

陈林, 石广玉, 秦世广, 等. 2009. 2008年北京奥运会期间大气气溶胶物理特征分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (6): 665–672. Chen Lin, Shi Guangyu, Qin Shiguang, et al. 2009. Analysis of physical properties of aerosols during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 665–672.

2008年北京奥运会期间大气气溶胶物理特征分析

陈林^{1,2} 石广玉² 秦世广³ 陈彬² 陈丽琼² 陈焕森²

1 中国气象局国家卫星气象中心卫星辐射定标与真实性检验重点实验室, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

3 中国气象局大气探测技术中心, 北京 100081

摘要 应用MODIS卫星的气溶胶产品资料 and 地面的光学粒子计数器的资料, 对比分析了北京地区2006、2007、2008年7~9月的气溶胶光学厚度、细粒子光学厚度、Angstrom指数、气溶胶粒子数浓度谱及体积谱, 发现2008年北京奥运会期间(7月20日~9月20日)的气溶胶光学厚度比2006、2007年同期明显降低, 气溶胶细模态光学厚度占总光学厚度的比上升, Angstrom指数上升, 气溶胶细粒子数浓度没有明显相对变化, 而粗粒子数浓度则减少约50%。利用大气标高, 将MODIS反演的气溶胶柱的质量浓度转化为地面气溶胶质量浓度。用粒子计数器得到的体积谱, 在假定气溶胶粒子密度的情况下, 计算出其质量浓度。将这两种方法得到的气溶胶质量浓度与国家环境保护部公布的空气质量指数换算得到的可吸入颗粒物(PM₁₀)质量浓度进行比较。结果表明: 北京奥运期间空气质量总体达到了国家二级空气质量标准; 与2006、2007年同期相比, 2008年气溶胶PM₁₀质量浓度明显下降, 而这主要是由气溶胶粗粒子的减少引起的。

关键词 2008年北京奥运会期间 气溶胶 空气质量

文章编号 1006-9585 (2009) 06-0665-08 **中图分类号** P401 **文献标识码** A

Analysis of Physical Properties of Aerosols during the 2008 Beijing Olympic Games

CHEN Lin^{1,2}, SHI Guangyu², QIN Shiguang³, CHEN Bin²,
CHEN Liqiong², and CHEN Huansen²

1 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorology Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 National Atmospheric Observation and Technology Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The aerosols optical depth (AOD), optical depth due to fine aerosol particles, Angstrom index, and number concentration and volume size distribution of aerosol particles during the Beijing Olympic Games (20 July to 20 September 2008) were compared with data in the same periods of 2006 and 2007 using the MODIS retrieved aerosols product and the data measured by the optical particle counter on the ground. Decrease in AOD during the Beijing Olympic Games was primarily attributed to the reduction in coarse mode aerosol particles. The Angstrom index

收稿日期 2008-10-26 收到, 2009-09-10 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究规划项目 2006CB403705、国际科技合作交流专项 2008KR0176

作者简介 陈林, 男, 1981年出生, 博士, 主要从事卫星遥感数据的反演和应用研究。E-mail: chenlin@post.iap.ac.cn

and particle counter data also approved this. The MODIS retrieved aerosols mass was converted to the surface aerosol mass concentration by dividing by the atmospheric scale height in Beijing, while another aerosol mass concentration was gained by the particle volume size distribution assumed the density of aerosol particles. Comparison of these two concentrations with the particulate matter with aerodynamic diameter less than $10\text{ }\mu\text{m}$ (PM₁₀) concentration translated by air pollution index (API) showed that Beijing air quality in the 2008 Olympic Games was improved and achieved class II national standard, which primarily owes to the reduction in coarse mode aerosol particles.

