北京市大气细颗粒物污染与来源解析研究

韩力慧*,张 鹏,张海亮,程水源,王海燕 (北京工业大学环境与能源工程学院,北京 100124)

摘要：采集北京市 2014 年冬、春、夏、秋 4 个季节代表月 1、4、7、10 月的大气细颗粒物 $PM_{2.5}$ 样品,分析研究了 $PM_{2.5}$ 质量浓度、化学特征、季节变化和污染成因.同时,采用正交矩阵因子分析法(PMF)对 $PM_{2.5}$ 进行了来源解析.结果表明,北京市 2014 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度为 87.74μg/m^3,是国家环境空气质量标准年均浓度限值的 2.5 倍.轻、重污染期间,$PM_{2.5}$ 浓度较常日分别增加了 1.5 和 3.9 倍,其季节变化表现为冬季>夏季>秋季>春季.地壳元素 Mg、Al、Fe、Ca、Ti 在轻度污染和重度污染期间较常日略有升高,分别是常日浓度的 1.1~1.2 倍和 1.2~1.5 倍.污染元素 S、Pb、Zn、Cu 浓度变化显著,轻度污染和重度污染期间分别是常日浓度的 1.3~2.7 倍和 1.9~5.9 倍.S 元素是 $PM_{2.5}$ 中受人为活动影响较为严重的组分,其相应的 SO_4^{2-} 年均浓度为 13.43μg/m³,在轻度污染和重度污染期间分别是常日浓度的 2.7 和 5.9 倍.硫酸盐的形成主要受 O_3 浓度、温度、相对湿度等气象要素的协同影响,较高的 O_3 浓度、较高温度和相对湿度有利于硫酸盐的生成.$PM_{2.5}$ 主要来源于机动车排放、燃煤、地面扬尘和工业排放,其贡献率分别为 37.6%、30.7%、16.6%和 15.1%.

关键词：$PM_{2.5}$；污染特征；影响因素；来源解析

中图分类号：X513 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2016)11-3203-08

Pollution and source apportionment of atmospheric fine particles in Beijing. HAN Li-hui*, ZHANG Peng, ZHANG Hai-liang, CHENG Shui-yuan, WANG Hai-yan (College of Environmental and Energy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). *China Environmental Science*, 2016,36(11)：3203~3210

Abstract：Aerosol samples of $PM_{2.5}$ were collected in Beijing during January, April, July and October 2014, which stood for winter, spring, summer and autumn respectively, to investigate the physical and chemical characteristics, seasonal variation and formation factors of $PM_{2.5}$. At the same time, source apportionment was carried out by using the positive matrix factorization analysis method. The results showed that the annual average concentration of $PM_{2.5}$ reached 87.74μg/m³ in Beijing in 2014, 2.5 times as high as the national air quality standard. The $PM_{2.5}$ concentrations during light and heavy pollution periods increased more than 1.5 and 3.9 times compared with normal days, respectively, and its seasonal variation was significant, with the order of winter>summer>autumn>spring. The concentrations of crustal elements, such as Mg, Al, Fe, Ca, Ti, during light and heavy pollution days were 1.1~1.2 and 1.2~1.5 times as high as those in normal days, respectively, and the concentrations of pollution elements, such as S, Pb, Zn and Cu, showed significant changes during light and heavy pollution days, with 1.3~2.7 and 1.9~5.9 times as high as those in normal days, respectively. S was the most important anthropogenic pollution element in $PM_{2.5}$, and its SO_4^{2-} annual average concentration was 13.43μg/m³. The concentrations of SO_4^{2-} in light and heavy pollution days were 2.7 and 5.9 times higher than that in normal days, respectively. The formation of sulfate was mainly influenced by the concentration of O_3, air temperature and relative humidity etc.. Higher O_3 concentration, temperature and relative humility were in favor of the formation of sulfate. $PM_{2.5}$ was mainly from mobile emission, coal combustion, re-suspended dust and industrial emission, which contributed to $PM_{2.5}$ about 37.6%, 30.7%, 16.6% and 15.1%, respectively.

Key words：$PM_{2.5}$；pollution characteristics；impact factors；source apportionment

据北京市环境监测中心数据显示,2013 年北京市一级和二级天气共 176d,占 48.2%;重污染和严重污染天气共 58d,占 15.9%.2014 年 $PM_{2.5}$ 一级优的天数比 2013 年增加了 22d,而重污染天气减少了 13d,空气质量略有所改善.但以灰霾为特征

收稿日期：2016-03-01

基金项目：国家环保部公益性行业科研专项(201409003);国家留学基金委项目(201406545022);北京市教委项目(PXM2016_014204_001029_00205967_FCG);北京工业大学区域大气复合污染防治北京市重点实验室资助

