、NO₂、O₃、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 平均浓度分别为 2.7、24.2、63.2、27.2 和 19.5 μg/m³,与相邻时段相比分别降低了 26.0%、31.3%、24.5%、59.0%和 59.4%;PM_{2.5} 的降幅最大,体现了一次源排放和前体物排放同时减排的叠加作用。从 PM_{2.5} 化学组分来看,阅兵期间浓度最高前 4 位依次是 OC(6.1 μg/m³)、NH₄⁺(3.8 μg/m³)、SO₄²⁻(3.4 μg/m³)和 NO₃⁻(2.5 μg/m³),OC 中二次生成的组分仍高达 57.6%。通过与相邻时段中相似天气形势下污染物浓度的对比测算了减排措施的“净环境效益”,阅兵期间的减排措施使得 SO₂、O₃、NO₂、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度分别降低了 50.0%、0.7%、42.1%、45.7%和 48.6%,并对 APEC 期间和阅兵期间 O₃ 浓度变化不同的原因进行了讨论。

关键词: 阅兵; 减排; 空气质量; PM_{2.5}; 化学组分; O₃

中图分类号: X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2017)05-1628-09

Analysis on air quality in Beijing during the military parade period in 2015. WANG Zhan-shan¹, LI Yun-ting¹, ZHANG Da-wei^{1*}, CHEN Tian², WEI Qiang¹, SUN Tong-hui¹, WANG Bu-ying¹, PAN Jin-xiu¹, CUI Ji-xian³, PI Shuai¹ (1. Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2. Beijing Environmental Protection Bureau, Beijing 100044, China; 3. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). *China Environmental Science*, 2017,37(5): 1628~1636

Abstract: During the military parade period in 2015, air quality in Beijing was analyzed to investigate the impact of regional-scale air pollutant control strategies on Beijing. Ground-observed meteorological data, regulated air pollutant concentrations, and chemical compositions of PM_{2.5} were analyzed. The results showed that the average wind speed of north wind, temperature, relative humidity and ground-level atmospheric pressure during the military parade period were at the same level with the adjacent period, whereas, frequency of north wind was obviously higher. In general, atmospheric dispersion conditions during the military parade period was more favorable than the adjacent period. The average concentrations of SO₂, NO₂, O₃, PM₁₀ and PM_{2.5} were 2.7, 24.2, 63.2, 27.2 and 19.5 μg/m³, respectively, which decreased by 26.0%, 31.3%, 24.5%, 59.0% and 59.4% compared with the adjacent period, respectively. The decrease of PM_{2.5} was the largest, indicating the combination effect of reduction of primary emission and precursor emission. OC concentration (6.1 μg/m³) was the highest in PM_{2.5} chemical composition, followed by NH₄⁺ (3.8 μg/m³), SO₄²⁻ (3.4 μg/m³) and NO₃⁻ (2.5 μg/m³). Notably, secondary OC accounted for 57.6% of total OC even with the implementation of emission reduction measures. The net effectiveness of the emission reduction measures was calculated through comparisons of concentrations of air pollutants under similar meteorological conditions. Through the implementation of emission reduction measures, concentrations of SO₂, O₃, NO₂, PM₁₀, and PM_{2.5} decreased by 50.0%, 0.7%, 42.1%, 45.7% and 48.6%, respectively. In addition, the mechanisms of the different variations of O₃ during the APEC period and the military

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 环保公益性行业科研专项(201409005); 国家科技支撑计划课题(2014BAC23B03); 北京市优秀人才培养资助

* 责任作者, 研究员, zhangdawei@bjmemc.com.cn

parade period were discussed.

Key words: military parade; reduction measures; air quality; PM_{2.5}; chemical compositions; O₃

2015 年 9 月 3 日,为纪念中国人民抗日战争暨世界反法西斯战争胜利 70 周年,中国在北京举办了阅兵仪式,来自俄罗斯、韩国等世界各国的政要出席了此次活动.为保障活动期间的空气质量,自 2015 年 8 月 20 日开始,北京市执行了机动车单双号限行等污染物减排措施,自 8 月 28 日开始,周边省市也开始执行减排措施,包括工厂停产限产、工地停工、机动车单双号限行、加强道路清洁等.这些减排措施也起到了良好的环境效果,2015 年 8 月 20 日至 9 月 3 日期间(简称为“阅兵期间”),北京市 PM_{2.5} 浓度在有监测历史上首次连续 15d 达到一级优^[1]水平,O₃ 浓度也仅有 1d 超标,空气质量维持较好水平,创造了广为人知的“阅兵蓝”^[2-3].