Key words 2008 Beijing Olympic Games, aerosol, air quality

1 引言

大气气溶胶是指悬浮在大气中的颗粒物,其直径一般在 $0.01\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 之间。它既是影响地气系统辐射平衡的重要辐射强迫因子,也是造成大气污染的主要成分之一(石广玉, 2007)。大气气溶胶有自然源与人为源两类。自然源气溶胶包括海盐和沙尘气溶胶,而人为源气溶胶则来源于城市建设、工业活动、燃料燃烧和汽车尾气排放等人类活动。随着北京城市化建设的不断推进以及工业化过程的快速发展,大气气溶胶所引起的能见度下降,可吸入颗粒物增加等大气污染问题,日益得到社会各界和政府的重视(Bergin et al., 2001)。李成才等(2003)分析了城市中气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)与城市能见度和空气污染指数的关系表明,气溶胶光学厚度与大气能见度和空气污染指数,特别是可吸入颗粒物质量浓度有比较高的相关性,证明气溶胶光学厚度可以一定程度上反映城市空气质量水平。而可吸入颗粒物(PM₁₀)一直是我国大部分地区首要污染物,也是目前评价大气质量的主要依据之一。

北京举办奥运会的口号是“科技奥运,绿色奥运,人文奥运”。要实现“绿色奥运”对于北京来说不是件容易的事情,特别是空气质量不容乐观。李金娟等(2004)分析了北京和部分举办过奥运会的城市可吸入颗粒物的污染特征指出,北京大气中的首要污染物是可吸入颗粒物,其含量比历届举办过奥运会的城市,如洛杉矶、赫尔辛基、巴塞罗那等相比要高了几倍甚至十倍以上。因此,为了保障奥运会及残奥会期间北京的空气质量,庄严兑现申奥承诺,让“蓝天白云”般的北京迎接来自世界的宾朋,北京市人民政府发布

了《关于2008年北京奥运会残奥会期间本市空气质量保障措施》的通告,如今奥运会已经落下帷幕,毫无疑问,北京奥运会是“一届真正无与伦比的奥运会”。那么备受关注的奥运期间北京空气质量到底怎么样,空气质量保障措施的实施是否影响了北京的空气质量,是否真正达到了预期目标——空气质量达到国家二级标准?本文拟采用奥运空气质量保障措施实施期间(7月20日~9月20日,以下简称为奥运期间)MODIS气溶胶资料、粒子计数器资料结合环保部公布的空气污染指数,从气溶胶光学厚度、粒子谱分布以及气溶胶粒子质量浓度等方面分析气溶胶物理特征,试图探究空气质量保障措施的实施对奥运期间北京大气气溶胶浓度产生的可能影响。

2 观测资料

利用卫星遥感资料来研究城市气溶胶特性,国内外已有不少相关的研究。特别是地球观测计划EOS计划中的MODIS仪器,具有较高的时空分辨率和成熟的气溶胶算法,并且其气溶胶产品经过广泛的应用和验证。毛节泰等(2002)对北京地区的MODIS气溶胶产品与地面的太阳光度计资料进行了检验,证实MODIS气溶胶产品达到了一定的精度,可以用来反映气溶胶区域分布及进行城市污染研究。目前MODIS开发小组将其气溶胶算法改进至版本5(Remer et al., 2005)。它采用了新的气溶胶模型与地理分布数据,解决了版本4中已知的一些问题。搭载MODIS仪器的Terra和Aqua卫星过境的时间一般为10时30分和13时30分(北京时间,下同)。本文使用的MODIS气溶胶数据是以北京市区中心($39^{\circ}55'06''\text{N}$, $116^{\circ}23'29''\text{E}$), 30 km 半径范围内Terra/MODIS和Aqua/MODIS的气溶胶产品,进行平均得到。

本文中用到的 MODIS 气溶胶产品有 $0.55\ \mu\text{m}$ 波段的气溶胶光学厚度 (以下的光学厚度均为 $0.55\ \mu\text{m}$ 波段)、 $0.55\ \mu\text{m}$ 波段细模态气溶胶 (又称积聚态, 即粒径在 $2\ \mu\text{m}$ 以下的气溶胶粒子) 光学厚度、大气柱的气溶胶质量浓度、 $0.66\ \mu\text{m}$ 波段比 $0.47\ \mu\text{m}$ 波段的 Angstrom 指数。

