

杨婷, 李杰, 王自发, 等. 2010. 北京奥运会期间气溶胶光学特性垂直分布特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 602–608. Yang Ting, Li Jie, Wang Zifa, et al. 2010. Vertical distribution of the aerosol optical characteristics during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 602–608.

## 北京奥运会期间气溶胶光学特性垂直分布特征

杨婷<sup>1,2,3</sup> 李杰<sup>2</sup> 王自发<sup>2</sup> 张柏<sup>1</sup> 王喜全<sup>2</sup> GBAGUIDI Alex<sup>2</sup>

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

**摘要** 利用激光雷达观测资料, 分析了奥运会期间气溶胶消光系数的垂直廓线, 并结合后向轨迹方法对北京地区污染源以及污染控制措施效果进行了初步分析。观测数据表明: 1) 2008年消光系数较之2007年在不同高度层的降幅并不相同, 600 m以下的年际降幅最为显著, 1200~4000 m高度范围次之。2) 各类型消光系数垂直廓线出现频次的统计显示, 2008年影响北京的主要廓线类型为边界层上部最高型, 而非近地面最高型, 说明2008年近地层消光系数有明显的降低。另外, 利用后向轨迹法对近地层消光系数降低的原因进行了分析, 结果表明, 当近地层气团中污染物主要来自于北京周边地区时, 400 m以下气溶胶消光系数的年际降幅可达18.1%, 这说明北京周边区域大气污染控制措施对改善北京近地面层气溶胶污染起到了重要作用。

**关键词** 激光雷达 气溶胶 消光系数 垂直廓线 后向轨迹

**文章编号** 1006-9585 (2010) 05-0602-07 **中图分类号** P407 **文献标识码** A

## Vertical Distribution of the Aerosol Optical Characteristics during the 2008 Beijing Olympic Games

YANG Ting<sup>1,2,3</sup>, LI Jie<sup>2</sup>, WANG Zifa<sup>2</sup>, ZHANG Bai<sup>1</sup>, WANG Xiquan<sup>2</sup>, and GBAGUIDI Alex<sup>2</sup>

1 *Geography and Remote Sensing Research Center, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012*

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

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

**Abstract** The effect of air pollution control in Beijing and its surrounding areas during the 2008 Beijing Olympic Games was evaluated by using the analysis of aerosols extinction vertical distribution (from lidar) and aerosol backward trajectory. The results indicated: 1) In general, aerosol extinction coefficients decrease within various altitudes (notably below 600 m and within 1200–4000 m) in 2008 compared to trends in 2007. 2) Statistical analysis of the different types of the extinction coefficient showed that high pollutant concentrations in 2008 mainly occurred in the vicinity of the boundary layer confirming the decrease of the extinction coefficients near the ground. Description of the aerosols backward trajectory showed that the aerosols (mainly transported from Beijing surrounding areas)

**收稿日期** 2010-04-06 收到, 2010-07-21 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** 杨婷, 女, 1984年出生, 博士研究生, 主要从事遥感技术在大气环境中的应用研究。E-mail: yangting0207@126.com

displayed the extinction coefficient decrease by about 18.1% below 400 m. This highlighted significant impact of air pollution control efficiency in the surrounding areas on the air quality improvement in Beijing.

**Key words** lidar, aerosol, extinction coefficient, vertical profile, backward trajectory

## 1 引言

近年来,可吸入颗粒物已成为城市大气中的首要污染物,它对人体健康的危害已引起从科学家到民众的普遍关注(罗云峰等,1998;车凤翔,1999)。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加强对可吸入颗粒物污染的控制,这些措施包括:减少和控制工厂污染,推广天然气等清洁能源,提高机动车排放标准,机动车单双号限行等措施(BOCOG,2005;UNEP,2007;袁佳珺,2008)。奥运会后评估这些措施的效果,一方面对北京本地可吸入颗粒物污染进一步治理具有重要的意义,另一方面也可对其他城市可吸入颗粒物污染的治理提供借鉴依据。