2008 年北京奥运会期间以及 2014 年 APEC 会议期间,北京市及周边地区曾经采取过类似的污染源减排措施,同样成功的完成了空气质量保障工作.Wang 等^[4]对 2006~2008 年 8 月份密云站点气态污染物的监测发现,奥运期间 O₃、SO₂、CO 和 NO_y 的日均浓度分别下降了 23%、61%、25%和 21%.Zhang 等^[5]在中国气象局站点的监测发现,2008 年 7 月中上旬的 CO、NO_x、BC(Black carbon)、SO₂ 和 PM₁₀ 小时平均浓度与 6 月份相比分别下降了 23%、30%、26%、45%和 21%.孔茜等^[6]对交通环境的监测发现,奥运期间北四环道路附近的 CO、NO₂ 和 NO_x 平均浓度分别下降了 63%、70%和 71%; NO_x 单人高峰小时与日间小时平均吸入剂量分别下降了 58%和 55%.王占山等^[7]的观测发现,APEC 期间密云、榆垓、昌平、奥体中心和西直门北大街 5 个站点 SO₂、NO₂、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 平均浓度分别为(8.0±8.0)、(37.4±21.6)、(67.7±43.4)和(48.6±42.2)μg/m³,与近 5 年同期(PM_{2.5} 为 2013 年同期)相比分别下降了 61.5%、40.8%、36.4%和 47.1%; O₃ 日均浓度为(36.0±22.5)μg/m³,与近 5 年同期相比上升了 101.8%.张霖琳等^[8]于 APEC 期间在北京及周边城市的监测发现,北京、天津、石家庄、保定和

济南 5 个城市 PM_{2.5} 日平均浓度略高于 75μg/m³,并计算了 PM_{2.5} 中 Zn、Pb 和 Cu 等重金属元素的致癌风险,结果表明 APEC 期间的重金属元素的健康风险水平整体低于 2012 年和 2013 年同期.

针对奥运会、APEC 会议和阅兵仪式等重大国际活动所实施的一系列大气污染物临时减排措施在国内较为罕见,为研究区域性大气污染特征以及污染物排放量与环境浓度之间的关系提供了难得的机会.另外,奥运会在夏季举办,APEC 会议在秋季举办,而阅兵仪式在夏末秋初举办,减排措施的实施效果也受到不同的气象条件的影响.本研究对阅兵期间北京市气象条件、大气污染物浓度以及 PM_{2.5} 化学组分等地面监测数据进行分析,探讨污染物减排措施对北京市空气质量的影响,以期今后相关污染调控政策的制定提供科学依据.

1 材料与方法

目前,北京市环境保护局对社会实时发布 35 个监测站点的空气质量,选择其中的密云水库站(城市背景站)、榆垓站(区域站)、昌平站(郊区站)、官园站(城区站)和西直门北大街站(交通站)进行分析.这 5 个站点具有不同的监测功能,且分布于北京市的不同方位,所以认为能较好的代表北京市的整体水平.PM_{2.5} 化学组分监测仪器安装在北京市环境保护监测中心七楼楼顶,气象数据来自北京市南郊观象台,站点位置见图 1.

PM_{2.5} 监测仪采用 Thermo Fisher 1405F 监测仪,原理是以恒定的流速将环境空气中的 PM_{2.5} 颗粒通过采样切割器吸入仪器内部,用滤膜动态测量系统(FDMS)配合微量震荡天平法(TEOM),测量 PM_{2.5} 的质量浓度.PM₁₀ 监测仪采用 Thermo Fisher 1400 监测仪,原理同样为 TEOM 法.NO_x 分析仪采用 Thermo Fisher 42C 化学发光 NO-NO₂-NO_x 分析仪,其原理是 NO 与 O₃ 发生化学反应时产生激发态的 NO₂ 分子,当激发态的 NO₂ 分子返回基态时发出一定波长的光,所发出

光的强度与 NO 的体积分数呈线性正相关.检测 NO₂ 时先将 NO₂ 通过钼转换器转换成 NO,然后再通过化学发光反应进行定量分析.该分析仪最低检测限:0.05×10⁻⁹(体积分数);零漂:小于 0.025×10⁻⁹/24h;跨漂:±1%/24h.O₃ 分析仪采用 Thermo Fisher 49C 紫外光度法分析仪,原理为 O₃ 分子吸收波长为 254nm 的紫外光,该波段紫外光被吸收的程度直接与 O₃ 的体积分数相关,根据检测样品通过时紫外光时被吸收的程度来计算出 O₃ 体积分数.分析仪最低检测限:1×10⁻⁹(体积分数);精度:1×10⁻⁹(体积分数);零漂:0.4%/24h;跨漂:±1%/24h,±2%/7d.SO₂ 监测仪采用 Thermo Fisher 43i 脉冲紫外荧光法分析仪,分析仪最低检测限:0.5×10⁻⁹(体积分数);精度:1×10⁻⁹(体积分数);零漂:小于 1×10⁻⁹/24h;跨漂:±0.5%/24h.化学组分分析仪采用 RT-4 型有机碳元素碳分析仪和 URG 9000S 阴阳离子在线监测仪.能见度监测采用芬兰 VAISALA 公司生产的 FD12 型能见度仪.使用国家计量院生产的 NO、CO 和 SO₂ 标气进行校准,使用 Thermo 49i-PS 型紫外光度计法 O₃ 校准仪对 O₃ 分析仪进行校准.各仪器均两天校准一次,采样管路至少每月清洗一次,保证监测数据的准确性和有效性.PM_{2.5}、SO₂、O₃ 和 NO_x 监测仪输出的为 5min 数据,根据每个小时内 5min 数据的算术平均值求得小时浓度;能见度仪和 PM_{2.5} 化学组分在线监测仪输出的为小时数据.本研究中使用的均为小时数据.

