

## 区域大气细粒子污染特征及快速来源解析

陈多宏<sup>1</sup>,李梅<sup>2\*</sup>,黄渤<sup>3</sup>,蒋斌<sup>2</sup>,张涛<sup>1</sup>,江明<sup>1</sup>,谢敏<sup>1</sup>,钟流举<sup>1</sup>,毕新慧<sup>4</sup>,吕小明<sup>1</sup>,张干<sup>4</sup>,周振<sup>2</sup> (1.广东省环境监测中心,国家环境保护区域空气质量监测重点实验室,广东省环境保护大气二次污染研究重点实验室,广东 广州 510308; 2.暨南大学大气环境安全与污染控制研究所,广东 广州 510632; 3.广州禾信分析仪器有限公司,广东 广州 510530; 4.中国科学院广州地球化学研究所,有机地球化学国家重点实验室,广东 广州 510640)

**摘要:** 在广东大气超级站使用单颗粒气溶胶飞行时间质谱仪(SPAMS)等仪器开展综合观测,2013年12月共监测到两个污染过程,主要的化学成分为元素碳(EC),占总颗粒数的56.8%,其次为有机碳(OC)和重金属(HM),分别占总颗粒数的12.7%和10.1%。两个污染过程中,不同颗粒类别的变化趋势有差异,说明两个污染过程的污染特征有所不同。污染源分析发现,监测期间主要受到机动车尾气源和燃煤源的影响,二者分别占24.8%和22%;其次为工业工艺源和生物质燃烧,分别占16.4%和10.3%。第一个污染过程中,工业工艺源是首要污染源,而随着颗粒物浓度的增高,燃煤和二次无机气溶胶的比例明显增加,说明此污染过程中受一次污染源(燃煤源和工业工艺源)和二次光化学反应的复合影响。而第二个污染过程中,机动车尾气为首要污染源,其次是燃煤和工业工艺源,整个过程中各源的比例较为稳定,说明该次污染过程主要由不利气象条件导致的污染物累积形成。

**关键词:** 超级站; SPAMS; 大气细颗粒物; 快速来源解析

中图分类号: X831 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2016)03-0651-09

**The pollution characteristics and source apportionment of regional atmospheric fine particles.** CHEN Duo-hong<sup>1</sup>, LI Mei<sup>2\*</sup>, HUANG Bo<sup>3</sup>, JIANG Bin<sup>2</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>, JIANG Ming<sup>1</sup>, XIE Min<sup>1</sup>, ZHONG Liu-ju<sup>1</sup>, BI Xin-hui<sup>4</sup>, LV Xiao-ming<sup>1</sup>, ZHANG Gan<sup>4</sup>, ZHOU Zhen<sup>2</sup> (1.Guangdong Environmental Monitoring Center, State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Air Quality Monitoring, Guangdong Environmental Protection Key Laboratory of Atmospheric Secondary Pollution, Guangzhou 510308, China; 2.Institute of Technology on Atmospheric Environmental Safety and Pollution Control, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3.HeXin Mass Spectrometry Guangzhou 510530, China; 4.State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China). *China Environmental Science*, 2016,6(3): 651~659

**Abstract:** Single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) was used to analyze the single particle characteristics of aerosols in Heshan, in December 2012. Two typical pollution processes were captured during the sampling period. The fine particles were dominated by elemental carbon (EC), which accounted for 56.8% of total particles. Organic carbon (OC) and heavy metal (HM) accounted for 12.7% and 10.1% of sampled particles, respectively. Different particle types showed different temporal profiles during the two pollution processes, indicating the characteristics of the two processes were different. The source apportionment results showed that the most important PM<sub>2.5</sub> sources in this region were vehicle emission and coal combustion, accounting for 24.8% and 22% of PM<sub>2.5</sub>, respectively. Industry emission and biomass burning were also important, contributing 16.4% and 10.3% to total PM<sub>2.5</sub> particles, respectively. During the first pollution process, industry emission was the most important source, and the contribution of coal combustion and secondary inorganic aerosol were found to be increasing with PM<sub>2.5</sub> concentration, implying that primary emission as well as enhanced secondary photochemical reaction played important roles in the increasing of PM<sub>2.5</sub> concentration. However, vehicle emission was the most important source during the secondary pollution process, and the proportion of each source

收稿日期: 2015-06-24

基金项目: 科技支撑项目资助(2014BAC21B03,2014BAC21B01);2014年广东省公益研究与能力建设专项资金(2014B020216005)

\* 责任作者, 博士, limei2007@163.com

was stable during the whole pollution process, indicating this process was induced by the accumulation of pollutants under unfavorable meteorological conditions.

**Key words:** super monitoring station; SPAMS; atmospheric particles; fast source apportionment

细颗粒物是大气的重要组成部分,其化学组成复杂,粒径小,在环境中停留时间长,可显著降低大气能见度,改变成云过程,在气候变化中起到重要作用<sup>[1]</sup>;同时,细颗粒物中含有重金属、多环芳烃和酸性物质等众多有毒有害物质,对人体健康尤其是呼吸系统和血液循环系统具有明显损害作用<sup>[2-5]</sup>。近年来,大气污染频发,影响范围扩大,亟需开展PM<sub>2.5</sub>污染防治行动<sup>[6]</sup>。