* 责任作者, 副教授, hlh@bjut.edu.cn

的污染天气对大气环境和人类健康造成的严重影响已不容忽视,成为当今大气污染亟待解决的关键问题.为此,许多学者做了相关的研究.有研究报道,北京市2009~2013年$PM_{2.5}$年均污染水平在 100μg/m³左右,风速、相对湿度对细粒子的污染程度有着较显著的影响,风速低,相对湿度高时,会导致 $PM_{2.5}$ 的积累[1].在对 2004 年 11 月 30 日~12 月 4 日持续灰霾期间大气细颗粒物中无机元素浓度分析发现,矿物元素 Ca、Fe、Al、Ti、Mg 浓度在灰霾期间是非灰霾期间的 2~3 倍,污染元素 S、Zn、Pb、Cu 浓度在灰霾期间是非灰霾的 4~10 倍,灰霾天积累了高浓度的污染物,尤其是颗粒物中的污染元素[2,3].在 2010-2011 年冬春灰霾和沙尘期间北京 $PM_{2.5}$ 的质量浓度明显升高,且灰霾时期的人为污染元素、水溶性离子及二次有机碳均高于沙尘天气和非污染天气.$PM_{2.5}$ 主要来自燃煤和工业过程、二次转化、地面扬尘、机动车尾气排放等[4].

随着清洁空气行动计划的落实与推行,2013 年全市累计有 6595 蒸 t 燃煤锅炉改造使用清洁能源,退出 392 家污染企业,淘汰老旧机动车 47.6 万辆,启动 116 项环保技改项目.2014 年北京市空气质量有所改善,$PM_{2.5}$ 等 4 项主要污染物浓度同比平均下降 3.3%,但主要大气污染物 $PM_{2.5}$ 浓度仍高于环境空气质量标准所规定的二级浓度限定值,大气污染复合型特征日益突出,污染物来源发生了变化.因此,深入研究北京市 2014 年细粒子的理化特性、成因及来源,对于进一步研究区域复合型污染具有重要的指导意义,该研究将为北京市 $PM_{2.5}$ 控制措施的制定提供科学理论依据.

1 实验部分

1.1 样品采集

采样点位于北二环和北三环之间,北京师范大学科技楼顶,距离地面高度约 35m,为交通和居民混合区.采样时间为 2014 年 1、4、7、10 月份分别代表冬、春、夏、秋 4 个季节,因 APEC 会议于 11 月 5~11 日在京召开而增加了 11 月份,并将 11 月 1~14 日划入秋季,11 月 15~28 日划入冬季.采用武汉天虹仪表有限责任公司生产的 150DⅡ型中流量(100L/min)大气颗粒物采样仪,采用英国 Whatman 公司生产的直径为 90mm 的 Whatman41 纤维素滤膜,每天连续 23h50min(早晨 8:00 至次日早晨 7:50)采集 $PM_{2.5}$ 样品.所有采样滤膜在采集前后均放置在恒温恒湿室(温度为(20±2)℃,湿度为(40±5)%)恒温恒湿 48h,并采用十万分之一天平(型号 DENVER-TB-215D)进行称量,之后放入冰箱保存.

1.2 化学分析

采用聚乙烯塑料剪刀剪 1/4 空白膜和采样膜,称重后放入聚四氟乙烯消解罐内,分别加入 3mL 浓硝酸、1mL 浓高氯酸和 1mL 浓氢氟酸,将消解罐放入微波消解仪中消解 1.5h 后,用高纯水清洗消解盖于消解罐内,并将消解罐置于赶酸仪中进行赶酸处理,赶酸至消解罐内剩最后一滴后,向消解罐内加入 1mL 浓硝酸转入 10mL 试管中定容,待测.

采用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS 分析上述溶液中 24 种元素组分,即 Na、Mg、Al、S、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Sr、Mo、Cd、Sb、Ce、Eu、Pb.该方法是目前大气颗粒物中元素组分分析应用最广泛的方法之一[5,6].

1.3 气象和气态污染物数据收集

采样期间在环境保护部数据中心(http://datacenter.mep.gov.cn/)和中国空气质量在线监测分析平台(http://www.aqistudy.cn/)实时采集气象要素和气态污染物浓度数据,主要包括温度、相对湿度、露点、大气压、能见度、风速、O_3 和 SO_2 浓度、空气质量指数等.

2 结果与讨论

2.1 大气污染特征

依据国家空气质量标准[7],本研究将空气质量指数为 0~100 的称为常日天气,将空气质量指数 101~200 的称为轻度污染天气,将空气质量指数≥201 的称为重度污染天气.2014 年全年共采集 92d 有效样品,其中常日天气 40d,占总采样日 44%;轻度污染和重度污染天气各为 36d 和 16d,

分别占 39%和 17%.在春、夏、秋、冬 4 季代表月中常日天气分别为 8、8、15、9d,轻度污染天气分别为 10、9、3、14d,重度污染天气分别为 3、4、3、6d,说明污染天气在 4 季均有发生,且轻污染多发生在春季、夏季和冬季,重污染主要集中在冬季,这与气象要素和气态污染物浓度有很大关系.采样期间气象要素和气态污染物浓度变化情况如表 1 所示.