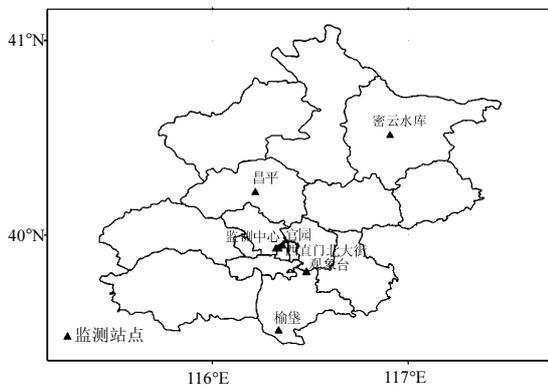


图 1 各监测站点位置

Fig.1 Location of monitoring sites

2 结果与讨论

对于 SO₂、NO₂、O₃、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 等 5 项污染物,将阅兵期间浓度水平与 2013~2015 年间同一时段的浓度进行对比,以探讨阅兵期间空气质量变化.对于 PM_{2.5} 化学组分,将阅兵期间观测值与 2015 年夏季(6~8 月)非阅兵期间浓度水平进行对比分析.将阅兵期间和相邻的非阅兵时段两次相似天气形势下的污染物浓度对比,以测算阅兵减排措施的“净环境效益”,并对 APEC 期间和阅兵期间 O₃ 浓度变化趋势相反的现象进行了讨论.

2.1 阅兵期间气象条件和污染物浓度水平

将阅兵时段及其相邻的年 8 月 5 日至 9 月 15 日期间分为 3 个阶段,即 S1(8 月 5~19 日)、S2(阅兵期间)和 S3(9 月 4~15 日).表 1 显示了各阶段的气象要素水平,可以看出,阅兵期间北京市北风频率明显高于前后相邻时段,但北风平均风速和温度、相对湿度以及气压等其他气象要素并没有明显有利于其他时段.整体来看,阅兵期间大气扩散条件比前后相邻时段相比略有利.

图 2 显示了 3 个阶段中气象要素和 5 项污染物浓度变化,可以看出,除 O₃ 外,其他 4 项污染物阅兵期间浓度均明显低于前后相邻时段,由于 S3 中温度明显低于 S2,导致其 O₃ 浓度降低,主要是气象因素导致的.S2 中 SO₂、NO₂、O₃、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 平均浓度分别为 2.7、24.2、63.2、27.2 和 19.5 μg/m³,与 S1 和 S3 中平均浓度相比分别降低了 26.0%、31.3%、24.5%、59.0%和 59.4%,PM_{2.5} 的降幅最大,体现了一次源排放和前体物排放同时减排的叠加作用.

表 1 各阶段气象要素水平

Table 1 meteorological factors in the three stages

阶段	北风频率(%)	北风平均风速(m/s)	南风平均风速(m/s)	平均温度(°C)	平均相对湿度(%)	平均气压(hPa)
S1	33.1	1.8	2.0	27.9	63.7	1003.6
S2	65.9	1.8	1.9	25.1	63.7	1006.0
S3	53.8	1.8	1.8	20.7	67.5	1012.2