为了更有效地解决颗粒物污染的问题,制定科学的污染控制政策与措施,对细粒子开展源解析研究工作十分重要。细粒子源解析的传统方法是采用滤膜采样与分析,再运用源解析模型分析污染来源<sup>[7]</sup>。该方法通常需要长时间的样品采集,而且要求样品数量较多,需要花费大量的人力、物力;另外,从污染事件发生到样品收集再到组分分析和源解析,需时较长,所得结果时效性不强,不利于高污染事件的及时诊断和应急响应<sup>[8]</sup>。本研究利用在线气溶胶质谱仪(SPAMS)、PM<sub>2.5</sub>在线监测仪等仪器,开展高时间分辨率的细粒子化学成分和粒径分布的联合监测,综合分析细粒子污染特征,并针对不同污染过程,开展快速源解析研究,为及时、有效地反映细粒子污染随着气象条件和污染源变化的响应提供科学支撑。

目前,在线气溶胶质谱的在线源解析研究起步较晚,缺乏本地化的一次排放源化学成分谱<sup>[9]</sup>、对质量浓度测定结果不够准确等问题,会对解析结果造成一定不确定性的影响。本研究参考国内外一次排放源化学成分谱,初步建立了在线源解析方法,分析珠江三角洲典型区域大气污染源。

## 1 实验和方法

### 1.1 样品采集

采样点设置在位于广东鹤山的大气超级监测站,相关研究已经对站点有所描述<sup>[10]</sup>。2013年12月1~31日,使用在线气溶胶质谱仪

(SPAMS)(广州禾信分析仪器有限公司生产)和PM<sub>2.5</sub>在线监测仪开展高时间分辨率的联合监测。监测期间SPAMS共采集2434406个颗粒,其中同时具有粒径和正负离子信息的颗粒1320876个,粒径范围为0.2~2.0 $\mu\text{m}$ 。

### 1.2 SPAMS工作原理

SPAMS的工作原理、基本性能和质量控制已有文献进行了详细的阐述<sup>[11-12]</sup>。简单来说,气溶胶颗粒通过0.1mm的进样微孔引入到空气动力学透镜,被聚焦成为笔直运动的粒子束进入真空测径系统。粒子束触发双测径激光完成粒径测定和颗粒数目统计,并触发电离激光,在电离腔内将颗粒物打击成离子碎片,再由双极飞行时间质量分析器对气溶胶颗粒化学成分进行检测。

### 1.3 数据分析

颗粒的粒径及质谱信息输入到MATLAB7.12上运行的SPAMS Data Analysis V2.2软件包进行处理。首先通过自适应共振理论神经网络算法(ART-2a)对采集到的颗粒进行自动分类<sup>[13]</sup>,该算法能够根据颗粒质谱中离子峰的种类及强度自动将相似的颗粒归为同一类,本研究中使用的ART-2a算法参数如下:警戒因子为0.75,学习率为0.05,迭代次数为20。ART-2a将所有的颗粒分成了数百种颗粒类型,然后再通过人工根据化学成分特征将其合并为8类:元素碳(EC)、有机碳(OC)、元素-有机碳混合碳(ECOC)、富钠(Na-rich)、富钾颗粒(K-rich)、左旋葡聚糖颗粒(LEV)、重金属颗粒(HM)和富硅颗粒(Si-rich),它们占总颗粒数的90%以上,粒径为0.2~2.0 $\mu\text{m}$ 。然后,根据各类污染源的排放特征,采用示踪离子法将采集到的环境颗粒物分为海盐、扬尘、生物质燃烧、汽车尾气、燃煤、工业工艺源、纯二次无机气溶胶及其他等8种来源。

## 2 结果与讨论

### 2.1 监测期间空气质量状况

图 1 为监测期间鹤山超级站的  $PM_{2.5}$  浓度及 SPAMS 采集颗粒数关系图, 可以看到 SPAMS 采集颗粒数与  $PM_{2.5}$  具有较好的相关性 ( $r^2=0.65$ ), 因此 SPAMS 的监测数据较好地反映了细颗粒物污染状况. 此结果与前期研究结果一致<sup>[14]</sup>.

监测期间, 共捕获到两个污染过程,  $PM_{2.5}$  浓度平均浓度为  $91\mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $7\sim 188\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). 第一次污染形成过程较为典型, 由 5~9 日,  $PM_{2.5}$  浓度迅速升高, 最高达到  $184\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 而第二次污染过程, 由 27~28 日颗粒物浓度达到最高值, 随即迅速降低, 持续时间较短.

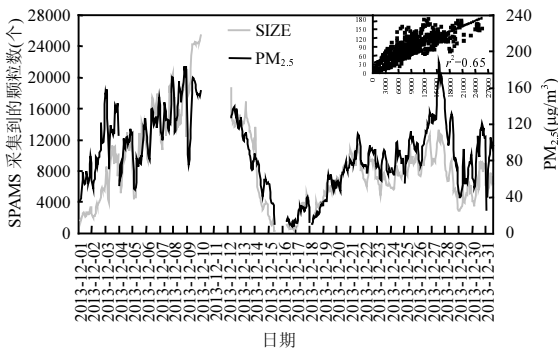


图 1 监测期间采集颗粒数与  $PM_{2.5}$  随时间变化趋势  
Fig.1 Temporal profiles of SPAMS number concentration and  $PM_{2.5}$  mass concentration during the sampling period

## 2.2 监测期间气象条件

图 2 为监测期间气象条件变化趋势图, 从图中可以看出, 上半个月平均风速在  $1.7\text{m}/\text{s}$  左右, 而到了下半个月风速为  $2.5\text{m}/\text{s}$  左右; 上半个月的平均温度 ( $15.5^\circ\text{C}$ ) 高于下半个月 ( $11^\circ\text{C}$ ); 湿度在  $20\%\sim 80\%$  之间; 监测期间 12 月 14~18 日有降水.

