

潘小乐, 王自发, 王喜全, 等. 2010. 2008北京奥运会前后城区黑碳气溶胶浓度的变化特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 616–623.
Pan Xiaole, Wang Zifa, Wang Xiquan, et al. 2010. Characteristics of urban black carbon concentration around 2008 Beijing Olympic Games [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 616–623.

2008 北京奥运会前后城区黑碳气溶胶浓度的变化特征

潘小乐^{1,2,3} 王自发^{1,2} 王喜全^{1,2} 董华斌^{2,3}
张伟² GBAGUIDI Alex¹ 黄江平^{1,2,3}

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

2 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

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 利用 Model-5012 型黑碳仪观测的大气中黑碳气溶胶的浓度资料, 结合北京城区环保控制措施和气象资料, 分析了 2008 北京奥运会前后和奥运会期间黑碳气溶胶浓度变化的主要影响因子。结果表明, 7 月 20 日前 (北京城区无机动车单双号控制), 大气中黑碳气溶胶的特征浓度为 $3.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 实施机动车单双号控制后至奥运会前 (7 月 20 日至 8 月 7 日), 该特征值增加至 $3.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 奥运会期间 [8 月 8 日 00 时 (北京时间, 下同) 至 24 日 23 时] 城区黑碳气溶胶浓度有明显下降, 为 $2.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 比奥运会前下降了 31%。对同期气象观测数据的分析表明, 奥运会期间北京周边降雨量明显增大, 偏北风出现的频次也从奥运会前的 24.1% 提高至 38.8%。另外, 八达岭高速路健翔桥段的机动车监测数据显示, 奥运会期间进、出北京的机动车流量有所降低, 上下班高峰期机动车流量减少了约 30%, 这也是奥运会期间黑碳气溶胶浓度降低的重要原因。

关键词 黑碳气溶胶 机动车流量控制 气象要素 北京奥运会

文章编号 1006-9585 (2010) 05-0616-08 **中图分类号** P401 **文献标识码** A

Characteristics of Urban Black Carbon Concentration around 2008 Beijing Olympic Games

PAN Xiaole^{1,2,3}, WANG Zifa^{1,2}, WANG Xiquan^{1,2}, DONG Huabin^{2,3}
ZHANG Wei², GBAGUIDI Alex¹, and HUANG Jiangpin^{1,2,3}

1 Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 The State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Black Carbon (BC) concentration at the urban site was measured using Multi-Angle Absorption Photometer (MAAP, Model-5012) around 2008 Beijing Olympic Games, and its temporal variation pattern and controlling factors were investigated according to corresponding meteorological data and traffic controlling policy during and

收稿日期 2009-12-10 收到, 2010-08-15 收到修定稿

资助项目 北京市科委重大项目“北京及近周边区域大气复合污染形成机制及防控措施研究示范”课题“区域大气污染模拟、预测、预警与示范”

作者简介 潘小乐, 男, 1980 年出生, 博士, 主要从事大气化学与大气环境方向研究。E-mail: xlpanelf@gmail.com

after the Olympic Games period. Frequency analysis indicates that BC concentration for peak frequency before implementation of vehicles control policy (before 20 Jul) was $3.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, and it enhanced to $3.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ averagely during 20 Jul to 7 Aug. During the Olympic Games period, BC concentration declined to $2.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 31% lower than the value before the Olympic Games period. According to meteorological data, the increase of rainfall amount and frequency of northerly wind (from 24.1% to 38.8%) might play an important role in the decrease of BC concentration in Beijing urban area. Motor vehicles monitoring data at Jianxiang Bridge of the Badaling Expressway show that the traffic mount has declined by about 30% during the rushing hours of weekday, which might be another possible contribution to the decrease of BC concentration.

Key words black carbon, urban vehicle control implementation, meteorological factors, Beijing Olympic Games

1 引言

黑碳气溶胶是大气气溶胶的重要成分,它是含碳燃料不完全燃烧所释放无定形碳质。在城市地区,工业排放、汽车尾气、生物质燃烧以及居民生活炉灶是大气中黑碳气溶胶的主要来源(汤洁等,1999;秦世广等,2001)。大气中的黑碳颗粒较为稳定,但其表面容易吸附二氧化硫、臭氧、多环芳烃类等有毒物质,随呼吸道进入肺部沉积后损害人体健康。黑碳也可以吸收可见到红外很宽频谱的太阳辐射,具有很强的直接增温效应,对局地大气稳定度甚至大尺度的大气水汽和能量循环有着重要影响(罗云峰和周秀骥,1998;张立盛和石广玉,2001;王自发等,2008;张靖和银燕,2008;张华等,2008)。