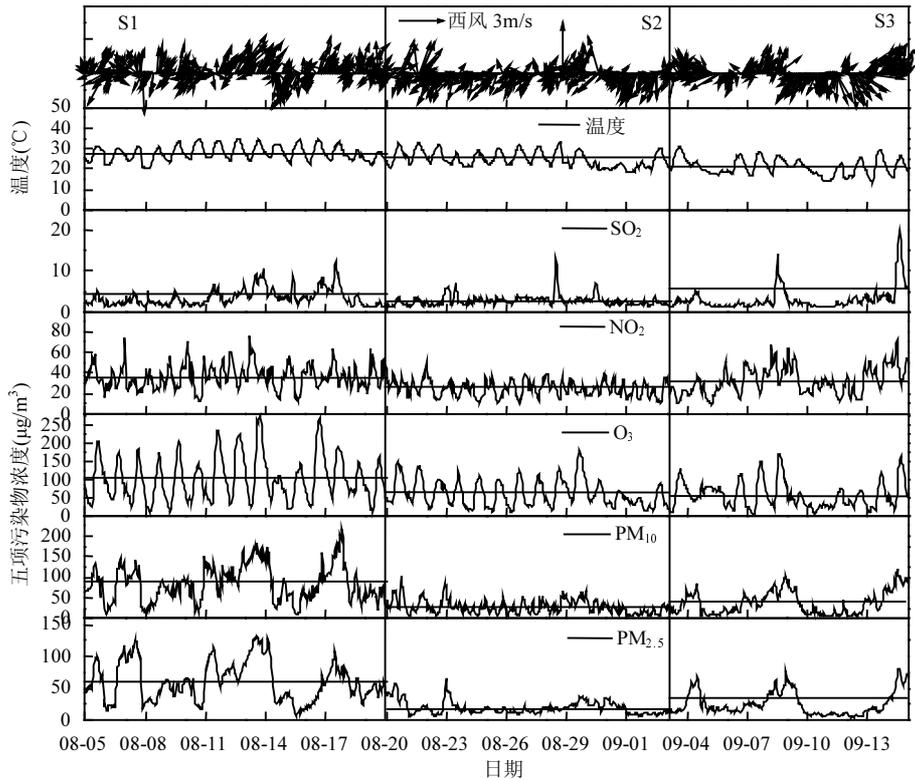


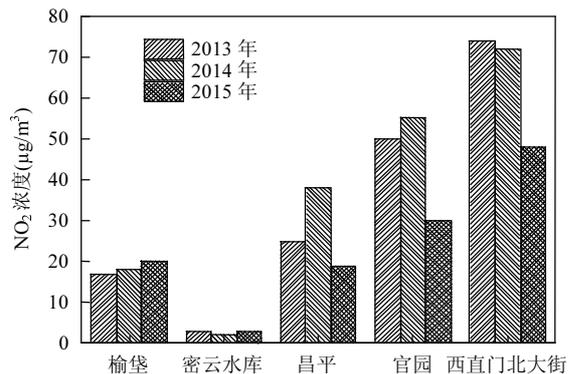
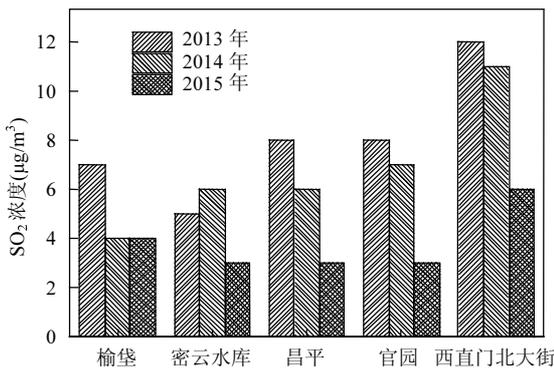
图 2 2015 年 8 月 5 日至 9 月 15 日北京市气象数据及各污染物浓度

Fig.2 Meteorological data and concentrations of air pollutants in Beijing during August 5 – September 15, 2015

2.2 各污染物与近两年的比较

图 3 显示了近 3 年阅兵时段 5 项污染物平均浓度.对 SO_2 来说,南部的榆垓站的降幅最小,与 2013 年和 2014 年平均浓度相比降低了 27.3%,城区的官园站降幅最大,达到 60.0%.从各站点浓度水平来看,也是城区站最高,体现了夏季 SO_2 区域排放源较少的特征.对 NO_2 来说,榆垓站和密云水库站浓度水平较低,2015 年阅兵期间浓度出现轻微反弹,

其他 3 个站点 NO_2 浓度均表现出明显下降,官园站降幅最大,与 2013 年和 2014 年平均浓度相比降低了 42.9%.对 O_3 来说,榆垓站浓度略有反弹,其他站点浓度降幅也低于其他 4 项污染物的降幅,其中密云水库站浓度降幅最大,为 46.5%. PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的整体降幅明显高于其他 3 项污染物,所有站点均达到 50% 以上, PM_{10} 降幅最大的为昌平站,达到 66.4%, $PM_{2.5}$ 降幅最大的为密云水库站,达到 73.0%.



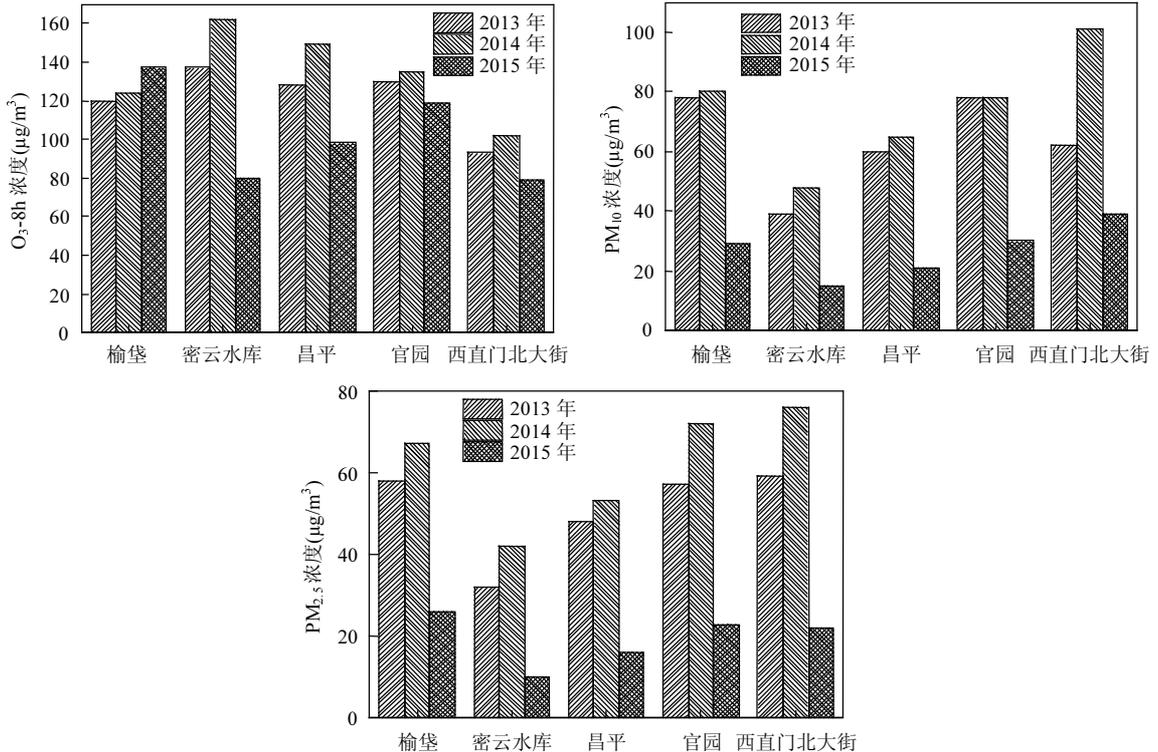


图3 阅兵期间与近2年同时期污染物平均浓度

Fig.3 Average concentrations of air pollutants during the military parade period of 2014 and the same time period of the last two years