地面观测资料采用的仪器为 BCJ-1D 型光学粒子计数器 (张仁健等, 2000; 姜忠等, 2003)。它分为 6 档对大气气溶胶浓度进行测量。各档的粒子直径范围分别为 $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 、 $0.7\sim 1\ \mu\text{m}$ 、 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 、 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 和大于 $5\ \mu\text{m}$ 。仪器采样率流量为 $2.83\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。仪器放置在中国科学院大气物理研究所大塔分部 8 m 高的铁塔上, 离北京奥运会主场馆国家体育场不到 2 km。测量时间为每天的 06 时至 18 时, 每小时观测 3 次, 每次持续 1 min, 遇雨暂停观测。本文使用的观测仪器有专人进行定期维护和校正, 虽然由于长期使用, 其精度较短期测量的仪器略有不足, 但经过对比其他观测仪器 (日本产的手持式 OPC, 5 通道, $0.3\sim 5\ \mu\text{m}$) 进行连续一个月的观测对比, 测量数据的绝对值略有差异 (由于两种仪器测量的粒径范围有所差别), 但是数据的趋势符合较好。

空气污染指数 (Air Pollution Index, API) 是国际上通用的用来评价空气质量的标准。它将 PM10、 SO_2 、氮氧化物和臭氧在市区不同地点 24 h 监测的数据, 按照统一规定的计量方法处理后, 变成一种简洁而易被理解和掌握的形式。首要污染物是几种污染物中浓度最高者, 空气污染指数是首要污染物质量浓度经分段线性映射后的结果 (李成才等, 2003)。目前, 北京及各大城市每日的 API 能够在国家环境保护部的网站上得到。表 1 给出了我国规定的空气质量分级标准与相应的 API 和 PM10 质量浓度的关系。因为对于北京来说, 绝大多数情况下, 首要污染物为 PM10, 国家二级标准空气质量的要求是 PM10 日均浓度小于 $150\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均值小于 $100\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3 结果与分析

3.1 MODIS 气溶胶产品分析

图 1 为 2006、2007 和 2008 年同期, 北京地区

表 1 中华人民共和国国家标准——环境空气质量标准及 API 和 PM10 的对应关系

Table 1 National ambient air quality standard GB3095-1996 and the relationship between API and PM10 (particulate matter with aerodynamic diameter less than $10\ \mu\text{m}$)

空气质量状况	API	PM10 日均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
I 优	≤ 50	≤ 50
II 良好	≤ 100	≤ 150
III 轻度污染	≤ 200	≤ 350
IV 中度污染	≤ 300	≤ 420
V 重度污染	> 300	> 420

气溶胶特性的比较。将前文所述的北京地区, 以中心为标准划分为南部和北部, 考虑到粒子计数器放置的位置在北京市北部, 且奥运场馆大部分集中在北京北部, 因此特别选取了以上范围的北部地区记为北京北部。2006、2007、2008 年同时期的 AOD 分别为 0.74、0.67 和 0.52, 其标准差分别为 0.65、0.58 和 0.37。2008 年全市平均光学厚度比前两年有了显著降低。并且 2008 年北京北部地区的 AOD 只有 0.43, 标准差为 0.3, 说明奥运期间北京北部的光学厚度比南部要小。细模态光学厚度从 2006、2007 年的 0.58 和 0.51 减小到 2008 年的 0.42 (全市平均) 和 0.37 (北京北部), 下降幅度达到 23% (全市平均) 和 32% (北京北部)。但值得注意的是, 细模态气溶胶光学厚度在总光学厚度中的比重却从 2006、2007 年的 79% 和 75% 上升到了 81% (2008 年全市平均) 和 86% (2008 年北京北部)。而粗模态气溶胶 (粒径大于 $2\ \mu\text{m}$) 光学厚度则从 2006、2007 年的 0.16 和 0.16 减小到 2008 年的 0.1 (全市平均) 和 0.07 (北京北部)。与前两年平均相比, 2008 年粗模态气溶胶光学厚度下降幅度达到 38% (全市平均) 和 56% (北部)。这说明细模态气溶胶光学厚度虽然也随着气溶胶总光学厚度下降而下降, 但其下降的幅度却没有粗模态气溶胶光学厚度的下降幅度大。北京北部地区的 AOD 虽然最小, 但是细模态气溶胶占的比重却最大。在假定气溶胶粒子谱分布是荣格分布的情况下, 可以用 Angstrom 指数来反映气溶胶的平均粒径大小, Angstrom 指数越大说明气溶胶粒子的粒径越小。2008 年 Angstrom 指数为 1.48 (全市平均) 和 1.56 (北京北部), 而 2006、2007 年分别为 1.35 和 1.40。