随着城市中高层建筑、超高层建筑不断涌现,人们所关注的范围已不再局限于近地面,边界层上层的空气质量状况已进入人们的视野(徐宏辉,2007)。研究表明,高浓度污染物也可集中在边界层上层(徐宏辉,2007;Jung et al.,2009),同时边界层上层也是区域污染物向北京输送的重要通道(Streets et al.,2007)。因此,全面评估奥运会期间污染控制措施的效果,需研究不同高度层气溶胶的变化特征。激光雷达的显著优势在于可获取不同高度层气溶胶消光系数,而气溶胶消光系数与可吸入颗粒物浓度关系密切(胡欢陵等,2004)。

本文利用双波长偏振激光雷达于2008年北京奥运会期间的气溶胶消光系数观测资料,详细分析了奥运会期间空气污染控制措施下不同高度层的气溶胶消光系数分布特征,并将其与2007年同期数据进行了比对,同时结合后向轨迹方法对北京地区污染来源以及污染控制措施效果进行了初步分析。与以前的研究相比(Sugimoto et al.,2002,2003,2006;袁松等,2005;杨辉等,2006;董旭辉等,2007;Sánchez et al.,2007),本文所用的观测资料时间较长,并且具有不同污染控制措施下的对比分析结果,这可同时为全面评估周边地区污染物对北京空气质量的影响的数

值模拟研究提供观测基础。

## 2 方法及实验地点

观测采用的激光雷达是日本国立环境研究所(NIES)研制的双波长(1064 nm和532 nm)偏振激光雷达,该仪器在532 nm波长具有偏振测量能力(Sugimoto et al.,2000,2001)。该激光雷达采用钕铝( Nd: YAG)激光光源,可以同时发射波长分别为1064 nm和532 nm的两束平行激光,发射功率分别为每脉冲20 mJ和30 mJ,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的激光进入偏振器后由两个光电倍增管来接收偏振信息;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。该仪器可连续探测、反演6 km以下大气气溶胶的消光系数。反演采用Fernald(1984)算法,其中雷达比率选用50 sr(董旭辉等,2007)。

中国科学院大气物理研究所铁塔分部气象观测塔(39°58′35″N,116°22′41″E)位于北京市区北部,与奥运会主场馆直线距离约2 km,其周边下垫面条件具有典型的的城市结构特征。自2008年7月20日开始,北京奥运会期间空气质量保障措施全面启动(包括机动车单双号限行),考虑到大气污染的累计效应,为准确地反映奥运会期间北京的大气状况,本文将2008年7月20日至8月24日观测的数据(以下简称时段2)与2007年同期(以下简称时段1)数据进行比对,以评估奥运会期间污染控制措施效果。