## 2.3 颗粒物化学组成

### 2.3.1 不同类别颗粒物质谱特征

图 3 为 8 类颗粒质谱特征: 元素碳颗粒正负谱图中含有一系列 C 簇离子峰 ( $m/z=\pm 12$ ); 有机碳颗粒正谱图中含有明显有机碳碎片峰如:  $\text{C}_2\text{H}^+$  ( $m/z=27$ )、 $\text{C}_3\text{H}^+$  ( $m/z=37$ )、 $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+/\text{C}_2\text{H}_5\text{N}^+$  ( $m/z=43$ )、 $\text{C}_4\text{H}_3^+$  ( $m/z=51$ )、 $\text{C}_5\text{H}_3^+$  ( $m/z=63$ )、 $\text{C}_6\text{H}_5^+$  ( $m/z=77$ )<sup>[15]</sup>; 元素-有机混合碳颗粒除含有明显的 C 簇离子峰外, 正谱图中混有有机碳碎片离子特征峰; 富钾颗

粒正谱图中含有较高强度的  $\text{K}^+$  离子峰, 负谱图中含有明显的硝酸盐 ( $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ ) 及硫酸盐 ( $\text{HSO}_4^-$ ) 离子峰, 在已有的研究中往往将  $\text{K}^+$  作为生物质燃烧的示踪离子<sup>[16-17]</sup>; 左旋葡聚糖颗粒正谱图含有明显的  $\text{K}^+$  离子峰, 负谱图中含有  $\text{CN}^-$  ( $-26$ )、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}^-$  ( $-45$ )、 $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$  ( $-59$ ) 及  $\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_2^-$  ( $-73$ ) 等左旋葡聚糖的碎片离子峰<sup>[18]</sup>, 这类颗粒与富钾颗粒相似, 可能同样来源于生物质燃烧<sup>[19-20]</sup>; 富钠颗粒正谱图中含有明显的  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  离子峰, 且  $\text{Na}^+$  的信号强度高于  $\text{K}^+$ , 此外, 此类颗粒中往往伴随  $\text{Na}_2\text{OH}^+$  ( $m/z=63$ ) 和  $\text{Na}_2\text{Cl}^+$  ( $m/z=81$ ) 离子峰, 负谱图中含有较高强度的硝酸盐 ( $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ ) 离子峰, 但硫酸盐 ( $\text{HSO}_4^-$ ) 离子峰强度很低, 这样的质谱特征表明该类颗粒是由海水溅沫蒸发而成的海盐颗粒; 重金属颗粒正谱图含有明显的金属 ( $\text{Fe}^+$  及  $\text{Pb}^+$ ) 离子峰, 负谱图中硝酸盐 ( $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ ) 及硫酸盐 ( $\text{HSO}_4^-$ ) 离子峰明显, 说明这类型颗粒很可能来自于工业源; 富硅颗粒正谱图中有明显的地壳元素 ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{Al}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^+$ ) 的离子峰, 负谱图中含有明显的硅酸盐 ( $\text{SiO}_2^-$ 、 $\text{SiO}_3^-$ ) 的离子峰, 说明它们主要来源于自然界的扬尘<sup>[21-24]</sup>.

