

北京市采暖期 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 污染特征分析

崔蓉, 郭新彪*, 邓芙蓉, 刘红

(北京大学公共卫生学院劳动卫生与环境卫生学系, 北京 100083)

[摘要] 目的: 了解北京市采暖期大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的污染特征。方法: 在北京市城区设置采样点, 采集了 2006 年 3 月 3~5 日、6~8 日、8~10 日和 12~14 日 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} , 对其中的 8 种水溶性离子、17 种“酸提”元素、12 种“水提”元素、17 种多环芳烃及有机碳、元素碳的含量进行了分析。结果: 8 种水溶性离子总浓度及含碳组分(有机碳+元素碳)的质量浓度分别占 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的 29.8%、17.5% 和 21.0%、14.6%; 17 种“酸提”元素总浓度分别占 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的 4.8% 和 5.8%; 已测定的 17 种多环芳烃中以 4 环和 5 环为主, 二者浓度之和分别占 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中多环芳烃总浓度的 84.9% 和 86.3%。结论: 水溶性离子、含碳组分为采暖期 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的主要成分。

[关键词] $PM_{2.5}$; PM_{10} ; 污染特征

[中图分类号] R122

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-8685(2008)08-1505-04

Analysis of pollution characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in heating period in Beijing

Cui Rong, Guo Xin-biao*, Deng Fu-rong, Liu Hong

(Peking University School of Public Health Department of Occupational & Environmental Health Sciences, Beijing 100083, China)

[Abstract] **Objective:** To investigate the pollution characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in heating period in the ambient air of Beijing. **Methods:** $PM_{2.5}$ and PM_{10} samples were collected from March 3 to 5, March 6 to 8, March 10 to 12, March 12 to 14 of 2006 in Beijing, 8 kinds of water-soluble ions, 17 kinds of “acid extraction” elements, 12 kinds of “water extraction” elements, 17 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), organic carbon and element carbon were analyzed. **Results:** The results showed that in heating period, the total concentration of those 8 kinds of water-soluble ions and the total concentration of organic carbon and element carbon accounted for 29.8%, 17.5% and 21.0%, 14.6% of mass concentration of $PM_{2.5}$ and PM_{10} respectively. The total concentration of 17 kinds of “acid extraction” elements accounted for 4.8% and 5.8% of mass concentration of $PM_{2.5}$ and PM_{10} respectively. 4 to 5 rings PAHs were the main components of 17 kinds of PAHs, accounted for 84.9% and 86.3% of the total concentration of PAHs in $PM_{2.5}$ and PM_{10} respectively. **Conclusion:** Water-soluble ions and the total carbon are the main components in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in heating period in Beijing.

[Key words] $PM_{2.5}$; PM_{10} ; Pollution characteristics

近年来,可吸入颗粒物一直是影响北京市大气环境质量的首要污染物。流行病学研究结果表明,大气颗粒物的浓度水平与呼吸系统及心血管疾病的发病率与死亡率相关^[1~3],且颗粒物对人体健康造成的不良影响与颗粒物的大小、组成有关^[4]。因此,了解大气颗粒物所吸附的化学物质的构成及其含量的多少,可用以判断颗粒物的来源及分析其可能对人体健康造成的危害。本课题在北京市城区设置采样点,采集了 2006 年 3 月大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} ,并对其中的 8 种水溶性离子、17 种“酸提”元素、12 种“水提”元素、17 种多环芳烃及有机碳、元素碳的含量及其组成进行了分析。

1 材料与方法

1.1 大气颗粒物 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的采集

采样点设于北京市城区,采样器距地面约 15 m,采样点西面毗邻学院路,北面靠近北四环路,交通流量较大。采样时间分别为 2006-03-03~2006-03-05、2006-03-06~2006-03-08、2006-03-08~2006-03-10 和 2006-03-12~2006-03-14,采样器为 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 中流量采样器(北京地质仪器厂),流量为 77.36 L/min,在上述采样时间内,同时采集 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 样品。

采样膜为直径 90 mm 的 QR-100 石英滤膜(日本东洋滤纸株式会社)。滤膜采样前置于马弗炉中 600 灼烧 2 h,以去除可能存在的有机物。采样前后,滤膜在相同条件下于干燥器中平衡 24 h 后称重,采样后的滤膜于 -20 保存至分析。根据采样前、后滤膜的质量差和采样体积计算颗粒物的质量浓度。采样时间内,日平均气温为 5.4℃,日平均相对湿度为 28%,日平均风速为 2.9 m/s。

