基于激光雷达数据的奥运大气污染控制效果评估

杨婷^{①②③}, 王自发^{②*}, 张柏^①, 王喜全^②, 王威^{②③}, GBAGUIDI Alex^②, 龚晏邦^②

① 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 地理遥感信息研究中心, 长春 130012;

② 中国科学院大气物理研究所, 大气边界层物理与大气化学国家重点实验室/竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029;

③ 中国科学院研究生院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: zifawang@mail.iap.ac.cn

2009-05-31 收稿, 2009-10-12 接受

中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-205)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2005CB422205)资助

摘要 为有效评估 2008 年奥运会期间北京本地及周边地区的大气污染控制效果, 利用双波长偏振激光雷达观测数据, 分析研究了奥运会期间北京地区气溶胶消光系数的演变规律. 结果表明: (1) 在气象要素几乎相同的情况下, 2008 年奥运会期间近地面(250 m 以下)消光系数较 2007 年同期下降了 42.3%, 这表明北京本地污染控制措施对改善奥运会期间的空气质量起到了明显的作用. (2) 通过对比分析奥运会前(2008 年 7 月 20 日~8 月 7 日)与奥运会期间(2008 年 8 月 8~24 日)气溶胶消光系数的变化, 发现奥运会期间消光系数日均值在边界层中上层(0.5~1.5 km)减少显著. 为解释此现象, 利用 NAQPMS 模式分别模拟了北京周边地区在奥运会前与奥运期间对北京地区大气污染物的输送状况, 发现 PM₁₀ 的输送量在奥运期间有 36.6% 的削减, 这表明北京周边地区污染控制措施对改善奥运会期间的空气质量也起到了重要作用.

关键词

激光雷达
消光系数
大气污染
污染控制
效果评估
NAQPMS

作为第 29 届夏季奥运会的举办城市, 北京在奥运期间的空气质量成为国际社会、民众、奥运与会人员以及广大媒体关注的焦点. 由于空气质量的改善难以在短期之内实现, 加之北京地区不利于污染物扩散的地理特点, 增加了改善北京地区空气质量的难度. 因此, 自 2001 年 7 月 21 日北京申奥成功开始, 为了兑现“绿色奥运”的承诺, 北京及周边地区采取了一系列措施以改善北京的空气质量, 这些措施包括: 减少和控制工厂污染(增加污染物净化装置), 关闭和搬迁高污染、高耗能、资源浪费企业(首钢及燕山石化等重污染企业的搬迁和减产), 推广采用清洁能源, 提高机动车排放标准(黄标车的淘汰和治理)等^[1,2]. 《2007 年联合国环境规划署(UNEP)报告》^[3]对中国在“绿色奥运”中所提出的措施以及前期所开展的工作给予了一定的认可, 但同时北京是否能够完全兑现“绿色奥运”的承诺抱有怀疑的态度. 2008

年奥运期间, 北京空气质量的监测结果证实了北京“绿色奥运”的庄严承诺^[4~7]. 为了进一步改善北京的空气质量, 对奥运期间各项大气污染控制措施的实际效果进行科学评估就具有重要的实际意义.

本文以双波长偏振激光雷达(NIES)观测的气溶胶消光系数为评估变量, 对奥运期间北京本地和周边地区的大气污染控制效果进行了评估.

1 观测方法

观测采用的仪器是日本国立环境研究所研制的双波长(1064 nm, 532 nm)偏振激光雷达(NIES), 该仪器在 532 nm 波长具有偏振测量能力^[8,9]. 该系列仪器已被 Sugimoto 等人成功用于沙尘暴及城市污染气溶胶的监测^[8,10~13]. 该激光雷达采用钕钇(Nd: YAG)激光光源, 可以同时发射波长为 1064 nm 和 532 nm 的相互平行的激光光束, 发射功率分别为 20 mJ/脉冲和

英文版见: Yang T, Wang Z F, Zhang B, et al. Evaluation of the effect of air pollution control during the Beijing 2008 Olympic Games using Lidar data. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-0081-y

30 mJ/脉冲, 脉冲的重复频率都为 10 Hz. 激光束经光束扩束器校准后垂直射向天空; 散射光用直径为 20 cm 的 Schmidt Cassegrain 望远镜接收, 并经分色镜对接收到的激光束进行波长区分, 其中 1064 nm 的激光束采用雪崩光电二极管接收, 532 nm 的激光束进入偏振器后由两个光电倍增管获取偏振信息; 采集到的信号经数字示波器平均整理后, 传输到数据采集计算机. 该激光雷达系统可全天候工作^[8], 已在中国科学院大气物理研究所铁塔分部连续运行近两年. 该仪器可连续探测、反演垂直 6 km 以下大气气溶胶的消光系数, 反演方法采用 Fernald^[14]算法, 其中的 S1 参数选用 50 sr^[13].