我国是能源消耗大国,近几十年经济快速发展使得黑碳排放量大幅增加。城市地区黑碳浓度的增加尤为明显,根据 INTEX-B 提供的 2006 年排放清单,北京地区来自工业排放、居民生活以及交通的黑碳气溶胶分别占总黑碳排放量的 25%、54%和 19%。为确保奥运会期间北京城区空气质量的达标,我国政府采取了严格的污染控制措施,包括周边大型工业企业的强制性关闭、城区机动车限行等措施,这必然会影响城区中黑碳气溶胶浓度,但受到气象因素的协同影响,这些措施在多大程度上改善城区的空气质量还并不十分清楚。本文连续观测了 2008 北京奥运会前后城区不同控制措施下黑碳气溶胶浓度,并结合气象数据分析黑碳气溶胶的变化特征及可能的影响因素。

2 观测试验

2.1 方法与仪器

研究使用 Thermo 公司生产的 Multi Angle Absorption Photometer (MAAP, Model-5012)。该仪器利用黑碳气溶胶对可见光的强吸收特性,光束经过气溶胶样品以后的衰减与纤维膜上黑碳气溶胶的负荷量之间具有一定的线性关系,在获取了光透过滤膜后的衰减量后,就可以根据此线性关系推算出气溶胶中黑碳的浓度,测量腔体内增加了光散射的测量,用于校正颗粒物累积在滤带上后造成的多次散射的影响。其具体性能参数见表 1。

表 1 MAAP 仪器参数设定

Table 1 Parameter setting of MAAP instrument

参数	设定
最小检测限	10 分钟平均 $<0.05 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
滤膜	玻璃纤维 (type GF 10), 长度约 40 m

滤带上测点更换间隔 20%透光率,约 $30 \mu\text{g}$,流量调节偏差小于 1%数据输出串口 RS-232 模拟输出: $0 \sim 20 \text{ mA}$ 或 $0 \sim 10 \text{ V}$,工作温度 $-20 \sim 50^\circ\text{C}$ 。

2.2 观测点及数据处理

观测点位于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院内 (39.97°N , 116.37°E),海拔 60 m,距离院内 325 m 铁塔 50 m。测点北 150 m 为北土城西路,东边 300 m 为八达岭高速路,白天和夜间车流量均较大。黑碳仪放置在移动观测集装箱内,采样口距地面

3.5 m, 采样管采用外径 1/2 英寸碳质防静电管, 长度为 1.5 m, 进气管路的损失可近似忽略不计。

观测期间每 3 h 记录观测点附近的人为活动和天气现象, 观测点周围局地人为活动 (如机动车出入等) 造成的观测数据的不合理波动, 在数据处理过程中将进行甄别后剔除。进气口安装在集装箱侧 1/2 m 处, 特殊的天气类型也会对数据质量造成不利影响, 如大风天气往往会将观测站点周边的泥土杂质卷挟至进气口, 下雨天湿度较大也造成数据的偏差, 此类数据在计算过程中均被去除。此外, 仪器报警 (光强、温度和流量) 时段的数据也进行了剔除, 最后总观测时段 (2008 年 6 月 12 日至 11 月 11 日) 共 13996 条记录数据, 有效数据共 10079 条, 占 72.0%。

3 结果与讨论

3.1 观测时段的划分

按照奥运会前后重要事件点对观测时段进行了划分, 首先取 2008 年 7 月 20 日之前作为第一时段, 7 月 1 日至 7 月 20 日 00 时 (北京时间, 下同), 北京市城区内禁止货运机动车、拖拉机、低速载货汽车等不符合规定排放标准的机动车在市区内行驶, 但未实施车牌尾号实行单号单日、双号双日行驶政策, 该时段记为 T1 时段; 7 月 20 日至 2008 年 8 月 8 日 00 时 (奥运会开幕式当天), 北京市行政区内所有道路的机动车实施单双号控制措施, 该时段记作 T2; 8 月 8 日 00 时至 8 月 24 日 24 时 (第 29 届北京夏季奥运会闭幕式当

日) 为奥运会比赛日, 该时段记为 T3; 此后至 9 月 19 日为残奥会准备和比赛日, 8 月 28 日 00 时开始, 机动车单双号限行仅在五环主路以内道路实施, 而其他奥运会环保措施并没有相应改变, 将该时段记作 T4。观测期间黑碳气溶胶浓度变化特征如图 1 所示。