表 1　采样期间气象数据和气态污染物数据

Table 1　Meteorological data and concentrations of gaseous pollutants in Beijing during the sampling period

天气型	常日	轻度污染	重度污染
温度(℃)	−6~29 (11.9)	−4~30 (13.1)	−1~28 (12.9)
相对湿度(%)	15~68 (39.8)	29~84 (53.5)	34~88 (66.1)
露点(℃)	−21~22 (2.8)	−13~24 (7.7)	−3~24 (9.3)
大气压(hPa)	1000~1036 (1019.9)	1003~1034 (1016.8)	1001~1031 (1016.4)
能见度(km)	6~28 (13.9)	3~15 (6.3)	1~7 (3.6)
风速(km/h)	5~26 (9.6)	3~14 (8.1)	3~13 (6.9)
O_3(μg/m^3)	4~106 (41.7)	3~167 (57.3)	4~165 (44.3)
SO_2(μg/m^3)	2~53 (12.20)	2~75 (23.8)	4~109 (28.2)
AQI	32~100 (75)	106~196 (141)	204~403 (251)

注:括弧中数值为平均值.

由表 1 可见,污染时段较常日相对湿度、露点、O_3 浓度、SO_2 浓度和空气质量指数 AQI 较高,而能见度和风速较低,说明这些因素是形成污染天气的重要要素.

2.2　$PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征

监测期间 $PM_{2.5}$ 年均浓度为 87.74μg/m³,是国家空气质量标准年均浓度限定值(35μg/m³)的 2.5 倍.日均浓度最大和最小值分别为 313.04μg/m³(2014 年 11 月 20 日)和 7.14μg/m³(2014 年 4 月 20 日),污染期间最大日均浓度是国家空气质量标准日均浓度限定值(75μg/m³)的 4.2 倍.常日、轻度污染和重度污染期间 $PM_{2.5}$ 平均浓度分别为 38.58、97.22 和 190.38 μg/m³,轻度污染和重度污染期间细粒子平均浓度较常日分别提高了 1.5 和 3.9 倍.春、夏、秋、冬 4 季中,$PM_{2.5}$ 平均浓度分别为 64.83、81.00、67.95、123.54μg/m³,呈现出冬季>夏季>秋季>春季的特点.这可能与冬季采暖期增加了污染物的排放,夏季强烈的紫外线照射、高温、高湿、高氧化性增加了二次污染物的形成;而春季没有往年的沙尘天气,秋季 APEC 会议前和期间北京及周边地区采取临时减排措施减少了污染物的排放有很大关系.

2.3　$PM_{2.5}$ 化学组分变化特征

富集因子法(EF)是用来反映大气颗粒物中各元素富集程度,判断颗粒物来自天然源和人为污染源的有效方法[8].富集因子计算公式如下:

$$EF=\frac{(C_i/C_n)_{气溶胶}}{(C_i/C_n)_{地壳}}$$

式中:$(C_i/C_n)_{气溶胶}$为气溶胶中待测元素与参比元素浓度之比;$(C_i/C_n)_{地壳}$为地壳中待测元素与参比元素浓度之比.

参比元素主要有 Al、Fe、Ti、Sc、Si,其中在地壳中化学性质较稳定、分析精度较高、使用最普遍的参比元素为 Al[9].因此,选取 Al 作为参比元素,依据中国地壳元素丰度[10]计算 $PM_{2.5}$ 中元素的 EF 值.其中 Sc、Co、Se、Sr、Mo、Ce、Eu 等 10 种元素浓度非常低,其 EF 值接近于 0,几乎无富集,对大气环境影响甚微.而 Na、Mg、Al、Fe、Ca、S、Mn、Ni、Cu、Zn、Pb、Ti 等 14 种元素浓度相对较高,EF 值为 0.57~4385.95,对大气环境影响较大,是细颗粒物中的主要元素,其富集因子变化如图 1 所示.

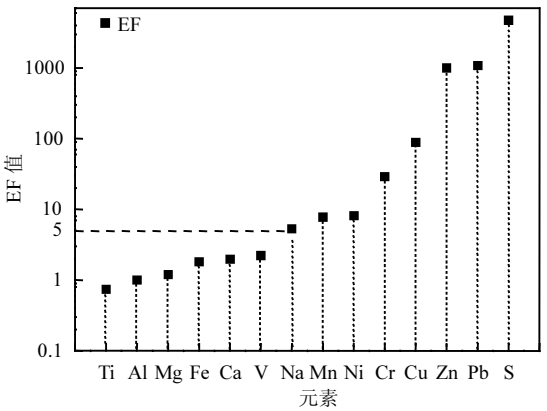


图 1　北京市细粒子中主要元素富集因子

Fig.1　Enrichment factors of main elements of $PM_{2.5}$ in Beijing

有研究[8]指出,若 EF 值小于等于 5,则认为该

元素相对于本底没有出现富集,主要来自地壳源;若EF值大于5,则该元素出现了富集,认为该元素主要来自人为源.由图1可知,Ti、Al、Mg、Fe、Ca、V的EF值低于5,说明它们主要来自地壳源;Na、Mn、Ni、Cr、Cu、Zn、Pb、S的EF值大于5,且Zn、Pb、S三元素的EF值接近甚至大于1000,说明它们受到人为活动的强烈影响,主要来自人为源.

