

奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析

张菊, 欧阳志云*, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 利用城市生态系统研究站对北京市奥运前后(2008年6~9月)大气中细颗粒物($PM_{2.5}$)进行连续监测, 获得不同阶段 $PM_{2.5}$ 日平均浓度的动态特征, 分析气象因素、人为控制管理措施对颗粒物浓度的影响。结果表明, 近北五环的生态中心站点(RCEES)颗粒物日均浓度平均值为 $0.067 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 奥运期间的颗粒物浓度($0.060 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)比奥运前期($0.081 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)减少了约26%。而位于南二环市中心的教学植物园站点(JX)颗粒物浓度平均含量为 $0.078 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, JX站点奥运期间的颗粒物浓度($0.069 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)比奥运前期($0.095 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)减少了约27%。各个阶段 $PM_{2.5}$ 的日变化都基本呈现双峰态势。第一个峰值出现在08:00~10:00左右, RCEES站点颗粒物浓度为 $0.068 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, JX站点浓度值为 $0.089 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 另一个峰值出现在晚20:00~22:00左右, RCEES和JX站点颗粒物浓度为 $0.079 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.083 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 这主要与上班交通高峰导致的尾气排放污染和道路扬尘污染等有关。研究气象参数发现奥运期间与奥运前期气象条件无显著差异, 属于高温高湿风力不大的典型北京夏季天气条件。奥运期间颗粒物浓度与温度呈显著正相关($P < 0.01$), 而与风速、相对湿度及降水相关性不显著($P > 0.05$)。而连续多年大气污染综合治理措施和奥运空气质量保障措施的实施, 产生了显著环境效益。在自然因素相差不大的条件下, 人为控制因素对奥运期间颗粒物的下降起到主导作用。

关键词: 颗粒物; 北京; 奥运会; 气象条件; 日变化特征

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2512-07

Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics

ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, WANG Xiao-ke, REN Yu-fen, SONG Wen-zhi

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Two city ecosystem research stations were selected for continuous monitoring of atmospheric fine particulate matter ($PM_{2.5}$) concentration from June to September 2008, when the Beijing Olympic Games was held. The relationship between meteorological factors, artificial control management measures and $PM_{2.5}$ dynamic characteristics were analyzed. The results showed that the daily average concentration of $PM_{2.5}$ at RCEES Station, which is near the 5th North Ring, was $0.067 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ during the study period, and the particle concentration during the Olympic Games was $0.060 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, which was decreased by about 26% compared with the content before the Olympic Games ($0.081 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). As for JX Station located in the 2th South Ring, its daily average concentration of $PM_{2.5}$ was $0.078 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Similar to RCEES Station, $PM_{2.5}$ average content during the Olympic Games ($0.069 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) was 27% lower compared with the content before the Olympic Games ($0.095 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Two peaks could be found when daily distribution of $PM_{2.5}$ was displayed, one appeared between 08:00 and 10:00 (the average content for RCEES and JX were 0.068 and $0.089 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively), and the other appeared at 20:00-22:00, which could be attributed to traffic emission and road dust pollution, especially the emission from the growing number of cars in rush hours. Meteorological condition during the whole period was typical in summer in Beijing with both high temperature and humidity. Correlation analysis revealed that the concentrations of $PM_{2.5}$ had a positive correlation with the air temperature ($P < 0.01$), while it had no significant relationship with wind speed, relative humidity or precipitation ($P > 0.05$). Our monitoring results suggested that the artificial air pollution control strategies were effective measures for air pollution control during 2008 Beijing Olympic Game.

Key words: particulate matters; Beijing City; The Olympic Games; meteorological conditions; daily dynamic characteristics

空气是城市生态系统的重要组成部分。随着经济社会的发展和城市化进程的加快, 空气污染成为世界上许多国家大城市都面临的重要环境问题^[1-4]。与世界上其他城市相比, 作为第29届奥林匹克运动会举办城市的北京, 是一个迅速发展的城市, 同时也是世界上深受空气污染困扰的城市之一^[5-8]。在奥运会举办前的2005~2007年里, 北京

地区生产总值增长了2 000多亿元, 年增长率均超过10%^[9]。与此同时, 北京市人口增加约95万人, 能源消费总量增长了约10%, 机动车保有量超过300

收稿日期: 2011-04-24; 修订日期: 2013-01-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030744)

作者简介: 张菊(1980~), 女, 博士, 主要研究方向为城市生态系统环境空气质量, E-mail: zhang_ju@mails.gucas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

万辆. 快速的城市化进程和能源消耗的大量增加给北京市大气污染防治带来较大压力.