3.2 黑碳气溶胶浓度频次分布

由 4 个时段黑碳气溶胶浓度频次分布 (见图 2) 可知, 奥运会前后黑碳气溶胶的浓度特征具有明显的差异。T1 时段黑碳气溶胶浓度主要分布在 $2 \sim 6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 对该时段的频次分布进行高斯拟合发现, 其频次峰值对应的黑碳浓度为 $3.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 当实施了机动车单双号限行后, 黑碳浓度频次分布趋于集中, 其中浓度高于 $6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的频次略有增加, 从 T1 时段的 18.1% 增至 T2 时段的 21.6%, 频次峰值对应的黑碳浓度也升高至 $3.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 根据气象资料, 7 月 24~29 日, 8 月 5~7 日, 我国华北地区持续受弱气压场的控制, 持续南风, 而且风速较小, 城区内污染物未能及时从城区清除, 这与黑碳平均浓度增高有密切相关; 奥运会期间 (T3 时段), 黑碳浓度整体有所降低, 频次峰值对应的浓度为 $2.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 与机动车控制前 (T1) 相比下降近 30%, 黑碳浓度高于 $6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的时段降低至 3.0%。根据中国气象局 3 小时实时气象数据, 奥运会时段偏北风 (北东北—西西北) 出现的频率比奥运会前有所增加, 气象条件的改变对城区空气质量的改善起重要作用 (具体见 3.4.2)。残奥会期间 (T4 时段), 黑碳浓度水平有所回升, 频次峰值对应的浓度为

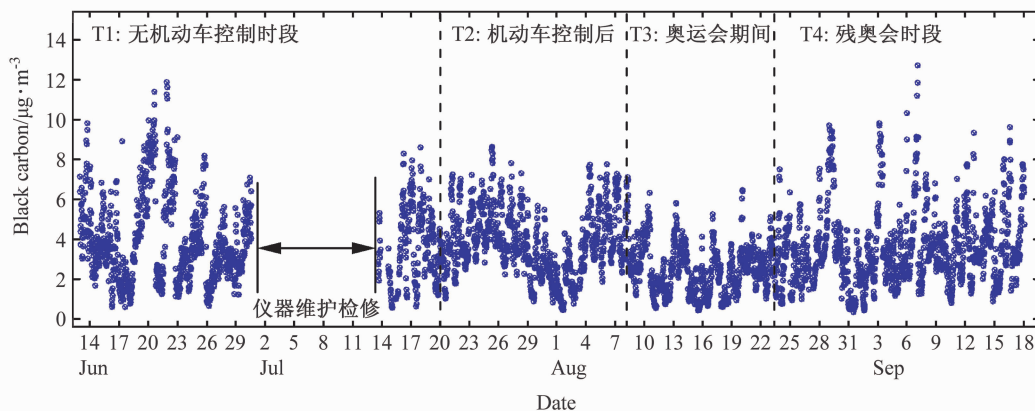


图 1 观测期间黑碳气溶胶浓度的时间序列及观测时段划分

Fig. 1 Temporal variation of black carbon mass concentration during the observation period and classification of different periodicities

