

文章编号: 0253-2239(2010)07-1931-07

北京奥运期间大气细粒子谱与 能见度、PM10 质量浓度对比分析

王 杰 刘建国 陆亦怀 刘文清 伍德侠 桂华侨 黄书华 刘世胜 程 寅 陆 钊

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 利用自行研制的大气细粒子谱分析仪、振荡天平、大气能见度仪和气象参数仪, 对 2008 年北京奥运期间的主场馆区域大气质量状况进行了连续在线测量。奥运期间粒子日平均数浓度变化表明, 核模态粒子(5~20 nm)主要受气相成核过程的影响, 数浓度变化曲线呈单峰值结构; 爱根核模态(20~100 nm)受人为源及核模态粒子贡献影响较大, 数浓度曲线呈典型的三峰值结构; 积聚模态(100 nm~1 μm)数浓度日变化不大, 但受降水等天气因素影响较大。结合地面能见度数据, 对降雨、灰霾和晴好天气状态下大气细粒子谱变化特征进行分析, 结果表明, 降雨对颗粒物的清除作用与颗粒物粒径大小密切相关, 而灰霾天气下大气能见度的降低主要受积聚模态粒子散射消光的影响。同时, 利用细粒子数浓度计算得到粒径小于 10 μm 的颗粒(PM10)质量浓度, 计算值与振荡天平实测值具有较好的一致性, 相关系数达 86.1%。

关键词 大气光学; 大气细粒子谱; 能见度; PM10 质量浓度

中图分类号 X831 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.1931

Analysis of Aerosol Particle Size Distribution, Visibility and Mass Concentration of PM10 in Beijing City During Beijing 2008 Olympics

Wang Jie Liu Jianguo Lu Yihuai Liu Wenqing Wu Dexia Gui Huaqiao
Huang Shuhua Liu Shisheng Cheng Yin Lu Fan

(Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract The atmospheric qualities of Olympic national stadium were measured by using the fine particulate meter (FPM), tapered element oscillating microbalance (TEOM, with a PM10 cutting head), visibility sensor and meteorological analyzer during Beijing 2008 Olympic games from 8 to 24 August, 2008. The variation trend of diurnal average of particle number concentration showed that the nucleation mode (5~20 nm) was closely related to the nucleation process, and the concentration curve was unimodal. Atiken mode (20~100 nm), with curve of three peak values, was stronger influenced by human activities and growing process of nucleation mode. Accumulation mode, with a tiny trend for its diurnal average particle number concentration, was strongly affected by the weather conditions such as rain. The visibility, the particle number size distribution in rainy, haze and sunny weather conditions were also summarized. The conclusion that scavenging action of rain to the particles had close relation with particle size, and lower visibility in haze day was caused by the scattering excitation of accumulated mode particulate. Mass concentration of PM10 was calculated using the data of particle number concentration, and it showed a good coincidence with PM10 directly measured by TEOM. The correlation coefficient could achieve 86.1%.

Key words atmospheric optics; particle number size distribution; visibility; mass concentration of PM10

收稿日期: 2009-08-11; 收到修改稿日期: 2009-10-10

基金项目: 国家 863 计划(2006AA06A302)资助课题。

作者简介: 王 杰(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事大气细粒子方面的研究。E-mail: wangjie@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘建国(1968—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事环境污染光学监测新技术、目标散射特性及遥感监测技术等方面的研究。E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

本文彩色效果详见中国期刊网(www.opticsjournal.net)相关文章

1 引 言

大气气溶胶是大气的重要组成部分,是大气物理化学过程中的一个重要因素。随着工业经济的迅速发展及汽车保有量的持续上升,北京已由一个典型的煤烟型污染城市成为复合型污染城市,煤烟排放、机动车尾气排放及二次污染物使得北京大气污染越发严重,其显著表现之一就是气溶胶悬浮颗粒物浓度的不断升高^[1]。大气气溶胶作为悬浮在大气中的颗粒物,不仅影响大气能见度^[2,3],甚至影响整个区域气候变化^[4]。研究表明,大气中纳米级超细颗粒物在粒子数浓度中所占比例最高,与人类健康的关系也最为密切,正日益受到公众的关注,故对大气气溶胶细粒子数浓度谱及变化规律的研究是极其必要的^[5~8]。