地壳元素和污染元素的季节变化如图2所示.地壳元素Ti、Al、Mg、Fe、Ca、V和污染元素Na、Mn、Cr、Cu、Zn、Pb的浓度均表现为冬、春季节浓度较高,夏、秋季节浓度较低的特点,这与$PM_{2.5}$的季节变化相近.

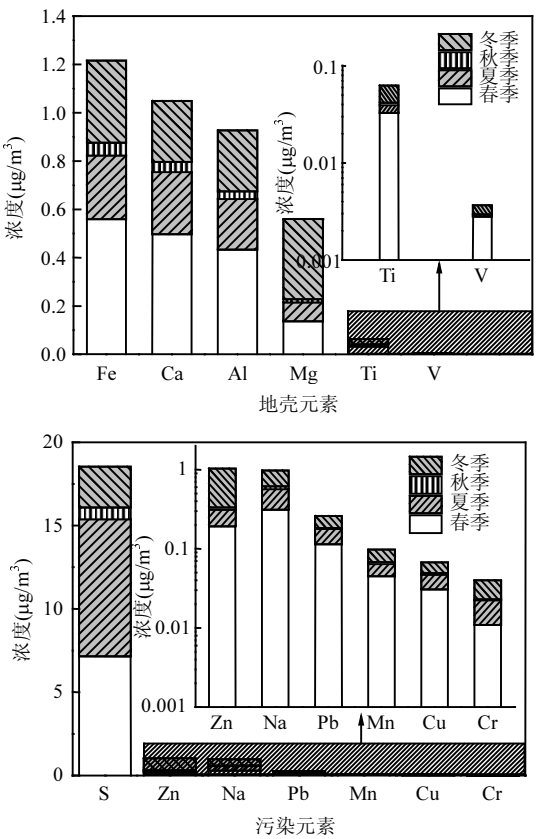


图2 地壳元素和污染元素的季节变化

Fig.2 The seasonal variations of crustal and pollution elements in $PM_{2.5}$

常日与污染期间元素浓度变化如图3所示,地壳元素Mg、Al、Ca、Ti、Fe在轻度污染和重度污染期间平均浓度分别是常日浓度的1.1~1.2倍和1.2~1.5倍,可见地壳元素在轻、重污染期间浓度较常日略有升高,这可能是由于常日风速比污染期间大,地面扬尘对其贡献较大,而污染期间虽风速较小,但累积效果显著,从而造成污染期间地壳元素浓度与常日相近.而污染元素Zn、Cu、Pb、S浓度在轻度污染和重度污染时段分别是常日浓度的1.3~2.7倍和1.9~5.9倍,表现出明显的变化特征,说明污染天气积累了高浓度的污染物,尤其是颗粒物中的污染元素[2].

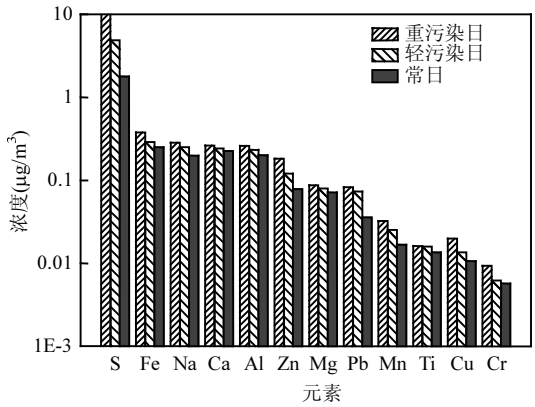


图3 常日和污染期间主要元素浓度

Fig.3 The concentrations of the major elements in $PM_{2.5}$ in normal days and light–heavy pollution days

2.4 影响二次硫酸盐形成的重要因素

S元素是$PM_{2.5}$中受人为活动影响较为严重的组分,其相应的SO_4^{2-}年均浓度为13.43μg/m³,常日、轻度污染和重度污染期间浓度分别为5.33、14.62和31.25μg/m³,且轻、重度污染期间SO_4^{2-}浓度分别是常日浓度的2.7和5.9倍,春、夏、秋、冬浓度分别为21.02、24.68、2.12、7.36μg/m³,表现为夏、春季节浓度较高,冬、秋季节浓度较低的特征,这显然与SO_4^{2-}的形成有很大关系.