2.3 阅兵期间污染物日变化规律分析

官园站位于北京市城区市委党校内,受区域传输以及交通污染排放等特殊因素的影响相对较小,更能代表北京市的平均水平。图4显示了阅兵期间和夏季非阅兵期间(2015-06-01~2015-08-19)官园监测站的各污染物日变化规律的对比。 SO_2 日变化呈单峰型曲线,峰值出现在上午10:00~11:00,与 SO_2 全年的日变化规律一致^[9]。阅兵期间日变化浓度明显低于非阅兵时段,降幅最大的出现在上午的峰值时段。 NO_2 日变化呈双峰型分布,第1个峰值出现在交通早高峰时段,主要是由机动车排放引起的;第2个峰值出现在夜间00:00左右,由交通晚高峰的排放叠加夜间边界层高度降低的“挤压效应”共同导致的^[10]。阅兵期间后半夜和白天时段 NO_2 浓度明显低于非阅兵时段,前半夜2个时段的 NO_2 浓度接近。 O_3 日变化呈单峰型曲线,白天阅兵时段浓度明显低于非阅兵时段,夜间2个时段的浓度较为接近。 PM_{10} 和

$\text{PM}_{2.5}$ 的日变化规律呈波浪型曲线,阅兵期间浓度明显低于非阅兵期间,浓度降幅在白天时段更为明显。

值得注意的是,APEC活动期间,由于减排措施的实施,导致北京市 O_3 浓度出现上升,而本次活动保障期间,并未出现 O_3 浓度上升的现象,可能的原因将在下文开展讨论。

2.4 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分分析

图5和图6展示了阅兵期间和夏季非阅兵期间的 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分浓度水平和占比。从绝对浓度来看,非阅兵期间组分浓度最高的前4位依次是 SO_4^{2-} ($11.8\mu\text{g}/\text{m}^3$)、 NO_3^- ($10.6\mu\text{g}/\text{m}^3$)、 OC ($10.3\mu\text{g}/\text{m}^3$)和 NH_4^+ ($6.8\mu\text{g}/\text{m}^3$)。阅兵期间前4位依次是 OC ($6.1\mu\text{g}/\text{m}^3$)、 NH_4^+ ($3.8\mu\text{g}/\text{m}^3$)、 SO_4^{2-} ($3.4\mu\text{g}/\text{m}^3$)和 NO_3^- ($2.5\mu\text{g}/\text{m}^3$)。排序发生了明显的变化。从4大主要组分浓度降幅来看,从大到小依次为 NO_3^- (76.2%)、 SO_4^{2-} (70.7%)、 NH_4^+ (44.1%)和 OC (40.6%)。 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的巨大

降幅反映了阅兵期间机动车和工业排放管控措施的环境效益.从各组分占比来看,非阅兵期间 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 OC 占比比较接近,均为 25%左右;

阅兵期间 OC 占比达到 34.6%,明显高于其他组分, NH_4^+ 占比上升了 35.4%, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 占比分别下降了 29.1%和 42.7%.

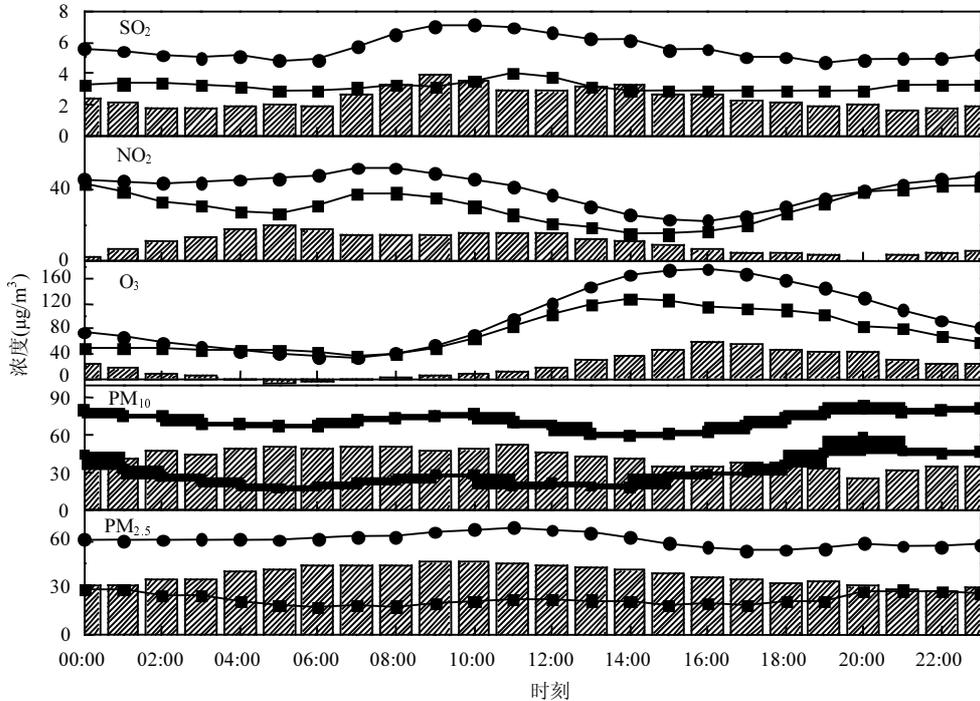


图 4 5 项常规污染物在 2015 年阅兵期间和夏季非阅兵期间的日变化曲线

Fig.4 Diurnal variation curves of five pollutants during the military parade period and the other time period in summer in 2015