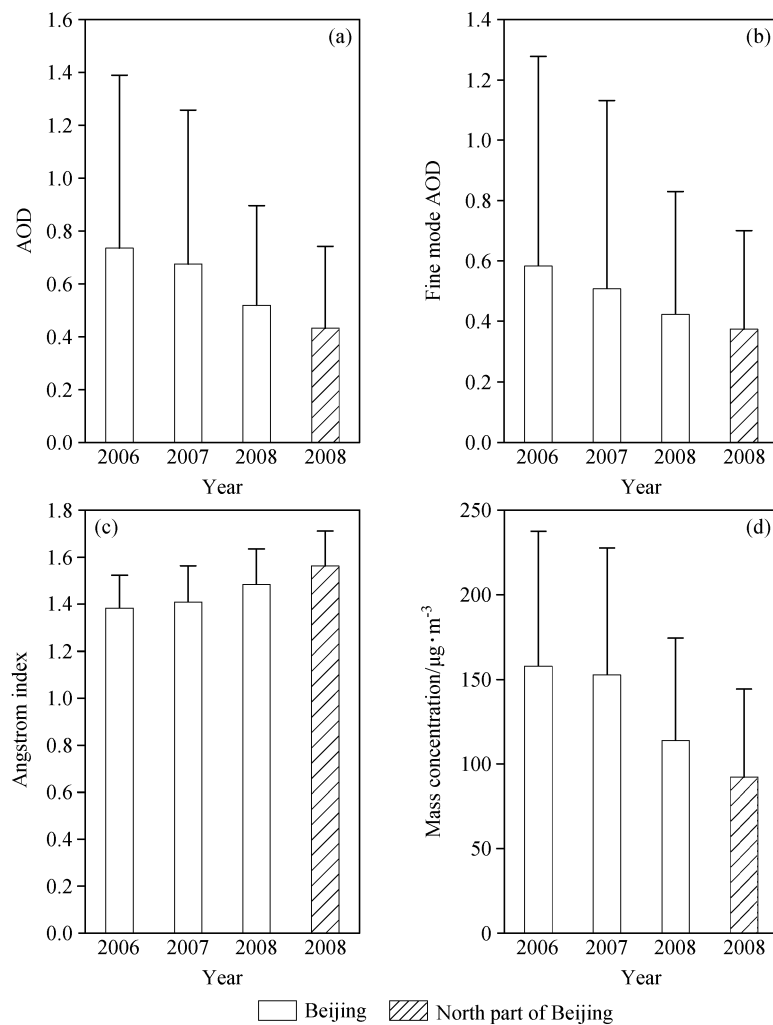


图1 2006、2007、2008年7~9月北京气溶胶 (a) 光学厚度、(b) 细模态气溶胶光学厚度、(c) Angstrom指数和 (d) 地面气溶胶质量浓度

Fig. 1 (a) AOD, (b) fine mode AOD, (c) Angstrom index, and (d) mass concentration of ground aerosols from July to September in 2006, 2007, and 2008 over Beijing area

MODIS 产品中给出了气溶胶柱质量浓度, 它表示空间柱上气溶胶的总质量。一般认为, 由于干湿沉降的作用, 在某一高度 H_p 以下, 大气气溶胶的质量浓度是随高度指数衰减的; 在此高度之上, 则基本保持不变。于是在高度 $z < H_p$ 的范围内, 该高度层的气溶胶质量浓度 $M(z)$ (单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 随高度 z (单位: m) 的变化可以表示成 (石广玉, 2007; 李成才等, 2003):

$$M(z) = M(0) \exp\left(-\frac{z}{H_p}\right),$$

其中, $M(0)$ 是气溶胶地面质量浓度 (单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), H_p 则称为标高 (单位: m)。气溶胶