中国科学院大气物理研究所铁塔分部(39°58'35"N, 116°22'41"E)位于城区北部, 与奥运主场地的直线距离有 2 km 左右, 其周边的城市结构具有典型的代表性. 自 2008 年 7 月 20 日起北京奥运期间空气质量保障措施全面启动(特别是机动车单双号限行), 因此将 2008 年 7 月 20 日~8 月 24 日(以下简称时段 2)期间观测的数据与 2007 年同期(以下简称时段 1)数据进行了对比, 以评估奥运期间北京本地的大气污染控制效果. 由于北京周边地区是在奥运期间才全面执行奥运污染控制措施的^[4], 因此将奥运期间(2008 年 8 月 8~24 日)的观测数据与奥运会前(2008 年 7 月 20 日~8 月 7 日)的数据进行对比分析, 以评估周边地区奥运期间空气污染控制措施对北京空气质量改善的效果.

2 实验期间气象背景对比

杨东贞等人^[15]指出, 气象因子对气溶胶的浓度分布有很大影响, 气溶胶浓度分布又会直接影响气溶胶的消光系数. 为排除气象因子对评估结果的影响, 本文分别统计分析了 MICAPS 北京站(116°17'E, 39°56'N)在时段 1、2 期间的各气象因子, 结果显示(表 1), 时段 1、2 主导风 I 与 II 风向一致性较好, 风频较为接近; 主导风 III 风频年际变幅不大, 但风向年际差异较大; 时段 1 的平均风速、降水频次都略高于时段 2. 但综合考虑, 时段 1 和时段 2 的风场差别不大.

周丽等人^[16]对北京地区、杨军等人^[17]对西藏泽当地区的相关研究指出, 大气低层风向、风速影响着污染物的传输及扩散过程: 通常风速越大越有利于空气中污染物的扩散, 细粒子浓度会因强湍流扩散作用而显著降低, 消光系数在此时往往呈现低值; 而长时间的微风或静风则会抑制污染物的扩散, 使近地面层的污染物浓度持续增加, 进而可增大消光系数. 本文对样本总数为 395 的风速及消光系数数据进行相关分析, 在置信度为 0.01 的情况下, 风速和消光系数的相关系数为 -0.28, 结果显示了消光系数与风速的负相关特征(图 1). 受北京地区特殊地形的影响, 北京地区消光系数除了受风速影响外还与风向密切相关. 不同风向风速下消光系数的变化如图 2 所示. 由图 2 可见, 消光系数的高值往往发生在盛行南风或者东风的情况下. 徐祥德等人^[18]利用 MODIS 资料对其产生的原因进行了分析, 认为北京向南开口的“马蹄形”地形导致南部周边城市排放源远距离输送的污染物“滞留”, 因而在南风条件下北京的污染物浓度往往较高.

降水也是影响消光系数的重要因子. 降水既可清除大气中的污染物, 又可阻止地面扬尘, 故降水可显著改善空气质量. 时段 1 日均降水量为 4.1 mm, 降水频次为 20, 降水主要集中在 3 次强降水过程: 2007 年 7 月 31 日 2 时、2007 年 8 月 2 日 2 时、2007 年 8 月 12 日 8 时的 6 h 降水量分别为 33 mm, 41 mm, 29 mm. 时段 2 日均降水量为 3.4 mm, 虽然时段 2 日均降水量略低于时段 1, 但时段 2 的降水量分布更为均匀, 降水清除作用持续时间较长.

纵观以上各气象因子, 两时段的气象条件差别不大, 但时段 2 的气象条件稍助于空气质量的改善.