## 3 结果与讨论

### 3.1 气溶胶消光系数垂直分布特征

如图1所示,时段2消光系数在240~600 m

范围内缓慢升高, 于 600 m 处达到消光系数最大值  $0.58 \text{ km}^{-1}$  后缓慢回落直到 1 km 左右, 在 1 km

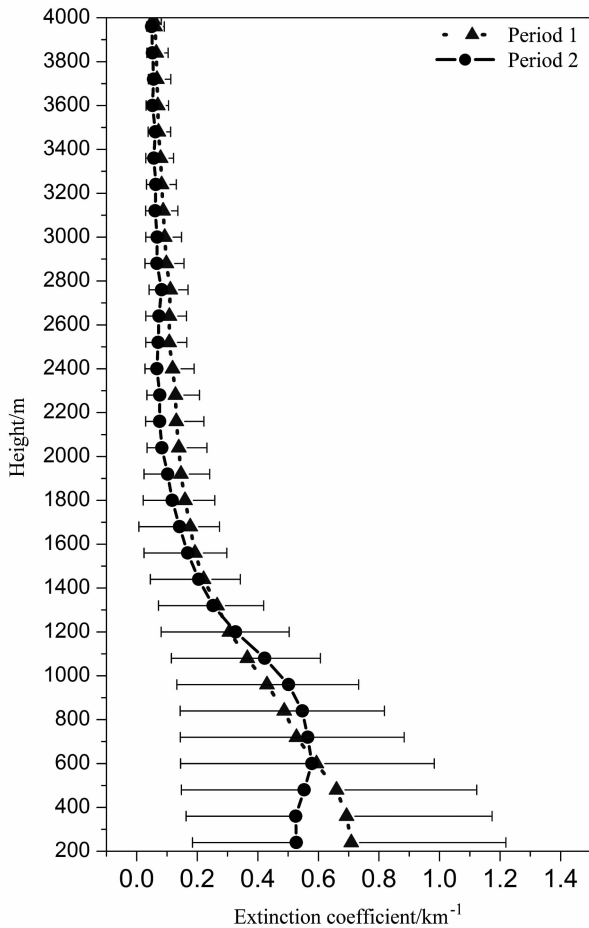


图1 时段1和时段2气溶胶消光系数均值垂直廓线对比  
Fig. 1 Comparison of the extinction vertical profiles between period 1 and period 2

以上, 消光系数快速下降。这种变化特征与北京清洁郊区(大兴区榆垓镇)夏季气溶胶消光系数垂直廓线形态类似(胡欢陵等, 2004)。比较时段2与时段1的消光系数垂直廓线, 两者在以下几个方面具有显著差异: 1) 时段1消光系数最大值出现在近地面层 240 m 处, 而时段2消光系数峰值出现在距离地面 600 m 高度; 2) 时段2消光系数的峰值与时段1相比也有了显著地降低, 其值由  $0.70 \text{ km}^{-1}$  减少到  $0.58 \text{ km}^{-1}$ ; 3) 时段2消光系数较之时段1, 在 600 m 以下降幅显著; 600~1200 m 范围内消光系数略高于时段1; 1200~4000 m 之间, 时段2消光系数较之时段1又出现明显的衰减。根据上述降幅特点把消光系数的垂直高度划分为3个高度段, 对各自高度段内的数据进行平均, 具有针对性地进行研究。

如图2所示, 在 210~600 m 之间, 时段2消光系数在高值区 ( $>1.5 \text{ km}^{-1}$ ) 的频数远低于时段1; 然而在中值区 ( $0.5 \sim 1.1 \text{ km}^{-1}$ ) 时段2出现的频数显著高于时段1; 在此高度范围内, 时段2峰值也从时段1的  $2.4 \text{ km}^{-1}$  降至  $2.2 \text{ km}^{-1}$ ; 时段2消光系数时均值 ( $0.61 \pm 0.03 \text{ km}^{-1}$ ) 也远低于时段1 ( $0.71 \pm 0.03 \text{ km}^{-1}$ )。1200~4000 m 消光系数的频数分布特征与 210~600 m 高度范围类似。总之, 较之时段1, 时段2不同高度层消光系数频数分布特征首先体现在中小值消光系数出现频数的升高, 其次体现在峰值与均值的总体降低。与其他高度范围不同的是: 600~1200 m 高度范围内的消光系数均值在时段2内出现了略微升高,