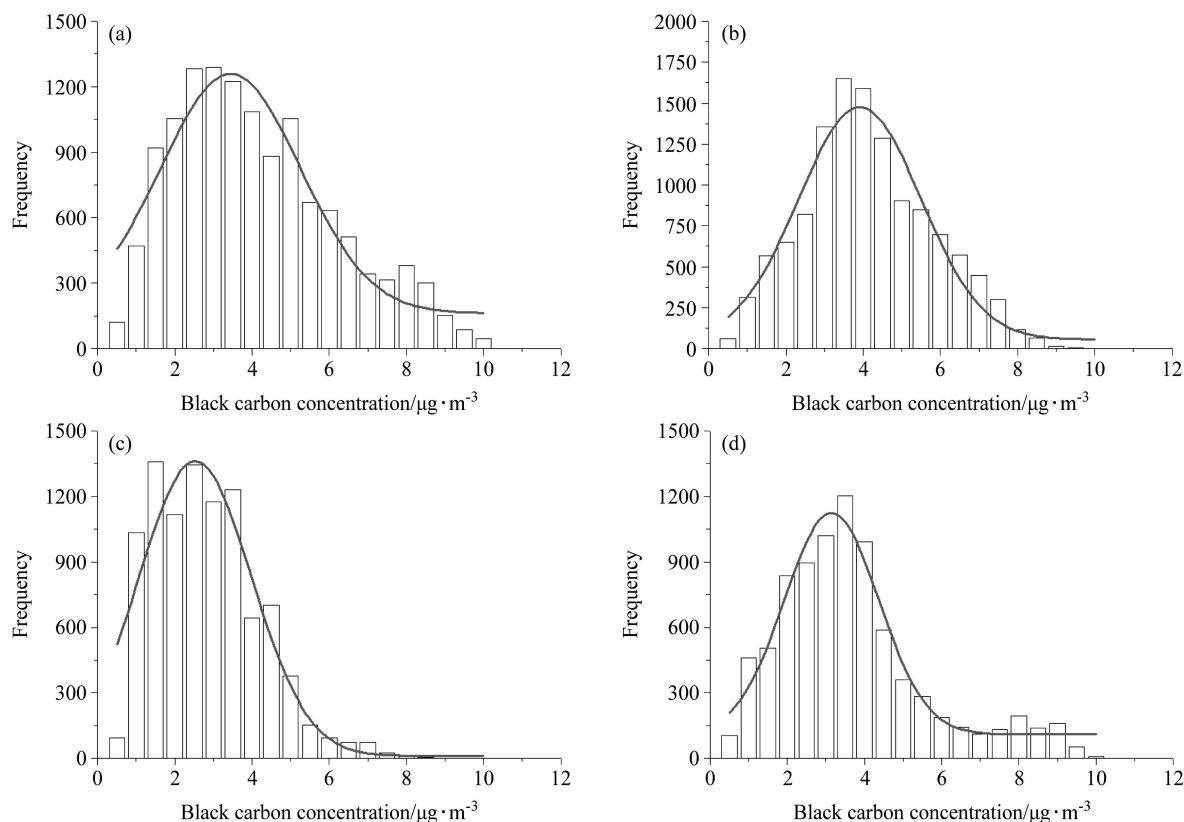


图2 奥运会前后黑碳气溶胶浓度频率统计: (a) T1 时段; (b) T2 时段; (c) T3 时段; (d) T4 时段

Fig. 2 Number frequency statistics of urban black carbon mass concentration around Olympic Games Period: (a) T1; (b) T2; (c) T3; (d) T4

$3.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 比 T3 时段提高了 21.4%, 黑碳浓度高于 $6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的时段也上升至 13.4%。虽然该时段环保的措施没有改变, 但是随着气温的降低, 城区内居民采暖设施逐渐运行以及城区周边的生物质燃烧的增加可能是黑碳浓度上升的原因之一。

3.3 黑碳气溶胶日变化特征

图 3 给出了 T1 (7 月 14~19 日)、T2 (7 月 20 日~8 月 7 日)、T3 (8 月 8~24 日) 和 T4 (8 月 25 日~9 月 19 日) 4 个时段黑碳气溶胶的平均日变化特征。从图中可以看出, 除 T1 时段外, 其它各时段城区内黑碳气溶胶小时平均浓度均在 $5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下。T1 时段黑碳浓度日变化呈明显的单峰型, 其最大值出现在 03 时至 06 时之间, 最低值出现在 12 时, 平均为 $2.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; T2 时段其最大值出现在 09 时左右, 随着白天辐射增强、大气热对流活动的加剧, 近地层黑碳浓度逐渐降低至最低, 15 时平均为 $2.72 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。值得注意的是, 尽管在 T2 时段北京市行政区内道路进

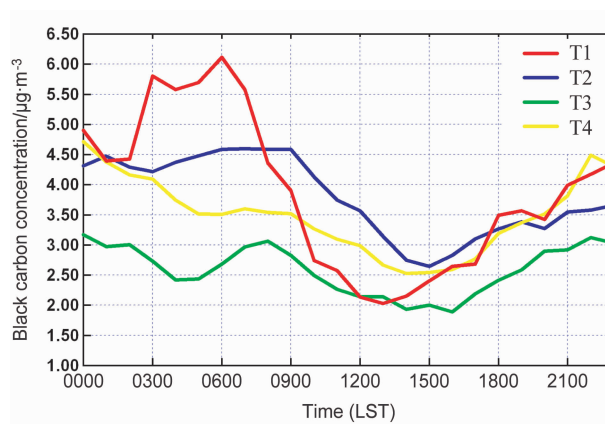


图3 T1、T2、T3、T4 时段黑碳气溶胶平均日变化特征

Fig. 3 The diurnal variation of black carbon mass concentration for T1, T2, T3 and T4 periods

行了机动车单双号的控制, 但 09 时至 17 时黑碳浓度反而略高于机动车控制前, 这种现象与大的气象背景条件有关, 根据地面天气形势可知, 该时段北京地区位于两高之间低压带的前缘, 来自北方的冷高压系统位于内蒙地区, 正缓慢向东移

动, 500 hPa 高空处, 由于受到副高系统北抬的影响, 低压系统向东移动缓慢, 会造成在华北地区持续的静稳天气, 这种天气形势非常不利于污染物的扩散, 导致污染物累积。

