

宋少洁, 吴烨, 蒋靖坤, 等. 2012. 北京市典型道路交通环境细颗粒物元素组成及分布特征[J]. 环境科学学报, 32(1): 66-73

Song S J, Wu Y, Jiang J K, et al. 2012. Characteristics of elements in size-resolved fine particles in a typical road traffic environment in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(1): 66-73

北京市典型道路交通环境细颗粒物元素组成及分布特征

宋少洁, 吴烨, 蒋靖坤, 杨柳, 郝吉明*

清华大学环境学院, 北京 100084

收稿日期: 2011-03-23 修回日期: 2011-04-12 录用日期: 2011-04-19

摘要:对北京市典型道路交通环境中不同粒径段(0.2~0.5 μm 、0.5~1.0 μm 和 1.0~2.5 μm)的细颗粒物进行了采样分析,在 2008—2009 年期间 5 个阶段内共采集了 198 个细颗粒物样品.通过 XRF 分析得到细颗粒物中 Al、Na、Mg、K、Ca、Si、S、Cl、Fe、Mn、Ti、Cu、Zn、As、Br 和 Pb 16 种元素的质量浓度.含量较高的元素有 S、K、Fe、Cl、Si、Ca 和 Zn,占测试元素总浓度的 90% 以上.应用富集因子法将元素分为地壳元素、双重元素和污染元素三类.应用因子分析法分离出两个主要因子,因子 1 主要与地壳元素和双重元素相关,可归于扬尘源的贡献;因子 2 主要与污染元素相关,可能来自机动车、燃煤、生物质燃烧和工业等排放源.人为源对小粒径(0.2~0.5 μm)颗粒物的贡献较大,而地壳源的贡献更集中于大粒径段(1.0~2.5 μm).多数地壳元素和双重元素在夏季和冬季均随粒径的增大而富集,且冬季浓度较高,而多数污染元素的分布形态存在季节差异.Br、As 和 Pb 夏季在 0.5~1.0 μm 出现峰值,而冬季在 0.2~0.5 μm 出现峰值.冬季因采暖增加的煤和生物质的燃烧造成部分元素浓度在 0.2~0.5 μm 有显著增加.云层内部的硫酸盐生成过程可能是夏季 S 元素在 0.5~1.0 μm 出现峰值的原因.通过奥运时期与非奥运时期元素浓度和分布的比较,发现奥运时期交通源临时控制措施对机动车排放和道路扬尘均有显著的削减作用,削减率分别为 53% 和 63%,且随粒径增大而增加.

关键词:交通环境;北京奥运会;细颗粒物;元素;富集因子;因子分析

文章编号: 0253-2468(2012)01-66-08 中图分类号: X513 文献标识码: A

Characteristics of elements in size-resolved fine particles in a typical road traffic environment in Beijing

SONG Shaojie, WU Ye, JIANG Jingkun, YANG Liu, HAO Jiming*

School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084

Received 23 March 2011; received in revised form 12 April 2011; accepted 19 April 2011

Abstract: Fine particles in three size ranges (0.2~0.5 μm , 0.5~1.0 μm and 1.0~2.5 μm) were sampled at a typical roadside site in Beijing. There were 198 samples collected during five sampling periods in 2008—2009. The mass concentrations of Al, Na, Mg, K, Ca, Si, S, Cl, Fe, Mn, Cu, Zn, As, Br and Pb in these samples were measured using XRF method. Elements with the highest concentrations are S, K, Fe, Cl, Si, Ca and Zn, accounting for more than 90% of the total mass concentrations. Using enrichment factor analysis, we found that these elements can be classified into three clusters: crustal elements, mixed elements, and pollution elements. Two main factors were identified using factor analysis. One factor was mainly associated with crustal elements and mixed elements. We attributed this factor to dust sources. The other factor was mainly correlated with pollution elements and was due to anthropogenic activities including motor vehicles, coal combustion, biomass burning and industries. Anthropogenic sources contributed most to the particles in the size range of 0.2~0.5 μm , whereas the crustal sources contributed most to those in the size range of 1.0~2.5 μm . Most crustal elements and mixed elements showed similar distribution patterns in both summer and winter, with higher enrichment in larger particle sizes. Higher concentrations were found in winter. However, the distributions of most pollution elements showed seasonal differences. Br, As and Pb peaked at 0.5~1.0 μm and 0.2~0.5 μm in summer and winter, respectively. The concentration increases of some elements in 0.2~0.5 μm particles in winter were most likely due to the increased coal combustion and biomass burning for heating. The peak of S at 0.2~0.5 μm in summer was possibly related to the in-cloud formation of sulfate. The effects of the temporary traffic control measures were evaluated by comparing the data before, during, and after the Olympics. The reduction rate of 53% was found for the elements originated from the vehicle emission. Moreover, the reduction rate became larger

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50908121, 20521140077)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50908121, 20521140077)

作者简介: 宋少洁(1988—), 男, E-mail: ssj04@mails.tsinghua.edu.cn; * 通讯作者(责任作者), E-mail: hjm-den@tsinghua.edu.cn

Biography: SONG Shaojie(1988—), male, E-mail: ssj04@mails.tsinghua.edu.cn; * Corresponding author, E-mail: hjm-den@tsinghua.edu.cn

with increasing particle sizes.