自 1998 年起, 北京市实施了一系列阶段性大气污染防治措施, 区域空气质量得到了明显改善. 市区空气中主要污染物 SO_2 、 NO_2 和 CO 的年均浓度值达到国家标准. 然而, 上述措施对可吸入颗粒物成效甚微. 颗粒物已成为北京市环境空气质量的首要污染物. 2007 年北京市可吸入颗粒物的年均浓度为 $0.148 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 接近国家标准 1.5 倍^[10]. 与欧洲、北美城市以及国内其他大城市相比, 北京的环境空气质量仍然相对较差^[11-13], 且呈现复合型 and 压缩型污染特征.

为兑现绿色奥运的承诺, 保证奥运期间北京市空气质量优良, 北京市在奥运期间特别实施了包括机动车单双号限行、重污染企业限产减排、暂停土石方工程、错峰上下班等空气质量保障措施. 分析奥运期间污染物的动态变化, 对比奥运前期污染物特征的改变, 分析人为控制因素与环境变化之间的关系, 将有助于理解北京空气污染物的变化特征, 以期为今后北京乃至全国其他城市的空气污染控制和空气质量改善提供科学决策依据.

1 材料与方法

1.1 研究点位

北京市作为全国的政治、经济和文化中心, 工业贡献相对较少. 近年来, 由于奥运会的申办和举办, 一些大型工业源也逐步被迁出城市. 因此可认为工业源对北京市的污染影响减小. 而其他人为源, 如生活源、汽车尾气与道路尘源、建筑尘源等占据了污染源相对的主要部分. 为了研究多种源的实际复合影响, 布设了 2 个监测站点(图 1). 生态中心监测点位(记为“RCEES”)位于北五环海淀区双清路上, 距离奥林匹克公园 3 km. 该监测点距地面约 12 m. 监测点附近有多个居民小区和外地来京人员聚居区. 监测点附近 5 km 内有建筑工地, 但是奥运期间停止施工. 教学植物园监测点位(记为“JX”)位于北京市中心的东城区(原崇文区)南二环, 该监测点距地面约 4.5 m, 周边有公园、居民区. 附近 200 m 内有工地施工, 但是奥运期间停止施工.

1.2 研究方法

使用配备 $\text{PM}_{2.5}$ 采样头的 R&P TEOM 1400a 振荡天平法颗粒物分析仪对 $\text{PM}_{2.5}$ 进行 24 h 连续在线监测. 每个监测点各有一套监测仪器. 每个站点都

分别配有气象站搜集对应的 24 h 气象数据.

监测时段从 2008 年 6 月 20 日开始, 至 2008 年 9 月 20 日结束. 研究中将这一时段分为 2 个阶段. 2008 年 6 月 20 日~7 月 19 日, 即奥运前的一个月, 作为奥运前期(P1); 2008 年 7 月 20 日~9 月 20 日, 即奥运举办期间, 作为奥运期间(P2).