奥运会期间 (T3 时段) 黑碳浓度整体平均最小, 而且呈双峰型分布, 07 时至 09 时出现一个小峰值, 平均为 $3.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 该峰值可能与八达岭高速每日上班早高峰有关; 最低值出现在 15 时, 平均为 $1.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 随着气温的下降和边界层热对流活动的减弱, 近地层黑碳浓度有逐渐累积的趋势, 21 时至次日 01 时达到第二个峰值, 平均在 $3.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 该时段大型货运车辆进京排放也会增加城区内的污染程度。与 T1 和 T2 时段相比, 白天黑碳浓度分别下降了 59.8%、27.6% (见图 3), 然而上班早高峰时刻 (08 时), 奥运会期间仅比机动车控制前下降了 18.4%。

残奥会期间 (T4) 黑碳气溶胶日间平均浓度较 T3 时段有整体性的抬升, 其日变化特征逐渐由双峰型转变为“V”型 (见图 3 中黄线所示), 黑碳浓度最大值出现在夜间 23 时, 平均在 $4.0 \sim 4.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 白天 15 时浓度最低, 为 $2.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 该值略低于 T2 时段, 而明显高于 T3 时段。该现象可能与来自北京周边生物质燃烧引起的区域黑碳背景浓度提高有关, 另外, 该时段夜间气温较低, 边界层高度及大气稳定度均有所增加, 黑碳浓度夜间平均升高了 $1.14 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 而日间

平均升高了 $0.74 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

3.4 影响因素分析

3.4.1 城区机动车变化

根据《北京市人民代表大会常务委员会关于为顺利筹备和成功举办奥运会进一步加强法治环境建设的决议》, 北京市在 2008 年 7 月 1 日至 9 月 20 日期间, 对外省、区、市进京及本市机动车采取临时交通管制措施, 即从 7 月 1 日 00 时至 9 月 20 日 24 时, 禁止货运机动车、拖拉机、低速载货汽车、三轮汽车、摩托车、危险化学品 (含剧毒化学品) 运输车辆以及不符合规定排放标准 (汽油车须符合国 II 及其以上排放标准、柴油车须符合国 III 及其以上排放标准) 在市区五环内行驶, 另外, 在 7 月 20 日 00 时至 9 月 20 日 24 时市区内实行按车牌尾号实行单号单日、双号双日行驶等控制措施。

八达岭高速路是市区北部居民聚集区的主要进出京通道, 每日上下班高峰期间车流量较大, 观测点距离八达岭高速路仅不到 300 m 的距离, 因此易受到该路段上机动车流量波动的影响。T1、T2、T3 和 T4 时段八达岭高速健翔桥段车流量的平均日变化特征见图 4 所示, 从 7 月 20 日实施机动车单双号控制以来, 八达岭高速路上的机动车流量有明显的下降, 尤其是在上下班高峰期 (08 时和 16 时左右) 降低尤为明显, 上班高峰时段每小时车流量减少了近 1500 辆 (见图 4a), 占

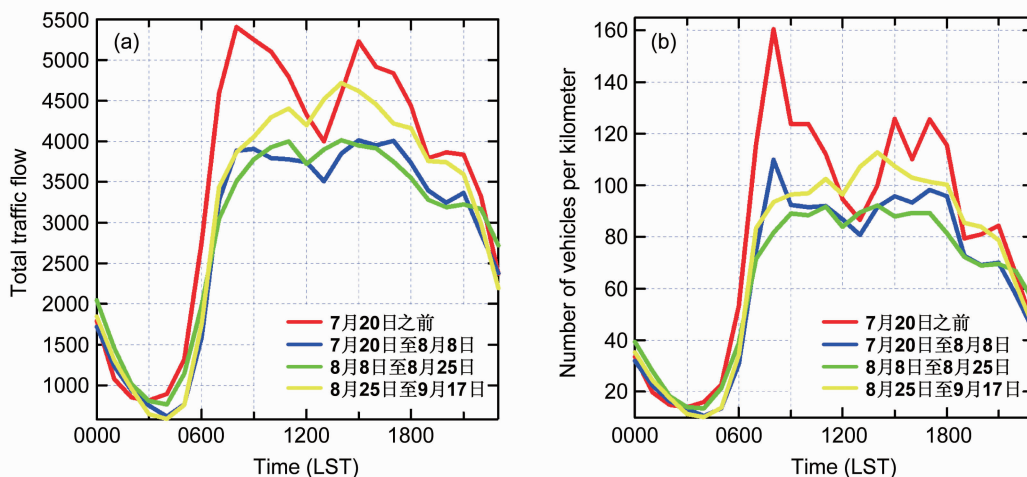


图 4 奥运会前后八达岭高速健翔桥段机动车流量日变化特征: (a) 总机动车量; (b) 每公里机动车量

Fig. 4 Diurnal variations of (a) traffic flow and (b) number of vehicles per-kilometer at Jianxiang Bridge of Badaling Expressway during Beijing Olympic Games