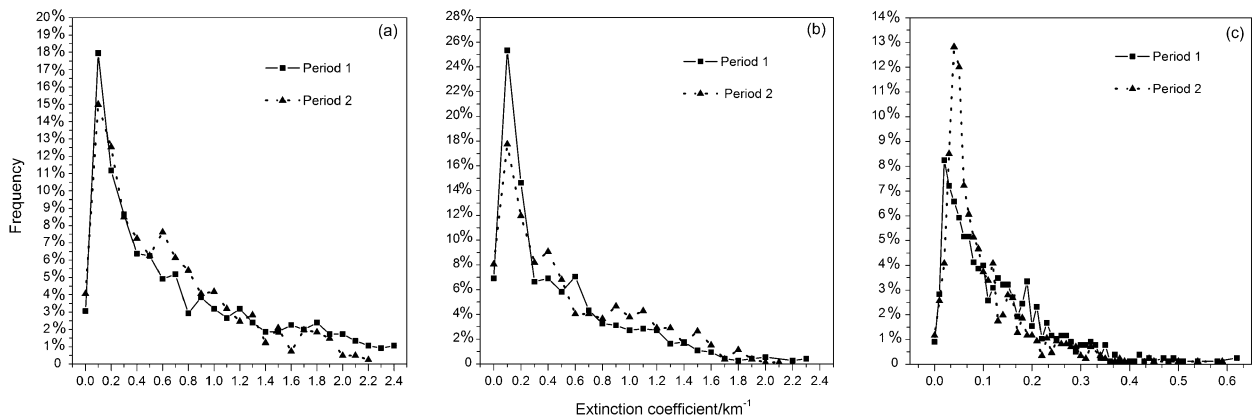


图2 时段1和时段2不同高度气溶胶消光系数小时均值的频数对比: (a) 210~600 m; (b) 600~1200 m; (c) 1200~4000 m  
Fig. 2 Comparison of the hourly averaged extinction frequency in different height layers between period 1 and period 2: (a) 210 - 600 m; (b) 600 - 1200 m; (c) 1200 - 4000 m

在小值区（如  $0.1\text{ km}^{-1}$ ）消光系数在时段 2 的出现频次较之时段 1 降低了 8%。

不同高度层气溶胶消光系数均值存在不同的年际降幅，本文利用 SPSS 软件对不同高度层均值降幅的显著性进行检验。由于样本并不符合正态分布，因此采用了 Wilcoxon (1945) 非参数检验方式。结果显示：在 210~600 m、1200~4000 m 高度范围，时段 1 与时段 2 均值通过了 0.01 的显著性检验，而 600~1200 m 高度范围年际均值通过了 0.05 的显著性检验。

综上所述，时段 2 消光系数与时段 1 相比具有显著的降低，但不同高度层降幅并不相同，降幅明显的两个高度层为 210~600 m、1200~4000 m，降幅分别为  $0.1\text{ km}^{-1}$  与  $0.03\text{ km}^{-1}$ ；在 600~1200 m 高度范围内时段 2 消光系数较时段 1 反而增加了  $0.08\text{ km}^{-1}$ 。

3.2 气溶胶消光系数垂直廓线类型的年际变化特征

排放源及气象要素变化会影响气溶胶消光系数垂直廓线类型的变化，本文将时段 1 与时段 2 气溶胶消光系数垂直廓线的日均值分为 5 类（表 1 和图 3），并比较了两者之间的差异。时段 1 与时段 2 不同类型廓线出现的频次如表 1 所示：类型 I 与类型 III 出现频次发生了较大的变化。类型 I 出现的频次由时段 1 的 5 次升高到时段 2 的 13 次；类型 III 的频次由时段 1 的 15 次降低到时段 2 的 8 次；同时，时段 2 类型 II 的出现频次较时段 1 也有了一定的提高。

表 1 气溶胶消光系数廓线类型及时段 1 与时段 2 逐日消光系数廓线类型统计

Table 1 Vertical profile types of the aerosol extinction coefficient and the vertical profile type statistics of the daily extinction coefficient of period 1 and period 2

分类	描述	时段 1 出现频次	时段 2 出现频次
类型 I	消光系数峰值出现在边界层上部（1 km 左右）	5	13
类型 II	消光系数峰值在 4 km 以下分布相对均匀	9	12
类型 III	消光系数峰值出现在近地面（500 m 以下）	15	8
类型 IV	消光系数在边界层内分布均匀，但高于自由大气	3	3
类型 V	消光系数峰值出现在边界层（自由大气）以上	2	0