3 观测结果与讨论

3.1 北京本地大气污染控制效果

为对北京本地大气污染控制效果进行评估, 本节分析了近地层气溶胶消光系数的年际日变化趋势, 比较了两者的差异. 近地层(250 m 以下)气溶胶消光系数的日变化特征年际对比如图 3 所示. 时段 1

表 1 北京地面气象站观测 2007 和 2008 年(7 月 20 日~8 月 24 日)气象要素的对比分析

	平均风速 /m·s ⁻¹	主导风 I	主导风 I 风频	主导风 II	主导风 II 风频	主导风 III	主导风 III 风频	日均降水量 /mm	降水记录数 /次
时段 1	1.9	南风	33%	东风	29%	西南风	11%	4.1	22
时段 2	2.1	南风	37%	东风	23%	北风	11%	3.4	30

图1 时段1((a))及时段2((b))消光系数与风速的对比变化

图2 不同风向风速下消光系数的变化

(a) 时段1; (b) 时段2

近地层消光系数的均值为 0.78 km^{-1} , 时段2消光系数的均值为 0.45 km^{-1} , 均值下降了 42.3%; 时段1消光系数的最大值为 1.18 km^{-1} , 最小值为 0.44 km^{-1} , 时段2消光系数的最大值为 0.72 km^{-1} , 最小值为 0.27 km^{-1} . 时段2的消光系数较之时段1在极值和均值方面都有显著下降.

除上述特征外, 两时段内消光系数的日变化趋势大体相同, 都呈单峰型, 峰值一般出现在早晨 7:00~8:00, 谷值出现在午后 14:00~16:00. 这与相关的研究结论相吻合^[19]. 以上现象是多种因素共同作用的结果: 上午 7:00~9:00 是交通流量的高峰期, 各类污染源排放量较大^[19,20], 并且本文的观测点位于城

市高污染背景区域, 受污染源排放影响更为显著^[21]. 另外, 此时段的大气混合层尚未得到充分的发展, 不利于污染物的扩散, 使上午消光系数的峰值较为明显^[20]. 午后, 太阳辐射增强, 大气湍流、水平输送以及垂直扩散能力加强, 加上午后各种污染物的排放量也有所降低, 使消光系数的谷值出现在午后.

为进一步分析不同高度层气溶胶消光系数的年际变化, 本文从 0.1~0.5, 0.5~1.5 和 1.5~4.0 km 三个高度层对消光系数的变化规律进行分析. 不同高度层消光系数日均值的年际对比如图 4 所示, 图 4(a)为时段1, 图 4(b)为时段2. 时段2的消光系数与时段1相比在各高度层都有不同程度的下降, 其中 0.1~0.5 km

图3 时段1及时段2均值消光系数日变化年际对比分析

内消光系数均值与时段1相比下降最多,高达41.3%;0.5~1.5 km高度层下降幅度次之;1.5~4.0 km高度层下降幅度最小。在时段1中,0.1~0.5 km高度层为均值最大层,均值为 0.80 km^{-1} ;次之为0.5~1.5 km高度层,均值达到 0.77 km^{-1} ;均值最小层为1.5~4.0 km,均值为 0.22 km^{-1} 。而在时段2中,0.5~1.5 km高度层为均值最大层,均值为 0.60 km^{-1} ;次之为0.1~0.5 km高度层,均值为 0.47 km^{-1} ;1.5~4 km高度层消光系数均值最小,为 0.18 km^{-1} 。

由此可见,2007年夏季北京城区污染物主要集中在0.1~0.5 km高度层,而在2008年奥运期间,污染物并非集中在近地面,而是集中在0.5~1.5 km高度层,边界层下部气溶胶消光系数年际降幅显著,这表明北京本地的空气质量改善措施起到了良好的效果。

3.2 北京周边地区大气污染控制措施对北京空气质量的改善效果

为研究周边地区大气污染控制措施对北京空气质量的改善效果,本节分别分析了奥运会前与奥运会期间消光系数垂直廓线的年际变化情况(图5)。在奥运会前,年际气溶胶消光系数的显著差异发生在1000 m以下(图5(a)),但在奥运会期间,年际消光系数显著降幅区间可从近地面一直延伸到4000 m的高空(图5(b))。总之,在上述时段内2008年消光系数较2007年都有显著的降低,低层消光系数年际降幅在奥运会前与奥运期间差异不大,而中高空消光系数年际降幅在两时段差异显著。