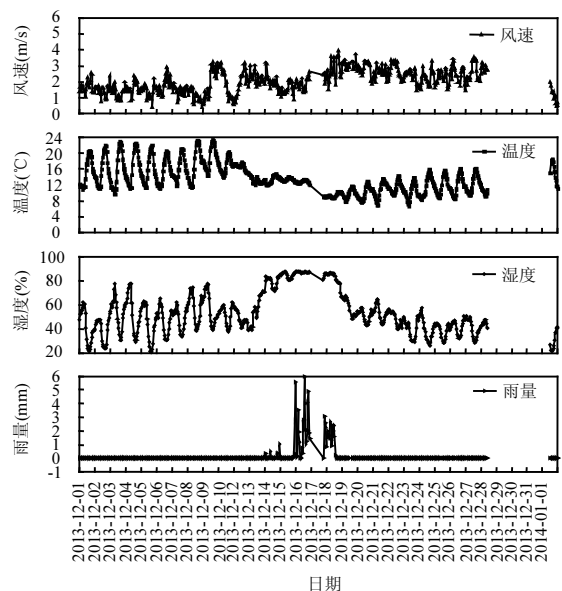


图 2 监测期间气象条件

Fig.2 Meteorological conditions during the sampling period

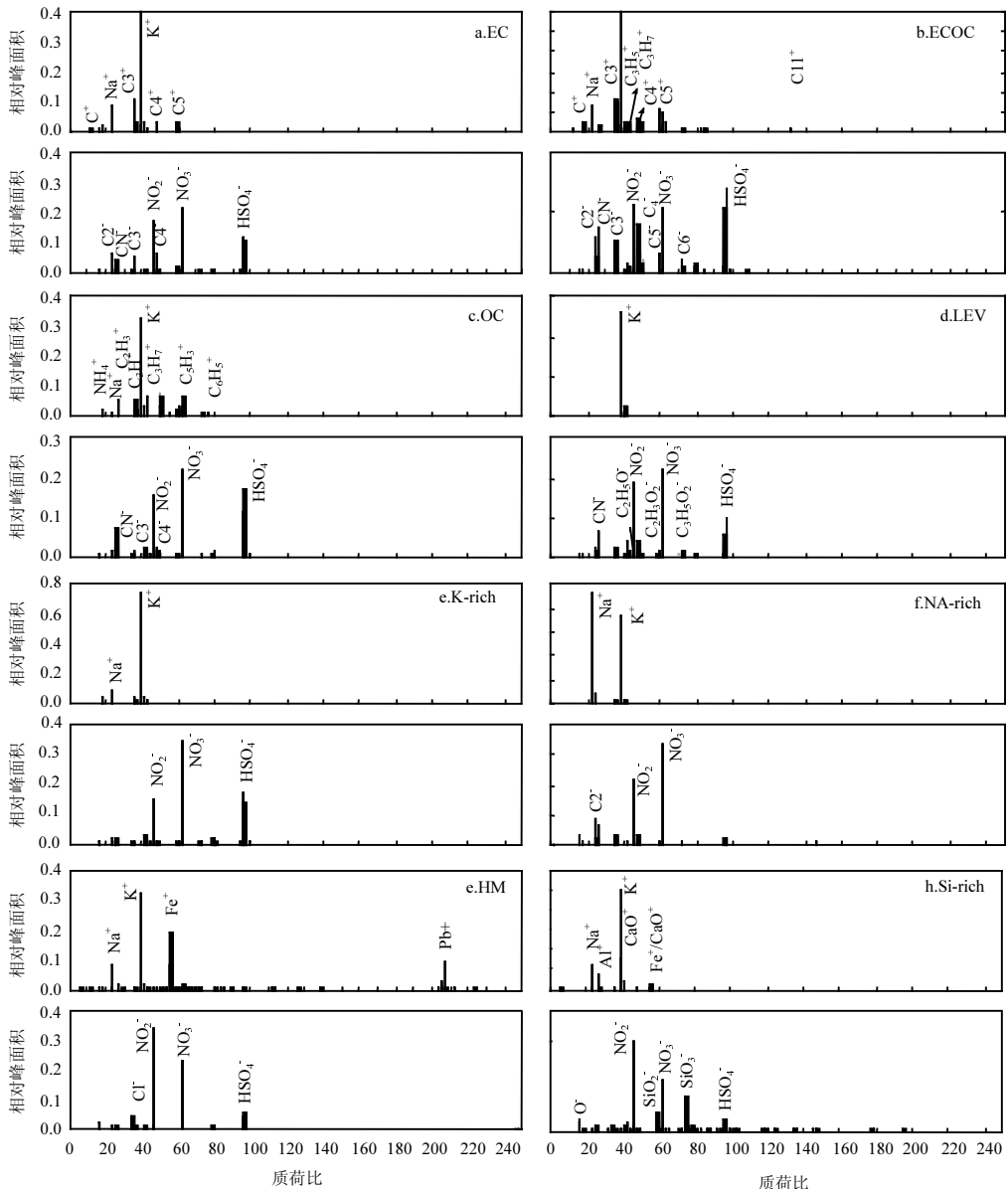


图3 监测期间各类颗粒物的平均质谱

Fig.3 Averaged mass spectra of each particle type during the sampling period

**2.3.2 监测期间颗粒物化学组成** 图4为监测期间细颗粒物的平均化学组成.整个监测过程中,主要的化学成分为元素碳(EC),占总颗粒数的56.8%,其次为有机碳(OC)和重金属(HM),分别占总颗粒数的12.7%和10.1%.

由各类别颗粒数量和百分比随时间的变化趋势图(图5~图6)可以看出,在整个监测过程中元素碳颗粒无论是在绝对颗粒数量还是在百分

比含量上都占据了绝对优势. EC颗粒数与 $PM_{2.5}$ 的变化趋势最为吻合,二者相关系数达到了0.816,而其他颗粒类型与 $PM_{2.5}$ 的相关性则相对较弱,说明EC颗粒在不利扩散天气条件下的累积是污染 $PM_{2.5}$ 浓度升高的主要原因之一.而由图中可以发现,除EC与颗粒物浓度变化较为一致外,其他颗粒类别在两次污染过程中表现出了不同的变化规律,说明这两次污染过程有所不同.

第一次污染过程,除 EC 和 ECOC 颗粒外,其余类别颗粒在污染初期随颗粒物浓度增长有明显增加,然而在污染发生过程中后期(12 月 5~9 日),绝对数浓度反而随颗粒物浓度增长而下降,表明该污染过程主要是由 EC 颗粒累积造成的。

第二次污染过程中,OC 颗粒数浓度明显低于第一次污染过程,并且随颗粒物浓度增加变化不大,而 HM 颗粒的数浓度则有明显增加,并出现多个峰值,说明该污染过程中有明显的重金属颗粒排放。

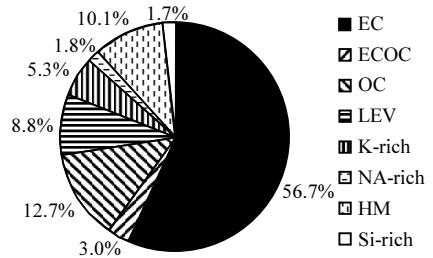


图 4 监测期间细颗粒物平均化学组成  
Fig.4 Chemical composition of detected ambient aerosols during the sampling period