Keywords: traffic environment; Beijing Olympics; PM_{2.5}; elements; enrichment factors; factor analysis

1 引言 (Introduction)

流行病学和毒理学的研究已经表明细颗粒物 (PM_{2.5}) 中的元素组分对人体健康存在显著的危害 (Chen *et al.*, 2009). 空气动力学直径大小决定了颗粒物在人体呼吸系统内的沉积、滞留和清除过程, 因而与健康风险密切相关 (Ham *et al.*, 2010). 粒径分布也对颗粒物的大气传输具有重要的影响 (Hussein *et al.*, 2004). 积聚模态颗粒物可以在较大的空间尺度内进行传输, 而成核模态和爱根核模态颗粒物在大气中的存留时间较短, 传输距离也较小.

近些年来, 在我国一些城市已经开展了对颗粒物中元素的化学组成、分布形态及来源分析的研究. 滕恩江等 (1999) 对重庆、武汉、兰州和广州 4 个城市的 PM_{2.5} 样品进行聚类分析, 将元素分为地壳元素和污染元素两大类. 林俊等 (2009) 在上海郊区采集分级颗粒物样品, 分析结果表明 Ca 和 Ti 主要集中在 >2 μm 的范围内, 而 Mn、Zn、Cu、Pb、Cl 和 S 等元素主要分布在 0.1 ~ 1.0 μm 内. 2009 年底北京市机动车保有量超过 400 万辆 (北京市统计局, 2010), 交通源已成为北京市颗粒物的主要来源之一 (Hao *et al.*, 2005). 交通环境是受到机动车排放和道路扬尘的影响最为直接的区域, 而目前对交通环境中颗粒物元素特征的研究仍然较少 (杨仪方等, 2010). 在 2008 年奥运会期间, 北京市采取了一系列的交通源临时控制措施, 对其排放的污染物产生了明显的削减作用. Zhou 等 (2010) 的研究表明, 北京市城区机动车排放的 VOC、CO、NO_x 和 PM₁₀ 在奥运期间分别下降了 55.5%、56.8%、45.7% 和 51.6%. 本研究通过在北京市典型道路边的分粒径细颗粒物 (0.2 ~ 0.5 μm、0.5 ~ 1.0 μm 和 1.0 ~ 2.5 μm) 采样和化学测试, 获得了元素的浓度、分布特征及季节变化特征, 分析了元素的主要来源, 并评估了奥运临时控制措施的效果.

2 采样及分析 (Sampling and analysis)

2.1 道路边及郊区采样

本研究选择北京市北四环中段保福寺桥和学院桥之间作为采样路段, 位于国家体育场 (鸟巢) 西侧约 4 km. 道路边采样点根据风向和城市管理要求设置于路南或路北, 其中路北采样点距道路外缘约

5 m, 路南采样点距道路外缘约 2 m. 郊区对照采样点位于密云水库附近, 距离北四环道路边采样点约 80 km, 周围 1 ~ 2 km 内无明显人为排放源. 采样头距地面垂直高度均为约 2.5 m.

采样仪器为多级碰撞式颗粒物采样器 DGI (型号 1570, 芬兰 Dekati 公司). 在流量为 70 L·min⁻¹ 时, DGI 可根据颗粒物的空气动力学直径进行分级, 从而同时采集 0.2 ~ 0.5 μm (第 I 级)、0.5 ~ 1.0 μm (第 II 级) 和 1.0 ~ 2.5 μm (第 III 级) 三个粒径段的颗粒物. 采样时间为 12 h, 其中白天样品为 7 时 ~ 19 时, 夜间样品为 19 时 ~ 次日 7 时, 但本研究对相邻的白天和夜间样品元素分析结果进行合并处理为日均值. 使用 Teflon 膜 (直径 47 mm, 孔径 5 μm, 美国 Millipore 公司) 进行元素分析. 在 2008—2009 期间选择 5 个阶段进行采样, 共收集 198 个 Teflon 样品, 各阶段采样统计见表 1. 在颗粒物采样期间, 还使用便携式气象站 (型号 Vantage Pro2, 美国 Davis 公司) 测量了气象参数 (温度、相对湿度、风速和风向). 对各采样阶段的典型工作日车流量的统计显示, 非奥运期间采样点附近每天总车流量约为 27 万辆, 而在奥运期间减少到约每天 18.5 万辆, 削减率为 31.5%.

