



沈阳城区春节期间大气细颗粒元素浓度及其来源

洪 也¹, 周德平¹, 马雁军¹, 李潮流², 刘宁微¹, 董玉敏³

(1. 中国气象局 沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110016;

2. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100085; 3. 辽宁工业大学 外国语学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要:为了解城市春节期间大量燃放烟花爆竹造成的大气污染状况,对沈阳城区进行了大气气溶胶分级采样,对细颗粒样品中 41 种元素进行了分析。结果表明:春节期间空气中污染物浓度明显高于平时状态,其中燃放烟花爆竹的标识元素 Ba、Sr、K 等元素浓度非常高;由交通和工业生产产生的污染元素 Cd、As、B、Pb、Zn 等在细颗粒中也有大量的富集,显示了春节期间除燃放烟花爆竹造成的颗粒物污染外,来自冶炼、餐饮、化学工业以及汽车尾气等人为污染源的释放也占有重要地位。

关键词:烟花爆竹;悬浮细颗粒;富集因子

中图分类号:X513 **文献标志码:**A

文章编号:1008-5548(2010)01-0023-05

Concentration and Origin of Atmospheric Fine Particles in Shenyang Urban During the Spring Festival

Hong Ye¹, Zhou Deping¹, Ma Yanjun¹,

Li Chaoliu², Liu Ningwei¹, Dong Yumin³

(1. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016; 2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085;

3. Institute of Foreign Language, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: To understand the atmospheric pollution status result from letting off firework during the Spring Festival in Shenyang, the elements concentrations of collected samples were analyzed. The results indicated that letting off fireworks caused serious contamination and the element concentrations of fine particles were higher than the ordinary period. The concentration of identification elements for fireworks such as Ba, Sr, K and other elements also reached very high concentration. In addition, other

polluted elements such as Cd, As, B, Pb, Zn derived from traffic and industry activities were significantly enriched in fine particles. It was indicated that the anthropogenic origins of smelting restaurant, chemical industry and automobile emissions played an important role besides fireworks during this period.

Key words: fireworks; suspended fine particles; enrichment factor

随着人民生活水平的提高,春节期间烟花爆竹燃放量不断增加,导致城市大气环境明显恶化。我国很早就已经开展了该方面的研究。张恩飞^[1]、孙作平等^[2]讨论分析了燃放烟花爆竹对城市居民身体健康和环境的影响。近年来,徐敬等^[3]对北京城区悬浮颗粒物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度和化学成分进行了研究。金军等^[4]利用 2006 年春节期间的大气颗粒物浓度及粒径谱分布资料,进一步分析了北京市鞭炮燃放禁改限后大气颗粒物污染的变化规律。国外对燃放烟花爆竹也很关注,研究发现烟花燃烧时会释放有害微粒,能引起哮喘等呼吸道疾病^[5-6],燃放产生的大量颗粒物主要为细粒子,其中 K 元素和 S 元素含量最多^[7],甚至可能产生致癌的多种有机污染物^[8-9]。

作为我国东北最大的重工业城市,沈阳市的大气可吸入颗粒物污染一直比较严重^[10-11]。沈阳大气成分站 Grimm180 颗粒物分析仪显示,在 2007 年春节期间 PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM₁ 的浓度均在除夕夜的 22:00 开始至次日凌晨 2:00 之间达到高峰值,峰值浓度约为平时的 5 倍多。因此,为了解春节期间集中燃放烟花爆竹产生颗粒物污染的程度,于 2008 年春节期间在沈阳市区采集了气溶胶样品,测定了样品的质量浓度和元素成分,并对污染物的来源进行了初步探讨,以了解目前沈阳市城区内燃放烟花爆竹造成的大气污染的程度和变化规律,为沈阳大气污染治理及政府相关决策提供参考依据。

1 样品采集与分析

采样点位于沈阳市内两条主干道文化路与青年大街的交汇处,沈阳区域气象中心大楼 15 楼楼顶平台上。由于平台位置较高,周围没有障碍物影响采样,

收稿日期:2009-11-06。

基金项目:国家自然科学基金,编号:40575067;国家科研院所社会公益研究专项资金,编号:2005DIB2J111;2008 年公益性行业(气象)科研专项,编号:GYHY20080620;中国气象局沈阳大气环境研究所环境安全重点实验室开放基金,编号:200804。