■ 阅兵期间 ● 2015 年夏季非阅兵时段 ▨ 日变化差值

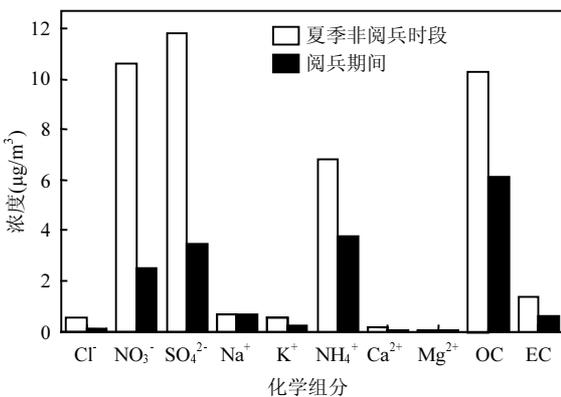


图 5 2015 年阅兵期间和夏季非阅兵时段 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分浓度

Fig.5 Average concentrations of chemical compositions of $\text{PM}_{2.5}$ during the military parade period and the other time period in summer in 2015

OC 中包括一次有机碳(POC)和二次有机碳(SOC),目前对于 SOC 复杂的大气形成过程、凝结/分配机制尚缺乏全面认识,还不具备公认的对 SOC 直接测量的分析手段.除利用烟雾箱在特定的条件下直接模拟其生成外,大气环境中的 SOC 浓度一般采用间接方法进行估算,如 OC 与 EC 浓度比值法、有机分子示踪法以及数值模型预测法^[11].其中 OC 与 EC 浓度比值法最为简单直接,在识别和评估 SOC 污染中应用广泛.OC/EC 比值法认为,污染源之间排放的颗粒物中 OC 与 EC 浓度比值是一个相对稳定的特征值,它与排放源种类有关,当大气颗粒物中 OC/EC 比值超过此值时,表示有 SOC 形成.根据这一理论,Castro 等^[12]提出 SOC 的计算方法:

$$\text{SOC} = \text{TOC} - \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\min} \quad (1)$$

式中: TOC 代表总有机碳, $(OC/EC)_{\min}$ 表示最低 OC/EC 比值, 本研究根据此公式计算了 OC 中 SOC 的比例, 在夏季非阅兵期间和阅兵期间的比例分别为 72.3% 和 57.6%, 即使采取了大规模的减排措施后, OC 中二次生成的组分仍超过 50%, VOCs 向 OC 的二次转化可能是阅兵期间 OC 浓度仍相对较高的原因。

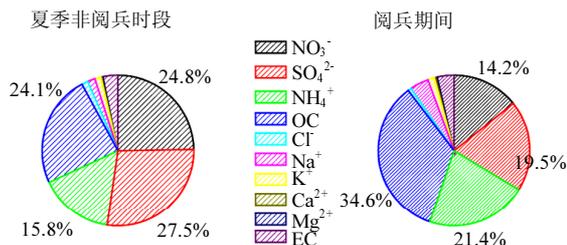


图 6 2015 年阅兵期间和夏季非阅兵时段 $PM_{2.5}$ 化学组分占比

Fig.6 Proportions of chemical compositions of $PM_{2.5}$ during the military parade period and the other time period in summer in 2015

2.5 减排措施的“净环境效益”测算

由于北京市正在实施《北京市 2013~2017 年清洁空气行动计划》等大气污染物排放量控制措施, 因此近 2 年的大气污染物排放量基数并不相同, 气象条件也不可能完全一致. 因此, 阅兵期间污染物浓度与往年同期的对比可以在一定程度上反映减排措施的环境效益, 但并不能反映出其“净环境效益”. 参照 Zhang 等^[5]和 Wang 等^[13]的评估方法, 对阅兵期间的天气系统进行分类, 然后与相邻的时间段内相似天气系统下的污染物浓度进行对比, 两者的差值被认为阅兵减排措施的“净环境效益”. 由于夏季污染物浓度水平相对较低, 天气系统对污染物浓度变化的影响相对较大, 所以必须严格筛选临近时间段内十分相似的天气系统. 选定时间段及其对应的污染物浓度见表 2, 可以看出, 阅兵期间的减排措施使得 SO_2 、 O_3 、 NO_2 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度分别降低了 50.0%、0.7%、42.1%、45.7% 和 48.6%。

表 2 相似天气形势下污染物浓度对比

Table 2 Comparison of concentrations of air pollutants in similar weather periods

时间段	污染物浓度($\mu g/m^3$)					北京市气象背景描述
	SO_2	O_3	NO_2	PM_{10}	$PM_{2.5}$	
8月4~5日	4.2	106.6	47.0	76.7	51.4	北京市为均压场控制, 东北部朝鲜半岛为低压系统, 西南部华中地区为高压系统, “西南高, 东北低”型气压系统. 平均气温 27.0℃, 平均风速 1.96m/s, 平均相对湿度 61.8%
8月28~29日	2.1	105.9	27.2	41.6	26.4	北京市同样为“西南高, 东北低”型气压系统中间的均压场控制, 平均气温 26.1℃, 平均风速 1.93m/s, 平均相对湿度 59.8%
降幅(%)	50.0	0.7	42.1	45.7	48.6	