近年来,由于北京市加大力度实施各项大气污染控制措施,粒径小于 $10\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒(PM₁₀, PM_{2.5})的污染状况已经逐步得到改善,特别是 2008 北京奥运赛事期间,北京市及周边采取了一系列更为严格的环境空气质量保障措施,例如控制煤烟和扬尘污染、国有大中型企业限产、黄标车及各种私家车限行等。事实证明,这一系列措施的实施,

对于改善奥运期间北京空气质量提供了强有力的保障。

在中国科学院 2007 年“北京地区大气环境监测行动计划”成功实施的基础上,于 2008 年北京奥运会赛事期间,立足具有自主知识产权的创新成果,对大气细粒子谱、PM₁₀ 质量浓度、大气能见度等进行连续在线测量,为奥运期间空气质量的保障提供及时准确的预测和风险评估数据,同时也为进一步研究北京夏季大气细粒子数浓度粒径分布时空变化特征及其对大气能见度与人类健康的影响提供数据支持,从而为今后空气质量的改善提供治理的依据与参考。

2 实验与方法

2.1 实验仪器

大气颗粒物数密度谱是利用大气细粒子谱分析仪(FPM)进行长时间连续在线观测。FPM 主要由三部分构成:光散射粒子计数器(LPS)、气溶胶差分电迁移分析仪(DMA)、粒子冷凝计数器(CPC),其结构如图 1 所示。

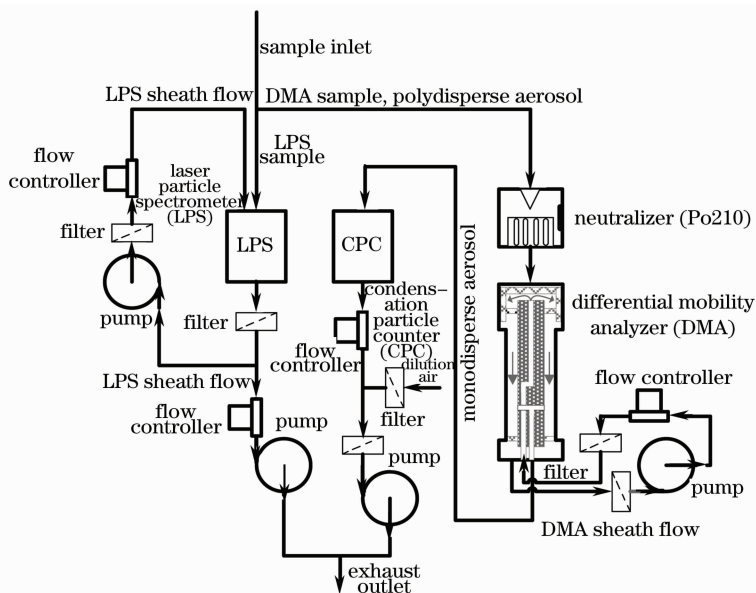


图 1 大气细粒子谱分析仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of fine particle meter

气溶胶进入样机后,首先被分为两路。一路样气直接进入 LPS,通过测量粒子通过激光照射区域产生的散射峰强度反演气溶胶的粒径大小,通过散射峰个数得到粒子的浓度,从而完成 $0.35\sim 10\ \mu\text{m}$ 粒径范围内粒子光学粒径谱的测量。另一路样气进入电荷中和源,经惯性切割粗分级并带电后进入

DMA,根据粒子电迁移率的不同被细分级形成单分散气溶胶。经 DMA 细分级后粒子粒径通常低于光散射的检测下限,故将其通入 CPC 正丁醇饱和蒸汽室,使全部颗粒物与正丁醇过饱和蒸汽充分结合,通过吸湿长大达到光散射检测下限值。最后通过 CPC 的激光粒子计数部分完成细粒子个数的统计。

通过 DMA-CPC 系统,可以检测 5~500 nm 粒径范围内的粒子。FPM 整套系统最高可设 120 个粒径分析通道,实现 5 nm~10 μm 范围内的粒子粒径及数浓度测量。

使用振荡天平 (TEOM),结合 PM10 切割头,对大气中 PM10 质量浓度进行监测,仪器检测精度 5 μg/m³,时间分辨率为 30 min。同时,利用前向散射型大气能见度仪,对大气能见度进行实时监测,仪器检测上限达 50 km。另外,利用气象参数仪,获得观测点大气温湿度、气压及风速风向信息。