总车流量的 1/3, 该时刻每公里路段上行驶的平均机动车数目 (车流量/平均车速) 也从单双号控制前的 160 辆降低至 100 辆左右 (见图 4b); 下班高峰期车流量减少了近 1000 辆, 同比减少了近 20%, 每公里路段上行驶的平均机动车数目减少了约 30 辆 (图 4b)。

从黑碳浓度平均日变化特征来看, 市区内机动车的消减有利于大气中黑碳气溶胶浓度的降低, 但由于受城市边界气象条件的影响, 机动车流量减少对黑碳浓度降低的贡献却有明显不同。例如, T2 时段 08 时机动车流量大幅下降, 但黑碳浓度甚至比控制前 (T1 时段) 有所增加, 从环保控制措施来看, 这两个时段工业排放、居民生活排放等状况基本保持不变, 因此气象条件在该过程中起主导作用。

3.4.2 气象因子

以上分析可知, 气象因素对奥运会期间空气质量改善方面起重要作用, 根据国家气象局 3 小时实况气象数据, 统计了测点奥运会前 (6 月 12 日~8 月 7 日) 和奥运会期间 (8 月 8~24 日) 北京北部地区 (昌平站, 站点号: 54499) 降水量、及测点风向和气温数据的变化特征, 见表 2。奥运会前后云量变化整体变化不大, 但是降水却存在明显的差异, 8 月 8 日前降水总量为 159.7 mm, 而奥运会期间降水总量为 86.8 mm, 日平均降水量增加了一倍, 残奥会期间, 总降水量较低, 为 49.7 mm, 降水量的增大有利于大气中污染物及黑碳气溶胶的清除。此外, 对两个时段的风向风速也有明显的改变, 奥运会前北京多为东南风, 风速平均在 $2\sim6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 占整个观测时段的 40.9%, 有利于来自南部的污染物向北京城区的输送和堆积。相比而言, 来自偏北的气流占 24.1%。在奥运会期间北京盛行东北风的频次明显增加, 偏北风的频次占观测时段的 38.8%, 而

东南风的频次下降至 30.6%。从气温来看, 奥运会前后日间气温平均降低了 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其在一定程度上将影响近地层热对流状况, 因此残奥会期间黑碳浓度水平的整体抬升可能与之有一定关系。

3.4.3 周边源的影响

测点污染物浓度水平易受到风速和风向的影响, 此处给出了奥运会前后黑碳浓度的玫瑰图, 它代表不同风向上黑碳浓度的频次分布, 具体见图 5。在奥运会开幕前 (8 月 8 日), 偏南风为测点主导风向 (占该时段的 40%左右), 黑碳浓度主要分布在 $2.0\sim6.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内, 而偏北风盛行时黑碳浓度通常小于 $4\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 可见北京南部污染区域对北京城区的潜在影响; 奥运会期间, 测点风向有明显改变, 偏东北风 (ENE-NEN 扇区) 的频次明显增大, 约为 35%, 西南风频次减少至 25%以下。

图 6 为四个时段各个风向上平均黑碳浓度的分布情况。从图中可以看出, 奥运会前黑碳浓度大于 $8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时段主要在 EN-E 扇区, 该扇区对城区重污染过程贡献较大; 浓度在 $6\sim8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时段在 NEN-WS 扇区均有分布; 黑碳浓度小于 $2.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 在各个方向上差别不大。奥运会期间黑碳浓度高于 $6.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 频次明显减少, 黑碳浓度在 $4.0\sim6.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时段的气团仍然来自 EN-WS 扇区。残奥会期间, 各个风向上平均黑碳浓度均有所增加, 黑碳浓度大于 $8.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的频次与奥运会前和奥运会期间相比, 增加非常明显, 而且分布在 EN-WS 较大扇区范围内, 这可能与周边生物质燃烧量的增大以及周边机动车限行范围放松 (北京五环以外道路机动车取消单双号出行限制) 有关, 此外, 因气温降低造成城市边界层状况的变化的影响也不能忽视。

奥运会期间城市空气质量的改善与北京局地及周边污染源的减排、气象条件以及人们的出行生活

表 2 奥运会前后气象要素的变化特征
Table 2 Temporal variation of meteorological factors before and during Olympic Games and during Paralympics Games