表 1 各阶段采样统计

Table 1 Summary of sampling periods

采样阶段	时间	采样点	样品数/个
奥运前	2008. 6. 24—2008. 6. 30	道路边	36
奥运中	2008. 7. 29—2008. 8. 19	道路边	72
奥运中	2008. 9. 7—2008. 9. 14	郊区	24
冬季	2008. 12. 5—2008. 12. 14	道路边	30
奥运后	2009. 8. 4—2009. 8. 15	道路边	36

2.2 元素分析

采集的样品使用中日友好环境保护中心环境分析测试中心的波长色散型 X 荧光光谱仪 (WD-XRF, 型号 RIX3000, 日本理学电机株式会社) 进行元素分析, 得到了 Al、Na、Mg、K、Ca、Si、S、Cl、Fe、Mn、Ti、Cu、Zn、As、Br 和 Pb 共 16 种元素的质量浓度. 实验条件: 端窗 Rh 靶 X 射线管, 电压为 50 kV, 电流为 50 mA, 粗狭缝, 视野光阑直径为 30 mm, 真空度为 3.7 ~ 6.7 Pa. 采用美国 MicroMatter 公司的无机元素标准薄膜进行定量分析, 校准工作曲线采

用单点比值法,扣除空白滤膜的元素本底值.分析前滤膜在 $<4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下保存,所有的操作步骤均进行严格的质量控制以防止样品被污染.

2.3 来源分析

在本研究中,富集因子法和因子分析法被用于判定各种元素的主要来源.富集因子法是比较自然源和人为源对颗粒物中元素贡献水平的常用方法 (Yang *et al.*, 2010).富集因子 EF (Enrichment factor) 的计算公式为:

$$EF_i = (C_i/C_R)_{\text{环境}} / (C_i/C_R)_{\text{背景}} \quad (1)$$

式中, C_i 为研究的第 i 个元素的浓度; C_R 为参比元素的浓度; $(C_i/C_R)_{\text{环境}}$ 是指大气颗粒物中 i 元素浓度和参比元素浓度的比值; $(C_i/C_R)_{\text{背景}}$ 是指土壤中 i 元素含量与参比元素含量的比值.本研究选择在土壤中丰度高、受人为污染影响小的 Al 元素作为参比元素,土壤元素背景值取北京市表土元素平均值 (中国环境监测总站, 1990).

因子分析法是一种多元分析方法,用于分析多个变量间的存在关系,可将相关性比较密切的若干变量归类,以较少的因子数反映原始数据中的大部分信息 (胡伟等, 2003).本研究使用 PASW Statistics 18 统计软件进行因子分析,提取方法为主成份,应用 Kaiser 标准化的正交旋转法,将相关矩阵特征值大于 1 的因子分离.其主要步骤为:将颗粒物中元素

浓度值作为变量代入因子模型,原始数据标准化,建立变量的相关系数矩阵,通过求解相关矩阵的特征方程以确定特征值和对应的特征向量,进而确定主因子数并提取初因子;对因子载荷矩阵进行方差极大旋转,获得正交旋转矩阵,将初因子转化为具有最简结构的公因子 (邹本东等, 2007).

3 结果 (Results)

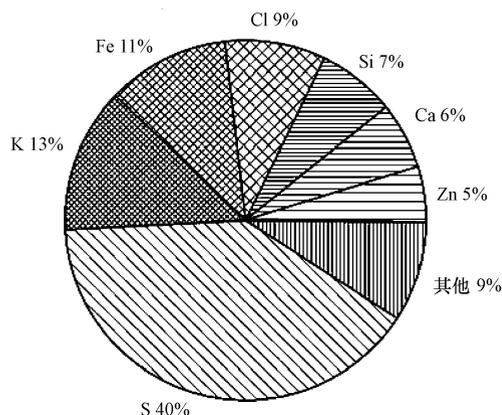
3.1 元素组成

各采样阶段 $PM_{0.2-2.5}$ 中元素的质量浓度由 3 个粒径段相加得到并列于表 2. 道路边 $PM_{0.2-2.5}$ 中的元素浓度主要是由 S、K、Fe、Cl、Si、Ca 和 Zn 等 7 种元素贡献的,占测试 16 种元素总浓度的 90% 以上 (见图 1). 其中 S 元素浓度最高.有研究表明, XRF 测出的 S 元素浓度与离子色谱检测的 SO_4^{2-} 浓度具有很好的一致性 (He *et al.*, 2001). 与 2001—2002 年在北京城区的研究相比 (Duan *et al.*, 2006), Na、Mg、Si、Ca 和 Ti 等元素浓度显著降低,体现出近些年对沙尘污染的控制效果.由于北京奥运会采取了严格的空气质量控制措施,奥运中的元素总浓度 ($3910\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) 显著低于奥运前 ($8624\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) 和奥运后 ($8164\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) 的浓度.交通源临时控制措施对颗粒物元素浓度和分布的影响将在 3.4 节中详细讨论.