2.2 实验观测地点与时间

实验观测地点选在中国科学院遥感与应用研究所 (IRSA)1 号办公楼 5 楼楼顶 (40.00 N,116.38 E),采样头离地面高度约为 15 m。观测点如图 2 所示,北面紧邻奥运村,东面与奥运停车场仅一路之隔,东南面是奥运主场馆区 (包括主新闻中心、鸟巢和水立方等),所选地点监测结果能够客观反映奥运主场馆附近的大气状况。该区域内无大型污染源,除本地污染外,大气污染主要以机动车尾气排放及家庭生活排放为主。选取 2008 年 8 月 8 日至 24 日北京奥运会期间大气细粒子谱、能见度、PM10 质量浓度以及气象参数等数据,主要对奥运期间细粒子谱日平均变化特征、典型天气状况下细粒子谱变化特征及其对能见度的影响进行分析,同时利用细粒子浓度数据计算出了 PM10 质量浓度,并对计算结果与振荡天平所测数据的相关性进行了分析。



图 2 遥感所观测点位置

Fig. 2 Location of the IRSA sampling site in Beijing

3 实验结果分析

3.1 大气细粒子数密度谱日变化特征

来源复杂是大气细粒子的主要特点之一,总体

来讲,可分为自然源和人为源,如建筑扬尘污染、工业气体排放、饮食油烟排放、机动车尾气排放、外地污染输送和大气光化学反应等,都是大气细粒子的来源,而且由不同污染源生成的颗粒污染物组成和粒径分布不同。奥运赛事期间,主场馆附近人为活动较为频繁,且天气状况变化较大,细粒子谱分布的变化规律较其质量浓度变化也更为复杂。

图 3 为奥运期间大气细粒子数浓度谱日平均变化趋势图,可以看出,大气细粒子数浓度谱主要分布于 10~400 nm 之间。粒径在 20 nm 以下及 100 nm 以上粒子谱分布较为稳定,随时间变化较小。而粒径在 100 nm 以下粒子数浓度谱随时间变化较大。由于不同粒径段内粒子来源不同,其数浓度变化特征及其对大气能见度、PM10 质量浓度等的影响也不同。结合大气细粒子谱分析仪粒径检测范围,将气溶胶按粒径大小分为四个模态:1)核模态 (5~20 nm);2)爱根核模态 (20~100 nm);3)积聚模态 (100~1000 nm);4)粗粒子模态 (1~10 μm) [9]。

总粒子数浓度取四种模态粒子数浓度值之和。观测数据表明,粗粒子模态粒子数浓度与其他模态相比非常低,在总数浓度中所占比例不足 1%,故工作将主要围绕 5 nm~1 μm 范围内细粒子数密度进行讨论分析。

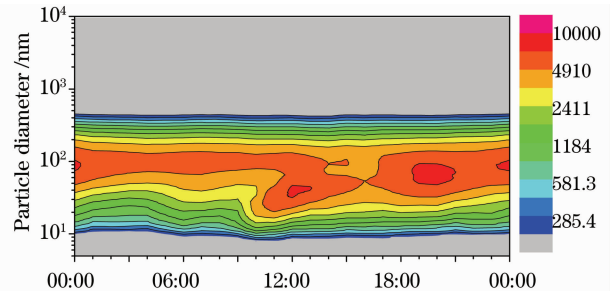


图 3 大气细粒子谱日变化趋势图

Fig. 3 Diurnal variations of particle number size distributions during Beijing 2008 Olympics

总体来讲,奥运期间大气细粒子总数浓度平均值为 5800 cm⁻³,数浓度分布主要是以爱根核模态粒子为主,各模态所占比例分别为 8.6%,65.5%和 25.9%,各模态数浓度平均值及峰值浓度在表 1 中给出。但由于不同模态的细粒子来源不同,受天气条件的影响也不同,各模态峰值浓度并非出现在同一时刻。

表 1 各模态粒子平均浓度及峰值浓度

Table 1 Average value and peak value of particle number concentration in every mode during Beijing 2008 Olympics

	Nucleation mode /cm ⁻³	Aitken mode /cm ⁻³	Accumulation mode /cm ⁻³	Total concentration /cm ⁻³
Average value of particle number concentration	500	3800	1500	5800
Peak value of particle number concentration	4900	13300	3300	16600

