

北京 2008 奥运期间 PM_{10} 的单颗粒形貌类型及生物活性研究

邵龙义, 宋晓焱, 刘君霞, 周林

(中国矿业大学(北京) 资源与地球科学系, 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 采集 2008 年北京奥运会期间大气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 样品, 计算质量浓度, 得出奥运会期间大气污染水平. 利用场发射扫描电镜(FESEM)和图像分析技术对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的形貌特征和粒度分布进行分析. 同时应用质粒 DNA 评价法研究了奥运会期间 PM_{10} 样品的生物活性. 结果表明, 奥运会期间可吸入颗粒物质量浓度日均值均符合国家 2 级标准, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的比值为 0.63, 以细粒子 $PM_{2.5}$ 为主. 奥运期间 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 样品的微观形貌主要为球形颗粒、烟尘集合体、不规则矿物和未知细颗粒, 其中球形颗粒和未知细颗粒占有相当大的数量比例. PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 数量-粒度呈单峰分布, 主要分布在 0.1~0.4 μm 范围内. PM_{10} 的体积-粒度呈双峰分布, 主要分布在 0.4~0.5 μm 和 1~2.5 μm 范围内, $PM_{2.5}$ 主要分布在 1~2.5 μm 范围内. 质粒 DNA 评价结果表明, 北京 2008 奥运期间可吸入颗粒物生物活性明显降低, 要达到 20% 的损伤需要的颗粒物剂量浓度在 $180 \mu g \cdot mL^{-1}$ 以上, 明显高于 2004 年的 $63 \mu g \cdot mL^{-1}$, 可见奥运期间大气颗粒物对人体危害比往年减小.

关键词: 奥运会; 可吸入颗粒物(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$); 形貌特征; 生物活性; 北京

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)12-3448-07

Individual Particle Morphology and Bioreactivity of PM_{10} in Beijing During the 2008 Olympic Games

SHAO Long-yi, SONG Xiao-yan, LIU Jun-xia, ZHOU Lin

(State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Department of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Inhalable particulates, including PM_{10} and $PM_{2.5}$, were collected on the campus of China University of Mining and Technology during the Summer Olympic Games of Beijing in 2008. The mass concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ were monitored. The morphology and size distribution of individual particles in PM_{10} and $PM_{2.5}$ were investigated by a high-resolution Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) and image analysis (IA). The toxicity reflected by bioreactivity of PM_{10} during the Olympic Games was also studied by Plasmid DNA assay. The results showed that the mass levels of PM_{10} and $PM_{2.5}$ were well below $81.6 \mu g \cdot m^{-3}$ and $54.6 \mu g \cdot m^{-3}$, meeting the second ambient air quality standard of China. The ratio of $PM_{2.5}$ and PM_{10} was averaged 0.63, indicating that the PM_{10} is dominated by fine particles. In terms of microscopic morphology, four types of particles were identified, including spherical particles, soot aggregates, minerals and unresolved fine particles, with the spherical particles and unresolved particles being the predominant components. Most PM_{10} and $PM_{2.5}$ particles were in the size range of 0.1-0.4 μm , displaying a unimodal pattern. Volume-size distribution of PM_{10} exhibited a bimodal pattern with the peaks in 0.4-0.5 μm and 1-2.5 μm , and $PM_{2.5}$ particles were mainly concentrated in the range of 1-2.5 μm . The results from plasmid assay showed that the bioreactivity of PM_{10} during the Olympic games was obviously lower than those of past summers, with the TD20 (toxic dosage of PM_{10} causing 20% plasmid DNA damage) being higher than those of the past summers.

Key words: Olympic Games; inhalable particulates (PM_{10} and $PM_{2.5}$); morphology; bioreactivity; Beijing City

可吸入颗粒物(PM_{10})是大气中空气动力学直径 $\leq 10 \mu m$ 的颗粒物. 其中空气动力学直径在 2.5~10 μm 范围的为粗颗粒, $\leq 2.5 \mu m$ 的为细颗粒物($PM_{2.5}$). 目前对颗粒物的研究主要集中在化学成分^[1,2]、物理特征^[3,4]等方面, 大气可吸入颗粒物对人体的损伤机制尚不清楚^[5-7]. 有学者认为颗粒物的粒径大小是表征可吸入颗粒物行为的重要参数^[8,9]. 颗粒物的粒径越小, 则表面积越大, 更容易吸附有害的金属和有机物, 对人体的危害越大^[10-12].

质粒 DNA 评价法作为一种简易可行的毒理学方法, 已经被有效地用于评价大气颗粒毒性^[13-16].