柱质量浓度 M (单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 即为 $M(z)$ 在垂直方向上的积分:

$$M = \int_0^\infty M(0) \exp\left(-\frac{z}{H_p}\right) dz = M(0) H_p,$$

因此只要知道标高就能求出地面质量浓度 $M(0)$ 。李成才等 (2003) 根据能见度资料与光学厚度之间的关系, 求出了季节平均的北京市地区的大气标高, 夏季和秋季分别为 1947 m 和 1461 m。利用这两个标高求得地面气溶胶质量浓度, 其在 2008 年奥运会期间的平均值为 113 (全市平均) 和 92 (北京北部) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 而 2006、2007 年分别为 157 和 152 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

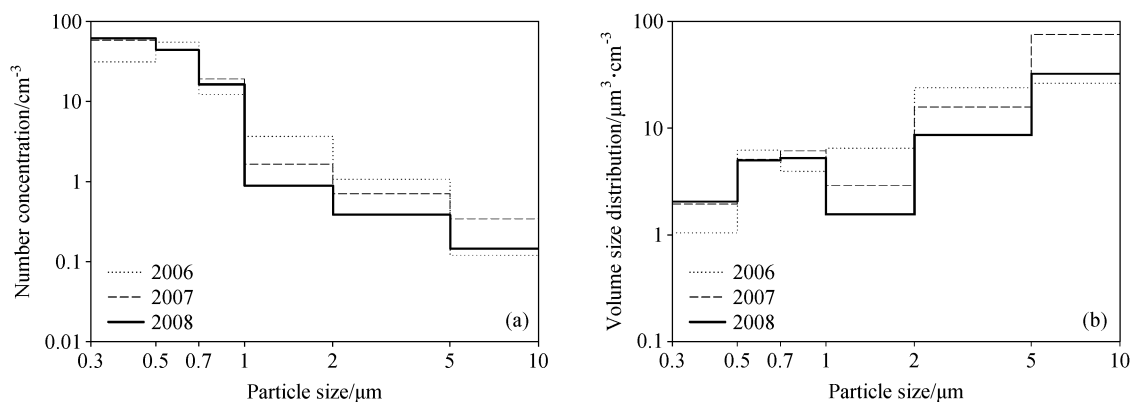


图2 2006、2007、2008年7~9月北京气溶胶 (a) 数浓度谱与 (b) 体积谱

Fig. 2 (a) Number concentration and (b) volume size distribution of aerosol particles from Jul to Sep in 2006, 2007, and 2008 over Beijing area

3.2 粒子计数器资料分析

图2给出的是2008年奥运会期间与2006、2007年相同时间段的平均数浓度谱和体积谱。体积谱是根据该粒径范围的中值直径和数浓度算出,其中大于 $5 \mu\text{m}$ 波段的中值直径取为 $7.5 \mu\text{m}$ 。2006、2007、2008年气溶胶粒子总数浓度分别为 103 、 124 、 123 cm^{-3} 。2008年总数浓度与前两年相比非但没有明显减少,反而比2006年的多了 20 cm^{-3} 。其原因在于,细粒子气溶胶个数远大于粗粒子气溶胶。而2008年细粒子的气溶胶个数非但没有减少,反而在 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 范围有上升的现象。然而在粗粒子范围,2008年的粗粒子数浓度明显下降,比前两年平均下降了约50%。这一下降趋势在 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 范围就已经显现出来,但是粗粒子气溶胶数浓度基数太小,对总数浓度影响不大。然而从体积谱上看,虽然细粒子的数浓度远高于粗粒子,但是体积却远小于粗粒子。粗粒子气溶胶体积在整个体积谱中占很大的比重。由于2008年奥运会期间的细粒子数浓度没有明显相对变化,而粗粒子数浓度明显下降,因此细粒子的体积没有明显减少,而粗粒子体积明显减少,特别是在 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 范围下降幅度最大。另外同数浓度变化一样,在 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 波段的体积谱也有相应的减少。由于粗粒子在整个体积谱中占的比重最大,因此在粗粒子明显减少的2008年,其总气溶胶粒子体积为 $54 \mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,比2006、2007年的 68 、 $107 \mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 明显减少。根据OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds)的气