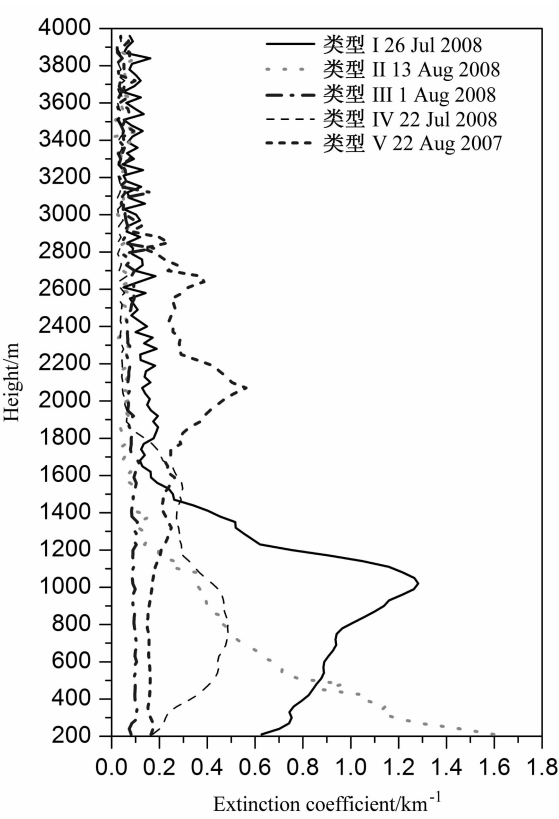


图 3 表 1 中各廓线类型典型日期示例  
Fig. 3 Typical dates of each type in table 1

以上分析显示，时段 1 近地层消光系数均值显著高于时段 2 均值并非偶然现象，表明了时段 2 近地层消光系数显著降低的整体趋势。

3.3 北京周边控制措施对消光系数垂直廓线变化的效果检验

本文利用美国国家海洋与大气管理局（NOAA）研制的后向轨迹模式 HYSPLIT4（Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated）（Draxler and Hess, 1997），对北京地区污染源以及污染控制措施效果进行了初步分析。该模式由 NOAA 研发，已被广泛应用于大气污染物输送研究（Chen et al., 2002；黄鹂鸣等，2002；Pedro et al., 2004；徐祥德等，2004；尹晓慧等，2007）。本文使用的气象输入数据来自中尺度气象模式 WRF（Weather Research Forecast）模拟的输出结果，水平分辨率为  $9\text{ km}\times 9\text{ km}$ ，时间分辨率为 1 h。本文利用后向轨迹模式 HYSPLIT4 计算了时段 1 和时段 2 内起始时间分别为 00 时、03 时、06 时、09 时、12 时、15 时、18 时和 21 时（北京

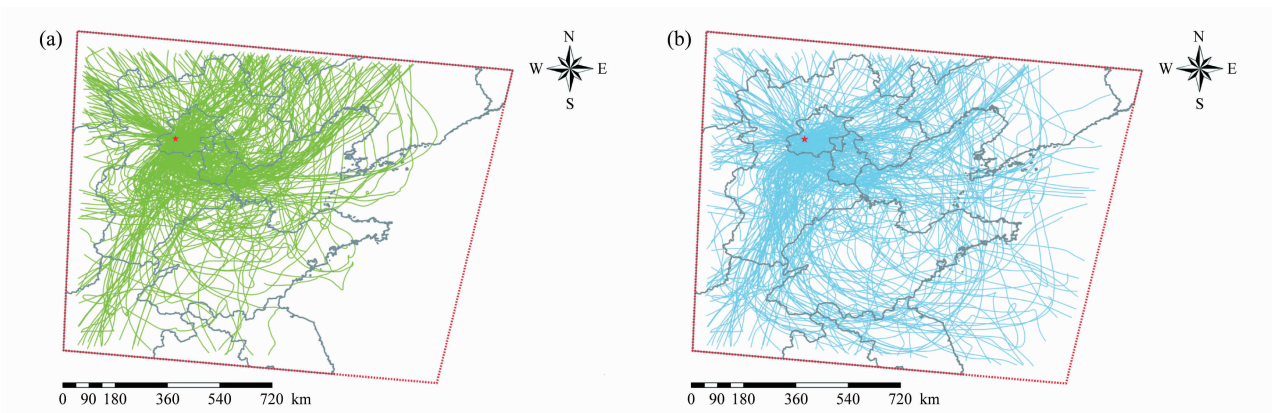


图4 (a) 时段1和(b)时段2后向轨迹分布(星号为后向轨迹起始点)