2.6 与 APEC 期间对比分析以及 O_3 浓度降低原因讨论

作者^[14]曾对 2014 年 APEC 会议期间空气质量进行分析, 发现与近 5 年同期相比, O_3 浓度上升了 101.8%. 而阅兵期间, O_3 浓度出现明显下降, 甚至在去掉气象条件的影响后, 测算的 O_3 浓度仍略低于相似气象条件下的浓度. APEC 会议在秋末举办, 而阅兵活动在夏末秋初举办, 气象条件差异较大, 对 O_3 生成的影响作用也不同^[15-17]. 本研究仅从前体物浓度水平的角度, 对 APEC 期间和阅兵活动期间 O_3 浓度变化进行分析. 图 7 显示了两

大活动期间各污染物浓度水平, 由于气象条件有利于 O_3 生成, 所以阅兵期间 O_3 浓度明显高于 APEC 期间, 其他污染物浓度均为阅兵期间明显低于 APEC 期间。

当 NO_2 浓度水平较低时, 影响 O_3 生成的主要是 NO_2 浓度, 此时为 NO_x 控制区; 当 NO_2 浓度水平较高且不能被完全消耗时, 影响 O_3 生成的主要是 VOCs 浓度, 此时过高的 NO_2 浓度反而限制 O_3 生成, 此时为 VOCs 控制区^[18-19]. 之前的研究^[20-21]多表明, 北京市城区和近郊区 O_3 生成为 VOCs 控制区, 那么造成 APEC 期间 O_3 浓度升高而阅兵期

间 O_3 浓度降低的可能原因是:(1)若两大活动中 O_3 控制区都没变,则 APEC 期间区域 VOCs 减排量明显小于 NO_x 减排量,而阅兵活动期间区域 VOCs 减排量明显高于 NO_x 减排量;(2)阅兵期间 O_3 生成已经变为 NO_x 控制区,则 NO_2 浓度降低会带来 O_3 浓度降低,而 APEC 期间仍为 VOCs 控制区,则 NO_2 浓度降低导致 O_3 浓度升高,那么北京市划分 O_3 前体物控制区的 NO_2 阈值将介于阅兵期间平均 NO_2 浓度($29.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)和 APEC 期间平均 NO_2 浓度($53.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)之间,这一阈值对于指导北京市以及区域的 O_3 前体物控制政策具有重要的意义.由于本研究并未同步观测 VOCs,另外国家并未公布重大活动保障期间具体减排方案以及实施力度,所以这两个原因也无从验证.不过由此可得出 O_3 污染控制措施的建议为:加大区域 VOCs 减排力度,使其减排量远大于 NO_x 减排量,或者加大区域 NO_x 减排力度,但必须保证区域 NO_2 浓度降至能改变 O_3 生成前体物控制区的阈值以下.

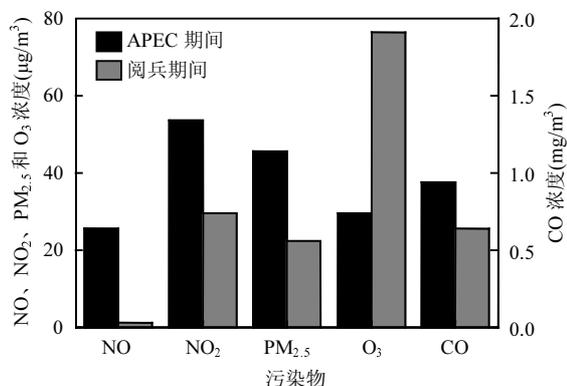


图7 APEC 期间和阅兵期间各污染物浓度水平

Fig.7 Concentration levels of air pollutants during the APEC period and the military parade period

Liu 等^[22]使用卫星反演了 APEC 和阅兵期间 O_3 及前体物浓度,研究发现,阅兵期间京津冀区域 O_3 生成变为 NO_x 控制区,而 APEC 期间为 NO_x 和 VOCs 混合控制区,阅兵期间由于污染控制得当,没有来自周边的区域输送,本地减排使 NO_2 下降达到了控制的阈值,从而使得 O_3 浓度也同时下降,而 APEC 期间对周边区域的控制以及 NO_2 浓

度的下降并未达到有效控制的阈值,该研究结果与笔者分析的第二种原因相似.类似于 APEC 和阅兵这种能够在京津冀及周边七省市采取大规模减排措施的重大活动在国内较为罕见,因此提供了绝佳的分析污染物减排量和环境浓度变化之间非线性关系的实验机会,对今后污染物控制措施的制订也具有重要的指导意义.

3 结论

3.1 从气象条件来看,阅兵期间大气扩散条件比前后相邻时段相比略有利.阅兵期间 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 平均浓度分别为 2.7、24.2、63.2、27.2 和 $19.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,与阅兵前后时段相比分别降低了 26.0%、31.3%、24.5%、59.0% 和 59.4%,与近 2 年同比多数站点污染物浓度也明显降低.