溶胶数据集 (Hess et al., 1998),城市型气溶胶主要由水溶性气溶胶和煤烟型气溶胶组成,其质量密度分别为 $1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,而水溶性气溶胶粒子的平均粒径远大于煤烟型气溶胶粒子,因此,本文对于粒径小于 $2 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子,采用煤烟型气溶胶质量密度,对于粒径大于 $2 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子,采用水溶性气溶胶质量密度,这样就得到了气溶胶的质量浓度。2006、2007年、2008年奥运会期间地面气溶胶平均质量浓度分别为 105 、 181 、 $83 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,2008年低于前两年同期。

3.3 气溶胶粒子质量浓度的对比分析

首先通过表1给出的空气污染指数与可吸入颗粒物之间的分段线性关系,根据国家环境保护部网站上公布的API数据,计算得到PM10的质量浓度。当API小于50时,环保部门不提供首要污染物,因此假设当API小于50时首要污染物仍然为PM10。图3给出了MODIS反演得到的北京北部地区的气溶胶质量浓度、粒子计数器计算得到的气溶胶质量浓度和根据API指数计算的气溶胶质量浓度在奥运期间的日变化。可以看出,绝大多数的气溶胶日平均质量浓度在 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,即达到国家二级空气质量标准。分别只有8天 (MODIS)、7天 (粒子计数器) 和5天 (API) 超过 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,而2006年和2007年同期,粒子计数器计算的气溶胶质量浓度分别有13天和34天超过 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。MODIS反演得到的气溶胶质量浓度最高,这可能由于MODIS反演的气溶胶

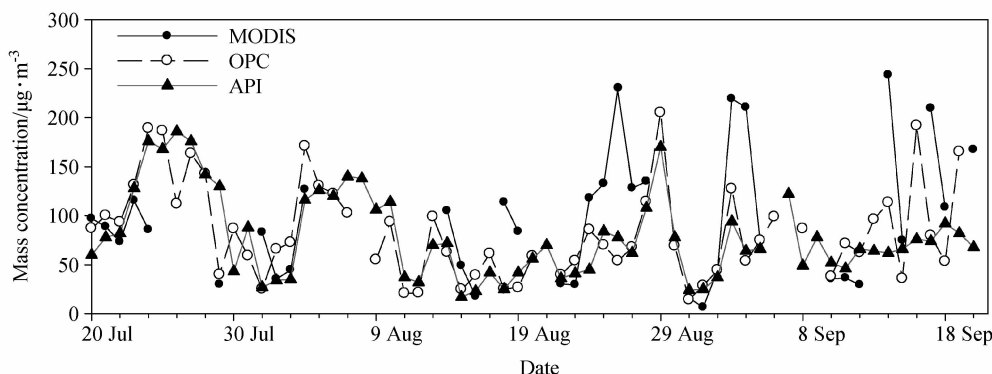


图3 MODIS反演得到的北京北部地区的气溶胶质量浓度、粒子计数器计算得到的气溶胶质量浓度和根据API指数计算的气溶胶粒子质量浓度在北京奥运期间的日变化

Fig. 3 Daily variation of aerosol mass concentration during the Beijing Olympic Games reckoned by MODIS, optical particle counter (OPC), and API

质量浓度是根据确定的气溶胶类型和反演的谱参数决定的,谱参数反演的粒径范围可能超过了 $10\ \mu\text{m}$,其代表的是总气溶胶质量浓度,而不仅仅是 PM_{10} 质量浓度。而且,MODIS的反演结果是一个瞬时值,即是卫星过境时的值,它与OPC的观测时间以及环保部门的观测时间并不一致。而根据粒子计数器的体积谱分布计算的气溶胶质量浓度可以近似看作是 PM_{10} 质量浓度,它与API计算得到的 PM_{10} 质量浓度平均值非常接近,分别为 $83\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $79\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。粒子计数器的计算值要略大一些,这可能是由于在高相对湿度的情况下,粒子易于吸湿增长,粒径增加,并且粒子碰并形成大粒子的机会也增加(王庚辰,1982;张仁健等,2000),这样导致粒子体积谱增加。而环保部门测定 PM_{10} 质量浓度时,要将采集的气溶胶粒子烘干后再测量。两者测量原理的不同导致了结果略有差异。即使这样,两者的线性相关性仍然达到0.75以上。

4 结论与讨论

本文综合了MODIS气溶胶产品、粒子计数器资料和空气污染指数等资料,对比分析了2006、2007和2008年奥运期间的北京气溶胶物理特性,得到如下结论:

(1) 2008年北京奥运会期间,北京地区气溶胶光学厚度与往年(2006、2007年)同期相比显著下降,平均下降了约27%,其中北京北部地区

AOD平均为0.43,达到了奥运会室外运动项目气溶胶光学厚度小于0.5的要求。

(2) MODIS细模态光学厚度占总光学厚度的比例,2008年比往年上升,Angstrom指数也相应上升,说明MODIS反演得到的气溶胶平均粒子直径减小。2008年粒子计数器细粒子数浓度与往年相比并没有减少,在 $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 粒径范围反而有所增加,而粗粒子数浓度明显下降,下降了约50%。气溶胶体积谱分布表明,粗粒子气溶胶数浓度虽然很低,但是却在体积谱中占据绝对优势。因此气溶胶质量浓度的下降,主要是由粗粒子气溶胶的数浓度减少引起的。

(3) MODIS、粒子计数器和API指数分别计算得到的气溶胶粒子质量浓度分别为92、83和 $79\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。均小于 $100\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的国家二级空气质量标准。而日平均气溶胶粒子质量浓度超过150 mg的天数也远低于往年。

综上所述,2008年北京奥运会期间北京空气质量总体达到国家二级空气质量水平。而令人有些意外的是,被认为主要是由人为产生的细粒子的数浓度非但没有明显减少,反而略有上升,相反是粗粒子的明显减小带动了气溶胶粒子质量浓度的明显降低。原因可能是,北京的气溶胶有相当部分来自于北京南部城市的区域输送(徐祥德等,2003),细粒子比粗粒子在空气中停留的时间长,更容易被输送过来。而且北京西北东三面环山且夏季多刮南风,不利于空气扩散,细粒子易于堆积。建筑尘和汽车飞尘被认为是城市粗粒子

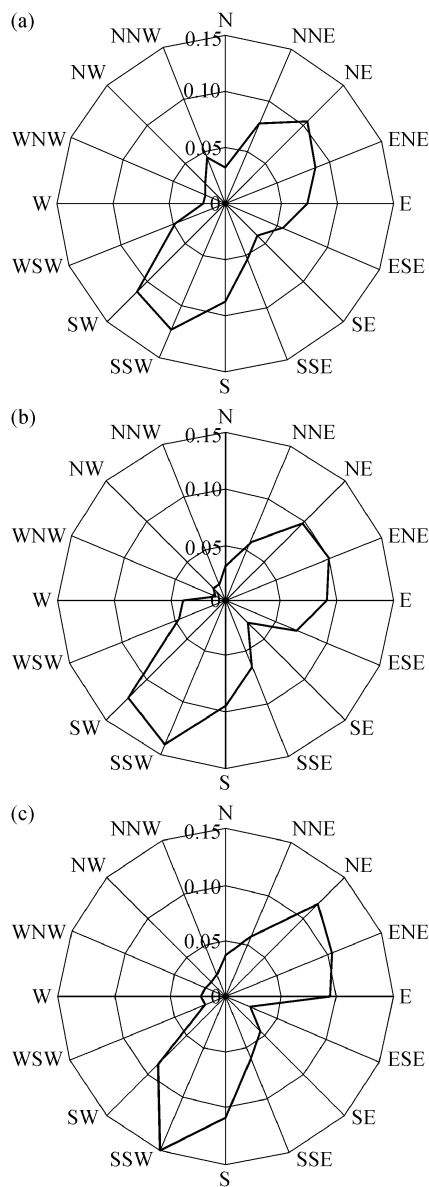


图 4 北京 (a) 2006、(b) 2007、(c) 2008 年 7~9 月风向图
Fig. 4 Wind rose in Beijing from Jul to Sep in (a) 2006, (b) 2007, and (c) 2008

的两个重要来源。奥运空气质量保障条例中有建筑业全面停工, 强化道路清洁和加强机动车管理这几项规定, 这对于粗粒子的显著减小有重要影响。当然, 气象条件特别是风向风速和降水也会对气溶胶浓度产生较大的影响, 尤其是在北京市这种复杂地形下。图 4 给出了 2006~2008 年 7~9 月北京市风向玫瑰图, 可以看出, 2008 年的主导风向与前两年相比没有大的变化, 仍然以西南风为主, 东北风次之, 此外这三年 7~9 月的平均风