Fig. 4 The distribution of the back trajectories in (a) period 1 and (b) period 2 (stars denote the origin of the back trajectories)

时间,下同)的96 h后向轨迹,轨迹起始点为中国科学院大气物理研究所气象观测塔(40°N, 116°E)。考虑到污染物的垂直分布特征以及消光系数的垂直变化特征,由于近地层对人类的影响较大,并基于本文前面章节的研究结果,时段2在近地层的消光系数降幅也最为显著,因此本文主要关注400 m处气团来源,时段1与时段2后向轨迹如图4所示。

由图4可见,从北面进入北京的后向轨迹数目年际差异不大;时段1内来源于东面的后向轨迹数目较时段2稍多,而时段2期间来源于南面的后向轨迹数目则要比时段1略多。

气团中所包含的污染物含量与气团的来向及气团在污染较重区域停留时间有密切关系。苏福庆等(2004)的研究显示,北京市外来污染物的输入通道可以分为西南气流、东南气流和偏东气流,这3个方向气流的流经地区恰好位于华北平原3个主要源排放地区。本文综合考虑研究时段后向轨迹的特点,根据后向轨迹的来源以及在污染较重区域的停留时间将来自偏南部与偏东部的后向轨迹类型分为2类:类型A,后向轨迹在以(40°N, 116°E)为中心的100 km范围内停留时间在24 h以上,代表该气团中的污染物受北京本地污染物影响最大;类型B,后向轨迹在以(40°N, 116°E)为中心300 km范围内停留时间大于36 h,但在100 km范围内停留时间小于24 h,代表该气团中的污染物受北京近周边区域(河北和天津)的污染物影响较大但北京本地污染物对其的影响也不容忽视。

时段1及时段2的400 m处各后向轨迹类型出现频率的统计结果如表2所示。在该高度层下,各类型后向轨迹年际出现频数并没有显著差异,这也说明两年气象场对污染物的区域输送并未有明显差异。鉴于类型A后向轨迹出现频次较少,不具有统计上的意义,因此本文仅分析了类型B后向轨迹所对应的210~400 m消光系数垂直廓线的年际变化(如图5所示)。时段2后向轨迹类型B所对应时刻形成的气溶胶消光系数廓线比时段1有明显降低,均值由时段1的 $0.91\text{ km}^{-1}$ 下降到时段2的 $0.75\text{ km}^{-1}$ ,降幅可达18.1%,这说明了北京近地面气溶胶污染的改善是由局地控制及区域联防联控而得到的。

表2 400 m高度各类型后向轨迹频次

Table 2 Frequency of the back trajectory types at the height of 400 m

类型A		类型B	
时段1	时段2	时段1	时段2
22	17	73	70

## 4 结论

本文利用激光雷达观测数据,分析了奥运会期间气溶胶消光系数的垂直廓线,并结合后向轨迹方法对北京地区污染来源及污染控制措施效果进行了初步分析。分析结果表明:

(1) 2008年奥运会期间消光系数均值较2007年同期在不同高度层降幅并不相同,在210~600

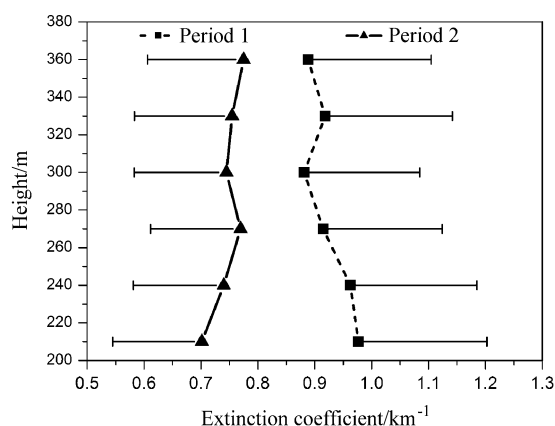


图5 400 m 类型 B 后向轨迹对应的消光系数垂直廓线年际对比  
Fig. 5 Interannual comparison of the vertical profiles of the extinction coefficients for back trajectory type B at the height of 400 m

m、1200~4000 m 这两个高度范围分别有  $0.1 \text{ km}^{-1}$  与  $0.03 \text{ km}^{-1}$  的降幅,但在 600~1200 m 高度范围时段 2 的均值却比时段 1 增加  $0.08 \text{ km}^{-1}$ 。