SO_4^{2-}的形成与其前体物SO_2、O_3、温度、相对湿度、风速等因素存在着较复杂的关系,其随时间的变化趋势如图4和5所示.在夏季,SO_2、O_3平均浓度分别为6.6μg/m³和101.7μg/m³,平均气温为27℃,相对湿度为58%,且SO_4^{2-}浓度随O_3浓度升高而升高,二者相关系数为0.57,表现出一

定的线性关系.虽然前体物 SO_2 浓度不高,但由于夏季 O_3 浓度高,相对湿度大(RH=33%~78%),颗粒物表面存在一定水汽,SO_2 在大气中可通过气相氧化和液相氧化生成硫酸盐[11].

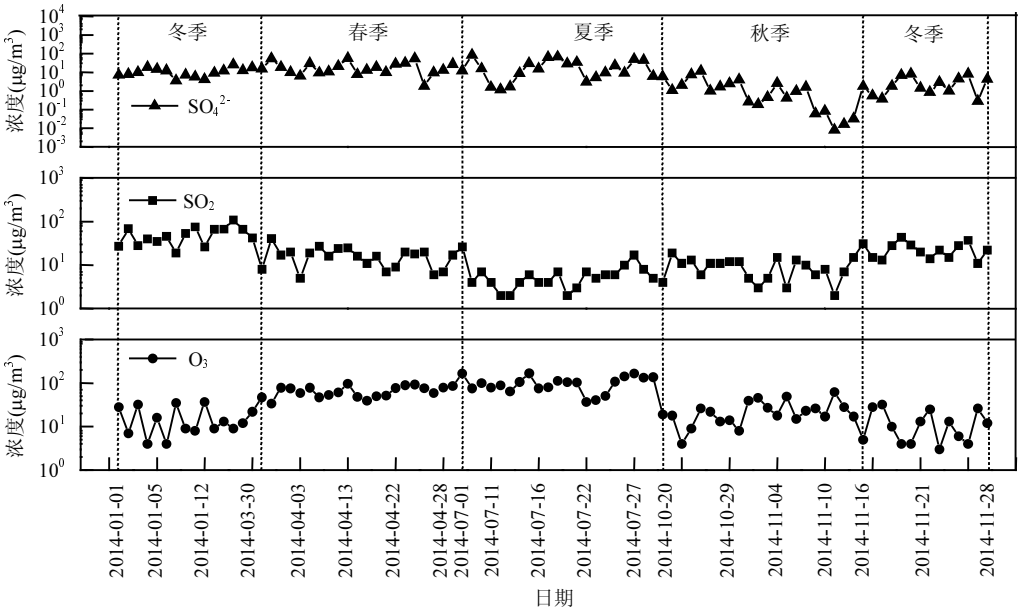


图 4　SO_4^{2-}—SO_2—O_3 随时间变化趋势

Fig.4　The temporal variations of SO_4^{2-}–SO_2–O_3

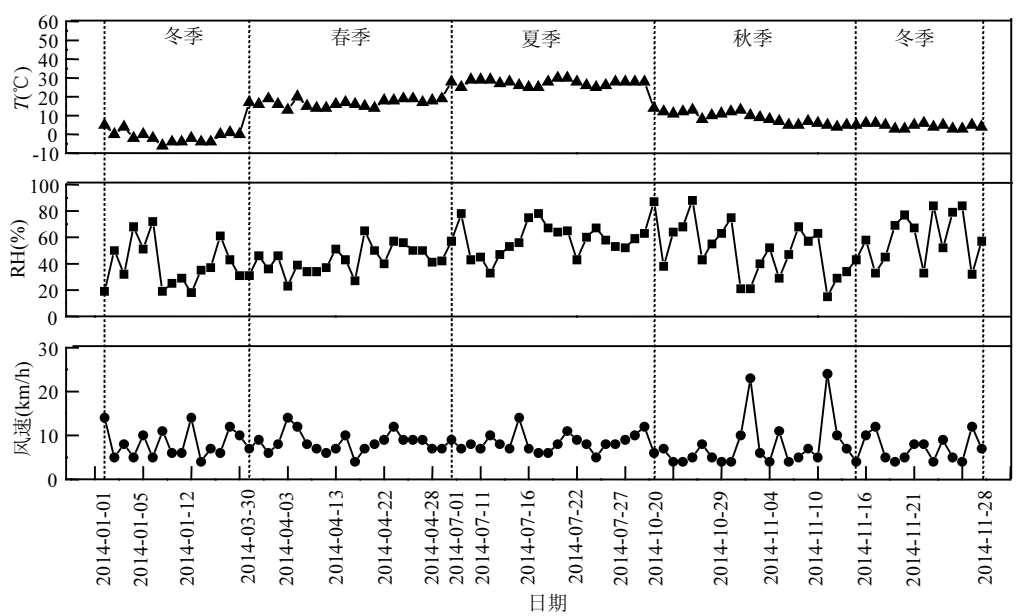


图 5　温度—湿度—风速随时间变化趋势

Fig.5　The temporal variations of temperature–relative humidity–wind speed

SO_2 还可吸附在颗粒物表面,被吸附在颗粒物表面的 OH、HO_2、O_2、O_3、H_2O_2 等氧化,最后形成 SO_4^{2-}.且水汽对硫酸盐的生成具有协同促进效应[12-13],使二次硫酸盐的生成速率明显增加.另一方面,SO_2 在颗粒物表面反应速率也与温度有关,夏季温度较高会使活化分子数增多,提高