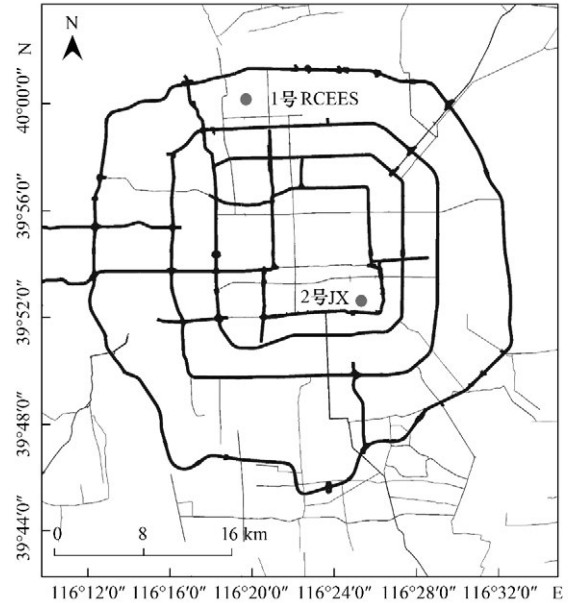


图 1 监测点位示意

Fig. 1 Sketch map of air quality monitoring stations

2 结果与分析

2.1 颗粒物浓度动态变化特征

观测期间两个监测点位颗粒物浓度日均值波动明显, 且具有类似的变化趋势(图 2). 无论是 RCEES 站点还是 JX 站点, 奥运期间(P2)颗粒物浓度值波动较小、相对稳定, 且基本低于奥运前期(P1)大气中的颗粒物浓度, 可见在奥运会举办期间, 采取交通管制和工厂停工等临时减排措施对大气中颗粒物浓度的下降起到明显的作用. 同时, 在监测初期(6 月 20 日左右)、奥运初期(7 月 23 日左右)、奥运末期(8 月 27 日左右)这几个时间段的日均颗粒物浓度均出现了峰值(超过 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$), 这可能与特定的气候条件有关.

2.2 奥运期间颗粒物质量浓度总体特征与空间差异比较

对奥运期间 2 个站点不同阶段的颗粒物浓度均值进行统计, 结果如表 1 所示. 整个研究期间内(6 月 20 日~9 月 20 日), RCEES 站点颗粒物浓度最小值为 $0.013 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大值为 $0.199 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均值为 $0.067 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 各个阶段浓度均值比较来看,

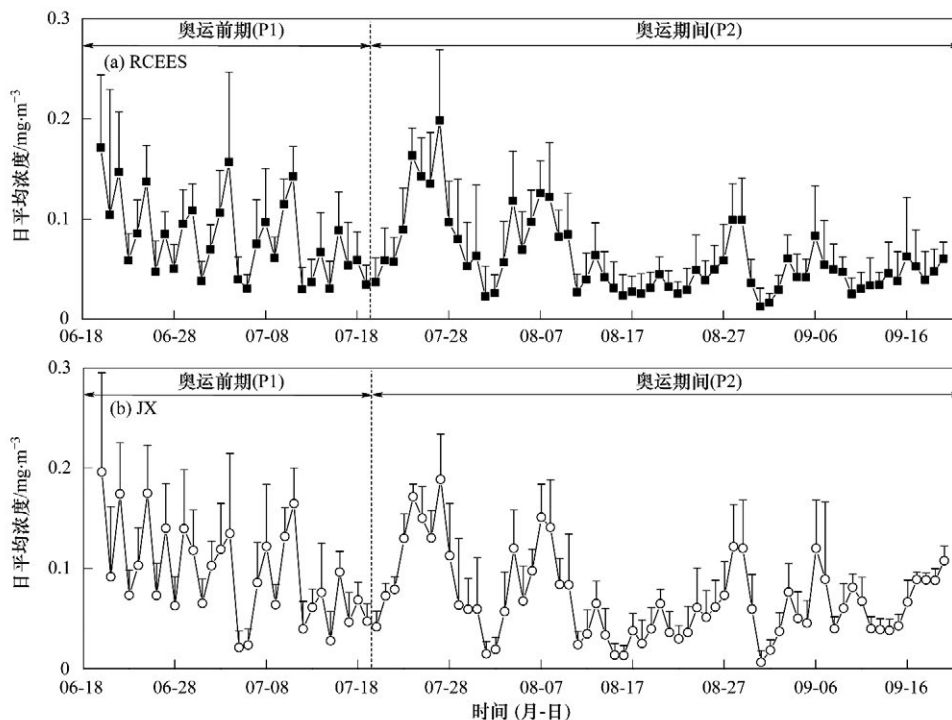


图2 颗粒物日平均统计值变化趋势

Fig. 2 Temporal variation of paticle concentration

RCEES 站点奥运期间的颗粒物浓度 ($0.060 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 比奥运前期 ($0.081 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 减少了约 26%, 说明奥运期间的临时管控措施(交通限行、工厂停工等)对于改善北京环境空气质量初有成效. 在监测期间的 93 d 中, RCEES 站点日均值浓度低于 WHO 指导值 $0.025 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的天数为 3 d, 占整个监测天数的 3.2%; 低于美国 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值国家标准值 $0.035 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的天数为 21 d, 占整个

监测天数的 22.6%. 虽然奥运会举办期间的临时污染控制管理措施对于北京市颗粒物浓度控制和北京环境空气质量改善起到促进作用, 但整体空气优良天数偏低, 表明奥运期间大多数天仍然出现细颗粒物污染. 鉴于 $\text{PM}_{2.5}$ 对人体健康的危害, 我国应尽快颁布 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关环境空气质量标准, 以缩小与目前世界推荐的标准值和发达国家的标准值之间的差距.