为深入探求北京周边地区在奥运期间加强控制措施^[19]的效果,本文还从3个不同的高度(高度划分同3.1节)对2008年奥运会前及奥运期间的消光系数进行了比对。如图4(b)所示,0.1~0.5 km高度层气溶胶消光系数的均值在奥运会前及奥运期间都为 0.47 km^{-1} ,由于低层污染物主要来自于本地,这表明在奥运会前和奥运会期间,北京本地对于污染物的控制起到了良好的效果;而在0.5~1.5 km高度层,奥运会前的消光系数均值为 0.80 km^{-1} ,奥运期间的均值为 0.40 km^{-1} ,降幅高达50%;对于1.5~4.0 km高度层,奥运会前的均值为 0.22 km^{-1} ,奥运期间均值为 0.14 km^{-1} ,降幅达到了36.4%。

为探求奥运期间中高空消光系数显著降低的原因,较精确提供北京及周边地区模拟结果,探讨周边

图4 7月20日~8月24日不同高度层消光系数日均值的对比分析

(a) 2007年, (b) 2008年; 圆括号中的值为该层均值, 方括号中分号前后的数值分别代表奥运会前与奥运期间该层消光系数的均值

图5 奥运会前及奥运期间消光系数垂直廓线年际对比
(a) 奥运会前年际对比; (b) 奥运期间年际对比

地区在奥运期间控制措施的效果, 本文选用嵌套网格空气质量模式系统^[22-25](NAQPMS)分别计算了奥运会前及奥运期间周边地区对北京 PM_{10} 的输送量. 本文模式模拟采用三重嵌套方法, 最内层网格覆盖北京及周边地区, 网格分辨率为 9 km, 最大模拟区域覆盖整个东亚, 网格分辨率为 81 km, 为模拟提供背景场. 模式对奥运会前及奥运期间周边地区对北京 PM_{10} 的输送量的模拟结果显示, 在奥运会前, 北京周边地区向北京 PM_{10} 总净输送量为 13.4 t, 而在奥运期间, 总净输送量减少到 8.5 t, 降幅高达 36.6%. 奥运会前及奥运期间最内层嵌套不同地区时均 PM_{10} 浓度分布及 PM_{10} 在该研究区域的输送方向和输送强度如图 6 所示.

高空的污染物主要是来自于周边城市对北京的

输送. 激光雷达消光系数的分析结果和模式的模拟分析均显示了奥运期间周边地区对北京的影响降低. 降低的原因一方面归因于北京周边地区在奥运期间大气污染控制力度的加强, 同时也应看到气象条件中的风向对于输送量降低的贡献.

4 结论

激光雷达是大气气溶胶空间分布的高效探测工具之一. 本文利用激光雷达测量数据结合数值模拟对北京本地及北京周边地区在奥运期间的空气质量控制措施效果进行了评估, 获得如下结果.

(i) 奥运会前及奥运期间, 由于北京市实施了重污染企业的搬迁或关闭、黄标车禁行、机动车限行等严格的空气质量保障方案, 进而在气象要素几乎相同的条件下, 2008 年研究时段近地层消光系数较 2007 年同期下降了 42.3%.

(ii) 奥运期间消光系数垂直廓线的年际对比、奥运期间与奥运会前不同高度层均值变化的对比均显示了奥运期间中上层消光系数的显著降低. 为对该现象进行解释, 本文利用 NAQPMS 模式分别模拟北京周边地区在奥运会前与奥运期间向北京的 PM_{10} 输送量. 模拟结果显示, PM_{10} 的输送量在奥运期间较奥运会前减少了 36.6%, 说明北京周边地区在奥运期间的加强控制措施效果明显.

总之, 与 2007 年同期相比, 北京 2008 年奥运期间的空气质量有了实质性的改善, 其中北京及周边地区在奥运期间所采取的各种控制措施在空气质量的改善方面效果明显, 但气象因素也不可忽略.