化学反应速率,硫酸盐的生成量也呈现增加趋势[14],这些因素的协同作用使夏季硫酸盐浓度较高.春季硫酸盐浓度仅次于夏季,表现出与往年不同的特征,是因为2014年春季采样期间共发生了10d轻度污染和3d重度污染事件,污染类型均为静稳型.污染期间 SO_2 和 O_3 的平均浓度分别为21.5和70.1μg/m³,平均相对湿度为46%,温度17℃,益于 SO_2 在颗粒物表面吸附并进一步被 O_3 氧化生成 SO_4^{2-},正是污染天气的频繁出现致使春季硫酸盐浓度偏高.冬季轻、重污染分别发生了14和6d,污染期间大气平均相对湿度为56%,且冬季采暖期大气中 SO_2 浓度较高,为42.3μg/m³,但由于 O_3 浓度较低,仅为9.9μg/m³,温度也较低,为1℃,不利于 SO_2 向硫酸盐的转化,使得冬季硫酸盐含量较低.秋季出现污染的天数最少,轻、重污染均发生了3d.这可能与此期间因召开APEC会议,北京市政府采取了一系列大气防治措施,确保会议期间的空气质量有很大关系.在污染期间,尽管平均温度为11℃,相对湿度达72%,益于硫酸盐的形成,但 O_3 浓度较低,仅为15.7μg/m³,前体物 SO_2 浓度也较低,为10.3μg/m³,不利于硫酸盐的形成,这些因素的综合作用致使秋季硫酸盐浓度较其它季节最低.

综上所述,硫酸盐的形成受温度、相对湿度、O_3 浓度、前体物 SO_2 浓度等要素的协同影响,其中较高的 O_3 浓度、较高的温度和相对湿度有利于 SO_2 向硫酸盐的转化.

2.5 $PM_{2.5}$ 来源解析

正交矩阵因子分析法(PMF)是解析污染物主要来源的重要方法之一.本文运用PMF 3.0模型对无机元素组分进行因子分析,共解析出4个因子,结果如图6所示.