北京在 2008 年夏季成功举办第 29 届奥林匹克运动会. 北京市政府提出的“科技奥运、绿色奥运、人

收稿日期: 2009-04-14; 修订日期: 2009-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(4057065); 澳门科技发展基金项目(023/2006/A); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070290007)

作者简介: 邵龙义(1964~), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为环境地球化学、气溶胶科学, E-mail: ShaoL@cumt.bj.edu.cn

文奥运”的口号引起了社会各界的共识,北京市空气首要污染物主要是可吸入颗粒物^[17]。“绿色奥运”对可吸入颗粒物浓度的要求是低于 150 μg•m⁻³,即达到国家空气质量 2 级标准。北京市政府在奥运期间对机动车按牌照尾号,实行单号单日,双号双日行驶、大型工业搬离北京以及停止建筑工地的施工等措施来确保奥运会的空气质量。本课题组在奥运期间对北京市空气质量进行监测,旨在分析奥运期间 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的质量浓度、PM₁₀ 的微观形貌和粒度分布、以及采用质粒 DNA 评价法研究 PM₁₀ 的毒性。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2008 年 8 月奥运会期间在中国矿业大学(北京)综合楼 5 层平台采集了 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 样品。该采样点距地面高度大约 17.8 m,经纬度为 E116°20′45.6″,N36°59′37.1″,位于西北城区的中关村高新科技园区,东面紧临学院路,距北四环大约 600 m,周围没有发现大型局地工业污染源。采样用 Minivol PM_{2.5}-PM₁₀-TSP 便携式采样仪(Air Metric Co. USA),采样流量为 5 L/min,使用聚碳酸酯滤膜(Millipore, USA),孔径为 0.6 μm。用 Kestral NK4000 型气象测量仪测量记录采样过程的气象要素,采集奥运期间 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 样品,将采样前后的滤膜恒温恒湿 48 h 后用日本 AND 天平(0.000 01 g)衡重,据此计算出质量浓度。

1.2 场发射扫描电镜(FESEM)及图像分析

场发射扫描电镜是可以获得颗粒物高分辨率微观图像的一种技术。将采集的滤膜裁下约 1/10,用双面胶带将样品平整地粘贴在金属垫圈上,样品镀金后放入电镜的样品仓中,抽真空后,再进行观察;本研究中所使用的是英国产 LEO453VP 场发射扫描电镜,每个样品随机选取几个点拍摄 6~7 张 FESEM 照片。将 FESEM 照片导入显微数字图像粒度分布软件进行粒度分布,获得颗粒物数量-粒度分布,表面积-粒度分布和颗粒物类型及数量等参数。使用中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室的显微数字图像粒度分析系统。

1.3 质粒 DNA 评价法

质粒 DNA 评价法是一种测量活性氧对质粒 DNA 的氧化性损伤能力的体外方法,这种方法已被用来评价可吸入颗粒物的毒性^[13]。DNA 评价法的原理与具体步骤参见文献[13]。对奥运期间大气样品

使用涡旋振荡法将颗粒物从滤膜上剥离下来,后将混合溶液转入另一清洁的离心管中,取出一部分作为全样品,另一部分离心分离后离心液作为水溶样品。利用专门软件 Gene Tools 对得到的凝胶图进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 奥运可吸入颗粒物质量浓度

矿大采样期间,白天(D表示)和晚上(N表示)12 h 换一个样,进行 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的同时观测。将当日 09:00~次日 09:00 作为当日的空气质量浓度,结果如表 1 所示。

奥运会从 2008 年 8 月 8~24 日,共 17 d,除去 10、11、14、21 日下雨没有监测外,根据表 1 可知,PM₁₀ ≤50 μg•m⁻³,即空气质量为优的天数为 8 d;PM₁₀ ≤150 μg•m⁻³ 空气质量为良的天数为 5 d。

1997 年,美国首次颁布了 PM_{2.5} 的空气质量标准,年均值为 15 μg•m⁻³,日均值 65 μg•m⁻³,而我国至今还没有制定出 PM_{2.5} 质量标准。本次监测除 8 月 8 日 PM_{2.5} 浓度超过 65 μg•m⁻³ 之外,其余符合美国 PM_{2.5} 质量标准。

表 1 北京 2008 奥运期间矿大校园采样点 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 日均值/μg•m⁻³