速变化也不大 (分别为 2.1、1.8 和 1.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。空气质量还与降水 (湿清除) 密切相关。2008 年奥运会期间降水量在 1 mm 以上的天数为 16 天, 降水量为 213 mm, 而 2006 年和 2007 年同期分别为 11 天和 12 天, 降水量分别为 105 mm 和 205 mm, 可以看出 2008 年奥运会期间的降水日数比前两年同期有所增加, 降水量比 2006 年增加一倍, 与 2007 年基本持平。2008 年北京气溶胶细粒子浓度变化不大, 粗粒子明显减少不大可能是由风场变化引起的, 而 2008 年奥运会期间湿清除作用的加强对于粗粒子的减少起到了一定的作用。而减排限行等污染防治措施是否能够真正有效地改善北京市空气环境质量, 还需要通过配合相关单位气溶胶成分元素分析的结果及空气污染物输送模式来最终确认。

致谢 感谢日本熊本大学张代洲副教授对本文写作提出了建设性意见; MODIS 资料由 NASA/GSFC GES DAAC (Goddard Space Flight Center Earth Sciences Distributed Active Archive Center) 提供, 在此一并致谢!

参考文献 (References)

- Bergin M H, Cass G R, Xu J, et al. 2001. Aerosol radiative, physical and chemical properties in Beijing during June 1999 [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D16): 17969–17980.
- Hess M, Koepke P, Schult I. 1998. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79: 831–844.
- 姜忠, 石广玉, 陈焕森. 2003. 北京市 1998~2001 年大气气溶胶数浓度分析 [J]. *气候与环境研究*, 6 (4): 495–502.
- Jiang Zhong, Shi Guangyu, Chen Huansen. 2003. Analysis on aerosol concentration of Beijing during 1998–2001 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 6 (4): 495–502.
- 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 2003. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染 [J]. *大气科学*, 27 (5): 869–880.
- Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Qihan, et al. 2003. Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (5): 869–880.
- 李金娟, 肖正辉, 杨书申, 等. 2004. 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*, 3: 26–28.
- Li Jinjuan, Xiao Zhenghui, Yang Shushen, et al. 2004. Analysis of pollution characteristics of inhalable particulate matter in Beijing and a comparison with some other Olympic Games cities [J]. *Environmental Science Trends (in Chinese)*, 3: 26–28.

- 毛节泰, 李成才, 张军华, 等. 2002. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比 [J]. 应用气象学报, 13 (特刊): 127-135. Mao Jietai, Li Chengcai, Zhang Junhua, et al. 2002. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun-photometer observations [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (Suppl.): 127-135.
- Remer L, Kaufman Y, Tanre D, et al. 2005. The MODIS aerosol algorithm, products and validation [J]. J. Atmos. Sci., 62 (4): 947-973.
- 石广玉. 2007. 大气辐射学 [M]. 北京: 科学出版社, 60-66. Shi Guangyu. 2007. Atmospheric Radiation [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 60-66.
- 王庚辰. 1982. 大气气溶胶浓度及其谱分布的某些特征 [J]. 大气科学, 6 (2): 211-216. Wang Gengchen. 1982. Some characteristics of the concentration and size distribution of atmospheric aerosol [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 6 (2): 211-216.
- 徐祥德, 周秀骥, 翁永辉, 等. 2003. 星载 MODIS 资料与地面光度计探测气溶胶变分场 [J]. 科学通报, 48 (15): 1680-1685. Xu Xiangde, Zhou Xiuji, Weng Yonghui, et al. 2003. Study on variation aerosol fields over Beijing and its adjoining areas derived from Terra/MODIS and ground sunphotometer observation [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 48 (15): 1680-1685.
- 张仁健, 王明星, 戴淑玲, 等. 2000. 北京地区气溶胶粒度谱分布初步研究 [J]. 气候与环境研究, 5 (1): 85-89. Zhang Renjian, Wang Mingxing, Dai Shuling, et al. 2000. Preliminary research on the size distribution of aerosols in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (1): 85-89.