第一作者简介:洪也(1969-),女,助理研究员,主要从事大气环境研究。E-mail: yehongofxf@126.com。

通信作者:周德平(1962-),女,研究员级高工,主要从事大气物理与大气环境研究。E-mail: yanqizhou234@163.com。

故采得的样品可以代表周边一定区域内大气气溶胶的平均状况。使用 FA-3 型 Anderson 撞击式气溶胶分级采样器,采样器大气入口高度距平台地面约 1.5 m,瞬时流量为 28.3 L/min。采样日期自 2008 年 1 月 30 日—2 月 9 日,每天连续采集约 24 h。采样膜使用聚四氟乙烯滤纸(Teflon)和玻璃纤维滤膜。本次实验,共采集到 7 组样品,分别记为 1[#]~7[#],采样方法和记录均按照监测规范进行。

Anderson 采样器共分 9 级,各级代表的空气动力学等效直径分别为:0 级:9~10 μm 、1 级:5.8~9.0 μm 、2 级:4.7~5.8 μm 、3 级:3.3~4.7 μm 、4 级:2.1~3.3 μm 、5 级:1.1~2.1 μm 、6 级:0.65~1.1 μm 、7 级:0.43~0.65 μm 和 8 级:<0.43 μm 。由于本实验的目的是着重分析细颗粒物的化学成分,所以在 5~8 级用聚四氟乙烯滤纸采样以便分析其元素含量,在其余各级采用玻璃纤维滤膜只分析其质量浓度。滤膜在采样前、后均置于温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 35 % 的恒温恒湿箱中恒重 48 h 后称重(其中玻璃纤维滤膜要先放在马弗炉中用 400 $^{\circ}\text{C}$ 高温烘烤 2 h)。

采集到的气溶胶样品收集在 PTFE 材质滤膜上,PTFE 滤膜具有极低的元素本底和良好的化学稳定性,溶样过程中不发生变化。经高压密闭酸溶法处理过的样品在中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, X-7, Thermo Elemental)进行元素测定。在室内外的所有操作过程中都采取严格措施防止可能的污染,并同时进行了空白样品的收集及测定。结果表明:所有元素的测定值均远高出仪器检测限(以空白样品连续 11 次测定的 3 倍标准偏差所对应的浓度作为检测限)。用国家土壤标准物质 GSS-8 作为质量控制样品,其前处理及测量方法与实际样品完全一致,绝大部分元素的测量准确度均在 10% 以内(用实际测量值与标准参考值的相对误差表示)。

2 结果分析

2.1 颗粒物质量浓度的变化

本文中把空气动力学直径 2.1 μm 作为粗、细粒子的分界。用 Anderson 采样器采集的 9 个级别颗粒物浓度之总和为 $\rho(\text{PM}_{10})$,第 5~8 级之和为 $\rho(\text{PM}_{2.1})$,6~8 级之和为 $\rho(\text{PM}_1)$ 。图 1 为可吸入颗粒物日均浓度的分布结果。可以看出,1 月 30—31 日 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.1}$ 和 PM_1 浓度较低,随着春节的临近,从 2 月 1 日(农历廿五)开始,颗粒物的浓度出现明显升高,在除夕(2 月 6 日)和大年初一(2 月 7 日)达到最高值, $\rho(\text{PM}_{10})$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.1})$ 、 $\rho(\text{PM}_1)$ 分别高达 0.400、0.265、0.220 mg/m^3 , PM_{10} 的日均浓度超过国家二级标准 2.67 倍^[12], $\text{PM}_{2.1}$ 的日均浓

度是美国 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度标准的 7 倍多^[13]。初一过后,浓度又明显降低。至初五(2 月 11 日)粗、细粒子浓度又出现另一高值,究其原因,主要是因为这一天有沙尘天气发生,同时,按照民间“破五”的习俗也是燃放烟花爆竹的高峰期。初六以后,尤其是春节假期结束后,颗粒物浓度明显减少。可见,春节期间燃放烟花爆竹对可吸入颗粒物日均浓度的增加,尤其是细粒子的日均浓度增加有非常显著的作用。