	总云量平均	降水总量/mm	风向	能见度/km	白天平均气温 (07 时~18 时)	黑碳平均浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	数据量
奥运会前	7.28	159.7	东东南	8.89	29.5	3.90	166
奥运会期间	7.04	86.8	东东南—北东北	14.82	27.9	2.58	49
残奥会期间	5.66	49.7	东北	14.50	24.1	3.50	53

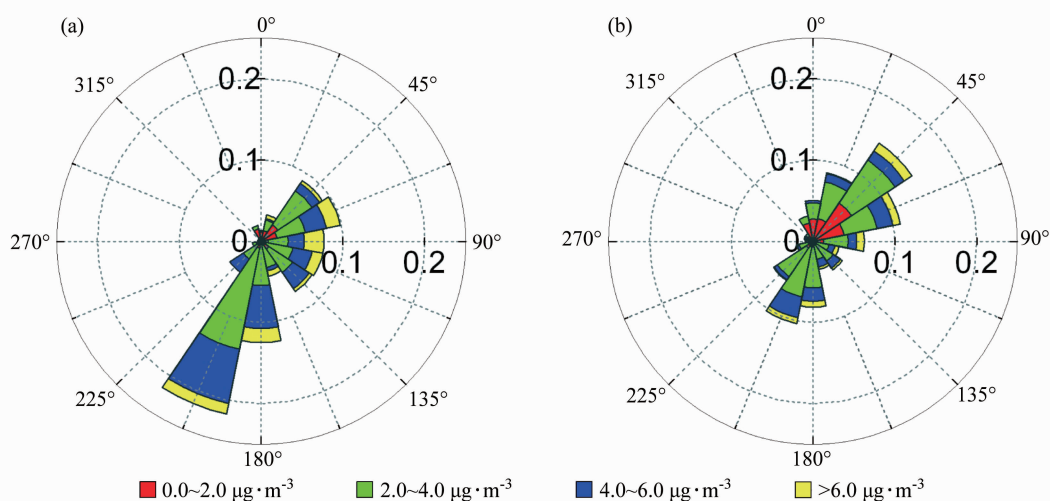


图5 (a) 奥运会前和 (b) 奥运会期间黑碳浓度玫瑰图

Fig. 5 Rose diagram of black carbon mass concentration (a) before and (b) during Beijing Olympic Games