(2) 2008 年奥运会期间高浓度污染物的分布不再集中在低层,而是主要集中在边界层上部。垂直廓线分类统计结果表明:2008 年奥运会期间近地层消光系数的显著降低并非偶然,而是局地污染排放削减所导致的。

(3) 后向轨迹类型分析结果显示:北京近周边区域的大气污染控制措施对于北京近地面气溶胶污染改善作用显著。

**致谢** 感谢中国科学院大气物理研究所龚晏邦老师在整个观测过程中,在激光雷达维护方面所做的工作,在此谨致谢意!

## 参考文献 (References)

- BOCOG (The Beijing Organizing Committee for the Games of the XXIX Olympiad). 2005. Green Olympics in Beijing 2005 environmental improvement in Beijing [R]. <http://en.beijing2008.cn/30/79/article212027930.shtml> [2008-08-01].
- 车凤翔. 1999. 中国城市气溶胶危害评价 [J]. 中国粉体技术, 5 (003): 4-10. Che Fengxiang. 1999. Risk assessment on aerosol in Chinese cities [J]. Special Column of Aerosol Research (in Chinese), 5 (003): 4-10.
- Chen A L W, Doddridge B G, Russell R, et al. 2002. Origins of fine aerosol mass in the Baltimore - Washington corridor: Implications from observation, factor analysis, and ensemble air parcel back trajectories [J]. Atmos. Environ., 36 (28): 4541-4554.

- 董旭辉, 祁辉, 任立军, 等. 2007. 偏振激光雷达在沙尘暴观测中的数据解析 [J]. 环境科学研究, 20 (2): 106-111. Dong Xuhui, Qi Hui, Ren Lijun, et al. 2007. Application and data demonstration of lidar in sandstorm observation [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 20 (2): 106-111.
- Draxler R, Hess G. 1997. Description of the HYSPLIT-4 Modeling System [R]. US Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Air Resources Laboratory Silver Spring, Maryland.
- Fernald F G. 1984. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments [J]. Applied Optics, 23 (5): 652-653.
- 胡欢陵, 吴永华, 谢晨波, 等. 2004. 北京地区夏冬季颗粒物污染边界层的激光雷达观测 [J]. 环境科学研究, 17 (1): 59-66. Hu Huanling, Wu Yonghua, Xie Chenbo, et al. 2004. Aerosol pollutant boundary layer measured by lidar at Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (1): 59-66.
- 黄鹏鸣, 王格慧, 王荟, 等. 2002. 南京市空气中颗粒物 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 污染水平 [J]. 中国环境科学, 22 (4): 334-337. Huang Liming, Wang Gehui, Wang Hui, et al. 2002. Pollution level of the airborne particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) in Nanjing city [J]. China Environmental Science (in Chinese), 22 (4): 334-337.
- Jung J, Lee H, Kim Y J, et al. 2009. Optical properties of atmospheric aerosols obtained by in situ and remote measurements during 2006 Campaign of Air Quality Research in Beijing (CAREBeijing-2006) [J]. J. Geophys. Res., 114 (D00G02); doi: 10.1029/2008JD010337.
- 罗云峰, 周秀骥, 李维亮, 等. 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 Xiuji, Li Weiliang, et al. 1998. Advances in the study of atmospheric aerosol radiative forcing and climate change [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 13 (6): 572-581.
- Pedro S, Begona A, Diana G A, et al. 2004. Identification and characterisation of sources of PM<sub>10</sub> in Madrid (Spain) by statistical methods [J]. Atmos. Environ., 38 (3): 435-447.
- Sánchez M L, García M A, Pérez I A, et al. 2007. Ground laser remote sensing measurements of a Saharan dust outbreak in Central Spain. Influence on PM<sub>10</sub> concentrations in the lower and upper Spanish plateaus [J]. Chemosphere, 67 (2): 229-239.
- Streets D G, Fu J S, Jang C J, et al. 2007. Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Atmos. Environ., 41 (3): 480-492.
- 苏福庆, 高庆先, 张志刚, 等. 2004. 北京边界层外来污染物输送通道 [J]. 环境科学研究, 17 (1): 26-29. Su Fuqing, Gao Qingxian, Zhang Zhigang, et al. 2004. Transport pathways of pollutants from outside in atmosphere boundary layer [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (1): 26-29.
- Sugimoto N, Matsui I, Liu Z, et al. 2001. Latitudinal distribution