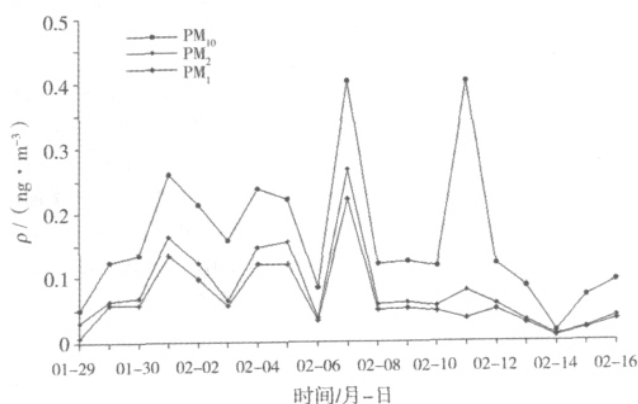


图 1 春节前后气溶胶日均浓度分布图

Fig.1 Daily average concentration distributions around the Chinese Spring Festival, 2008

2.2 细颗粒物的化学成分分析

大气颗粒物的化学特征是质量浓度外的另一个重要指标。了解大气颗粒物的化学成分,不但可以定性识别各类污染排放源,而且可以定量解析各个排放源贡献的大小,从而为有效进行颗粒物污染治理提供科学依据。由于烟花爆竹燃放产生的颗粒物主要为细粒子^[7],本研究测定了细颗粒 $\text{PM}_{2.1}$ 和 PM_1 中的 Li、Be、Al、K、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Ga、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Cs、Ba、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Hf、Ta、Tl、Th、U 共 41 种元素的质量浓度。

为了分析春节期间(1 月 30 日—2 月 8 日)由于燃放烟花爆竹引起的细颗粒物化学成分的变化情况,把春节前后各日大气细颗粒 $\text{PM}_{2.1}$ 和 PM_1 中各元素浓度值求平均,即为平时均值;除夕日 $\text{PM}_{2.1}$ 和 PM_1 的值是 6[#] 样品即 2 月 6 日 14:50—2 月 7 日 15:50 采样期间的元素浓度值。把除夕日值与平时均值相除,为相差倍数。然后把已测的 41 种元素按除夕日 $\text{PM}_{2.1}$ 的元素浓度值大小进行排序,取前 24 种元素值作为参比元素。把除夕与平时 PM_1 和 $\text{PM}_{2.1}$ 中各元素浓度进行对比。表 1 为除夕与平日 PM_1 和 $\text{PM}_{2.1}$ 中各元素浓度对比表。

由表可见,在平时均值中, $\text{PM}_{2.1}$ 中元素浓度在 200~1 010 ng/m^3 的元素有 K、Ca、Mg、Al、Zn、Na 等常量元素,这几种元素浓度占总浓度的分数是 88.59%;

表 1 除夕与平日大气中细颗粒 PM_{2.1} 与 PM₁ 中各元素浓度对比表

Tab.1 Comparison of element concentration in PM_{2.1} and PM₁ in the Chinese New Year's Eve and the same period

	平时				除夕				除夕与平时	
	PM _{2.1}		PM ₁		PM _{2.1}		PM ₁		相差倍数	
	元素浓度	质量分数	元素浓度	质量分数	元素浓度	质量分数	元素浓度	质量分数	PM _{2.1}	PM ₁
	$\rho/(\text{ng}\cdot\text{m}^{-3})$	$w/\%$	$\rho/(\text{ng}\cdot\text{m}^{-3})$	$w/\%$	$\rho/(\text{ng}\cdot\text{m}^{-3})$	$w/\%$	$\rho/(\text{ng}\cdot\text{m}^{-3})$	$w/\%$		
总和	3 708	100	2793	100	48 142	100	43 966	100	15.74	12.98
K	1 005	27.12	927.47	33.21	37 139	77.14	35 284	80.25	38.04	36.94
Mg	763.15	20.58	446.69	16.00	2 319	4.82	1 465	3.33	3.28	3.04
Al	284.88	7.68	154.53	5.53	2 171	4.51	1 632	3.71	10.56	7.62
Ba	23.89	0.64	20.71	0.74	1 808	3.76	1 654	3.76	79.86	75.68
Pb	98.99	2.67	95.10	3.41	744.36	1.55	684.10	1.56	7.19	7.52
Na	269.09	7.26	226.77	8.12	738.75	1.53	662.90	1.51	2.92	2.75
Ca	347.01	9.36	202.36	7.25	729.80	1.52	448.53	1.02	2.22	2.10
Zn	271.76	7.33	258.33	9.25	653.20	1.36	622.85	1.42	2.41	2.40
Fe	343.52	9.26	222.54	7.97	532.01	1.11	368.10	0.84	1.65	1.55
Sr	5.37	0.14	4.18	0.15	499.71	1.04	459.79	1.05	109.98	93.08
B	92.84	2.50	83.85	3.00	154.65	0.32	137.48	0.31	1.64	1.67
Ti	62.72	1.69	27.02	0.97	112.23	0.23	61.91	0.14	2.29	1.79
Mn	28.86	0.78	23.72	0.85	88.95	0.18	72.70	0.17	3.07	3.08
Ga	24.65	0.66	24.08	0.86	43.66	0.09	42.28	0.10	1.76	1.77
Cr	11.11	0.30	9.06	0.32	35.85	0.07	29.64	0.07	3.27	3.23
Mo	6.06	0.16	5.79	0.21	12.97	0.03	12.51	0.03	2.16	2.14
Ni	6.17	0.17	5.37	0.19	12.47	0.03	10.98	0.02	2.04	2.02
Rb	2.91	0.08	2.65	0.09	10.94	0.02	10.12	0.02	3.82	3.76
V	5.83	0.16	3.90	0.14	9.35	0.02	6.88	0.02	1.76	1.60
La	0.16	0.00	0.07	0.00	0.39	0.00	0.15	0.00	2.06	2.40
Y	0.13	0.00	0.06	0.00	0.24	0.00	0.10	0.00	1.71	1.82