图 4 中给出了各模态粒子数浓度日平均值随时间的变化趋势。核模态粒子主要受气相成核过程的影响,变化曲线呈单峰值结构。09:00 左右,随太阳辐射的不断增强,大气中光化学反应增强,有利于核模态粒子的形成;同时,夏季空气中相对湿度较高,核模态粒子可通过吸湿凝聚并迅速增大到爱根核模态,故 12:00 以后其浓度开始降低。对爱根核模态粒子,人为活动及成核模态粒子碰撞凝聚并长大过程的贡献都将影响其浓度,从图 4 中可看出其变化曲线呈典型的三峰值结构:第一峰值出现在 06:00~09:00 之间,此峰值的出现与人为活动的加强密切相关,如家庭油烟排放、汽车尾气排放等;第二峰值出现在 12:00~13:00 之间,此峰值出现一方面是由于中午人为活动的加强,另一方面是成核模态粒子增长的贡献;第三峰值出现在 20:00~21:00 之间,除受夜间人为活动的影响外,近地面贴地逆温的形成将不利于其扩散,同时夜间大气边界层的降低也将影响其变化。而对于积聚模态粒子,除直接生成源外^[10],主要来自于爱根核模态粒子的凝并长大,其粒子生成和消亡速率基本持平,浓度随时间变化趋势不明显,在大气中生存周期最长,受夏季大气边界层高度变化影响,数浓度变化基本是白天低、夜间高。由于粒子总数浓度中爱根核模态所占比例最高,而其他模态数浓度变化较小,故总数浓度变化曲线与爱根核粒子相似,也呈三峰值结构^[11]。

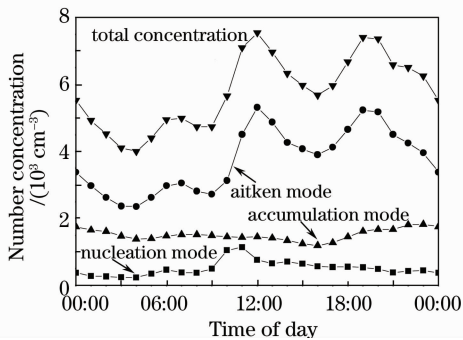


图 4 大气细粒子各模态数浓度日平均变化趋势图

Fig. 4 Diurnal variations of particle number concentration of every mode during Beijing 2008 Olympics

3.2 典型天气大气细粒子谱及其对能见度的影响

目前,对于影响大气能见度主要因素的研究相对较多,但是大多数方法都是从大气湿度、温度以及 PM10 质量浓度与大气能见度的相关性等方面入手。为研究奥运时段典型天气条件下大气细粒子谱变化特征,结合大气能见度数据和气象数据,选择三个特殊时段进行分析,即降雨时段(8月10日12:00至11日12:00)、灰霾时段(8月13日)、晴好时段(8月15日)^[12~14]。表 2 中给出了三个典型特征时段各气象参数的平均值。8月10日至11日,奥运主场馆区域出现连续性降雨,近地面大气相对湿度较大,气温较低,结合图 5 给出的各气象参数随时间的变化趋势可以看出,降雨时段内多数时刻大气相对湿度超过 90%,此段时间内能见度较低,基本在 10 km 以下,8月11日 06:00 降雨结束后,空气湿度开始降低,能见度略有好转;8月13日能见度平均值更低,多数时刻低于 5 km,由表 2 可知,当日空气湿度仅为 72.4%,故当日天气状况可以定为灰霾;8月15日全天天气晴好,能见度都在 20 km 以上,特别是 09:00 以后,能见度达到 50 km。

表 2 不同天气条件下大气气象参数

Table 2 Average value of meteorological parameters in different weather conditions

Weather condition	Temperature /°C	Humidity /%	Visibility /km
Rain(August 10~11)	26.5	88.8	6.8
Haze(August 13)	29.8	72.4	3.7
Sunny(August 15)	28.6	59.3	41.8

图 6 给出了三种典型天气状态下大气细粒子谱随时间的变化情况(a)~(c),同时还给出各模态粒子数浓度随时间的变化趋势图(d)~(f)。在降雨时段,从图 6(a)可以看出,8月10日 15:00 降雨开始后,40~200 nm 粒径段内粒子浓度迅速降低,结合图 6(d)图各模态粒子浓度变化可看出,降雨开始后,爱根核模态和积聚模态粒子浓度均有不同程度的下降,至 11日 06:00 降雨结束,两模态粒子浓度开始增长,而整个降雨过程中,核模态粒子浓度无明