Table 1 Daily concentrations of PM ₁₀ and PM _{2.5} collected on the CUMTB campus during the 2008 Beijing Olympics/μg•m ⁻³			
日期	PM ₁₀ 日均值	PM _{2.5} 日均值	PM _{2.5} /PM ₁₀
2008-08-08	127.1	102.5	0.8
2008-08-09	68.1	49.6	0.7
2008-08-12	42.0	35.2	0.8
2008-08-13	64.6	51.2	0.8
2008-08-15	23.3	12.0	0.5
2008-08-16	36.2	16.6	0.5
2008-08-17	22.5	8.6	0.4
2008-08-18	28.1	14.1	0.5
2008-08-19	41.3	28.9	0.7
2008-08-20	61.8	44.3	0.7
2008-08-22	37.8	20.8	0.5
2008-08-23	41.2	21.3	0.5
2008-08-24	81.6	54.6	0.7
2004-07 ¹⁾	105.4±15.6	54.0±10.5	0.5

1) 文献[18]相关数据

在 8 月 8 日开幕式当天,可能由于燃放烟花等原因,空气质量浓度较高。但奥运会期间整体空气质量良好,达到“绿色奥运”的要求。PM_{2.5}/PM₁₀ 的日平均值为 0.63,PM_{10-2.5} 占 0.37,说明奥运期间可吸入颗粒物以 PM_{2.5} 为主。2008 年奥运会期间矿大采样

PM₁₀和 PM_{2.5} 日均值分别为 52.0、35.4 μg•m⁻³. 李金娟^[18] 于 2004 年 7 月在同一地点 12h 连续监测的 PM₁₀和 PM_{2.5} 的平均值分别为 (105.4 ±15.6)、(54.0 ±10.5) μg•m⁻³, 对比可知 2008 年奥运期间空气质量明显好转.

促使奥运期间空气质量好转的因素除了政府的有力控制措施外, 气象因素也起到重要作用. 北京市奥运期间不同时间段 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的质量浓度与温度的相关性系数为 0.63 和 0.64, 成正相关, 表明气温越高, 可吸入颗粒物的污染水平也随之升高. 与压强、风速、相对湿度相关性不明显. 与风速相关性不

明显可能是因为奥运期间风速不大, 基本都为微风. 从表 1 可以看出在 8 月 10、11 日降雨以后, 颗粒物浓度也随之下降. PM₁₀、PM_{2.5} 分别从 8 日白天的 173.8、131.8 μg•m⁻³, 下降到 12 日白天的 23.6、22.4 μg•m⁻³, 污染物浓度下降了 86% 和 83%, 说明降雨对颗粒物浓度的减少起到重要作用.

2.2 奥运期间北京大气颗粒物形貌特征

为了分析奥运会期间大气颗粒物的微观形貌, 选取了奥运期间天气情况相似的白天和晚上 PM₁₀ 以及 8 月 16 日白天的 PM_{2.5} 聚碳酸酯滤膜的样品进行了扫描电镜分析, 具体的样品信息见表 2.

表 2 2008 年奥运大气可吸入颗粒物扫描电镜分析所用样品信息

Table 2 Information of PM₁₀ and PM_{2.5} samples collected during 2008 Olympic Games used for the FESEM analysis

样品编号	颗粒物类型	采样日期	采样时间/h	质量浓度/μg•m ⁻³	气象条件
1	PM ₁₀	2008-08-15(D)	8	26.94	晴, 西风<3级
2	PM ₁₀	2008-08-16(D)	6	15.77	晴, 静风
3	PM ₁₀	2008-08-18(D)	6	42.05	晴, 西风<3级
4	PM ₁₀	2008-08-19(D)	6	41.96	晴, 西北风<3级
5	PM ₁₀	2008-08-15(N)	8	29.71	晴, 静风
6	PM ₁₀	2008-08-16(N)	6	25.10	晴, 静风
7	PM ₁₀	2008-08-17(N)	6	20.43	多云, 东北风<3级
8	PM ₁₀	2008-08-19(N)	6	46.56	多云, 静风
9	PM _{2.5}	2008-08-16(D)	6	12.62	晴, 静风

高分辨率 FESEM 图像可以清晰地显示亚微米级颗粒的粒径和微观形貌, 场发射电镜附带的 X 射线能谱(EDX) 可以对单个颗粒物样品中的元素进行定性、定量分析. 图 1 为 2008 年 8 月采集的奥运期间大气 PM₁₀和 PM_{2.5} 的微观形貌图像. 单颗粒类型主要有: ①烟尘集合体, 主要由燃烧源排放, 包括燃煤、汽车尾气及生物质燃烧, 主要包括湿的烟尘集合体、密实状烟尘集合体、蓬松状烟尘集合体[图 1(a)]^[19]. X 射线能谱(EDX) 分析表明其主要成分是

C^[20]. ②球形颗粒(包括圆形、椭圆和浑圆) 小部分来源于燃煤^[21], 燃煤排放的有表面光滑的球形颗粒和表面被颗粒物覆盖的球形颗粒[图 1(b)], EDX 分析表明其主要成分是 Si、Al, 并含有少量的 Ca、K 等元素, 有时其成分全部为 C^[22]. 奥运期间球形颗粒大部分来源于空气中二次反应生成的硝酸盐包裹硫酸盐颗粒^[23]. ③不规则矿物[图 1(c)], 主要是地壳源矿物, 其成分以 Si、Al、Ca、K、S、Fe 等为主^[24, 25]. ④一些不能判断类型的未定颗粒物, 未见有生物颗粒出现.