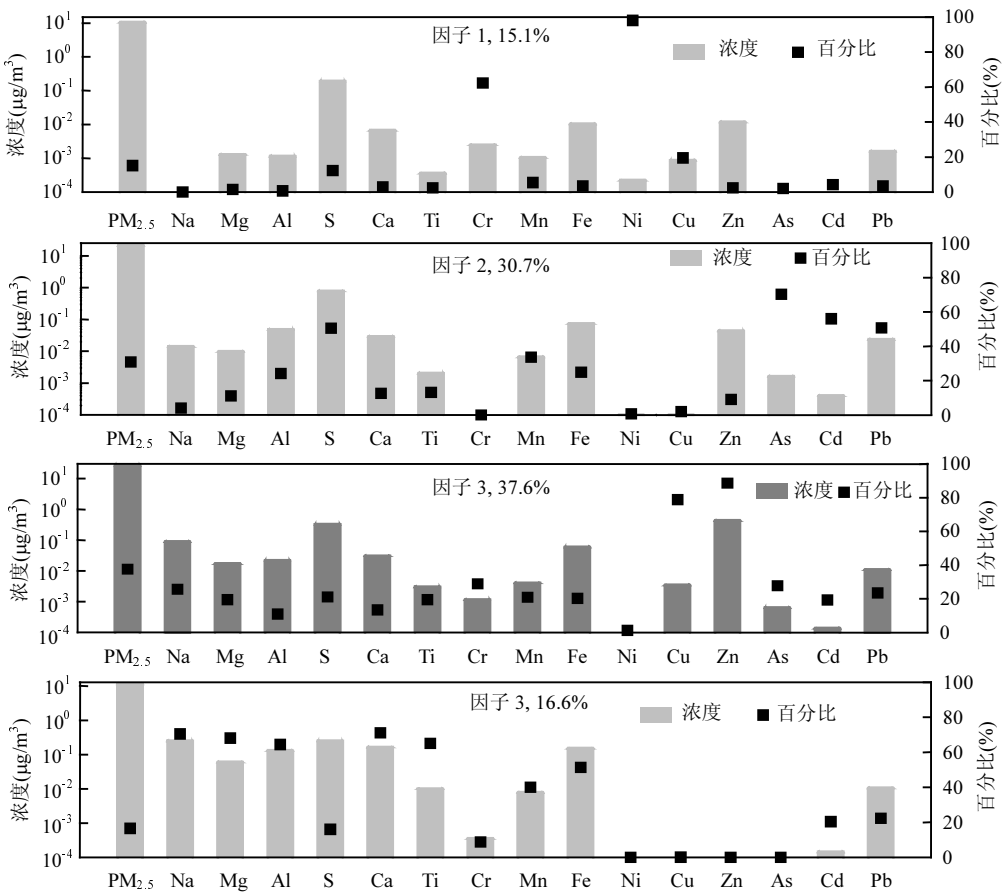


图6 $PM_{2.5}$ 的源解析特征

Fig.6 The characteristics of source apportionment for $PM_{2.5}$

因子 1 中 Ni 和 Cr 载荷贡献较大,均在 60%以上.工业过程会排放 Ni、Cr 等重金属元素,Cr 及其化合物在冶金、电镀等工业上有着广泛的应用,这些行业是大气环境中 Cr 的重要来源[15].也有报道 Cr 是冶金化工尘的标志性元素[16],说明该因子与工业排放有关,相关贡献为 15.1%.因子 2 的贡献为 30.7%,载荷较高的组分是 S、As、Cd 和 Pb.其中 S 和 As 是燃煤的主要标识物,虽然无铅汽油的推广使汽车尾气排放已不再是 Pb 元素的直接来源,但燃煤仍会释放出一部分 Pb 至环境中[18].因此,该因子与燃煤有关.Cu 和 Zn 是因子 3 中负载贡献最大的金属元素,均在 65%以上.Cu 和 Zn 主要来自机动车尾气,同时还分别来自机动车刹车片和轮胎磨损[18-21].虽然金属冶炼也是 Cu 和 Zn 的主要来源之一,但自从首钢 2010 年搬迁出北京后,金属冶炼已不再是 Cu 和 Zn 的主要来源.所以,该因子与机动车排放有关,贡献率为 37.6%,略高于北京市环保局公布的机动车排放对 $PM_{2.5}$ 的贡献(为 31.1%),这可能与二者的内涵略有不同有关,因为后者主要是指本地源中机动车尾气排放对 $PM_{2.5}$ 的贡献.因子 4 对 $PM_{2.5}$ 的贡献为 16.6%,该因子中 Na、Mg、Al、Ca、Ti 等元素表现为高载荷,显然与地面扬尘有关.

通过上述分析可知,北京市 $PM_{2.5}$ 主要来源于机动车排放、燃煤、地面扬尘和工业排放,相对贡献分别为 37.6%、30.7%、16.6%和 15.1%.交通排放和燃煤是北京市 $PM_{2.5}$ 的主要贡献源,这与近年来的源解析结果相近.北京市近年来机动车对 $PM_{2.5}$ 的贡献呈上升趋势,2011 年机动车贡献约为 13.2%[4],2012~2013 年机动车排放对 $PM_{2.5}$ 的贡献为 16%[22],2014 年贡献为 37.6%.燃煤贡献仍处于较高水平,基本保持在 30%左右的水平[4,23];扬尘对大气颗粒物的贡献呈下降趋势,从 2011 年 26.4%的贡献率[4]下降至 16.6%.由于本研究的源解析是基于颗粒物中元素组分的来源解析,没有考虑有机碳、元素碳以及二次硝酸盐和铵盐对 $PM_{2.5}$ 的贡献,因此源解析结果可能会有所偏差,但不影响源变化的趋势.

3　结论

3.1　2014 年北京市 $PM_{2.5}$ 年均浓度为 87.74μg/m^3,是国家空气质量标准年均浓度限定值的 2.5 倍.污染期间,最高污染日浓度是国家空气质量标准日均浓度限定值的 4.2 倍.轻、重污染期间,$PM_{2.5}$ 浓度较常日分别增加了 1.5 和 3.9 倍,$PM_{2.5}$ 浓度的季节变化表现为冬季>夏季>秋季>春季.

3.2　地壳元素 Mg、Al、Fe、Ca、Ti 在轻度污染和重度污染期间较常日略有升高,分别是常日浓度的 1.1~1.2 倍和 1.2~1.5 倍.污染元素 S、Pb、Zn、Cu 浓度变化显著,轻度污染和重度污染期间分别是常日浓度的 1.3~2.7 倍和 1.9~5.9 倍.

3.3　S 元素是 $PM_{2.5}$ 中受人为活动影响较为严重的组分,其相应的 SO_4^{2-} 年均浓度为 13.43μg/m³,在轻度污染和重度污染期间分别是常日浓度的 2.7 和 5.9 倍.其季节变化表现为夏、春季节浓度较高,冬、秋季节浓度较低.硫酸盐的形成受温度、相对湿度、O_3 浓度、SO_2 浓度等要素的协同影响,较高的 O_3 浓度、较高的温度和相对湿度有利于硫酸盐的生成.

3.4　$PM_{2.5}$ 主要来源于机动车排放、燃煤、地面扬尘和工业排放,贡献率分别为 37.6%、30.7%、16.6%和 15.1%,机动车排放和燃煤是北京市 $PM_{2.5}$ 的主要贡献源.

参考文献：

[1] 王　琪,孙　巍,张新宇.北京地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布及其与气象条件影响 [J]. 计算机与应用化学, 2014,10(31):1193-1196.