在 10~200 ng/m³ 的元素有 Pb、B、Ti、Ga、Mn、Cu、Ba、As、Cr；小于 10 ng/m³ 的元素为 Mo、Sr 等微量元素和一些稀土元素。PM₁ 中元素浓度在 200~1 000 ng/m³ 的元素有 K、Mg、Zn、Na、Fe、Ca、Al 等常量元素, 占总浓度的分数是 87.33%, 在 10~200 ng/m³ 的元素有 Al、Pb、B、Ti、Ga、Mn、Cu、Ba、As；小于 10 ng/m³ 的元素为 Cr、Mo、Sr 等元素。由 PM₁ 和 PM_{2.1} 的对比中可以发现, 一些来自于人为源污染的元素明显地聚集在 PM₁ 中。如 K 元素的浓度在 PM₁ 中占的分数为 33.21%, 在 PM_{2.1} 中则降低为 27.12%, Ba、Pb、Na、Zn、Sr、Cu、Cr、As、Bi 和 B 等一些人为源污染的元素也是相对聚集在 PM₁ 中, 而一些来自于自然源的元素如 Al、Mg、Fe、Ti、Rb、V、Zr、Tl、Co、La、Ce 等则更多地相对富集在 PM_{2.1} 中。

在 6# 样品中, 无论是 PM_{2.1} 还是 PM₁, 元素的浓度都远远高于平时元素的浓度, 除夕日 PM_{2.1} 浓度总和为 48 142 ng/m³, 是平时浓度的 15.74 倍, 这说明这一天污染物排放非常严重。除夕日 PM_{2.1} 中元素浓度在 200~30 000 ng/m³ 的元素有 K、Mg、Al、Ba、Pb、Na、Ca、Zn、Fe、Sr、Cu 和 Sr, 其中元素 K 的浓度最高, 高达 37 139 ng/m³, 是平时的 38.04 倍, 仅 K 一种元素

就占总浓度的分数是 77.14%, 而在 PM₁ 中的 K 元素所占的比例更高, 达 80.25%。另外在除夕增长倍数更高的元素还有 Sr、Ba 等元素, 在 PM_{2.1} 中这两种元素分别是平时的 109.98 倍和 79.86 倍。因此。从监测结果显示: 元素 Sr、Ba 和 K 在除夕夜的浓度远远高于平时, 且与烟花爆竹中的钾盐的成分一致, 可见这 3 种元素与烟花爆竹有很直接的关系, 之后的元素的富集因子和因子分析结果也验证了这一点。