表1 颗粒物浓度均值统计

Table 1 Stastics of particulates concentration

| 期间 | RCEES | | JX | |
|----------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| | 最小值~最大值 | 均值±标准差 | 最小值~最大值 | 均值±标准差 |
| 奥运前期(P1) | 0.030~0.171 | 0.081 ± 0.041 | 0.021~0.196 | 0.095 ± 0.048 |
| 奥运期间(P2) | 0.013~0.199 | 0.060 ± 0.038 | 0.006~0.189 | 0.069 ± 0.041 |
| 研究期间 | 0.013~0.199 | 0.067 ± 0.040 | 0.006~0.196 | 0.078 ± 0.045 |

研究期间 JX 站点日均浓度范围为 $0.006 \sim 0.196 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均含量为 $0.078 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. JX 站点奥运期间的颗粒物浓度 ($0.069 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 比奥运前期 ($0.095 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 减少了约 27%. 监测期间的 93 d 中, JX 站点日均值浓度低于 WHO 指导值 $0.025 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的天数为 14 d, 占总监测天数的 15.1%; 低于美国 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值国家标准值 $0.035 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的天数为 9 d, 占总监测天数的 9.7%; 即市中心出现优良空气质量的概率要小于郊区.

对比不同阶段两个站点的颗粒物浓度均值可以

发现, 位于郊区的 RCEES 站点的颗粒物浓度 ($0.067 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 要明显低于市中心的 JX 站点 ($0.078 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). 约 75% 的时期 JX 站点浓度高于 RCEES 站点浓度; 但整体上两站点颗粒物浓度变化趋势较为类似. 这可能与颗粒物的区域性污染特征^[14, 15], 与城市尺度上的变化趋同性有关.

2.3 颗粒物浓度日变化特征

基于高时间分辨率 (TEOM) 的方法, 可以得到 $\text{PM}_{2.5}$ 逐小时的质量浓度均值统计曲线, 为分析不同时期颗粒物浓度日变化特征提供了方便. 各个阶段

PM_{2.5} 浓度日变化都基本呈现双峰态势(图 3)。以图 3(c) 研究期间两点日变化曲线为例,第一个峰值出现在 08:00 ~ 10:00 左右,RCEES 站点颗粒物浓度为 0.068 mg·m⁻³,JX 站点浓度值为 0.089 mg·m⁻³,其原因可能与市民出行早高峰有关。随后,浓度逐渐降低,在 14:00 ~ 16:00 左右有极小值。在夜幕降临及 18:00 后,颗粒物浓度逐渐升高,直至 20:00 ~ 22:00 左右达到第 2 个峰值,此时 RCEES 站点颗粒物浓度为 0.079 mg·m⁻³,JX 站点浓度值为 0.083 mg·m⁻³。这可能是由于夜间受逆温层影响不利于

颗粒物扩散、引起积累效应,以及与北京夜间允许大车过境造成较多的尾气排放污染和道路扬尘污染等有关。接着大气 PM_{2.5} 浓度又逐渐降低,到第 2 d 05:00 时出现最低值。

就不同阶段来看,奥运前期的颗粒物双峰态势及变化趋势明显[图 3(a)],而在奥运期间两个站点的颗粒物浓度变化平缓[图 3(b)],在 0.060 mg·m⁻³ 上下波动,说明此阶段的污染源控制措施对颗粒物浓度的控制有一定的帮助,其平缓波动可能与当天的气象状况有关。