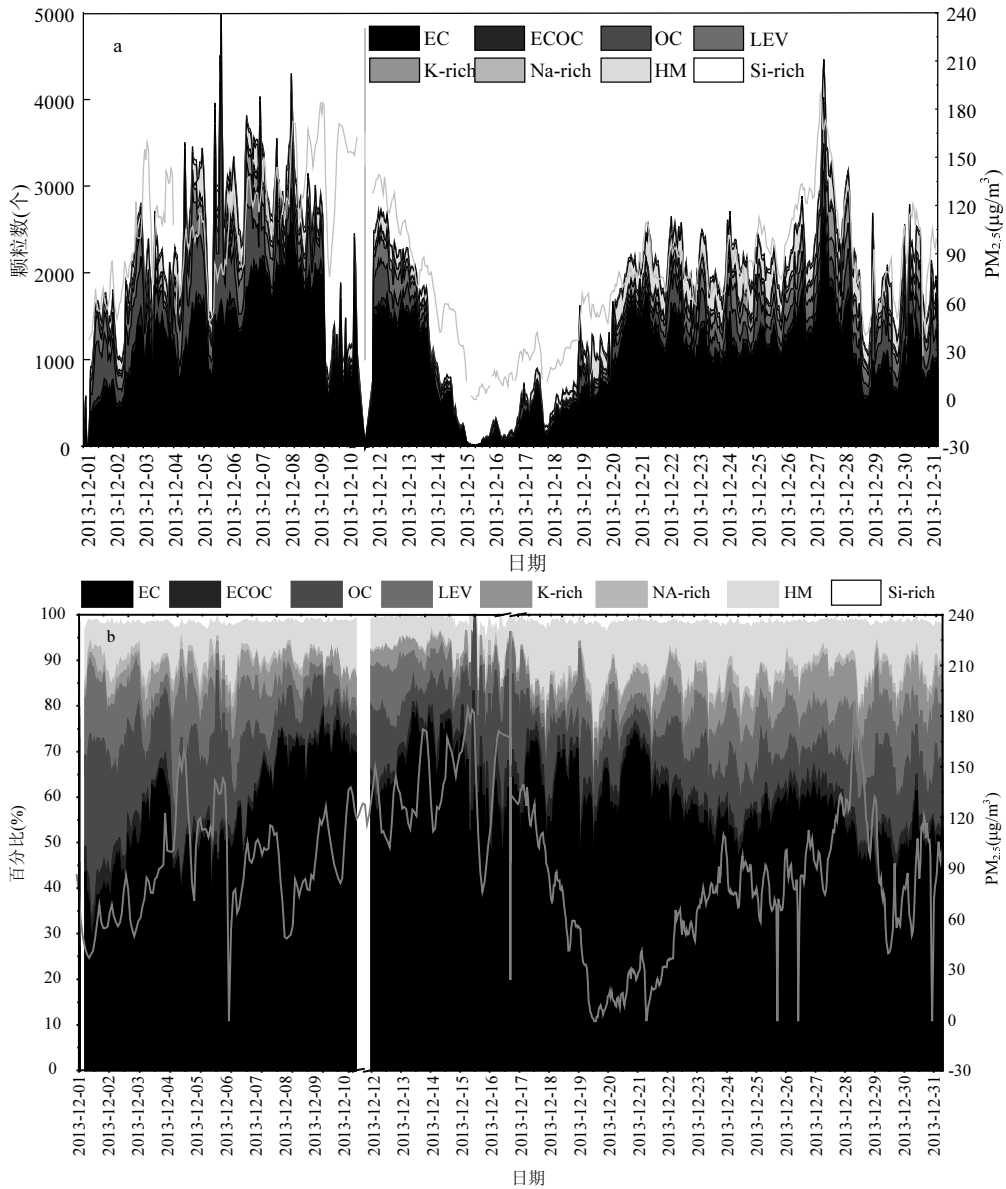


图 5 监测期间各颗粒类型数量和百分比随时间变化  
Fig.5 Temporal profiles of SPAMS number concentration and percentage for each particle type