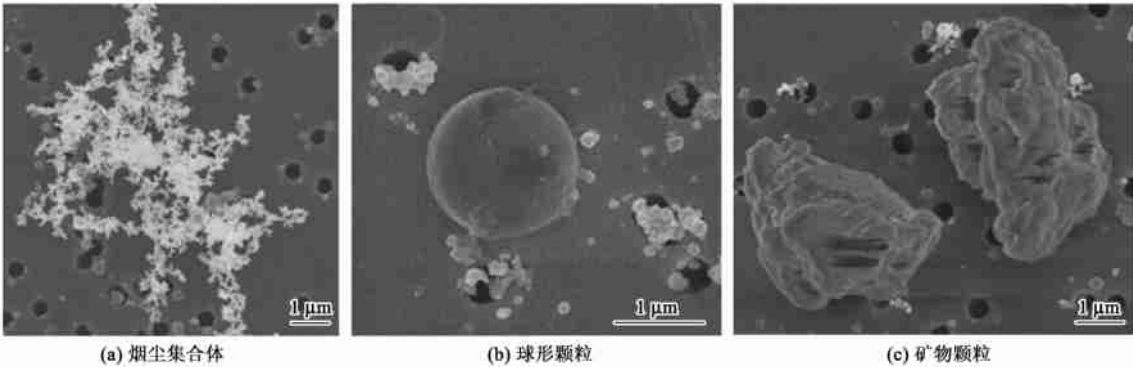


图 1 2008 年奥运会期间的样品 FESEM 微观形貌(比例尺 1 μm)

Fig. 1 FESEM images of the PM₁₀ collected during the 2008 Beijing Olympics

2.3 奥运大气 PM_{10} 的粒度分布

2.3.1 数量-粒度分布

本研究对所采集的颗粒物的数量-粒度分布和体积-粒度分布进行分析. 取白天和晚上 4 个样品的数量-粒度和体积-粒度分布的平均值作为奥运期间 PM_{10} 白天和晚上的粒度分布, 结果如图 2.

由图 2(a) 可以看出, 白天 PM_{10} 样品的数量-粒度分布中各颗粒物均呈单峰分布, 矿物颗粒、球形颗粒(包括圆形、椭圆形和浑圆形)和烟尘集合体主要分布在 $0.1\sim 0.4\ \mu\text{m}$ 范围内, 未知颗粒则主要分布在 $< 0.2\ \mu\text{m}$ 范围内. 由图 2(b) 可以看出, 晚上 PM_{10} 样品中矿物颗粒、球形颗粒主要出现在 $0.1\sim 0.4\ \mu\text{m}$

范围内, 而烟尘的峰值出现在 $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$, 未知细颗粒的峰值出现在 $< 0.2\ \mu\text{m}$. 由此也可以证实, 奥运期间以 $\text{PM}_{2.5}$ 即细粒子为主导, 尤其是 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下的颗粒. 由图 2(c) 可以看出, 8 月 16 日 $\text{PM}_{2.5}$ 的数量粒度主要分布在 $< 0.3\ \mu\text{m}$ 范围内, 其中未知细颗粒主要分布在 $< 0.1\ \mu\text{m}$ 范围内, 球形颗粒、矿物、烟尘集合体主要分布在 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 范围内.

与 2004 年李金娟^[18] 同一采样点的夏季采样 PM_{10} 的颗粒物的数量相比, 2008 年烟尘集合体 (15.78%) 比 2004 年 (92.28%) 明显降低了很多, 说明奥运期间的车辆限行政策取得了一定的成果.