表 2 $PM_{0.2-2.5}$ 元素平均质量浓度

Table 2 Mass concentrations (mean \pm standard deviations) of elements in $PM_{0.2-2.5}$

元素	$PM_{0.2-2.5} / (\text{ng}\cdot\text{m}^{-3})$									
	奥运前 (2008 年 6 月)		奥运中 (2008 年 8 月)		奥运中(郊区) (2008 年 9 月)		冬季 (2008 年 12 月)		奥运后 (2009 年 8 月)	
	平均值	方差	平均值	方差	平均值	方差	平均值	方差	平均值	方差
Al	171	72	73	33	53	18	382	185	222	90
Na	73	14	49	11	36	7.8	225	44	95	21
Cl	745	172	223	84	72	22	1877	515	449	101
Mg	37	15	17	6.7	18	7.1	125	55	62	28
Si	467	172	192	65	164	38	1056	477	571	206
S	3748	590	2131	566	1408	319	2339	862	3514	741
K	1387	302	402	87	431	111	1435	277	864	164
Ca	395	171	107	44	48	16	1123	475	554	212
Ti	47	15	22	5.6	11	2.8	77	33	45	15
Mn	46	8.7	23	4.8	12	4.1	76	15	52	8.6
Fe	866	217	402	100	213	44	1442	525	1047	260
Cu	33	6.2	21	5.6	14	3.5	44	9.2	52	12
Zn	399	122	151	46	86	20	541	120	441	118
As	14	1.8	7.2	2.5	1.6	1.1	19	3.9	17	6.1
Br	34	5.4	17	5.0	5.8	2.1	36	8.2	27	3.4
Pb	163	39	72	22	62	11	179	46	153	43
总和	8624		3910		2634		10975		8164	

图 1 道路交通环境 $PM_{0.2-2.5}$ 元素化学组成Fig. 1 Chemical composition of elements in $PM_{0.2-2.5}$ at roadside

3.2 元素来源

富集因子分析和因子分析结果分别列于表 3 和表 4. $EF > 10$ 一般作为元素中有显著比例来自人为源的标准 (Voutsas *et al.*, 2002). 按照富集因子值

表 3 道路交通环境细颗粒物元素富集因子

元素	第 I 级	第 II 级	第 III 级	$PM_{0.2-2.5}$
Si	1.4	0.9	0.7	0.7
Mg	2.1	1.6	1.5	1.5
Na	20.5	5.4	1.7	2.8
Ti	9.8	6.0	3.2	3.8
Fe	36.1	20.8	8.0	10.8
Ca	14.7	12.8	10.9	11.3
K	118	49.5	8.6	18.0
Mn	140	65.3	12.3	24.0
Cu	4648	1459	251	569
S	7879	3777	570	1264
Zn	7307	3211	691	1266
Pb	18892	5972	579	1951
Cl	18676	5107	804	2010
As	19903	6097	765	2158
Br	33045	9918	1037	3361

表 4 道路交通环境细颗粒物元素因子分析(仅显示 > 0.5 的数值)Table 4 Factor analysis results of elements in PM at roadside (loading > 0.5 are only shown)

元素	第 I 级		第 II 级		第 III 级		
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2	因子 3
Al	0.974		0.972		0.962		
Mg	0.960		0.951		0.983		
Si	0.923		0.976		0.972		
Ti	0.578		0.889		0.918		
Ca	0.957		0.971		0.946		
Na	0.608	0.701	0.825		0.885		
Fe	0.612	0.709	0.761	0.521	0.903		
Mn		0.801	0.564	0.703	0.771		
K	0.579	0.752		0.747			0.604
Cl	0.516	0.752		0.590			0.751
S		0.737		0.777			0.847
Br		0.911		0.783			0.874
As		0.812		0.778		0.894	
Cu		0.534		0.731		0.741	
Zn		0.886		0.912		0.766	0.510
Pb		0.863		0.899		0.851	
方差	36.60%	42.80%	41.90%	36.60%	47.20%	21.70%	20.50%

可将元素分为 3 类:地壳元素 (Al、Si、Mg、Na 和 Ti)、双重元素 (Fe、Ca、K 和 Mn) 和污染元素 (Cu、S、Zn、Pb、Cl、As 和 Br). 这与其他在北京市城区的研究结果相似 (王淑兰等, 2002). 各粒径段的富集因子变化规律为第 I 级 $>$ 第 II 级 $>$ 第 III 级, 说明人为源对粒径较小的颗粒物 ($0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$) 贡献较大, 而地

壳源的贡献更集中于大粒径段 ($1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$). 交通环境中元素的富集因子明显高于城区, 说明机动车排放的颗粒物以及道路扬尘的显著影响 (Duan *et al.*, 2006). 北京市道路降尘中 Ca、S、Zn、Cu 和 Pb 等元素的浓度远高于土壤背景中的含量 (Han *et al.*, 2007).