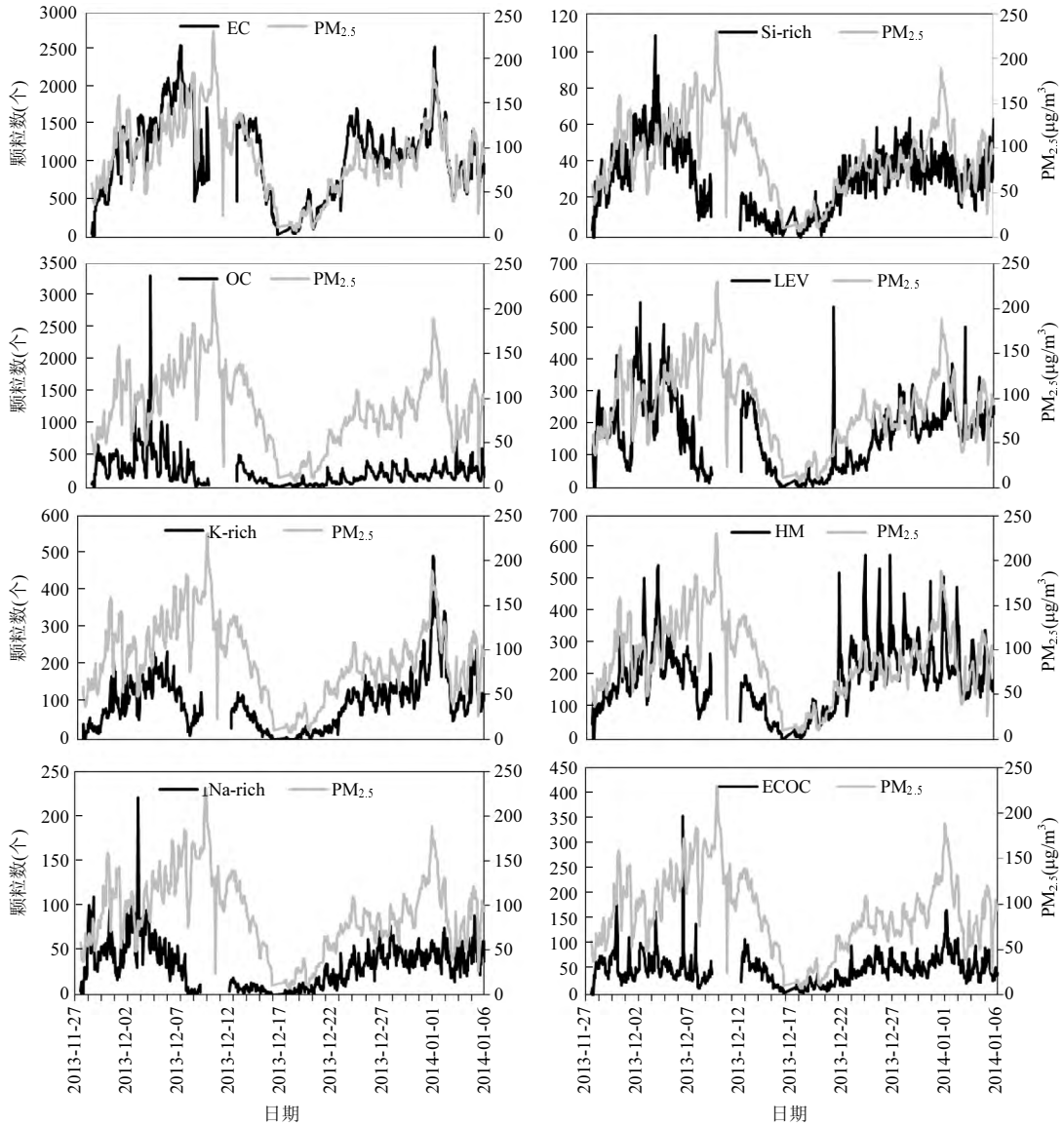


图6 各类别颗粒数随时间变化趋势

Fig.6 Temporal profiles of SPAMS number concentration for each particle type

### 2.4 PM<sub>2.5</sub> 来源解析探讨

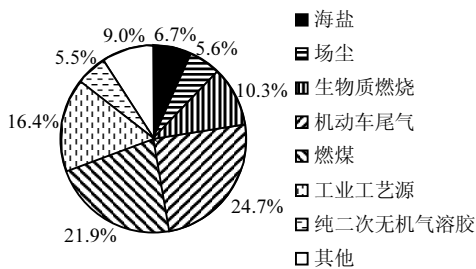


图7 区域PM<sub>2.5</sub>污染来源解析

Fig.7 Source apportionment results of regional PM<sub>2.5</sub>

2.4.1 主要来源分析 图7和图8为整个监测过程中的PM<sub>2.5</sub>源解析结果及随时间变化趋势。从图中可以看出,超级站在监测期间主要受到机动车尾气源和燃煤源的影响,二者分别占24.8%和22%,其次为工业工艺源和生物质燃烧,分别占16.4%和10.3%。

从图8可以看出,两次污染过程的颗粒物来源差别较大,第一次污染过程初期,工业工艺源是首要污染源,而随着颗粒物浓度的增高,二次无机气溶胶的比例明显增加,说明在此污染过程中,气象

条件利于二次离子的生成,使得  $PM_{2.5}$  浓度明显增加.而第二次污染过程中,机动车尾气变为首要污染源,其次是燃煤和工业工艺源,而整个过程中各源的比例较为稳定,说明该次污染过程主要由不

利气象条件导致的污染物累积造成.不同于第一个污染过程的是,生物质燃烧的贡献在第二个污染过程中与颗粒物浓度的变化趋势一致,这说明生物质燃烧对该次污染的形成也有一定贡献.