显变化。结合图 5(a)可以看出,降雨过程中大气相对湿度达到 90% 以上,可见降雨过程中能见度的降

低主要受雨雾散射消光的影响,而大气细粒子的散射和吸收作用对能见度的影响较小。

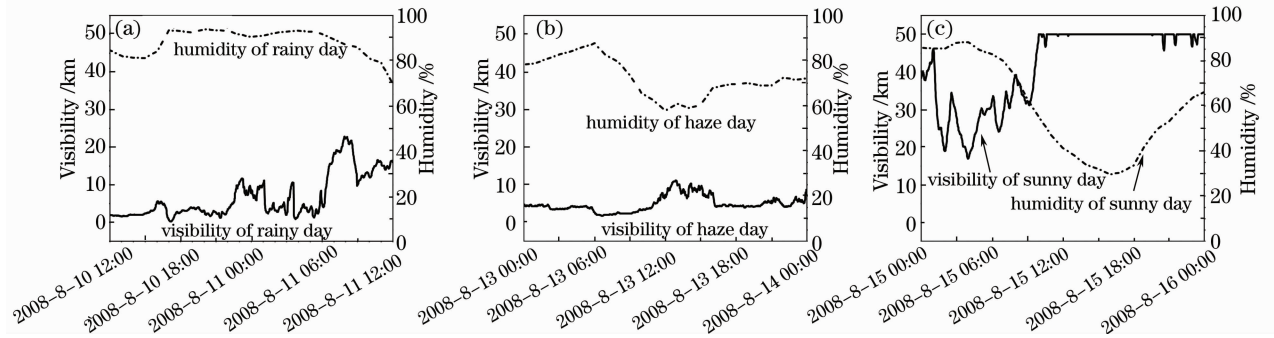


图 5 不同天气条件下大气气象参数变化趋势图。(a)雨天;(b)灰霾;(c)晴天

Fig. 5 Variations of meteorological parameters in different weather conditions. (a) rainy; (b) haze; (c) sunny

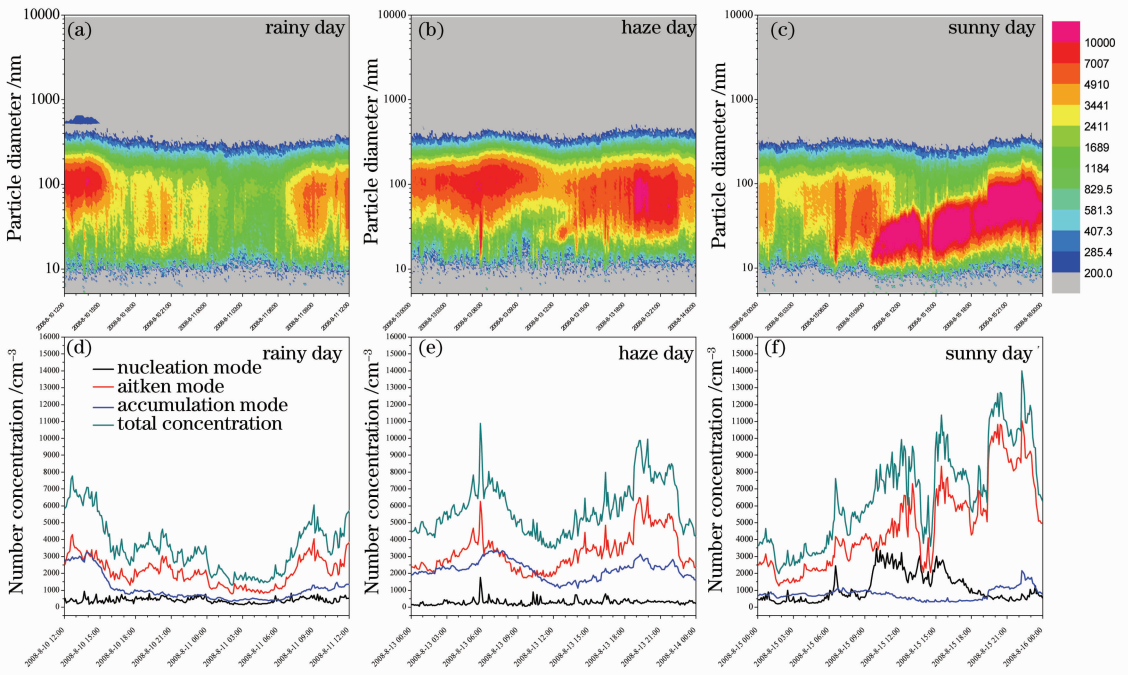


图 6 不同天气状况下大气细粒子谱及各模态粒子数浓度变化趋势图

Fig. 6 Variations of particle number size distribution and particle number concentration in every mode in different weather conditions