因子分析共分离出两个主要的因子,占总方差的78.5%~88.4%。因子1与Al、Mg、Si、Ti、Ca、Na、Fe和Mn等地壳元素和双重元素相关,因此其主要归属于扬尘源的贡献。交通环境中的扬尘源主要包括道路扬尘、建筑尘、外来尘等。因子2主要与污染元素相关,包括Pb、Zn、Cu、As、Br、S、Cl和K等元素。Cl和As被认为是燃煤排放的代表元素(张仁健等,2000),而K是生物质燃烧的特征元素(Li *et al.*, 2007)。Pb和Br有很大比例来自机动车的排放(Manalis *et al.*, 2005; Huang *et al.*, 1994)。Zn和Cu的来源比较复杂,可能来自机动车的轮胎和刹车线磨损、工业排放和燃煤飞灰(Sternbeck *et al.*,

2002; Wang *et al.*, 2005; 张晶等, 1998)。因此,因子2可能与机动车、燃煤、生物质燃烧和工业排放等相关。

3.3 元素分布特征

本研究以2008年12月和2009年8月的结果代表冬季和夏季分析细颗粒物中元素分布形态(见图2)。颗粒物的粒径分布不仅受到污染源排放特征的影响,还与干湿沉降,云过程,边界层和对流层的大气交换和化学转化等有密切关联(Allen *et al.*, 2001)。虽然机动车排放的颗粒物质量峰值在约 $0.2\ \mu\text{m}$ 以下,但后续的大气过程会造成环境中颗粒物分布的显著迁移(Kleeman *et al.*, 1998; 2000)。

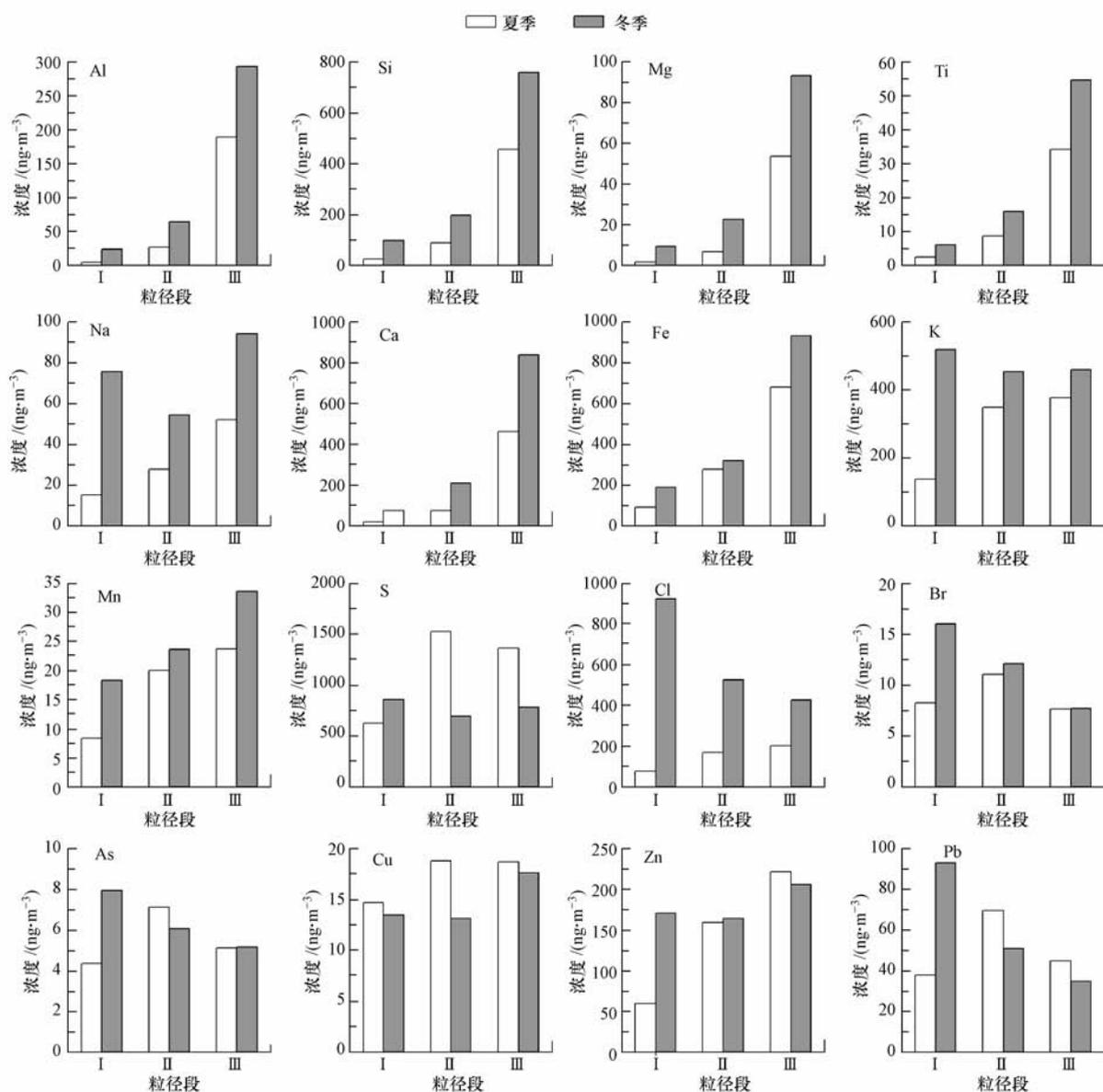


图2 道路交通环境颗粒物元素在夏季与冬季的分布形态

Fig. 2 Distribution patterns of elements in PM at roadside for summer and winter

多数地壳元素和双重元素(除 Na 和 K 外)在夏季和冬季表现出相同的分布形态,均随粒径的增大而富集,第 III 级(1.0 ~ 2.5 μm)可占总质量浓度的 45% ~ 80%。冬季的元素浓度较夏季上升约 30% ~ 100%,这可能是由于在冬季较高的风速和较低的相对湿度造成的外来沙尘和道路扬尘排放量的增加。多数污染元素的分布存在显著的季节差异。Br、As 和 Pb 等元素夏季在第 II 级(0.5 ~ 1.0 μm)出现峰值,而冬季在第 I 级(0.2 ~ 0.5 μm)出现峰值。Na、K、Cl、Br、As、Pb 和 Zn 等元素在冬季的第 I 级(0.2 ~ 0.5 μm)浓度均有显著增加,其主要原因可能是在冬季由于采暖需要增加的大量的燃煤和生物质燃烧。研究表明,采暖期开始后 Zn、Pb、Ti、K、Se、As 和 Cu 等元素在细粒径段的分布出现大幅度的增长(杨勇杰等,2008)。夏季 S 元素在第 II 级(0.5 ~ 1.0 μm)出现峰值,而在冬季未发现浓度峰。这可能因为夏季空气相对湿度较高,在云层内部存在着显著的硫酸盐生成过程。夏季的硫酸盐/二氧化硫的质量转化系数可能是冬季的 21 倍(Yao *et al.*,2002)。不同的粒径分布研究之间的结果可能难以相互比较,因为使用的颗粒物采样器的分割粒径和分割效率可能不同,采样膜的材料、孔径和负载率也可能造成得到分布形态的变化。但总体来说,本研究的元素分布结果和北京市其他研究相近

(Winchester *et al.*,1984;Ning *et al.*,1996)。

3.4 临时控制措施效果

对交通源的控制是奥运会临时控制措施的重要方面,包括单双号限行、封存部分公交车和增加道路清扫等。这些控制措施不但减少了机动车的直接排放,也降低了机动车引起的道路扬尘的浓度。由上述元素来源和分布特征的分析可知,在夏季样品中地壳元素和双重元素在很大程度上来自于扬尘源,而 Pb 和 Br 可被认为是机动车源的示踪元素。因此,本研究将它们分别作为扬尘源和机动车源的代表物种分析交通源临时控制措施的效果。图 3 表示道路边奥运前、中、后及郊区奥运中的颗粒物元素分布形态。道路边颗粒物浓度约为郊区对照点的 1.3 倍,表明机动车排放和道路扬尘对交通环境的直接影响。奥运前、后两个阶段的元素质量浓度及分布形态无明显差异,说明在交通结构未发生变化时颗粒物浓度相对稳定。奥运中相对于奥运前、后,扬尘源元素和机动车源元素削减率分别为 63% 和 53%。在第 I、II 和 III 级,扬尘源元素的削减率为 45%、59% 和 68%,而机动车源元素的削减率为 48%、52% 和 59%。由此可见,交通源的临时控制措施对机动车的直接排放和道路扬尘都有明显的削减作用,削减率随粒径增大而增加,且对道路扬尘的控制效果更为显著。

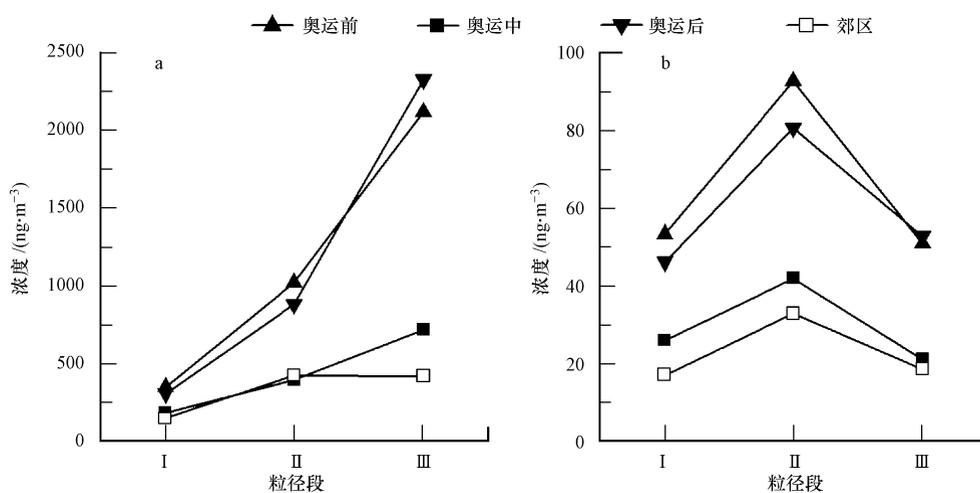


图 3 道路交通环境奥运前中后及郊区奥运中的颗粒物元素分布形态(a. 扬尘源元素;b. 机动车源元素)

Fig. 3 Distribution patterns of elements in PM before, during and after the Olympics at roadside and during the Olympics in suburb (a. elements from dust sources; b. elements from vehicle emissions)

4 结论(Conclusions)

1)2008—2009 年期间北京市道路交通环境颗

粒物中含量较高的元素有 S、K、Fe、Cl、Si、Ca 和 Zn, 占 16 种测试元素总浓度的 90% 以上。

2)按富集因子可将元素分为三类:地壳元素

(Al、Si、Mg、Na 和 Ti)、双重元素(Fe、Ca、K 和 Mn)和污染元素(Cu、S、Zn、Pb、Cl、As 和 Br)。人为源对小粒径颗粒物(0.2~0.5 μm)的贡献较大,而地壳源的贡献更集中于大粒径段(1.0~2.5 μm)。因子分析分离出两个主要因子,因子1 主要与地壳元素和双重元素相关,可归于扬尘源的贡献。因子2 主要与污染元素相关,可能来自机动车、燃煤、生物质燃烧和工业等排放源。

3)多数地壳元素和双重元素在夏季和冬季均随粒径的增大而富集,冬季浓度较夏季高约30%~100%,而多数污染元素的分布形态存在季节差异。Br、As 和 Pb 夏季在0.5~1.0 μm 出现峰值,而冬季在0.2~0.5 μm 出现峰值。冬季因采暖增加的煤和生物质的燃烧造成Na、K、Cl、Br、As、Pb 和 Zn 等元素的浓度在0.2~0.5 μm 有显著增加。云层内部的硫酸盐生成过程可能是导致夏季S 在0.5~1.0 μm 出现峰值的原因。

4)奥运时期交通源的临时控制措施对机动车的直接排放和道路扬尘都有显著的削减作用,削减率分别为53%和63%,且随粒径增大而增加。

责任作者简介:郝吉明(1946—),男,教授,主要研究方向为城市与区域复合型大气污染控制。

参考文献(References):

- Allen A G, Nemitz E, Shi J P, *et al.* 2001. Size distributions of trace metals in atmospheric aerosols in the United Kingdom [J]. *Atmospheric Environment*, 35(27):4581-4591
- 北京市统计局. 2010. 北京统计年鉴 2010 [M]. 北京:中国统计出版社
- Beijing Municipal Bureau Statistics. 2010. Beijing Statistical Yearbook 2010 [M]. Beijing: China Statistics Press (in Chinese)
- Chen L C, Lippmann M. 2009. Effects of metals within ambient air particulate matter (PM) on human health [J]. *Inhalation Toxicology*, 21(1):1-31
- Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* 2006. Concentration and chemical characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China: 2001—2002 [J]. *Science of the Total Environment*, 355(1/3):264-275
- Ham W A, Herner J D, Green P G, *et al.* 2010. Size distribution of health-relevant trace elements in airborne particulate matter during a severe winter stagnation event: implications for epidemiology and inhalation exposure studies [J]. *Aerosol Science and Technology*, 44(9):753-765
- Han L H, Zhuang G S, Cheng S Y, *et al.* 2007. Characteristics of resuspended road dust and its impact on the atmospheric environment in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 41(35):7485-7499
- Hao J M, Wang L T. 2005. Improving urban air quality in China: Beijing case study [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(9):1298-1305
- He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* 2001. The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 35(29):4959-4970
- 胡伟, 魏复盛. 2003. 中国4城市空气颗粒物元素的因子分析 [J]. *中国环境监测*, 19(3):39-42
- Hu W, Wei F S. 2003. Factor analysis of elements in airborne particulate matter of the 4 Chinese cities [J]. *Environmental Monitoring in China*, 19(3):39-42 (in Chinese)
- Huang X D, Olmez I, Aras N K, *et al.* 1994. Emissions of trace-elements from motor-vehicles-potential marker elements and source composition profile [J]. *Atmospheric Environment*, 28(8):1385-1391
- Hussein T, Puustinen A, Aalto P P, *et al.* 2004. Urban aerosol number size distributions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4:391-411
- Kleeman M J, Cass G R. 1998. Source contributions to the size and composition distribution of urban particulate air pollution [J]. *Atmospheric Environment*, 32(16):2803-2816
- Kleeman M J, Schauer J J, Cass G R. 2000. Size and composition distribution of fine particulate matter emitted from motor vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 34(7):1132-1142
- Li X H, Wang S X, Duan L, *et al.* 2007. Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stover in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 41(17):6052-6058
- 林俊, 刘卫, 李燕, 等. 2009. 上海市郊区大气细颗粒和超细颗粒中元素粒径分布研究 [J]. *环境科学*, 30(4):982-987
- Lin J, Liu W, Li Y, *et al.* 2009. Elemental size distributions of airborne fine and ultrafine particulate matters in the suburb of Shanghai, China [J]. *Environmental Science*, 30(4):982-987 (in Chinese)
- Manalis N, Grivas G, Protonotarios V, *et al.* 2005. Toxic metal content of particulate matter (PM₁₀), within the Greater Area of Athens [J]. *Chemosphere*, 60(4):557-566
- Ning D T, Zhong L X, Chung Y S. 1996. Aerosol size distribution and elemental composition in urban areas of northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 30(13):2355-2362
- Sternbeck J, Sjodin A, Andreasson K. 2002. Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension-results from two tunnel studies [J]. *Atmospheric Environment*, 36(30):4735-4744
- Tecer L H, Alagha O, Karaca F, *et al.* 2008. Particulate matter (PM_{2.5}, PM_{10-2.5}, and PM₁₀) and children's hospital admissions for asthma and respiratory diseases: A bidirectional case-crossover study [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 71(8):512-520
- 滕恩江, 胡伟, 吴国平等. 1999. 中国四城市空气中粗细颗粒物元素组成特征 [J]. *中国环境科学*, 19(3):238-242
- Teng E J, Hu W, Wu G P, *et al.* 1999. The composing characteristics of elements in coarse and fine particle in air of the four cities in China [J]. *China Environmental Science*, 19(3):238-242 (in Chinese)
- Voutsas D, Samara C. 2002. Labile and bioaccessible fractions of heavy metals in the airborne particulate matter from urban and industrial

- areas [J]. *Atmospheric Environment*, 36(22):3583-3590
- 王淑兰, 柴发合, 杨天行. 2002. 北京市不同尺度大气颗粒物元素组成的特征分析 [J]. *环境科学研究*, 15(4):10-12
- Wang S L, Chai F H, Yang T X. 2002. Characteristics analysis of elements contained in air suspended particles with different sizes in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 15(4):10-12 (in Chinese)
- Wang Y, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* 2005. The ion chemistry and the source of $PM_{2.5}$ aerosol in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 39(21):3771-3784
- Winchester J W, Bi M. 1984. Fine and coarse aerosol composition in an urban setting — a case study in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 18(7):1399-1409
- 杨仪方, 钱枫, 张慧峰, 等. 2010. 北京市交通干线周围可吸入大气颗粒物的污染特性 [J]. *中国环境科学*, 30(7):962-966
- Yang Y F, Qian F, Zhang H F, *et al.* 2010. Characteristics and source apportionment of PM_{10} at urban traffic roads and surrounding areas in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 30(7):962-966 (in Chinese)
- Yang Y J, Wang Y S, Huang W W, *et al.* 2010. Size distributions and elemental compositions of particulate matter on clear, hazy and foggy days in Beijing, China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(3):663-675
- 杨勇杰, 王跃思, 温天雪, 等. 2008. 采暖期开始前后北京大气颗粒物中化学元素特征及来源 [J]. *环境科学*, 29(11):3275-3279
- Yang Y J, Wang Y S, Wen T X, *et al.* 2008. Characteristics and sources of elements of atmospheric particles before and in heating period in Beijing [J]. *Environmental Science*, 29(11):3275-3279 (in Chinese)
- Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* 2002. The water-soluble ionic composition of $PM_{2.5}$ in Shanghai and Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 36(26):4223-4234
- 张晶, 陈宗良, 王玮. 1998. 北京市大气小颗粒物的污染源解析 [J]. *环境科学学报*, 18(1):62-67
- Zhang J, Chen Z L, Wang W. 1998. Source apportionment on fine particulates in atmospheric sphere in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 18(1):62-67 (in Chinese)
- 张仁健, 王明星, 张文, 等. 2000. 北京冬春季气溶胶化学成分及其谱分布研究 [J]. *气候与环境研究*, 5(1):6-12
- Zhang R J, Wang M X, Zhang W, *et al.* 2000. Research on elemental concentrations and distributions of aerosols in winter/spring in Beijing [J]. *Climate and Environmental Research*, 5(1):6-12 (in Chinese)
- 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社
- China National Environmental Monitoring Center. 1990. Soil Environmental Background Value in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese)
- Zhou Y, Wu Y, Yang L, *et al.* 2010. The impact of transportation control measures on emission reductions during the 2008 Olympic Games in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 44(3):285-293
- 邹本东, 徐子优, 华蕾, 等. 2007. 因子分析法解析北京市大气颗粒物 PM_{10} 的来源 [J]. *中国环境监测*, 23(2):79-85
- Zou B D, Xu Z Y, Hua L, *et al.* 2007. Sources apportionment of atmospheric particles PM_{10} in Beijing by factor analysis [J]. *Environmental Monitoring in China*, 23(2):79-85 (in Chinese)