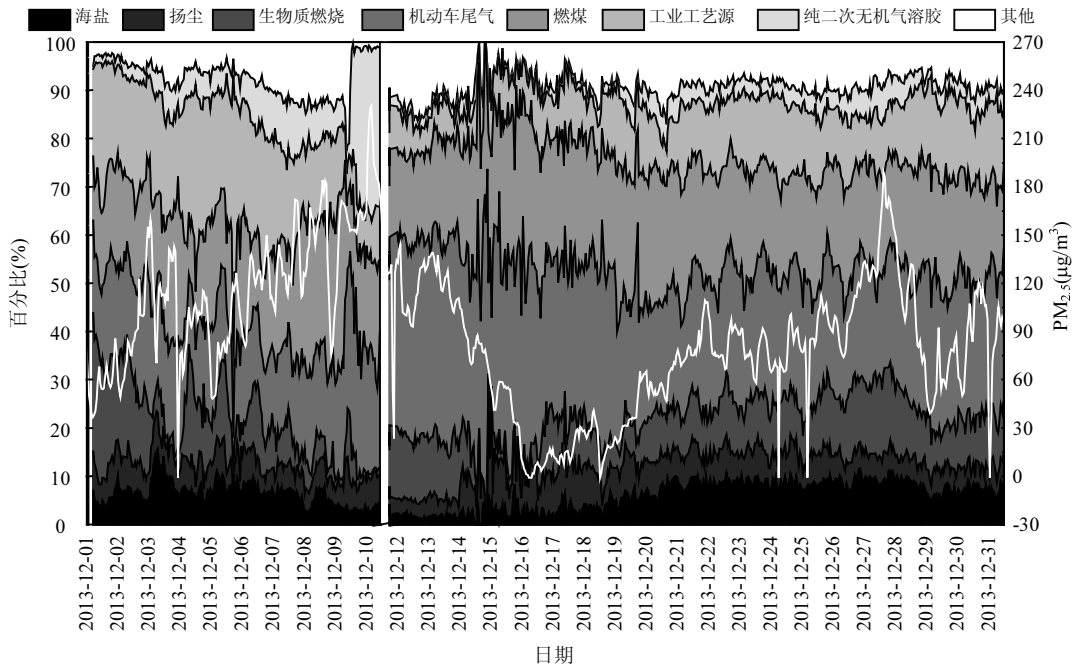


图 8 监测期间颗粒物来源随时间变化趋势

Fig.8 Temporal profiles of  $PM_{2.5}$

**2.4.2 典型污染过程分析** 单颗粒气溶胶质谱仪可实时在线快速获取污染源解析的结果(以小时计),可以捕捉每一个微小的污染过程,为颗粒物来源变化情况提供强有力的保证.由于第一次污染过程持续时间较长,污染较为严重,因此,选取其中的颗粒物浓度高峰值和低谷值时段其进行详细分析.

表 1 为具体时段信息,图 9 为各类污染源的变化趋势,从图中可以看出:

(1)随着  $PM_{2.5}$  质量浓度的增加,燃煤源的贡献逐渐增加;

(2)总体来看, $PM_{2.5}$  质量浓度高峰时段,燃煤源和工业源比例高于低谷时段;

(3)随着颗粒物浓度的增高,纯二次无机气溶胶(主要是以亚硝酸盐、硝酸盐及硫酸盐成分为主的颗粒)比例有所增加,但不是造成此次污染

的主要污染源.

综上所述,超级站在第一次污染过程中受到一次污染源(燃煤源和工业工艺源)和二次污染的共同影响.

表 1 污染过程中颗粒物高峰和低值时段

Table 1 Detailed information of  $PM_{2.5}$  peak hours and low hours during the pollution process

序号	时间段	序号	时间段
1	2013-12-05T16:00~18:00	8	2013-12-07T19:00~21:00
2	2013-12-06T7:00~10:00	9	2013-12-08T1:30~3:30
3	2013-12-06T15:00~18:00	10	2013-12-08T8:30~11:30
4	2013-12-06T20:00~23:00	11	2013-12-08T13:00~15:00
5	2013-12-07T5:00~7:00	12	2013-12-08T20:00~22:00
6	2013-12-07T9:00~11:00	13	2013-12-09T00:00~2:00
7	2013-12-07T15:00~18:00	14	2013-12-09T6:00~10:00

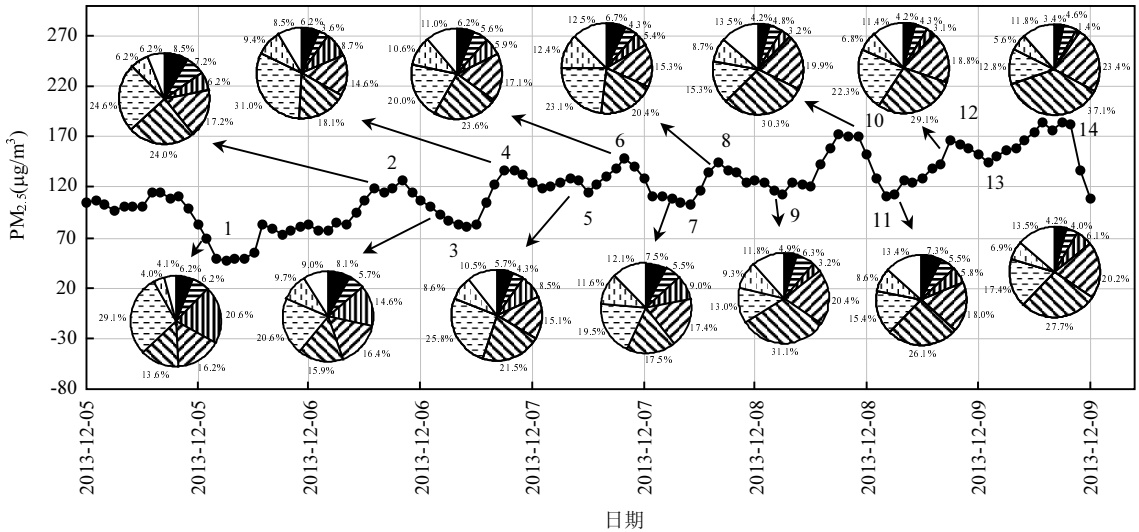


图9 第一次污染过程中不同时段颗粒物来源

Fig.9 PM<sub>2.5</sub> sources at different times during the first pollution process

■ 海盐 ■ 扬尘 ■ 生物质燃烧 ■ 机动车尾气 ■ 燃煤 ■ 工业工艺源 ■ 纯二次无机气溶胶 ■ 其他

### 3 结论

3.1 超级站大气颗粒物类型主要可分为8种:元素碳(EC)、有机碳(OC)、元素+有机碳混合(ECOC)、海盐(Na-K)、富钾颗粒(K-rich)、左旋葡聚糖颗粒(LEV)、重金属颗粒(HM)和富硅(Si-rich)。

3.2 观测期间共监测到两次污染过程,在整个持续污染过程中,颗粒物最主要的化学成分为EC.两个污染过程中,不同颗粒类别的变化趋势有所差异,说明两个污染过程有所不同。