2.3.2 体积-粒度分布

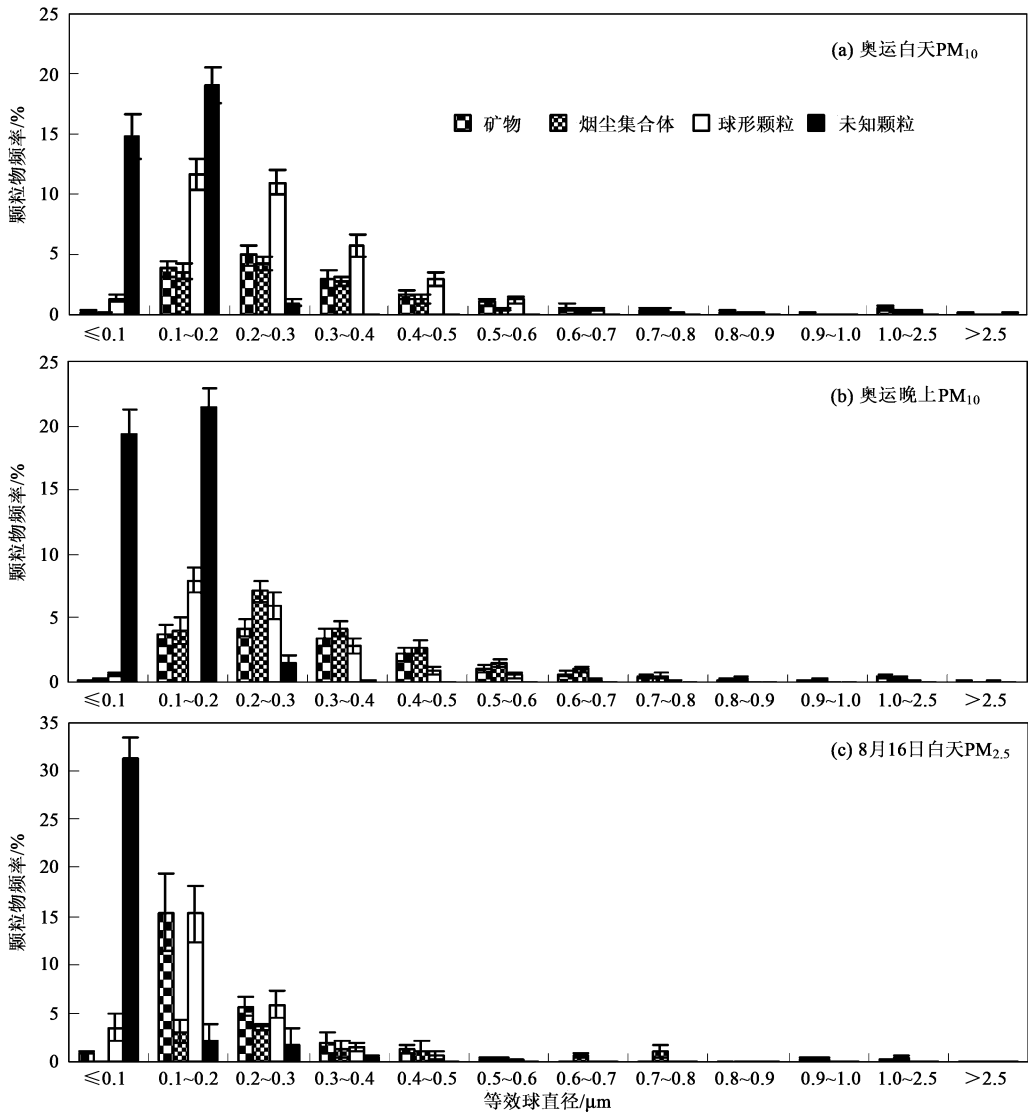


图2 2008年奥运会期间可吸入颗粒物数量-粒度分布

Fig. 2 Number-size distribution of the PM_{10} collected during the 2008 Beijing Olympics

奥运期间样品的体积-粒度分布见图 3. 由图 3 分布中, 粒度峰值出现在 $0.3\sim 0.4$ 、 $0.6\sim 0.7$ 和 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 范围内, 体积分数分别为 10.48%、8.18% 和

(a) 可以看出, 在白天 PM_{10} 的体积-粒度分布呈多峰

25.42%。晚上体积-粒度百分比呈双峰分布,峰值出现在 0.4~0.5 μm 和 >2.5 μm 范围内,体积分数为 8.99% 和 22.88%。8 月 16 日白天 PM_{2.5} 体积-粒度分布呈双峰型,峰值在 0.4~0.5 μm 和 1.0~2.5 μm 范围内。在 PM 中 >1 μm 的颗粒物数量不多,但对体积分数(质量浓度)的贡献却很大。由此可以看出,粗颗粒对大气颗粒物的质量浓度贡献较大。

2004 年李金娟^[18]研究北京市夏季样品的体积-粒度分布则呈双峰分布,市区样品的主峰分布在 <0.6 μm 的粒径范围内,次峰在 0.7~1.0 μm 的范围内;而 2008 年奥运期间 PM₁₀ 的主峰分布在 0.3~0.4 μm 的粒径范围内,次峰则在 0.6~0.7 μm 和 1~2.5 μm 的范围内,说明奥运期间 PM₁₀ 以细粒子为主。