3 讨论

城市生态系统是自然生态系统的一部分,与自然生态系统一样受到自然因素的影响。城市生态系统又与一般纯自然生态系统不同,有其自身的特点。城市生态系统中的主体是人及其改造的自然生态环境和建造的城市生态环境。这种自然-经济-社会复合生态系统受自然因素和人为因素耦合影响,在整个系统中,相比其他纯自然生态系统而言,人为因素的影响范围更广,影响程度更深,影响效果更突出。

气象条件是影响城市生态环境的重要自然要素^[16,17]。Wise 等^[18] 研究就发现气象条件的变化影响美国西南部 20% ~ 50% 的颗粒物浓度的变化;研究证明制造业的发展对颗粒物有显著影响^[19]。影响城市生态环境的人为要素主要是人为污染源的排放和相应的控制措施^[20-23]。北京奥运会的举办是在典型城市生态系统中进行的典型人为活动。奥运期间的北京市空气质量受到自然条件和典型人为为控制的影响。

3.1 自然气象条件对北京市大气颗粒物浓度特征的影响

地面气象因素(如降雨等)影响大气颗粒物的积累、扩散和清除过程,从而对颗粒物的浓度产生重要影响。北京城区夏季光化学反应活跃,大气氧化性强,有利于二次离子如硫酸盐、硝酸盐和铵盐等的生成,容易造成细颗粒物的污染。加之夏季多高温高湿,风力不大,若无显著降水以助湿沉降,对污染物的扩散并不十分有利,容易产生污染物的积累,颗粒物浓度也难以降低。根据监测结果,奥运期间,北京的平均风速约为 1.5 m·s⁻¹,约 95% 的时间风力在 2 级及以下。平均温度约为 24.3℃,约 26% 的时间温度在 25℃ 以上。平均湿度约为 67%,约 14% 的时间相对湿度在 80% 以上(图 4)。