[2] 唐傲寒,赵婧娴,韩文轩,等.北京地区灰霾化学研究进展 [J]. 中国农业大学学报, 2013,18(3):185-191.

[3] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A h, et al. Chemical Characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Haze-Fog Episodes in Beijing [J]. Environ. Sci. Technol., 2005,40:3148-3155.

[4] 王志娟,韩力慧,陈旭峰,等.北京典型污染过程 $PM_{2.5}$ 的特性和来源 [J]. 安全与环境学报, 2012,12(5):122-126.

[5] 曹　雷,任研冰,姚　远.微波消解ICP-MS法同时测定大气颗粒物中多种痕量元素 [J]. 环境监测管理与技术, 2012,24(4):52-55.

[6] 郑子龙,张　凯,陈义珍,等.北京一次混合型重污染过程大气颗粒物元素组分分析 [J]. 环境科学研究, 2014,24(11):1219-1226.

[7] GB3095-2012 环境空气质量标准 [S].
[8] 姬亚芹,朱 坦,冯银厂,等.天津市 PM_{10} 中元素的浓度特征和富集特征研究 [J]. 环境科学与技术, 2006,29(7):49-51.
[9] 王嘉珺,赵雪艳,姬亚芹,等.抚顺市 PM_{10} 中元素分布特征及来源分析 [J]. 中国环境监测, 2012,28(4):107-113.
[10] 黄荣辉,叶大年.高等地球化学 [M]. 科学出版社.
[11] 唐孝炎,李金龙,栗 欣,等.大气环境化学 [M]. 北京:高等教育出版社, 1990.
[12] Li L, Chen Z M, Ding J, et al. A DRIFTS study of SO_2oxidation on the surface of $CaCO_3$ particles [J]. Spectrosc. Spect. Anal., 2004,24:1556-1559.
[13] Li L, Chen Z M, Zhang Y H, et al. Kinetics and mechanism of heterogeneous oxidation of sulfur dioxide by ozone on surface of calcium carbonate [J]. Atmos. Chem. Phys., 2006,6:2453-2464.
[14] 崔虎雄,成天涛,陈建民,等.SO_2 在 Fe_2O_3 颗粒表面不同温度下非均相反应的实验模拟 [J]. 物理化学学报, 2008,24:2331-2336.
[15] 谭吉华,段菁春.中国大气颗粒物重金属污染、来源及控制建议 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2013,30(2):145-155.
[16] 刘 菁,张建强,吴香尧,等.成都市十里店地区大气气溶胶元素组成及来源解析 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(1):99-102.
[17] Hong Y, Ma Y J, Liu N W. A study on trace chemical composition and sources of atmospheric particles in winter in Shenyang [J]. Environmental Science & Technology, 2010,33(6E):292-296.
[18] Cen K, Neumann T, Norra S, et al. Land use-related chemical composition of street sediments in Beijing [J]. Environ. Sci. & Pollut. Res., 2004,11(2):73-83.
[19] Ho K F, Lee S C, Chow J C, et al. Characterization of PM_{10} and $PM_{2.5}$ source profiles for fugitive dust in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2003(37):1023-1032.
[20] 王伯光,杨嘉慧,周 炎,等.广州市机动车尾气中金属元素的排放特征 [J]. 中国环境科学, 2008,28(5):389-394.
[21] 石爱军,马俊文,耿春梅,等.北京市机动车尾气排放 PM_{10} 组分特征研究 [J]. 中国环境监测, 2014,30(4):44-49.
[22] 杨妍研,李金香,梁云平,等.应用受体模型(CMB)对北京市大气 $PM_{2.5}$ 来源的解析研究 [J]. 环境科学学报, 2015,35(9):2693-2700.
[23] 金象春,张贵英,肖才锦,等.PIXE 和 XRF 用于北京新镇地区 $PM_{2.5}$ 源解析研究 [J]. 原子能科技技术, 2014,48(7):1325-1330.

作者简介:韩力慧(1964-),女,山西太原人,副教授,博士,主要研究方向为大气污染与防治.发表论文 20 余篇.

《中国环境科学》2011~2014 年发表的论文中 20 篇入选“领跑者 5000”提名论文

《中国环境科学》2011~2014 年发表的论文中有 20 篇入选“精品期刊顶尖论文平台——领跑者 5000”提名论文.“领跑者 5000(F5000)”平台由中国科学技术信息研究所于 2013 年建设,旨在集中展示中国精品科技期刊上发表的最高端的学术研究成果,将与国际和国内重要检索系统链接,扩大论文影响.该平台将与汤森路透公司合作,拟利用 WOK 国际检索系统平台,与 SCI 数据库在同一平台内实现文献链接和国际引文检索,在更大范围内向世界科技同行展示和推广中国最重要的科研成果.提名论文均为 2011~2014 年在学科领域内被引率排名居前的论文.本次环境学科共有 65 篇文章入选“领跑者 5000”提名论文.