3.3 污染来源分析发现,监测期间主要受到机动车尾气源和燃煤源的影响,二者分别占24.8%和22%,其次为工业工艺源和生物质燃烧,分别占16.4%和10.3%。

3.4 第一个污染过程中,工业工艺源是首要污染源,而随着颗粒物浓度的增高,燃煤和二次无机气溶胶的比例明显增加,说明此污染过程中,主要受到一次污染源(燃煤源和工业工艺源)和二次光化学反应加剧污染的复合影响.而第二个污染过程中,机动车尾气变为首要污染源,其次是燃煤和工业工艺源,而整个过程中各源的比例较为稳定,说明该次污染过程主要由不利气象条件导致

的污染物累积造成。

### 参考文献:

- [1] 唐孝炎,张远航,邵敏.大气环境化学 [M]. 北京:高等教育出版社,2006,274.
- [2] 孙兆彬,陶燕,崔蕊蕊,等.北京地区奥运会期间PM<sub>2.5</sub>对心脑血管疾病的影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(11):3481-3488.
- [3] 李友平,刘慧芳,周洪,等.成都市PM<sub>2.5</sub>中有毒重金属污染特征及健康风险评价 [J]. 中国环境科学, 2015,35(7):2225-2232.
- [4] Huang X F, Sun T L, Zeng L W, et al. Black carbon aerosol characterization in a coastal city in South China using a single particle soot photometer [J]. Atmospheric Environment, 2012,51: 21-28.
- [5] 陈仁杰,陈秉衡,阚海东.大气细颗粒物控制对我国城市居民期望寿命的影响 [J]. 中国环境科学, 2014,34(10):2701-2705.
- [6] 张衍燊,马国霞,於万,等.2013年1月灰霾污染事件期间京津冀地区PM<sub>2.5</sub>污染的人体健康损害评估 [J]. 中华医学杂志, 2013,93(34):2707-2710.
- [7] 王苏蓉,喻义勇,王勤耕,等.基于PMF模式的南京市大气细颗粒物源解析 [J]. 中国环境科学, 2015,35(12):3535-3542.
- [8] 牟莹莹,楼晟荣,陈长虹,等.利用SPAMS研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态 [J]. 环境科学, 2013,34(6): 2071-2080.
- [9] 李磊.单颗粒气溶胶质谱仪的性能表征及应用研究 [D]. 上海:上海大学, 2011.
- [10] 何俊杰,张国华,王伯光,等.鹤山灰霾期间大气单颗粒气溶胶特征的初步研究 [J]. 环境科学学报, 2013,33(8):2098-2104.



- [11] Li L, Huang Z, Dong J, et al. Real time bipolar time-of-flight mass spectrometer for analyzing single aerosol particles [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2011,303(2):118-124.
- [12] 李梅,李磊,黄正旭,等.运用单颗粒气溶胶质谱技术初步研究广州大气粉尘污染 [J]. *环境科学研究*, 2011,24(6):632-636.
- [13] Song X H, Hopke P K, Fergenson D P, et al. Classification of single particles analyzed by ATOFMS using an artificial neural network, ART-2a [J]. *Analytical Chemistry*, 1999,71:860-865.
- [14] 陈多宏,何俊杰,张国华,等.不同天气类型广东大气超级站细粒子污染特征初步研究 [J]. *地球化学*, 2014,43(3):217-223.
- [15] Spencer M T, Prather K A. Using ATOFMS to determine OC/EC mass fractions in particles [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2006,40(8):585-594.
- [16] Hudson P K, Murphy D M, Cziczko D J, et al. Biomass-burning particle measurements: Characteristic composition and chemical processing [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2004,109(D23):2890-2898.
- [17] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C1-C29organic compounds from fireplace combustion of wood [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001,35(9):1716-1728.
- [18] Bi X H, Zhang G H, Li L, et al. 2011. Mixing state of biomass burning particles by single particle aerosol mass spectrometer in the urban area of PRD, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011,45(20):3447-3453.
- [19] Bein K J, Zhao Y, Johnston M V, et al. Interactions between boreal wildfire and urban emissions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2008,113(D7):1829-1836.
- [20] Silva P J, Prather K A. Interpretation of mass spectra from organic compounds in aerosol time-of-flight mass spectrometry [J]. *Analytical Chemistry*, 2000,72(15):3553-3562.
- [21] Dall'Osto M, Beddows D, Kinnersley R P, et al. Characterization of individual airborne particles by using aerosol time-of-flight mass spectrometry at Mace Head, Ireland [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2004, 109(D21).
- [22] Dall'Osto M, Harrison R M. Chemical characterization of single airborne particles in Athens (Greece) by ATOFMS [J]. *Atmospheric Environment*, 2006,40(39):7614-7631.
- [23] Moffet R C, de Foy B, Molina L T, et al. Measurement of ambient aerosols in northern Mexico City by single particle mass spectrometry [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008,8(16): 4499-4516.
- [24] Zhang X Y, Gong S L, Arimoto R, et al. Characterization and temporal variation of Asian dust aerosol from a site in the northern Chinese deserts [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2003,44(3):241-257.

**作者简介:** 陈多宏(1979-),男,教授级高工,博士,主要从事区域空气质量观测与预报预警等工作。

## 《中国环境科学》影响因子学科排名再获第一

根据中国科学技术信息研究所 2015 年 10 月份发布的《2014 年版科技期刊引证报告(核心版)》,《中国环境科学》核心影响因子 1.595,学科排名继续位居第一。

《中国环境科学》编辑部