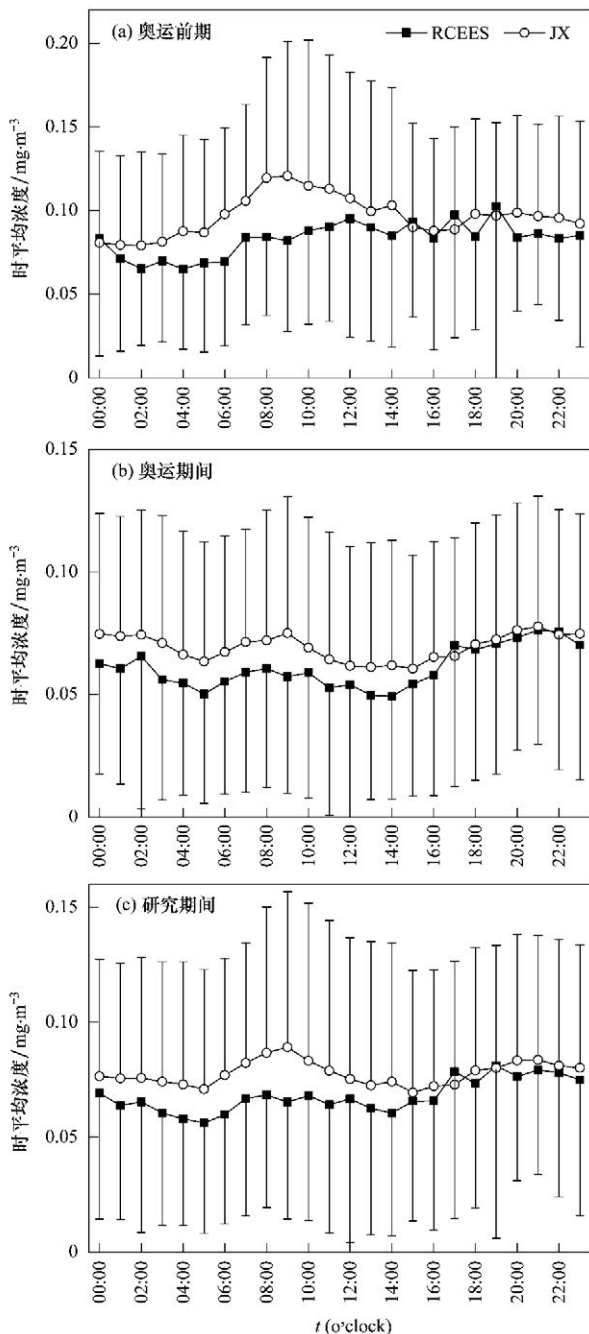


图 3 奥运时期 PM_{2.5} 日浓度统计日变化曲线

Fig. 3 Daily dynamics of PM_{2.5} during the Beijing Olympics Games

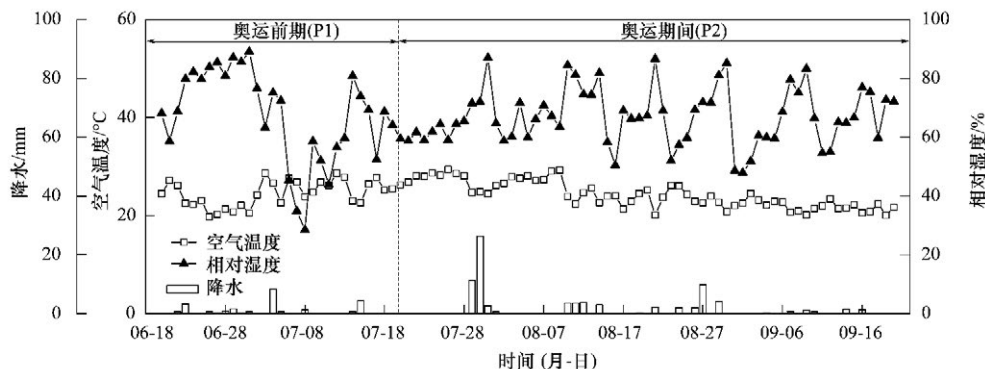


图4 北京奥运期间气象参数日平均统计值变化趋势

Fig. 4 Temporal variation of meteorological parameters

根据监测结果检验,奥运期间(P2)与奥运前期(P1)相比,风速、温度、相对湿度均无显著差异.对颗粒物浓度与自然气象条件的关系进行简单相关性分析(表2),得出在排除其他因素影响情况下,奥运期间以及整个研究期间的颗粒物浓度与温度呈显著正相关($P < 0.01$),而与风速、相对湿度及降水等相关性不佳($P > 0.05$).由此推断,在短期气象条件较为恒定的情况下,奥运期间颗粒物浓度比之奥运前期有约26%的下降,或可归功于绿色奥运举措的实施.

表2 颗粒物浓度与气象参数简单相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation coefficient between particle concentration and meteorological variables

| 气象参数 | 阶段 | 统计个数 | JX | RCEES |
|------|------|----------|----------|----------|
| 风速 | 奥运前期 | $n = 31$ | -0.29 | -0.199 |
| | 奥运期间 | $n = 62$ | 0.16 | 0.233 |
| | 研究期间 | $n = 93$ | 0.035 | 0.115 |
| 温度 | 奥运前期 | $n = 31$ | -0.59 | 0.119 |
| | 奥运期间 | $n = 62$ | 0.455 ** | 0.600 ** |
| | 研究期间 | $n = 93$ | 0.278 ** | 0.436 ** |
| 湿度 | 奥运前期 | $n = 31$ | 0.07 | -0.034 |
| | 奥运期间 | $n = 62$ | 0.142 | 0.124 |
| | 研究期间 | $n = 93$ | 0.109 | 0.056 |
| 降水 | 奥运前期 | $n = 31$ | 0.019 | 0.164 |
| | 奥运期间 | $n = 62$ | -0.071 | -0.017 |
| | 研究期间 | $n = 93$ | -0.066 | -0.001 |

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3.2 人为举措对北京市大气颗粒物浓度的影响

从1998年以来,北京市在防治煤烟型污染、机动车污染、工业污染、扬尘污染、生态保护和建设等方面,实施了14个阶段、200多项措施的阶段性控制大气污染措施,空气质量有明显改善^[24].根据北京市环境状况公报提供的数据来看,2007年与1998年相比,北京市大气环境中可吸入颗粒物年均浓度下降了17.8%,全年空气质量达到二级和好于

二级的天数由100 d增加到246 d,增长了40个百分点.奥运会前的这些综合治理措施为保证北京奥运期间环境空气质量达到承诺的要求打下了一定基础.