- of aerosols and clouds in the western Pacific observed with a lidar on board the research vessel Mirai [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (22): 4187–4190.
- Sugimoto N, Matsui I, Shimizu A, et al. 2000. Observation of aerosols and clouds using a two-wavelength polarization lidar during the Nauru99 experiment [J]. *Sea and Sky*, 76: 90–95.
- Sugimoto N, Matsui I, Shimizu A, et al. 2002. Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the Northwest Pacific with a two-wavelength polarization lidar on board the research vessel Mirai [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (19), 1901, doi: 10.1029/2002GL015112.
- Sugimoto N, Shimizu A, Matsui I, et al. 2006. Network observations of Asian dust and air pollution aerosols using two-wavelength polarization lidars [R].
- Sugimoto N, Uno I, Nishikawa M, et al. 2003. Record heavy Asian dust in Beijing in 2002: Observations and model analysis of recent events [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (12): 1640.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2007. Beijing report 2007 [R]. [http://www.unep.org/sport\\_env/Activities/beiji ngconf07/media/index. asp](http://www.unep.org/sport_env/Activities/beiji ngconf07/media/index. asp) [2008–08–01].
- Wilcoxon F. 1945. Individual comparisons by ranking methods [J]. *Biometrics Bulletin*, 1 (6): 80–83
- 徐宏辉. 2007. 北京及周边地区大气气溶胶的质量浓度和无机组分的特征及其来源研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所. Xu Honghui. 2007. Study on the characteristics of mass concentration and inorganic componets and the sources of aerosol in Beijing and its surrounding area [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- 徐祥德, 周丽, 周秀骥, 等. 2004. 城市大气环境重污染过程周边源影响域 [J]. *中国科学 (D辑)*, 34 (10): 958–966. Xu Xiangde, Zhou Li, Zhou Xiuji, et al. 2004. Infuential fields of peripheral sources of severe urban atmospheric polluting process [J]. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 34 (10): 958–966.
- 杨辉, 刘文清, 刘建国, 等. 2006. 城市对流层气溶胶观测分析与研究 [J]. *激光技术*, 30 (002): 174–176. Yang Hui, Liu Wenqing, Liu Jianguo, et al. 2006. Monitoring and study of city tropospheric aerosol [J]. *Laser Technology* (in Chinese), 30 (002): 174–176.
- 尹晓慧, 时少英, 张明英, 等. 2007. 北京沙尘天气的变化特征及其沙尘源地分析 [J]. *高原气象*, 26 (5): 1039–1044. Yin Xiaohui, Shi Shaoying, Zhang Mingying, et al. 2007. Change characteristic of Beijing dust weather and its sand–dust source areas [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 26 (5): 1039–1044.
- 袁佳珺. 2008. 北京公布 08 年控制大气污染新措施 [J]. *上海安全生产*, (003): 51. Yuan Jiajun. 2008. The air quality pollution control measures in 2008 [J]. *Shanghai Safety Production* (in Chinese), (003): 51.
- 袁松, 辛雨, 周军. 2005. 合肥市郊低层大气的激光雷达探测研究 [J]. *大气科学*, 29 (3): 387–395. Yuan Song, Xin Yu, Zhou Jun. 2005. Lidar observations of the lower atmosphere in Hefei [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (3): 387–395.