灰霾时段内,由图 6(b)可以看出,13 日 06:00 左右细粒子谱中红色区域分布范围达到第一峰值,扩至 20~200 nm;12:00 左右,红色分布区域缩小至 60~200 nm;至 14:00 左右,红色分布区域又迅速变大。结合图 6(e),06:00 左右核模态和爱根核模态粒子浓度相继出现峰值,07:00 左右积聚模态粒子浓度也出现峰值。各模态粒子浓度第一峰值的出现,主要与早晨人为活动的加强有关。由于核模态粒子和爱根核模态粒子通过吸湿碰并作用长大到积聚模态需要一定时间,故各模态第一峰值在时间上是先后出现的。从 12:00 开始,爱根核模态粒子浓度开始增长,至 19:00~20:00 左右,浓度达到第

二峰值,这与图 4 中爱根核模态粒子浓度第三峰值出现时间相一致。

晴好天气时段,如图 6(c)和图 6(f),核模态和爱根核模态粒子浓度第一峰值的出现与图 4 中第一峰值出现时间相一致,但其峰值浓度远高于奥运期间日平均值。对于核模态粒子,09:00 开始至 16:00,多数时刻粒子浓度值达到 2000 cm⁻³。产生这种现象的主要原因主要是晴好天气下,自 09:00 左右随太阳光照的不断增强,大气中的各种光化学氧化反应以及由此引起的气相成核作用明显增强^[13]。但由于核模态粒子粒径较小,粒子以布朗运动,可通过碰撞凝并等迅速增大到爱根核模态,故

16:00 太阳光照降低后,随着大气中光化学反应减弱,其浓度值迅速降低。对于爱根核模态,其第二峰值出现在 12:00~13:00 左右,与图 4 中出现时刻一致。但第二峰值过后,受核模态粒子的增长影响,其浓度一直处于不断增长阶段。至 15 日 23:00 左右,其数浓度达到当日峰值 11000 cm^{-3} 。

表 3 中给出了典型天气时段各模态粒子浓度的平均值。与晴好时段相比,灰霾时段粒径较小的核模态和爱根核粒子浓度较低,而积聚模态粒子浓度

表 3 不同天气条件下各模态粒子平均浓度

Table 3 Average value of particle number concentration in every mode in different weather conditions

Weather condition	Nucleation mode / cm^{-3}	Aitken mode / cm^{-3}	Accumulation mode / cm^{-3}	Total concentration / cm^{-3}
Rainy (August 10~11)	400	2100	1100	3600
Haze (August 13)	300	3300	2200	5800
Sunny (August 15)	1100	4800	800	6700
Olympic Games (August 8~24)	500	3800	1500	5800

3.3 利用细粒子谱反演 PM10 质量浓度

图 7 中给出了奥运期间大气 PM10 质量浓度随时间的变化曲线。图中黑点虚线表示利用 TEOM 振荡天平的直接测量结果。8 月 1 日降雨结束至 9 日,北京地区以晴朗少云天气为主,平均气温较高,

却远远高于晴好时段,由于能见度主要受大气中小粒径粒子的吸收消光作用以及大粒径粒子的散射消光作用影响^[15],可以推测,奥运时段灰霾天气下大气能见度的降低主要受到积聚模态粒子散射作用的影响。而对于降雨时段,尽管受到降雨的清除作用使得各模态粒子浓度都低于灰霾时段和晴好时段,但由于降雨时段内大气湿度较大,且受雨滴的散射作用的影响,能见度仍旧非常低。

湿度较大,风速较低,不利于颗粒污染物的扩散,形成颗粒物的积聚阶段。10 日 15:00 降雨过程开始后,PM10 质量浓度迅速降低。至 24 日奥运会结束,PM10 质量浓度基本都在 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。