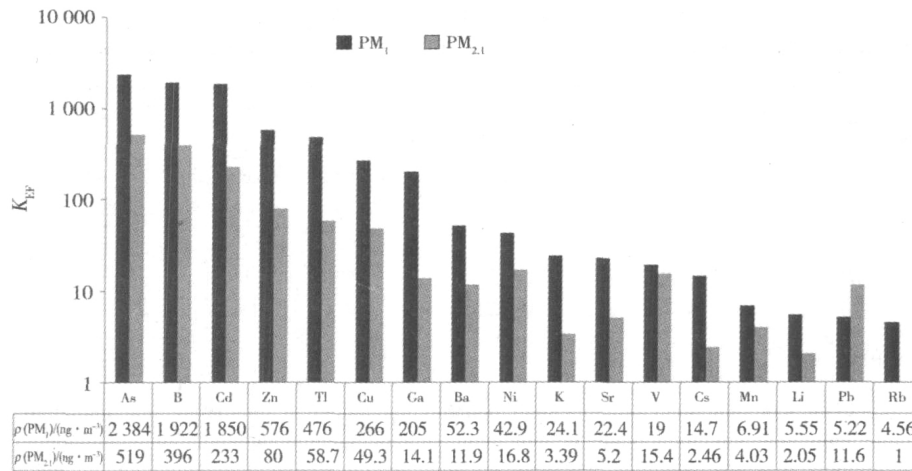
2.3 气溶胶元素的富集因子及其来源的分析

富集因子(enrichment factors)常用于研究大气中气溶胶粒子的元素富集程度, 可以有效地消除各种因素的影响, 并可以判断和评价气溶胶中元素的来源^[14-19]。

研究中一般选择 Al、Fe、Ti 等作为参考元素, 地壳元素的平均含量通常采用 Taylor 提出的上地壳(UCC)元素数据^[20]。富集因子 K_{EF} 可表示为:

$$K_{EF}=\frac{\rho(X)/\rho(R)_{\text{气溶胶}}}{\rho(X)/\rho(R)_{\text{地壳}}}$$

式中: $\rho(X)$ 代表待检验元素的数值; $\rho(R)$ 代表参考元素的数值, K_{EF} 指待评价元素的富集因子值。本文以 Fe 作为参考元素, 把富集因子高于 2 的元素视为

图 2 除夕日大气中细颗粒 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 中元素的富集因子Fig.2 Enrichment factors in $\text{PM}_{2.5}$ and $\text{PM}_{1.0}$ in the Chinese New Year's Eve

受到了人类活动的明显影响。

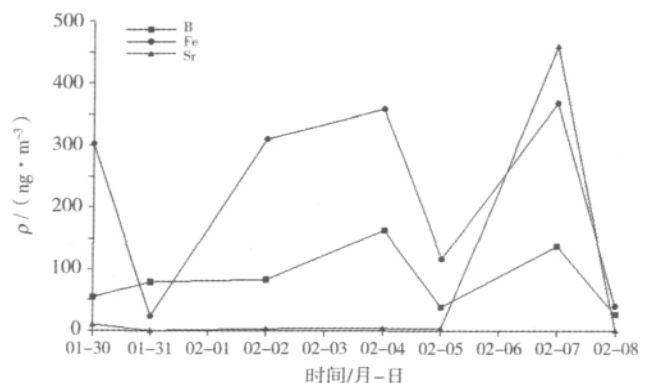
图 2 给出了沈阳市除夕日大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 中测定元素相对上地壳元素 Fe 的富集因子值。根据富集因子 (K_{EF}) 值的大小把沈阳市春节期间大气气溶胶的化学元素分成两类:一类为典型的地壳组成元素和稀土元素: Na、Al、Fe、Sc、Zr、Th、U 等地壳元素以及 La、Ta、Eu、Lu、Dy 等稀土元素,其 K_{EF} 值都小于 1,基本上保持地壳中元素的平均丰度水准,受到人类活动的影响很小;第二类为受到人类活动影响较大的元素,如 Ba、Sr、K、Ni、V、Cs、Mn、Li、Pb、Rb 的 K_{EF} 值都在 10~100 之间,其中 K、Ba、Sr 等主要来自于除夕日的浓度比平时的浓度高出近 40、80、100 倍(见表 1),可以看出它与除夕日燃放烟花爆竹直接相关;Ni、V 等来自冶金化工和燃油等^[21],Pb 主要来自燃煤燃油和汽车尾气外还有电池生产、废弃物燃烧和冶炼工业等的排放^[22];As、B、Cd、Zn、Tl、Cu 等的 K_{EF} 值大于 100,说明这几种元素受到了人类活动的强烈影响。这些元素除了少量自然源外有着复杂的人为来源,例如 As 主要来自燃煤,B 被广泛地应用于玻璃制造以及各种复合材料中;Cd 的来源包括金属矿产(如锌、镍、铅、镉矿)的开采和冶炼,化石燃料如煤和石油的燃烧、垃圾焚烧、水泥的制造、钢铁生产、磷肥、木材燃烧等^[23],Zn 一般来自化石燃料的燃烧、金属冶炼以及垃圾焚烧等活动^[24-25]。沈阳市是我国的著名的重工业城市,As、B、Cd、Zn、Tl、Cu 等元素的高富集因子值表明这些污染主要是由于春节期间繁忙的交通、取暖、工业燃煤、燃油、冶炼等原因造成的。As、Cu、Pb、Mg、Mn 等重金属元素在大气中虽然总含量不高,但富集程度很高,其潜在毒性会造成对人体的伤害。如儿童高血铅与空气中铅含量密切相关^[26]。沈阳除夕日 Pb 含量为 684 ng/m^3 ,超过世界卫生组织(WHO)年平均标