大气颗粒物的主要来源包括化石燃料燃烧、机动车尾气排放、工业生产、建筑施工、道路扬尘、生物质燃烧、二次颗粒物的生成等^[25,26].奥运期间实行了针对颗粒物污染源头的严格的空气质量保障措施.在前期综合治理措施的基础上,还实行了奥运会及残奥会期间临时减排措施.北京及其周边共6个省区市同时采取行动.在天气条件相对相差不大的情况下,奥运期间颗粒物浓度比奥运前期约下降26%,与积极的防治措施有关.

从2005~2008年,北京市机动车保有量持续上升,至2008年已达到320多万辆.其中“黄标车”约30余万辆,占机动车保有量的10%,但其污染比较严重,其排放占到了机动车排放总量的50%.由于奥运前综合措施的治理,在机动车保有量逐年上升的同时,北京市大气颗粒物的浓度却有下降.奥运期间实行机动车单双号限行、黄标车禁行,减少了约一半机动车,机动车污染物排放总量减少63%.根据监测结果,这一时段颗粒物浓度约有26%的下降幅度.在奥运前的综合治理措施中,已经对北京市的烟尘和粉尘排放控制起到了明显效果.在奥运期间更是执行了严格的燃煤污染控制和工业污染控制措施.奥运期间19家重点排污企业和4家燃煤电厂,采取压缩产量、调整运行方式、加强污染设施运行管理等措施,在确保达标基础上,减排30%.并从2008年7月1日起执行世界上最严格的燃煤锅炉排放标准限值.为控制工业污染,150多家重污染企业停产减产限产.这使得奥运期间烟尘和粉尘的排放量大大减少,对颗粒物浓度的下降有重要影

响。此外,奥运期间城区工地停止土石方工程和混凝土浇注工程,对减少施工扬尘、建筑扬尘起到了重要作用。机关单位、商场、居民实行了错峰上下班措施和公交出行等绿色出行方式,进一步减少了颗粒物的来源和积累。

奥运期间 $PM_{2.5}$ 质量浓度的日均值变化与常规的北京空气污染物日变化过程保持一致,颗粒物质量浓度呈现双峰的现象[图 3(c)],虽与气象条件有关,但汽车尾气排放也是极为重要的因素之一,上下班、上下学等交通运输高峰时段的高车流量带来了较高的尾气排放,从而可能对浓度高峰的出现起了很大的贡献。

气象结果研究表明,奥运期间的天气条件与正常的北京夏季天气条件无显著性差异,在这种条件下,奥运期间的颗粒物质量浓度与奥运之前相比有了显著的降低(表 1),RCEES 站点奥运期间的颗粒物浓度减少了约 26%,JX 站点奥运期间的颗粒物浓度减少了约 27%。表明奥运期间颗粒物浓度减少主要归功于人为污染源的控制和管理,即奥运期间实施的临时空气污染管控措施具有非常明显的效果。但与此同时,北京市出现优良空气质量的比例较小,也说明北京市空气污染控制压力依然重大。

总的来说,相关措施的实施使得从 8 月 8~24 日奥运会召开的 17 d 里,北京市空气质量全部达到二级以上,而且有 10 个一级天,在 12 d 的残奥会举办期间,有 2 个一级天、10 个二级天,创造了 10 a 来历史最好纪录,实现了北京奥组委“绿色奥运”的承诺,为北京市政府今后制订污染控制措施提供了科学的思路和依据。

4 结论

(1) 研究期间 RCEES 站点日均平均值为 $0.067 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,奥运期间的颗粒物浓度($0.060 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)比奥运前期($0.081 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)减少了约 26%。JX 站点颗粒物浓度平均含量为 $0.078 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,JX 站点奥运期间的颗粒物浓度($0.069 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)比奥运前期($0.095 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)减少了约 27%。

(2) 各个阶段 $PM_{2.5}$ 的日变化都基本呈现双峰态势。第一个峰值出现在 08:00~10:00 左右,RCEES 站点颗粒物浓度为 $0.068 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,JX 站点浓度值为 $0.089 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在晚 20:00~22:00 左右达到第 2 个峰值,RCEES 和 JX 站点颗粒物浓度为 $0.079 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.083 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,这主要与尾气排放污染和道路扬尘污染等有关。