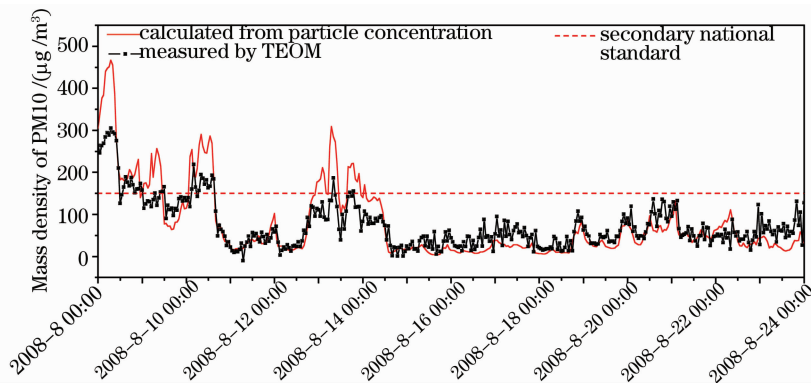


图 7 大气细粒子分布及与 PM10 对比图

Fig. 7 Comparison diagram between aerosol particle size distribution and the PM10

假定粒子为球形,并选择粒子质量浓度为 $1.7 \text{ g}/\text{cm}^3$,可以通过大气细粒子数浓度数据计算得到 PM10 质量浓度^[16],即

$$\rho_{\text{PM}_{10}} = \sum_i \frac{4\pi n_i \rho_p}{3} \left(\frac{D_{p_i}}{2}\right)^3$$

式中 $\rho_{\text{PM}_{10}}$ 为大气中 PM10 质量浓度, ρ_p 为颗粒物密度, D_{p_i} 为颗粒物粒径(直径), n_i 为与粒径 D_{p_i} 相对应的粒子浓度。通过对 $5 \text{ nm} \sim 10 \mu\text{m}$ 粒径范围内粒子质量浓度累加求和,可得到大气中 PM10 质量密度,计算结果在图 7 中用实线表示。

从图 7 中可看出,无论阴霾天气时段还是间歇

性降雨时段,又或是晴好时段,PM10 计算结果与 TEOM 直接测量结果除了数值上的微小差别外,在随时间的变化趋势上具有很好的一致性。图 8 中就两种不同测量方法得到的 PM10 数据的相关性进行了分析,图中横坐标对应利用大气细粒子谱数据计算得到的 PM10 质量浓度值,纵坐标对应振荡天平的直接测量值。利用 8 月 8 日至 24 日共 17 天 408 个样本数据,分析得到两者线性相关系数达到 86.1%,两种仪器所测数据具有相当好的相关性,这一方面说明利用大气气溶胶粒径分析仪进行大气 PM10 的反演估算具有一定的可行性,另一方面也

验证了粒子谱分析仪所测粒径以及浓度值能够正确反映出不同大气环境下的细粒子分布特征。

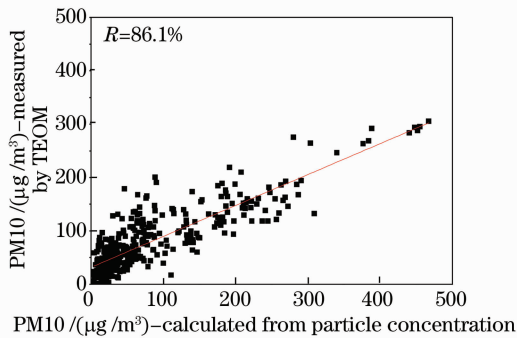


图 8 粒谱数据反演 PM10 结果与 TEOM 测量结果相关性分析

Fig. 8 Relation between PM10 measured by TEOM and PM10 calculated from the data of particle size distribution