3.2 从日变化来看,阅兵期间 SO_2 日变化浓度明显低于非阅兵时段,降幅最大的出现在上午的峰值时段.阅兵期间后半夜和白天时段 NO_2 浓度明显低于非阅兵时段,前半夜 2 个时段的 NO_2 浓度接近.阅兵期间白天时段 O_3 浓度明显低于非阅兵时段,夜间 2 个时段的浓度较为接近.阅兵期间 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 日变化浓度明显低于非阅兵期间,浓度降幅在白天时段更为明显.

3.3 从 $PM_{2.5}$ 化学组分来看,非阅兵期间组分浓度最高的前 4 位依次是 SO_4^{2-} ($11.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、 NO_3^- ($10.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、OC ($10.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 和 NH_4^+ ($6.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$),阅兵期间前 4 位依次是 OC ($6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、 NH_4^+ ($3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、 SO_4^{2-} ($3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 和 NO_3^- ($2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).从组分占比来看,非阅兵期间 SO_4^{2-} 占比最高,阅兵期间 OC 占比最高.

3.4 通过与相邻时段中相似天气形势下污染物浓度的对比测算了减排措施的“净环境效益”,发现阅兵期间的减排措施使得 SO_2 、 O_3 、 NO_2 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度分别降低了 50.0%、0.7%、42.1%、45.7% 和 48.6%,并对 APEC 期间和阅兵期间 O_3 浓度变化不同的原因进行了讨论.

参考文献:

- [1] HJ 633-2012 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行) [S]

- [2] 康志明,桂海林,王继康,等.2015年北京“阅兵蓝”特征及成因探讨[J].中国环境科学,2016,36(11):3227-3236.
- [3] 赵辉,郑有飞,徐静馨,等.大阅兵期间北京市大气质量改善效果评估[J].中国环境科学,2016,36(10):2881-2889.
- [4] Wang Y, Hao J, Mcelroy M B, et al. Ozone air quality during the 2008 Beijing Olympics: effectiveness of emission restrictions [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2009,9(2):5237-5251.
- [5] Zhang X Y, Wang Y Q, Lin W L, et al. Changes of Atmospheric Compositions and Optical Property over Beijing: 2008 Olympic Monitoring Campaign [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009,90(11):1633.
- [6] 孔茜,吴焯,杨柳,等.奥运期间北京典型交通环境气态污染物特征及人体吸入剂量[J].环境科学学报,2010,2:281-286.
- [7] 王占山,李云婷,张大伟,等.2014年APEC会议期间北京市空气质量分析[J].环境科学学报,2016,2:675-683.
- [8] 张霖琳,薛荔栋,吕怡兵,等.APEC会期5个城市空气细颗粒物中重金属健康风险评估[J].环境化学,2015,6:1218-1220.
- [9] 王占山,李云婷,孙峰,等.2014年10月上旬北京市大气重污染分析[J].中国环境科学,2015,35(6):1654-1663.
- [10] 王占山,张大伟,李云婷,等.北京市夏季不同O₃和PM_{2.5}污染状况研究[J].环境科学,2016,3:807-815.
- [11] 郑玫,闫才青,李小滢,等.二次有机气溶胶估算方法研究进展[J].中国环境科学,2014,34(3):555-564.
- [12] Castro L M, Pio C A, Harrison R M, et al. Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 1999,33(17):2771-2781.
- [13] Wang Z, Li Y, Chen T, et al. Science-Policy Interplay: Improvement of Air Quality from 2008 to 2014 in Beijing and the Scientific Approach to Achieve APEC Blue [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016,97(4):553-559.
- [14] Wang Z, Li Y, Chen T, et al. Changes in atmospheric composition during 2014 APEC conference in Beijing [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015,120(24).
- [15] Wang T, Xie S. Assessment of traffic-related air pollution in the urban streets before and during the 2008 Beijing Olympic Games traffic control period [J]. *Atmospheric Environment*, 2009,43(35):5682-5690.
- [16] Wang X, Westerdahl D, Chen L C, et al. Evaluating the air quality impacts of the 2008 Beijing Olympic Games: On-road emission factors and black carbon profiles [J]. *Atmospheric Environment*, 2009,43(30):4535-4543.
- [17] Tang G, Zhu X, Hu B, et al. Impact of emission controls on air quality in Beijing during APEC 2014: lidar ceilometer observations [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015,15(21):12667-12680.
- [18] Wang Z, Li Y, Chen T, et al. Ground-level ozone in urban Beijing over a 1-year period: Temporal variations and relationship to atmospheric oxidation [J]. *Atmospheric Research*, 2015,164-165:110-117.
- [19] Wang Z, Zhang D, Li X, et al. Multi-Method Observation and Numerical Simulation of a PM_{2.5} Pollution Episode in Beijing in October, 2014 [J]. *Aerosol & Air Quality Research*, 2016,16.
- [20] 聂滕,李璇,王雪松,等.北京市夏季臭氧前体物控制区的分布特征[J].北京大学学报(自然科学版),2014,(3):557-564.
- [21] 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,(6):973-980.
- [22] Liu H, Liu C, Xie Z, et al. A paradox for air pollution controlling in China revealed by “APEC Blue” and “Parade Blue” [J]. *Scientific Reports*, 2016,6:34408.

作者简介: 王占山(1987-),男,山东潍坊人,工程师,硕士,主要从事大气环境研究与模拟及空气质量预报预警研究.发表论文40余篇.