(3) 奥运期间与奥运前期气象条件无显著差异,属于高温高湿风力不大的典型北京夏季天气条件。奥运期间颗粒物浓度与温度显著正相关($P < 0.01$),而与风速、相对湿度及降水相关性不佳。

(4) 连续多年大气污染综合治理措施和奥运空气质量保障措施的实施,产生了显著环境效益。在自然因素相差不大的条件下,人为控制因素对奥运期间颗粒物下降起到主导作用。

参考文献:

- [1] Fenger J. Air pollution in the last 50 years—from local to global [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(1): 13–22.
- [2] Baldasano J M, Valera E, Jiménez-Gurrero P. Air quality data from large cities [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **307**(1–3): 141–165.
- [3] Qin Y Q, Kim E, Hopke P K. The concentrations and sources of $PM_{2.5}$ in metropolitan New York City [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **10**(S2): 312–332.
- [4] Querol X, Alastuey A, Moreno T, et al. Spatial and temporal variations in airborne particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) across Spain 1999–2005 [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(17): 3964–3979.
- [5] Fang M, Chan C K, Yao X H. Managing air quality in a rapidly developing nation: China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(1): 79–86.
- [6] World Bank. World Development Indicators 2007 [EB/OL]. http://siteresources.worldbank.org/DATASTATISTICS/Resources/table3_13.pdf 2007-04-01.
- [7] Oanh N T K, Upadhyay N, Zhuang Y H, et al. Particulate air pollution in six Asian cities: spatial and temporal distributions, and associated sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(18): 3367–3380.
- [8] 李金娟,肖正辉,杨书申,等.北京和部分奥运城市可吸入颗粒物污染特征分析[J].*环境科学动态*,2004,(3):26–28.
- [9] 北京市统计局.北京市统计年鉴[EB/OL].<http://www.bjstats.gov.cn> 2008.
- [10] 北京市环境保护局.2007年北京市环境状况公报[R].北京:北京市环境保护局,2007.
- [11] WHO. WHO Air Quality Guidelines Global Update 2005: Report on a Working Group Meeting [R]. Bonn, Germany, 2005.
- [12] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1–42.
- [13] 黄成,王冰妍,陈长虹,等.上海市大气质量与国内外城市的比较研究[J].*能源研究与信息*,2003,**19**(3):165–171.
- [14] Shao M, Tang X Y, Zhang Y H, et al. City clusters in China: air and surface water pollution [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, **4**(7): 353–361.
- [15] 任阵海,万本太,苏福庆,等.当前我国大气环境质量的几个特征[J].*环境科学研究*,2004,**17**(1):1–6.
- [16] 王淑英,张小玲.北京地区 PM_{10} 污染的气象特征[J].*应用气象学报*,2002,**13**(S1):177–184.

- [17] 田刚,樊守彬,黄玉虎,等. 风速对人为扬尘源 PM_{10} 排放浓度和强度的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2983-2986.
- [18] Wise E K, Comrie A C. Meteorologically adjusted urban air quality trends in the Southwestern United States [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(16): 2969-2980.
- [19] Kahn M E. Particulate pollution trends in the United States [J]. Regional Science and Urban Economics, 1997, **27**(1): 87-107.
- [20] 杨勇杰,王跃思,温天雪,等. 采暖期开始前后北京大气颗粒物中化学元素特征及来源[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3275-3279.
- [21] 温梦婷,胡敏. 北京餐饮源排放细粒子理化特征及其对有机颗粒物的贡献[J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2620-2625.
- [22] 吴丽萍,文科军. 机动车行驶过程道路扬尘影响因素试验研究[J]. 环境科学与管理, 2008, **32**(12): 34-36, 80.
- [23] Stephen G, Tharit I, Liu Q. Exploring variability in pedestrian exposure to fine particulates ($PM_{2.5}$) along a busy road [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(8): 1665-1676.
- [24] 张菊,苗鸿,欧阳志云,等. 近20年北京市城近郊区环境空气质量变化及其影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(11): 1886-1892.
- [25] Song Y, Tang X Y, Xie S D, *et al.* Source apportionment of $PM_{2.5}$ in Beijing in 2004 [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **146**(1-2): 124-130.
- [26] Kim E, Hopke P K. Source characterization of ambient fine particles at multiple sites in the Seattle area [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(24): 6047-6056.