2.4 奥运期间大气 PM₁₀ 的生物活性研究

本研究分析了 8 月 8 日和 8 月 20 日可吸入颗粒物样品的生物活性实验。表 3 为质粒 DNA 分析的样品的采样参数。

图 4 是奥运期间 8 月 8 日和 8 月 20 日采集的 PM₁₀ 样品对超螺旋 DNA 的氧化性损伤凝胶图,样品的 DNA 氧化性损伤分析结果见表 3。

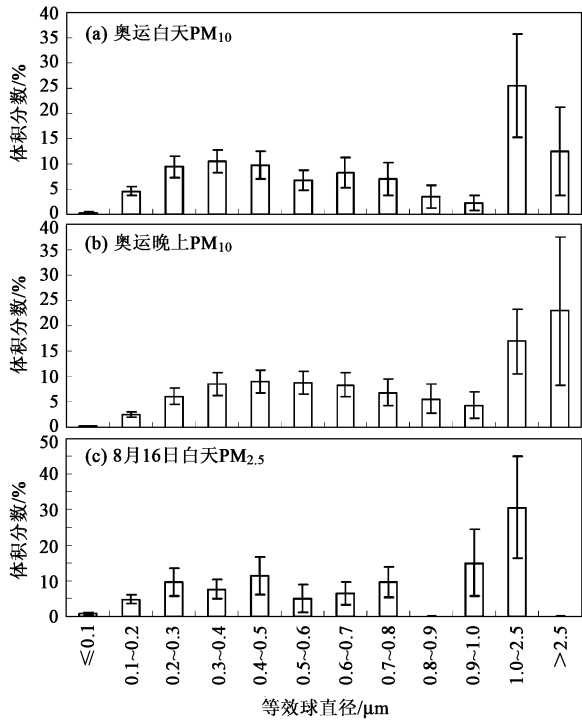
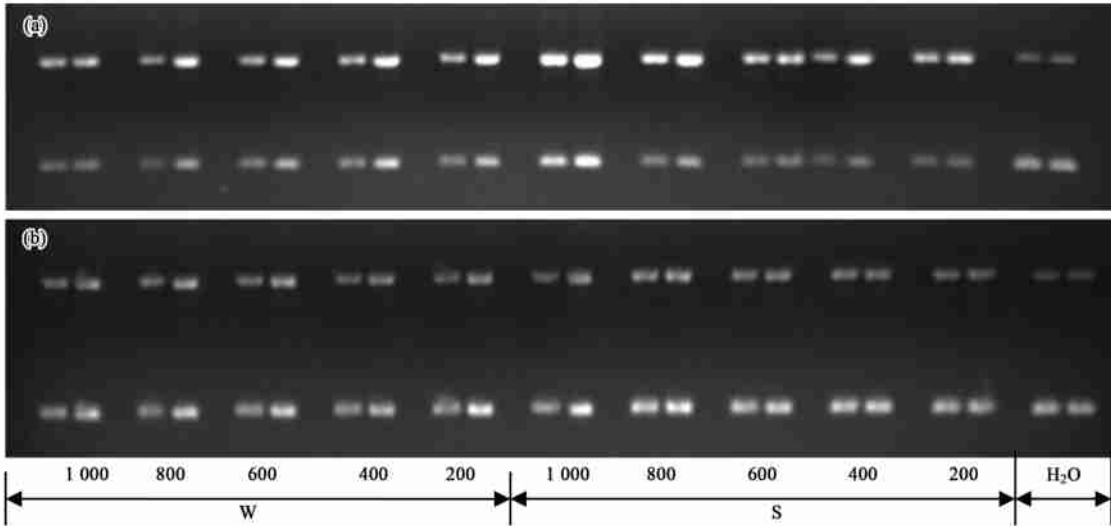


图 3 2008 年奥运会期间可吸入颗粒物体积-粒度分布
Fig. 3 Number-size distribution of the PM₁₀ collected during the 2008 Beijing Olympics

表 3 毒理试验样品参数
Table 3 Parameters of samples for toxicological assessment of PM₁₀

编号	采样日期	采样时间/h	采样浓度/μg·m ⁻³	天气	TD20 ² /μg·mL ⁻¹
2008-8-1	2008-08-08~2008-08-09	24	24.6	阴	180(W)/>1000(S)
2008-8-11	2008-08-20~2008-08-21	23.5	24.7	晴	>1000(W)/>1200(S)
2002-7-1 ¹⁾	2002-07-30		66.9		<37.5(W)/430(S)
2004-7-2 ¹⁾	2004-07-04~2004-07-06		109.0		63(W)/65(S)