准(500 ng/m^3)的 1.4 倍,其他有毒元素,通过呼吸作用也会对人体尤其是儿童、老年等特殊群体造成危害。因此,建议有关部门能够进一步做好污染源的减控。

由图 2 中 $\text{PM}_{2.5}$ 与 $\text{PM}_{1.0}$ 富集因子值对比可以看出,不同粒径组成的气溶胶粒子,其性质、来源和元素的富集程度都有很大区别,更重要的是一些元素主要集中在细粒子($\text{PM}_{1.0}$)中,如 As、B、Cd、Zn、Tl、Cu 等这些主要来自人为源的元素在细粒子 $\text{PM}_{1.0}$ 上富集的程度更高,达几百倍至几千倍,而主要来自地壳的元素如 Na、Al、Fe、Sc、Zr、Th、U 等地壳元素以及 La、Ta、Eu 等稀土元素多富集在较粗粒子 $\text{PM}_{2.5}$ 上, $\text{PM}_{2.5}$ 与 $\text{PM}_{1.0}$ 富集因子值相差不大。

3 代表元素浓度的时间变化

为分析春节期间不同来源元素浓度的时间变化特征,选用 Sr、B、Fe 研究 3 种不同来源元素在春节前后(1月30日—2月8日)的时间变化特点(图3)。其中 Sr 代表燃烧烟花爆竹产生的元素;B 代表工业生

图 3 春节期间 $\text{PM}_{1.0}$ 代表元素浓度时间变化Fig.3 Time variation characteristics of representative elements in $\text{PM}_{1.0}$ during the Chinese Spring Festival

产过程中产生的元素;Fe代表地壳元素。图4中,元素浓度最高的是6#样品即2月7日(大年初一)的Sr元素,浓度高达459 ng/m³,是平时的93倍(见表1),这主要是由于除夕夜烟花爆竹的大量燃放引起的,前面富集因子和因子分析的结果也同样证实了其来源是烟花爆竹。K、Ba等元素也具有相同的特征。元素B的浓度在除夕期间波动不大,可能因为大多数工人放假,工厂污染物释放比较稳定,As等元素也有这样的变化特征;地壳元素的代表元素Fe的浓度在这一日与平时相差不大,说明地壳元素无论是平时还是除夕它的含量均相对稳定。

4 结论

通过对沈阳市春节期间大气细颗粒物的监测分析与来源探讨,可以得到如下结论:

1) 2008年春节期间沈阳市颗粒物质量浓度明显高于同期的平均状况,除夕至初一大气中细颗粒PM₁₀的日均浓度超过国家二级标准2.67倍,PM_{2.5}的日均浓度是美国PM_{2.5}日均浓度标准的7倍多;可吸入颗粒物浓度在除夕夜0:00时达到最高值;大气中一些与燃放烟花爆竹有关的典型污染元素浓度更是达到了平时的数倍至数百倍。进一步说明大量燃放烟花爆竹,会使城市空气质量急剧恶化,极易引发比较严重的大气污染事件。

2) 冬季大气可吸入颗粒物中主要常量元素由Ca、Mg、Al等和微量元素Pb、B、Ti等组成,其中Cu、Cr、As等主要来自于人为污染的元素多富集在细颗粒PM₁中,而主要来自于自然源的元素如Al、Mg、Fe等则相对富集在PM_{2.5}中。