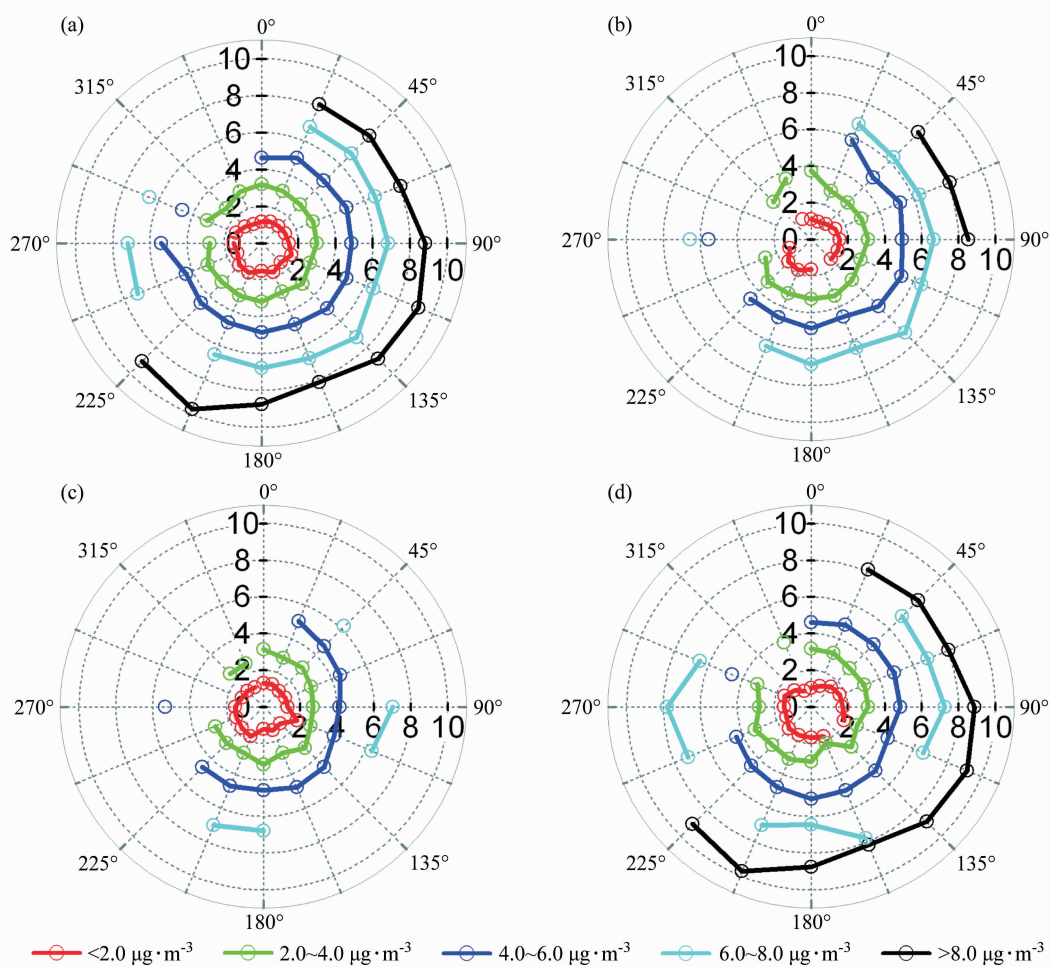


图6 奥运会前和奥运会期间黑碳浓度与风向的关系: (a) T1 时段; (b) T2 时段; (c) T3 时段; (d) T4 时段

Fig. 6 Relationship between average black carbon mass concentration and wind direction for (a) T1, (b) T2, (c) T3, (d) T4 periods

习惯均密切相关, 政策调控在强制污染减排、机动车限行等重大措施方面具有一定成效, 这种调控措施往往可以进行初步量化研究, 但政策出台后对人们心理以及生活习惯上的某些改变很难量化, 然而这些因素对城区污染排放状况可能具有一定影响。

4 结语

本研究在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院内, 使用 Model-5012 型黑碳仪观测奥运会前后 (2008 年 6~11 月) 黑碳气溶胶的浓度变化情况。结果表明, 除城区内的机动车控制措施、气象条件等因素的变化在奥运会期间北京市区空气质量的改善起重要作用。机动车单双号控制前 (T1 时段)、采取机动车单双号控制措施后奥运会前 (T2 时段)、奥运会期间 (T3 时段) 黑碳浓度特征浓度分别为 $3.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $3.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $2.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, T3 期间黑碳浓度比 T1 时段降低了 31%。健翔桥段机动车流量数据表明, 奥运会期间机动车早晚高峰车流量比奥运会前有不同程度的减少 (20%~30%之间), 北京周边降雨量提高了一倍, 偏北风出现的频率也提高了 14.7%, 这些因素均在改善北京奥运会期间空气质量方面起重要作用。

参考文献 (References)

罗云峰, 周秀骥. 1998. 大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状 [J]. 地球科学进展, 13 (6): 572-581. Luo Yunfeng, Zhou

Xiuj. 1998. Advances in the study of atmospheric aerosol radiative forcing and climate change [J]. Advanced in Earth Science (in Chinese), 13 (6): 572-581.

秦世广, 汤洁, 温玉璞. 2001. 黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义 [J]. 气象, 27 (11): 3-7. Qin Shiguang, Tang Jie, Wen Yupu. 2001. Black carbon and its importance in climate change studies [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 27 (11): 3-7.

汤洁, 温玉璞, 周凌晞, 等. 1999. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究 [J]. 应用气象学报, 10 (2): 160-170. Tang Jie, Wen Yupu, Zhou Lingxi, et al. 1999. Observational study of black carbon in clean air area of western China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 10 (2): 160-170.

王自发, 庞成明, 朱江, 等. 2008. 大气环境数值模拟研究新进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 987-995. Wang Zifa, Pang Chengming, Zhu Jiang, et al. IAP progress in atmospheric environment modeling research [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 987-995.

张靖, 银燕. 2008. 黑碳气溶胶对我国区域气候影响的数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 31 (6): 852-859. Zhang Jing, Yin Yan. 2008. Numerical simulations of effect of black carbon aerosol on tegional climate in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31 (6): 852-859.

张华, 马井会, 郑有飞. 2008. 黑碳气溶胶辐射强迫全球分布的模拟研究 [J]. 大气科学, 32 (5): 1147-1158. Zhang Hua, Ma Jinghui, Zheng Youfei. 2008. The study of global radiative forcing due to black carbon aerosol [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (5): 1147-1158.

张立盛, 石广玉. 2001. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射特性及辐射强迫的模拟估算 [J]. 大气科学, 25 (2): 231-242. Zhang Lisheng, Shi Guangyu. 2001. The simulation and estimation of radiative properties and radiative forcing due to sulfate and soot aerosols [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (2): 231-242.