图6 2008 年研究时段平均 PM_{10} 小时浓度及 PM_{10} 的输送方向和输送强度
(a) 奥运会前期; (b) 奥运会期间

致谢 感谢 Nobuo Sugimoto 教授在雷达系统的搭建以及数据反演过程中给予的指导。

参考文献

- 1 Beijing Organizing Committee for the Games of the XXIX Olympic Games (BOCOG). Green Olympics in Beijing 2005 Environmental Improvement in Beijing. 2005
- 2 袁佳珺. 北京公布 08 年控制大气污染新措施. 上海安全生产, 2008, 3: 51
- 3 United Nations Environment Programme (UNEP). Beijing Report 2007. 2007
- 4 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. 科学通报, 2009, 54: 299—304
- 5 Wang X, Westerdahl D, Chen C L, et al. Evaluating the air quality impacts of the 2008 Beijing Olympics Games: On-road emission factors and black carbon profiles. Atmos Environ, 2009, 43: 4335—4543
- 6 Wang Y, Hao J, McElroy M B, et al. Ozone air quality during the 2008 Beijing Olympics-effectiveness of emission restrictions. Atmos Chem Phys Discuss, 2009, 9: 9927—9959
- 7 Zhao Q, Liu Y, He K, et al. Air quality in Beijing during the 2008 Olympic Games observed by satellites and ground monitors. Eos Trans, Am Geophys Union Fall Meet, 2008, 89(Suppl): A31J-04
- 8 Sugimoto N, Matsui I, Liu Z Y, et al. Observation of aerosol and clouds using a two-wavelength polarization lidar during the nauru99 experiment. Sea and Sky, 2000, 76: 90—95
- 9 Sugimoto N, Matsui I, Liu Z Y, et al. Latitudinal distribution of aerosols and clouds in the western pacific observed with a lidar on board the research vessel Mirai. Geophys Res Lett, 2001, 28: 4187—4190
- 10 Sugimoto N, Matsui I, Shimizu A, et al. Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the Northwest Pacific with a two-wavelength polarization lidar on board the research vessel Marai. Geophys Res Lett, 2002, 29, doi:10.1029/2002GL015112
- 11 Sugimoto N. Network observations of Asian dust and anthropogenic aerosols with two-polarization Mie-scattering lidars. Proc Int Laser Rader Conf, 2002, doi:10.1029/2002GL015112
- 12 Sugimoto N, Uno I, Nishikawa M, et al. Record heavy Asian dust in Beijing in 2002: Observation and model analysis of recent events. Geophys Res Lett, 2003, 30, doi: 10.1029/2002GL016349
- 13 董旭辉, 祁辉, 任立军, 等. 偏振激光雷达在沙尘暴观测中的数据解析. 环境科学研究, 2007, 20: 106—111
- 14 Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation: Some comments. Appl Optics, 1984, 23: 652—653
- 15 杨东贞, 于海青, 丁国安, 等. 北京北郊冬季低空大气气溶胶分析. 应用气象学报, 2002, 13(增刊): 113—126
- 16 周丽, 徐祥德, 丁国安, 等. 北京地区气溶胶 PM_{2.5} 粒子浓度的相关因子及其估算模型. 气象学报, 2003, 61: 761—768
- 17 杨军, 朱彬, 李子华. 泽当、景洪大气气溶胶粒子的物理、化学特性. 气象学报, 2001, 59: 795—802
- 18 徐祥德, 周秀骥, 施晓晖. 城市群落大气污染影响的空间结构及尺度特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(增刊 1): 1—19
- 19 刘新民, 邵敏. 北京市夏季大气消光系数的来源分析. 环境科学学报, 2004, 24: 185—189
- 20 Hao J M, He D Q, Wu Y, et al. A study of the emission and concentration distribution of vehicular pollutants in the urban area of Beijing. Atmos Environ, 2000, 34: 453—465
- 21 王雪松, 李金龙. 北京地区夏季 PM₁₀ 污染的数值模拟研究. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39: 419—427
- 22 Wang Z F, Maeda T, Hayashi M, et al. A nested air quality prediction modeling system for urban and regional scales application for high-zone episode in Taiwan. Water Air Soil Poll, 2001, 130: 391—396
- 23 徐文帅. 上海空气质量状况及重污染时间数值模拟研究. 硕士学位论文. 广州: 中山大学大气科学系, 2005. 15—20
- 24 李丽娜. 区域污染输送对北京夏季臭氧浓度影响的研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2007. 17—23
- 25 王自发, 谢付莹, 王喜全, 等. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用. 大气科学, 2006, 30: 778—790