3) 除夕夜,不仅作为燃放烟花爆竹标识元素的Ba、Sr、K等元素的浓度显著上升,而且Cd、As、B、Pb等污染元素在细颗粒物中也有明显富集,尤其是在PM₁中的富集更加明显。说明春节期间除燃放烟花爆竹造成的颗粒物污染外,来自冶炼、餐饮、化学工业以及汽车尾气等人为污染源的释放也占有重要地位。

综上所述,春节期间大量燃放烟花爆竹,不仅使城市空气质量下降,而且其排放的可吸入颗粒物尤其是PM₁中含有的重金属元素能够沉积在人的肺泡中,对人体健康极为有害。因此,建议在综合治理大气污染物排放的同时,进一步限制含有重金属元素烟花的燃放。使城市人民在欢度传统节日的同时,也能尽量享有一份相对清洁的大气环境。

致谢:高少鹏为样品的室内分析作了细致的工

作,甄小杰、张云海、王扬锋等对本文的完成提供很大帮助,在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 张恩飞. 燃放烟花爆竹对城市居民身体健康的影响[J]. 中国环境监测, 1988, 4(5): 50-53
- [2] 孙作平, 张建党. 除夕夜燃放烟花爆竹对城市环境的影响[J]. 环境保护科学, 1995, 21(2): 65-68
- [3] 徐敬, 丁国安, 颜鹏, 等. 燃放烟花爆竹对北京城区细粒子的影响[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 79-82
- [4] 金军, 王英, 李令军, 等. 北京春节期间大气颗粒物污染及影响[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(3): 229-232
- [5] KULSHRESTHA U C, RAO T N, AZHAGUVEL S, et al. Emissions and accumulation of metals in the atmosphere due to crackers and sparkles during Diwali Festival in India[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(27): 4421-4425
- [6] STEINHAUSER Georg, THOMAS M Klapö tke. "Green" pyrotechnics: a chemists' challenge[J]. Angewandte Chemie, 2007, 47(18): 3330-3347
- [7] DUTCHER D D, PERRY K D, CAHILL T A, et al. Effects of indoor pyrotechnic displays on the air quality in the Houston AstroDome[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1999, 49: 156-160
- [8] FLEISCHER O, WICHMANN H, LORENZ W. Release of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans by setting off fireworks[J]. Chemosphere, 1999, 39(6): 925-932
- [9] DYKE P, COLEMAN P, JAMES R. Dioxins in ambient air, Bonfire Night 1994[J]. Chemosphere, 1997, 34(1): 5-7
- [10] 马雁军, 崔劲松, 刘晓梅, 等. 1987-2002年辽宁中部城市群大气污染物变化特征分析[J]. 高原气象, 2005, 24(3): 428-435
- [11] 严文莲, 周德平, 王扬峰, 等. 沈阳冬夏季可吸入颗粒物浓度及尺度谱分布特征[J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 435-443
- [12] TAYLOR S R, McLENNAN S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(2): 241-265
- [13] 温玉璞, 徐晓斌, 汤洁, 等. 青海瓦里关大气气溶胶元素富集特征及其来源[J]. 应用气象学报, 2001, 12(4): 400-408
- [14] ROGGE W F, HILDEMAN L M, MAZUREK M A, et al. Sources of fine organic aerosol. 3. road dust, tire debris, and organometallic brake lining dust: roads as sources and sinks[J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27(9): 1892-1904
- [15] PACYNA J M. Atmospheric trace elements from natural and anthropogenic sources[M]// NRIAGU J O, DAVIDSON C I. Toxic elements in the atmosphere. John Wiley Sons, Wiley Interscience Publications, 1986: 33-52
- [16] KHILLARE P S, BALACHANDRAN S, MEENA B R. Spatial and temporal variation of heavy metals in atmospheric aerosol of Delhi[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2004, 90: 1-21
- [17] CHUEINTA W, HOPKE P K, PAATERO P. Investigation of sources of atmospheric aerosol at urban and suburban residential areas in Thailand by positive matrix factorization[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 3319-3329.
- [18] 戚其平, 杨艳伟, 姚孝元, 等. 中国城市儿童血铅水平调查[J]. 中华流行病学杂志, 2002, 23(3): 162-164