4 结 论

利用大气细粒子谱分析仪、振荡天平、大气能见度仪和气象参数仪,对奥运期间北京奥运主场馆区域大气气溶胶 $5\text{ nm} \sim 10\ \mu\text{m}$ 范围内细粒子谱、PM10 质量浓度、能见度和温湿度等进行了连续测量,并对大气细粒子数浓度谱及变化特征、各模态粒子日平均数浓度变化特征及其与能见度、温湿度等参数的相互影响进行了分析。结果表明,1)核模态粒子主要受大气光化学反应及气相成核过程的影响,变化曲线呈单峰值结构;而对爱根核模态粒子,人为活动和核模态粒子吸湿及碰撞长大都将影响其变化,变化曲线呈典型的三峰值结构;除直接生成源外,积聚模态粒子主要来自于爱根核模态粒子的凝聚并长大,其粒子生成和消亡速率基本持平,浓度变化规律不明显,基本是白天低、夜间高;2)降雨对爱根核模态和积聚模态粒子都有一定的清除作用,且粒径越大,清除作用越强,但对核模态粒子浓度的清除作用较小;灰霾时段,粒径较大的积聚模态粒子浓度明显高于其他时段,大气能见度主要受到积聚模态粒子散射消光的影响;晴好天气条件下,核模态粒子浓度变化较大,这也将间接影响爱根核模态和积聚模态粒子浓度;3)利用大气细粒子数浓度计算大气 PM10 质量浓度,两者在随时间的变化趋势上具有很好的一致性,相关系数达到 86.1%。

参 考 文 献

1 Wu Zhijun, Hu Min, Lin Peng *et al.*. Particle number size distribution in the urban atmosphere of Beijing, China [J].

Atmospheric Environment, 2008, **42**(34): 7967~7980

2 X. J. Deng, X. X. Tie, D. Wu *et al.*. Long-term trend of visibility and its characterizations in the pearl river delta (PRD) region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(7): 1424~1435

3 B. Wehner, A. Wiedensohler, T. M. Tuch *et al.*. Variability of the aerosol number size distribution in Beijing, China; new particle formation, dust storms, and high continental background [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**(22): L22108

4 J. H. Seinfeld, S. N. Pandis. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* [M]. New York: Wiley, 2006

5 N. Englert. Fine particles and human health—a review of epidemiological studies [J]. *Toxicology Letters*, 2004, **149**(1-3): 235~242

6 D. B. Warheit, C. M. Sayes, K. L. Reed *et al.*. Health effects related to nanoparticle exposures: environmental, health and safety considerations for assessing hazards and risks [J]. *Pharmacology & Therapeutics*, 2008, **120**(1): 35~42

7 Kan Haidong, S. J. London, Chen Guohai *et al.*. Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China [J]. *Environment International*, 2007, **33**(3): 376~384

8 U. Lohmann, J. Feichter. Global indirect aerosol effects: a review [J]. *Atmos Chem. Phys.*, 2005, **5**: 715~737

9 M. Kulmala, H. Vehkamäki, T. Petäjä *et al.*. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations [J]. *J. Aerosol Sci.*, 2004, **35**(2): 143~176

10 B. Wehner, A. Wiedensohler. Long term measurements of submicrometer urban aerosols; statistical analysis for correlations with meteorological conditions and trace gases [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2003, **3**: 867~879

11 Wang Jie, Liu Jianguo, Lu Yihuai *et al.*. Aerosol particle number size distribution measurement in Beijing city during the olympic games [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2009, **4**(4): 290~299

王 杰, 刘建国, 陆亦怀等. 北京城区奥运期间大气细粒子谱分布与变化特征研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2009, **4**(4): 290~299

12 Wu Dui. A discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather [J]. *Meteorological Monthly*, 2005, **31**(4): 3~7

吴 兗. 关于雾与霾的区别和灰霾天气预警的讨论 [J]. *气象*, 2005, **31**(4): 3~7

13 China Meteorological Administration. *Standard Surface Meteorological Observation* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. 21~27

中国气象局. *地面气象观测规范* [M]. 北京: 气象出版社, 2003. 21~27

14 Shi Zongbo, He Kebin, Yu Xuechun *et al.*. Diurnal variation of number concentration and size distribution of ultra fine particles in the urban atmosphere of Beijing in Winter [J]. *J. Environment Sciences*, 2007, **19**(8): 933~938

15 Wang Mingxing, Zhao Deshan *et al.*. *Atmospheric Aerosols of Municipal Coal and Smoke Pollution* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1991. 9-11, 21-24

王明星, 赵德山等. *煤烟型城市污染大气气溶胶* [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991. 9-11, 21-24

16 Gu Fang, Yang Juan, Bian Baomin *et al.*. Aerosol mass density algorithm based on average mass [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1706~1710

顾 芳, 杨 娟, 卞保民等. 基于平均质量的悬浮颗粒物的质量密度算法 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1706~1710