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(30571534);国家科学技术部十一五支撑计划(2006BA119B06)

[作者简介] 崔蓉(1967-),女,硕士,副教授,主要从事理化分析工作。

* 通讯联系人

1.2 样品分析

从已采集了 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 样品的同一滤膜上,分别取部分滤膜用于水溶性离子、元素、多环芳烃及有机碳、元素碳的分析。

1.2.1 水溶性离子分析 将已采集样品的滤膜剪成条状碎片,用 10 ml 纯水超声提取 40 min, 0.45 μm 滤膜过滤提取液^[5], Dionex - 600 C 离子色谱仪 (美国戴安公司) 测定 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 8 种水溶性离子的浓度。

1.2.2 元素分析 酸提: 50 用 5% HNO_3 将已采集样品的滤膜超声提取 15 min, 充分振荡后, 50 再次超声提取 30 min, 3000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 用 PE - Sciex DRC 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP - MS) (美国 PE 公司) 和 SPSS - 8000 电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP - AES) (中国海光科技有限公司) 测定 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中 Na、Ca、Mg、Al、As、Zn、Pb、Cu、V、Mn、Co、Fe、Se、Mo、Ni、Cr 和 Cd 元素的浓度。

水提: 将已采集样品的滤膜剪成条状碎片, 用 10 ml 纯水超声提取 30 min, 2500 r/min 离心 10 min, 分别用 0.45 μm 和 0.22 μm 滤膜过滤提取液^[6], 用 PE - Sciex DRC 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP - MS) 和 SPSS - 8000 电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP - AES) 测定其中 Zn、Pb、Cu、V、Mn、Co、Fe、Se、Mo、Ni、Cr 和 Cd 元素的浓度。

1.2.3 多环芳烃及有机碳、元素碳的分析 采用气相色谱 - 质谱法 (GC/MS) 测定 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 样品中茚并芘、苯并 [g, h, i] 芘、二苯并蒽、晕苯、芘、蔡、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并 [a] 蒽、蒽、苯并 [b] 蒽、苯并 [k] 蒽、苯并 [a] 芘、苯并 [e] 芘共 17 种多环芳烃 (包括 15 种美国环保总署确定的优先监测的多环芳烃); 采用热光吸收法测定 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 样品中有机碳、元素碳的含量。

2 结果与讨论

2.1 水溶性离子

表 1 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性离子的平均质量浓度 ($\mu g/m^3$)

	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
$PM_{2.5}$	4.27	10.42	10.77	0.78	9.63	2.36	0.22	1.66
在水溶性离子总浓度中的百分比 (%)	10.34	25.60	27.32	2.18	22.45	5.84	0.68	5.59
PM_{10}	4.33	9.88	10.69	1.11	7.35	2.12	0.42	3.61
在水溶性离子总浓度中的百分比 (%)	10.71	24.85	27.26	2.94	17.97	5.40	1.15	9.72

采样时间内, 本研究 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的平均质量浓度范围分别为 0.22 ~ 10.77 $\mu g/m^3$ 和 0.42 ~ 10.69 $\mu g/m^3$, 分别占水溶性离子总浓度的 0.68% ~ 27.32% 及 1.15% ~ 27.26% (见表 1); 两种粒子中 8 种水溶性离子浓度高低顺序基本一致, 均以 SO_4^{2-} 浓度为最高, Mg^{2+} 浓度最低, NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} (或 K^+)、 Na^+ 居中; SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 Cl^- 为 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中主要的水溶性

离子, 分别占其水溶性离子总浓度的 27.32%、25.60%、22.45%、10.34% 及 27.26%、24.85%、17.97%、10.71%; PM_{10} 中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度约为 $PM_{2.5}$ 中的两倍; $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 8 种水溶性离子总浓度分别占 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的 29.8% 和 21.0%。

多项研究结果显示, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 及 NH_4^+ 为北京大气颗粒物中主要的水溶性离子^[7,8]。本研究结果中, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性离子仍以 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 为主 (三者浓度之和分别占离子总浓度的 75.4% 和 70.1%), 结果显示, 二次气溶胶粒子仍为 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中水溶性离子的主要成分; 由 NO_3^- 与 SO_4^{2-} 的质量比可判断颗粒物的来源^[9,10], 本研究结果中 $NO_3^-/SO_4^{2-} < 1$, 结果显示, 采样时间内 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 主要来源于固定源的排放, 即燃煤污染; 本研究结果中 8 种水溶性离子在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中所占比例均大于 20%, 且在 $PM_{2.5}$ 中所占比例大于 PM_{10} (29.8% > 21.0%), 结果提示, 水溶性离子仍为构成 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的主要成分之一; 水溶性离子在采样时间内对 $PM_{2.5}$ 的贡献相对大于 PM_{10} , 水溶性离子在细粒子中相对富集较多。

2.2 元素

2.2.1 “酸提”元素分析结果

表 2 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 9 种元素的平均质量浓度 (ng/m^3)

	V	Cr	Co	Se	Mo	Cd	Ni	As	Cu
$PM_{2.5}$	3.50	2.86	1.12	5.30	1.96	2.64	4.56	28.64	65.13
PM_{10}	5.05	4.18	1.78	4.88	2.54	2.51	5.15	34.83	68.65

表 3 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 8 种元素的平均质量浓度 ($\mu g/m^3$)

	Mn	Pb	Zn	Al	Ca	Mg	Fe	Na
$PM_{2.5}$	0.12	0.18	0.67	0.47	2.80	0.54	0.53	0.84
PM_{10}	0.21	0.23	0.84	1.02	5.32	1.00	1.10	1.16

由表 2 和表 3 可以看出, 采样时间内, PM_{10} 中 Ca、Mg、Al、Fe 和 Mn 元素浓度约为 $PM_{2.5}$ 中浓度的两倍。 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中 Ca 元素浓度最高, 分别占所测定元素总浓度的 37.8% 和 48.1%; Na、Zn、Al、Fe、Mg、Pb、Mn 其次, 浓度均高于 110 ng/m^3 ; V、Cr、Co、Se、Mo、Cd、Ni 浓度较低, 低于 6 ng/m^3 ; As、Cu 浓度居中; 本研究 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中所测定元素总浓度分别占 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的 4.8% 和 5.8%, 表明采样时间内, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素的污染水平较高。

本研究 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 Ca、Mg、Na、Al、Fe、Mn 六种元素的平均浓度之和分别占所测定元素总浓度的 79.7% 和 89.0%、分别占 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的 4.0% 和 5.2%。结果显示, Ca、Mg、Na、Al、Fe、Mn 为本研究中所测定元素的主要成分, 其余元素含量相对较少。Ca、Mg 为建筑材料的标识元素^[11,12], Na 主要来源于海盐^[13], Al、Fe 与 Mn 为地壳来源类元素^[11,14], 本研究中高浓度的 Ca、Mg、Na、Al、Fe、Mn 提示, 采样时间内, 建筑扬尘、土壤尘等可能为两种粒子中元素的主要来源之一。

As、Cu、Pb、Zn在本研究 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中浓度分别为 $0.029 \sim 0.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 及 $0.035 \sim 0.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$,分别占 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 所测定元素总浓度的 $0.60\% \sim 14.03\%$ 和 $0.32\% \sim 7.68\%$,As、Cu、Pb、Zn为污染元素,主要来源于燃料燃烧、工业排污、汽车尾气、垃圾焚烧等人为污染,由上述 4种元素在 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中浓度比值 ($0.78 \sim 0.95$)可明显看出,污染元素 As、Cu、Pb、Zn在细粒子中相对富集较多。Se是煤炭燃烧的标识元素,相对于 PM_{10} ,本研究 $PM_{2.5}$ 中较高浓度的 Se标示着其在细粒子中富集程度更高。本研究 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 Co、Mn、Cd、Cr、V、Ni 相对于其它元素浓度较低,分别占所测定元素总浓度的 $0.020\% \sim 0.088\%$ 和 $0.016\% \sim 0.048\%$,结果显示,与其它元素相似,Co、Mn、Cd、Cr、V、Ni同样更多地富集在细粒子中。

2.2.2 “水提”元素分析结果

表 4 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性元素的平均质量浓度 (ng/m^3)

	V	Cr	Co	Cd	Mn	Cu	Zn	Pb	Ni	Fe	Mo	Se
$PM_{2.5}$	1.48	1.60	0.68	1.58	49.00	25.20	392.85	16.20	3.13	411.65	1.58	4.93
水提 酸提 (%)	41.1	56.1	60.9	50.1	43.1	36.8	57.6	7.0	73.1	83.7	81.2	89.6
PM_{10}	1.48	0.82	0.88	1.28	63.50	23.22	274.89	10.25	2.34	399.05	1.78	4.44
水提 酸提 (%)	28.3	18.7	50.1	39.9	37.7	31.7	31.2	4.1	43.2	37.4	66.2	90.9

采样时间内,本研究 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性 Fe、Zn浓度最高(见表 4),是所测定水溶性元素的主要构成成分,分别占所测定水溶性元素总浓度的 43.4% 、 43.8% 和 54.2% 、 29.8% ,二者浓度之和分别占水溶性元素总浓度的 87.2% 和 84.0% ;其次为 Mn、Cu、Pb,分别占所测定水溶性元素总浓度的 $1.4\% \sim 7.0\%$ 和 $1.2\% \sim 10.3\%$;浓度较低的为 Se、Ni、Mo、V、Cd、Cr 或 Co,分别占水溶性元素总浓度的 $0.095\% \sim 0.56\%$ 和 $0.10\% \sim 0.61\%$ 。

由各元素“水提”浓度占其“酸提”浓度的百分数(水提/酸提(%))可以看出(见表 4), $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中,除水溶性 Pb所占百分比(7.0% 和 4.1%)较低外,其余各水溶性元素在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中所占百分比比较高,分别为 $36.8\% \sim 89.6\%$ 和 $18.7\% \sim 90.9\%$;其中, $PM_{2.5}$ 中 V、Cr、Cd、Zn、Ni、Mo和 Fe的“水提”浓度占其“酸提”浓度的百分数明显高于 PM_{10} 。研究显示,Fe、Cu、Cr、Cd、Pb、Ni和 V可致氧化性损伤^[15],可溶性的 Zn可致肺细胞损伤^[16]。本研究中,由各水溶性元素在 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中浓度比值可知,其在细粒子中相对富集较多,研究结果提示,相对于 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 中较高浓度的水溶性元素可能与细颗粒物对人体健康产生不良影响有关。

2.3 多环芳烃及有机碳、元素碳

采样时间内,样品中 17种多环芳烃在 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中的质量比见图 1和图 2。如图所示,采样时间内,样品中 17种多环芳烃在 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中的分布特征相似,且在 $PM_{2.5}$ 中的质量比高于 PM_{10} 。结果显示,上述 17种多环芳烃更多地富集在细粒子中。 $PM_{2.5}$ 中,蒽、荧蒽和芘的浓度最高,分别占多环芳烃总浓度的 22.4% 、 18.2% 和 17.8% ,三者浓度之和占多环芳烃总浓度的 58.4% ;其次,为苯并[k]荧蒽、苯并[b]荧蒽、苯

并[a]蒽、苯并[g,h,i]芘、苯并[e]芘、菲、苯并[a]芘、茚并[1,2,3-cd]芘及二苯并蒽(浓度大于 $1 \text{ ng}/\text{m}^3$);与 $PM_{2.5}$ 相似, PM_{10} 中同样以蒽、荧蒽和芘为主,分别占多环芳烃总浓度的 22.6% 、 19.9% 和 18.6% ,三者浓度之和占多环芳烃总浓度的 61.1% ;苯并[k]荧蒽、苯并[a]蒽、菲、苯并[b]荧蒽、苯并[e]芘、苯并[g,h,i]芘、苯并[a]芘和茚并[1,2,3-cd]芘浓度较高(大于 $1 \text{ ng}/\text{m}^3$); $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中均以芘的浓度为最低,分别占多环芳烃总浓度的 0.053% 和 0.071% 。

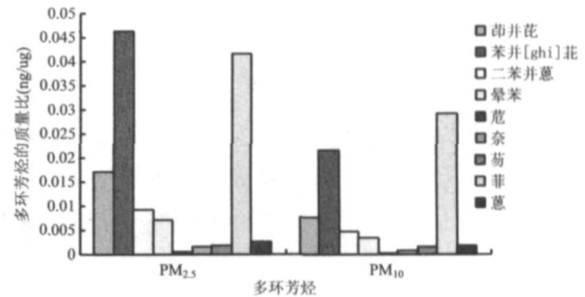


图 1 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 9种多环芳烃的质量比

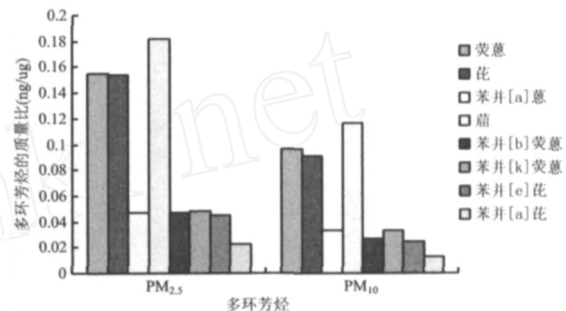


图 2 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 8种多环芳烃的质量比

本研究测定的 17种多环芳烃中 2环、3环、4环、5环、6环及 7环多环芳烃分别占 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中多环芳烃总浓度的 0.3% 、 5.8% 、 64.2% 、 20.7% 、 8.1% 、 0.9% 及 0.2% 、 6.9% 、 67.1% 、 19.2% 、 5.9% 、 0.7% 。结果显示,两种粒子中均以 4环 PAHs为主(含量 $>60\%$),其次为 5环 PAHs(含量分别为 20.7% 和 19.2%),二者浓度之和分别占多环芳烃总浓度的 84.9% 和 86.3% ;3环和 6环 PAHs含量较少,低于 10% ;7环和 2环 PAHs含量最低(低于 1%)。

2环~3环多环芳烃中菲的浓度最高,分别占 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中 2环~3环多环芳烃总浓度的 85.2% 和 87.3% 。研究表明,因为使用油、煤气、木材烹饪,排放的分子量较小的多环芳烃的浓度较高^[17],本研究中较高浓度的蒽、荧蒽、芘和菲提示燃煤及家庭烹饪可能为多环芳烃的主要来源之一。研究显示,由多环芳烃的比值可推断其来源,当荧蒽与(荧蒽+芘)的比值小于 0.2 时表明来自于石油源;比值为 $0.4 \sim 0.5$ 时显示主要源自于机动车尾气;大于 0.5 时主要为草、木材和煤燃烧造成的污染^[18];苯并[a]芘与萘的比值大于 1 时,提示源自燃煤污染源^[19];苯并[e]芘与(苯并[a]芘+苯并[e]芘)的比值为 $0.18 \sim 0.72$ 时,一般来自机动车尾气排放造成的污染^[20]。本研究结果中, $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中荧蒽与(荧蒽+芘)的比值分别为 $0.50 \sim 0.51$ 和 $0.51 \sim 0.52$;苯并[a]芘与萘的比值分别为 $2.5 \sim 3.8$ 和 $1.9 \sim 5.7$,均大于 1 ;苯并[e]芘与(苯

并 [a]蒽 + 苯并 [e]蒽) 的比值分别为 0.66 ~ 0.67 和 0.63 ~ 0.70。结果显示, 采样时间内, 民用污染和交通污染对多环芳烃的排放均有贡献。

本研究中, $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中苯并 [a]蒽的平均质量浓度分别为 3.04 ng/m^3 和 2.48 ng/m^3 , 低于国家大气质量标准 (10 ng/m^3), 但仍高于 WHO 建议的限值 (1 ng/m^3)。

采样时间内, $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中有机碳 (OC) 与元素碳 (EC) 的平均质量浓度分别为 20.08 、 $3.30 \mu\text{g/m}^3$ 及 23.57 、 $4.19 \mu\text{g/m}^3$, 分别占 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 质量浓度的 14.7%、2.8% 和 12.2%、2.4%, 含碳组分 (TC = OC + EC) 分别占 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 质量浓度的 17.5% 和 14.6%, 由此可见, OC 与 EC 在 $PM_{2.5}$ 中所占比例略高于 PM_{10} , 含碳组分仍为 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中的主要成分之一。本研究中, OC 与 EC 的比值均大于 2 ($PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 中分别为 3.4 ~ 12.6 和 3.7 ~ 7.4), 结果显示有二次反应生成的有机碳^[21]。

3 结论

本研究结果表明, 水溶性离子、含碳组分依然是北京市采暖期大气颗粒物的主要成分 ($PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 8 种水溶性离子总浓度及含碳组分的质量浓度分别占 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的 29.8%、17.5% 和 21.0%、14.6%); $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素的污染水平较高 ($PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中所测定元素总浓度分别占 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的 4.8% 和 5.8%), 建筑扬尘、土壤尘等可能为两种粒子中元素的主要来源之一; 相对于 PM_{10} , 本研究所测定的水溶性元素大多在 $PM_{2.5}$ 中浓度较高; 本研究所测定的 17 种多环芳烃以 4 环和 5 环为主, 二者浓度之和分别占 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中多环芳烃总浓度的 84.9% 和 86.3%, 推测主要源自民用污染 (燃煤) 和交通污染 (机动车尾气排放)。

[参考文献]

- [1] Chapman RS, Watkinson WP, Dreher KL, *et al.* Ambient particulate matter and respiratory and cardiovascular illness in adults: particle - borne transition metals and the heart - lung axis[J]. *Environ Toxicol Pharmacol*, 1997, 4: 331 - 338.
- [2] 魏复盛, 胡伟, 吴国平, 等. 空气污染与儿童肺功能指标的相关分析[J]. *中国环境科学*, 2001, 21 (5): 385 - 389.
- [3] Pope CA, Burnett RT, Thun MJ, *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long - term exposure to fine particulate air pollution[J]. *JAMA*, 2002, 287: 1132 - 1141.
- [4] Umila P, Kodavanti Mette C, Schladweiler Allen D, *et al.* Consistent pulmonary and systematic responses from inhalation of fine concentrated ambient particles: roles of rat strains used and physicochemical properties[J]. *Environ Health Perspectives*, 2005, 113 (11): 1561 - 1568.
- [5] 余学春, 贺克斌, 马永亮, 等. 气溶胶水溶性无机物及有机物的离子色谱测定[J]. *环境化学*, 2004, 23 (2): 218 - 222.
- [6] ME Guti  rez - Castillo, M Olivos - Ortiz, A De Vizcaya - Ruiz, *et al.* Chemical characterization of extractable water soluble matter associated with PM_{10} from Mexico City during 2000[J]. *Chemosphere*, 61 (5): 701 - 710.
- [7] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京 $PM_{2.5}$ 化学物种的质量平衡特征[J]. *环境化学*, 2004, 23 (3): 326 - 333.
- [8] 余学春, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京市 $PM_{2.5}$ 水溶性有机物污染特征[J]. *中国环境科学*, 2004, 24 (1): 53 - 57.
- [9] Wang Y, Zhang GS, Zhang XY, *et al.* The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of $PM_{2.5}$ and TSP aerosol in Shanghai[J]. *Atmospheric Environ*, 2006, 40 (16): 2935 - 2952.
- [10] Xiao HY, Liu CQ. Chemical characteristics of water - soluble components in TSP over Guiyang, SW China, 2003[J]. *Atmospheric Environ*, 2004, 38 (37): 6297 - 6306.
- [11] 常辉, 杨绍晋, 董金泉, 等. 大气气溶胶中元素种态研究[J]. *环境化学*, 2000, 19 (6): 485 - 500.
- [12] Zhang D, Iwasaka Y. Nitrate and Sulfate in individual Asian dust - storm particles in Beijing, China in Spring of 1995 and 1996[J]. *Atmospheric Environ*, 1999, 33: 3213 - 3223.
- [13] 刘章现, 蔡宝森, 张江石, 等. 河南省平顶山市大气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染水平及其微量元素特征[J]. *环境化学*, 2006, 25 (4): 516 - 517.
- [14] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京市大气 $PM_{2.5}$ 中矿物成分的污染特征[J]. *环境科学*, 2004, 25 (5): 26 - 30.
- [15] Stohs SJ, Bagchi D. Oxidative mechanisms in the toxicity of metal ions[J]. *Free Radical Biol Med*, 1995, 18: 321 - 336.
- [16] Adamson IYR, Prieditis H, Hedgecock C, *et al.* Zinc is the toxic factor in the lung response to an atmospheric particulate sample[J]. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2000, 166: 111 - 119.
- [17] Dural MM, Friedlander SK. Source resolution of polycyclic aromatic hydrocarbons in Los Angeles atmosphere - application of a CMB with first order decay. Washington DC: US Government Printing Office, 1981. EPA - 00012 - 81 - 161.
- [18] Yun KerMB, Macdonald RW, Vin Garzan R, *et al.* PAHs in the Fraser river basin: a critical appraisal PAH ratios as indicators of PAH source and composition[J]. *Organic Geochem*, 2002, 33: 489 - 515.
- [19] 钟晋贤, 李洪海, 张凤珠. 北京地区大气中 PAH 相关性研究[J]. *环境化学*, 1983, 2 (4): 22 - 27.
- [20] Kavouas IG, Lawrence J, Koutrakis P, *et al.* Measurement of particulate aliphatic and polynuclear aromatic hydrocarbons in Santiago de Chile: source reconciliation and evaluation of sampling artifacts[J]. *Atmospheric Environ*, 1999, 33: 4977 - 4986.
- [21] 于建华, 虞统, 杨晓光, 等. 北京冬季 $PM_{2.5}$ 中元素碳、有机碳的污染特征[J]. *环境科学研究*, 2004, 17 (1): 48 - 50.

(收稿日期: 2008 - 04 - 11)