1) 文献[18]相关数据; 2) W 表示全样品, S 表示水溶样品



(a) 为 8 月 8 日样品, (b) 为 8 月 20 日样品; W 表示全样品; S 表示水溶样品
图 4 2008 年奥运 PM₁₀ 样品对质粒 DNA 的氧化性损伤凝胶图

从样品在 200、400、600、800 和 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的剂量下对 DNA 损伤统计结果可以看出, 损伤率随着剂量的增加而增大, 由此可计算出导致 20% DNA 损伤所需要的剂量, 即 TD20 值. 2008 年 8 月 8 日全样和水溶样品的 TD20 值分别为 180 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $> 1\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$, 8 月 20 日全样和水溶样品的 TD20 值分别为 $> 1\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $> 1\,200\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$. 与其他类型的 PM₁₀ 样品相比^[17], 北京奥运期间的样品有较高的 TD20 值, 意味着其氧化性损伤能力明显偏低.

本次所测得的奥运样品的 TD20 值亦明显高于非奥运年 PM₁₀ 的 TD20 值(表 3). 北京市 2002 年 7 月颗粒物全样和水溶样品的 TD20 值分别为 $< 37.5\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $430\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$, 2004 年 7 月颗粒物全样和水溶样品的 TD20 值分别为 $63\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $65\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ^[18]. 对比数据可知, 奥运会期间大气颗粒物对 DNA 的损伤明显变小. 说明奥运期间采取的控制车辆行驶、防止建筑扬尘扩散、控制工厂污染物排放等措施, 以及降雨等因素的影响, 在可吸入颗粒物质量浓度降低的同时, 颗粒物的毒性(对 DNA 的损伤能力)也降低.

3 结论

(1) 2008 年奥运期间在矿大校园共监测 13 d, 空气质量为优的天数为 8 d, 空气质量为良的天数为 5 d, 达到“绿色奥运的要求”. PM_{2.5} 除 8 月 8 日开幕式当天外, 其余日全部达到美国 EPA 的日均值标准 ($\leq 65\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). PM_{2.5}/PM₁₀ 的平均值为 0.65, 说明可吸入颗粒物中主要以细粒子为主.

(2) 奥运期间样品的微观形貌主要为矿物、球形颗粒、烟尘集合体和未知细颗粒. 其中球形颗粒占数量百分比最高为 41%, 球形颗粒小部分为燃煤灰飞, 大部分为硝酸盐包裹硫酸盐粒子, 即空气中由于人为污染生成的二次粒子.

(3) 奥运期间 PM₁₀ 的数量-粒度分布中, 球形颗粒、矿物和烟尘主要集中在 0.1~0.4 μm 范围内, 未知细颗粒出现在 $< 0.2\ \mu\text{m}$ 范围内. PM_{2.5} 的数量主要分布在 $< 0.3\ \mu\text{m}$ 范围内, 其颗粒数量占到 80% 以上, 反映出奥运期间大气颗粒物有粒径变小的趋势.

(4) 2008 年北京奥运期间 PM₁₀ 生物活性明显降低, 要达到 20% 的损伤需要的颗粒物剂量在 180 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 以上, 明显低于 2004 年的 $63\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$, 可见奥运期间大气颗粒物对人体危害比往年减小.

参考文献:

- [1] Hu M, He L Y, Zhang Y H, *et al.* Seasonal variation of iron species in fine particles at Qingdao, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**: 5853-5859.
- [2] Shao L Y, Shi Z B, Jones T P, *et al.* Bioreactivity of particulate matter in Beijing air: Results from plasmid DNA assay [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **367**: 261-272.
- [3] Oberdorster G. Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles [J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2001, **74**: 1-8.
- [4] Gupta A, Cheong K W. Physical characterization of particulate matter and ambient meteorological parameters at different indoor-outdoor locations in Singapore [J]. *Building and Environment*, 2007, **42**: 237-245.
- [5] Hsiao W L W, Mo Z Y, Fang M, *et al.* Cytotoxicity of PM_{2.5} and PM_{2.5-10} ambient air pollutants assessed by the MTT and the comet assays [J]. *Mutation Research*, 2000, **471**: 45-55.
- [6] Tao F, Gonzalez-Flench B, Kobzik L, *et al.* Reactive oxygen species in pulmonary inflammation by ambient particulates [J]. *Free Radical Biology & Medicine*, 2003, **35**(4): 327-340.
- [7] 张文丽, 徐东群, 崔九思. 大气细颗粒物污染监测及其遗传毒性研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2003, **1**(1): 3-4.
- [8] 蒋红梅, 王定勇. 大气可吸入颗粒物的研究进展 [J]. *环境科学动态*, 2001, (1): 11-15.
- [9] 朱广一. 大气可吸入颗粒物研究进展 [J]. *环境保护科学*, 2002, **28**(113): 3-5.
- [10] Wilson M R, Lightbody J H, Donaldson K, *et al.* Interactions between ultrafine particles and transition metals *in vivo* and *in vitro* [J]. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2002, **184**: 172-179.
- [11] Nemmar A, Delaunois A, Nemery B. Inflammatory effect of intratracheal instillation of ultrafine particles in the rabbit: role of G-fiber and mast cells [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 1999, **160**: 250-261.
- [12] Quackenboss J J, Lebowitz M D, Hayes C. Epidemiological study of respiratory responses to indoor/outdoor air quality [J]. *Environment International*, 1989, **15**: 493-502.
- [13] Donaldson K, Beswick P H, Gilmour P S. Free radical activity associated with the surface of the particles: a unifying factor in determining biological activity [J]. *Toxicology Letter*, 1996, **88**: 293-298.
- [14] Greenwell L L, Moreno T, Jones T P, *et al.* Particle-induced oxidative damage is ameliorated by pulmonary antioxidants [J]. *Free Radical Biology & Medicine*, 2002, **32**(9): 898-905.
- [15] Donaldson K, Brown D M, Mitchell C, *et al.* Free radical activity of PM₁₀: iron-mediated generation of hydroxyl radicals [J]. *Environmental Health Perspective*, 1997, **5**: 1285-1289.
- [16] Stone V, Shaw J, Brown D M, *et al.* The role of oxidative stress in the prolonged inhibitory effect of ultrafine carbon black on epithelial cell function [J]. *Toxicity in Vitro*, 1998, **2**: 649-659.
- [17] 邵龙义, 杨书申, 时宗波, 等. 城市大气可吸入颗粒物物理化学特征及生物活性研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2006. 161-162.
- [18] 李金娟. 城市可吸入颗粒物的生物活性研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2006.

- [19] 李凤菊, 邵龙义, 杨书申, 等. 郑州大气 PM_{10} 的形貌特征及生物活性研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2654-2658.
- [20] 吕森林, 邵龙义, Tim Jones, 等. 北京 PM_{10} 中矿物颗粒的微观形貌及粒度分布[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(7): 863-869.
- [21] 邵龙义, 时宗波. 北京西北城区与清洁对照点夏季大气 PM_{10} 的微观特征及粒度分布[J]. 环境科学, 2003, **24**(5): 11-16.
- [22] 肖正辉, 邵龙义, 张宁, 等. 兰州市冬季大气 PM_{10} 的微观形貌和粒度分布[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, **26**(1): 147-148.
- [23] Li W J, Shao L Y, Observation of nitrate coatings on atmospheric mineral dust particles [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2008, **8**: 19249-19272.
- [24] 杨书申, 邵龙义, 李卫军, 等. 上海市冬季可吸入颗粒物微观形貌和粒度分布[J]. 环境科学, 2007, **28**(1): 20-25.
- [25] 吕森林, 邵龙义, 吴明红, 等. 北京 PM_{10} 中化学元素组成特征及来源分析[J]. 中国矿业大学学报, 2006, **35**(5): 686-687.

欢迎订阅 2010 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年, 由中国科学院主管, 中国科学院生态环境研究中心主办, 是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来, 始终坚持“防治污染, 改善生态, 促进发展, 造福人民”的宗旨, 报道我国环境科学领域内具有创新性高水平, 有重要意义的基础研究和应用研究成果, 以及反映控制污染, 清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行, 并在国内外科技界有较大影响, 被国内外一些重要检索系统收录, 如美国医学索引 MEDLINE; 美国化学文摘 CA; 俄罗斯文摘杂志 AJ; 美国生物学文摘预评 BP; 美国医学索引 IM; 日本科学技术情报中心数据库 JICST; 英国动物学记录 ZR; 剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences; 剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts; 剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等; 国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD); 中文科技期刊数据库(维普); 中国期刊全文数据库(CNKI); 数字化期刊全文数据库(万方); 中国科学引文数据库(CSCD); 中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅, 如有漏订的读者可直接与编辑部联系, 办理补订手续。

《环境科学》2010 年为大 16 开本, 70 元/册, 全年 12 期。

国内统一刊号: CN11-1895/X 国际标准刊号: ISSN 0250-3301

国外发行代号: M 0205 国内邮发代号: 2-821

编辑部地址: 北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编: 100085

电话: 010-62941102; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn