

## 太原市城区大气 PM<sub>2.5</sub> 中元素污染特征及其来源解析

刘喆<sup>1</sup>, 刘柳<sup>2</sup>, 杨一兵<sup>3</sup>, 李欣<sup>4</sup>, 史建平<sup>5</sup>, 王秦<sup>1\*</sup>, 徐东群<sup>1\*</sup>

1. 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所, 北京 100021
2. 北京市朝阳区疾病预防控制中心, 北京 100021
3. 中国疾病预防控制中心慢性病防治与社区卫生处, 北京 102206
4. 山西省人民医院, 山西 太原 030012
5. 太原市疾病预防控制中心, 山西 太原 030012

**摘要** 为了解 2017 年—2018 年非采暖季、采暖季 PM<sub>2.5</sub> 污染较轻时期和采暖季 PM<sub>2.5</sub> 污染较重时期太原市城区大气 PM<sub>2.5</sub> 及其附着的 15 种金属及类金属元素(铝、砷、钙、镉、铬、铜、铁、钾、镁、锰、钠、镍、铅、钒和锌)的分布特征及主要来源, 在太原市城区的尖草坪区解放北路、迎泽区新建南路和双塔寺街三个监测点使用中流量颗粒物采样器连续采集 6 d 且每天不少于 20 h 的大气 PM<sub>2.5</sub> 滤膜样品。PM<sub>2.5</sub> 滤膜样品用微波消解法进行前处理后, 使用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)检测其中 15 种金属及类金属元素的含量。通过描述性统计方法分析和比较三个监测点大气 PM<sub>2.5</sub> 及其附着的 15 种金属及类金属元素日均浓度在时间和空间上分布的差异, 进一步采用富集因子法和主成分分析法分析其聚集特征和主要来源。结果发现各采样点大气 PM<sub>2.5</sub> 及其附着的 15 种金属及类金属元素的日均浓度在整体上呈现的趋势为: 采暖季污染较重时期 > 采暖季污染较轻时期 > 非采暖季; 各监测期大气中 PM<sub>2.5</sub> 及其附着的大多数金属及类金属元素的日均浓度在 3 个监测点间无显著性差异( $p < 0.01$ ); PM<sub>2.5</sub> 上附着的 15 种金属及类金属元素的主要来源在非采暖季是土壤扬尘、建筑扬尘和冶金工业, 其贡献率分别为 32.03%, 30.52% 和 18.26%, 在采暖季污染较轻时, 主要来源是建筑、土壤和冶金工业的混合源、建筑和生物质燃烧混合源以及土壤, 其贡献率分别为 37.98%, 37.05% 和 16.55%, 在采暖季污染较重时, 主要来源是建筑和生物质燃烧混合源, 建筑、土壤和冶金工业的混合源以及土壤, 其贡献率分别为 40.62%, 35.52% 和 13.96%。与往年的相关研究结果相比, 虽然近年来太原市对 PM<sub>2.5</sub> 的污染源如冶金工业、机动车和燃煤等的污染物排放控制有所成效, 但还应进一步加强对生物质燃烧、土壤扬尘、建筑扬尘和冶金工业污染源的管控措施。

**关键词** ICP-MS; PM<sub>2.5</sub>; 元素; 主成分分析

**中图分类号**: O657.6 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)05-1593-06

### 引言

近年来, 大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)已成为我国许多城市的首要空气污染物, 大量流行病学和毒理学研究<sup>[1-2]</sup>已证实, PM<sub>2.5</sub>中的金属及类金属成分的暴露与心脑血管疾病的发生发展相关。因此, 了解 PM<sub>2.5</sub>中金属和类金属元素成分浓度水平及其来源, 对于控制 PM<sub>2.5</sub>污染, 减少健康危害具有重要的意义<sup>[3-4]</sup>。

太原是我国北方的重要工业城市, 已有多项研究<sup>[5-7]</sup>用富集因子法和主成分分析法分析了太原市大气中 PM<sub>2.5</sub>及其附着金属及类金属元素的来源。在 2017 年 11 月开始, 太原市政府加强了对采暖、工业排放、建筑施工等 PM<sub>2.5</sub>污染源的控制和监管<sup>[8]</sup>, 这些措施是否会对采暖季大气 PM<sub>2.5</sub>中的金属及类金属元素特征和来源造成影响, 这方面的研究还较少。本研究于 2017 年 6 月非采暖季和 12 月采暖季污染较轻时期, 以及 2018 年 1 月采暖季污染较重时期, 以太原市城区 3 个采样点为研究现场, 连续采集大气 PM<sub>2.5</sub>滤膜样品, 并对

**收稿日期**: 2018-11-26, **修订日期**: 2019-02-25

**基金项目**: 2014 卫生公益性行业科研专项(201402022), 2015 卫生公益性行业科研专项(201502003), 国家自然科学基金面上项目(20677136)资助

**作者简介**: 刘喆, 1985 年生, 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所助理研究员 e-mail: liuzhe@nieh.chinacdc.cn

\* 通讯联系人 e-mail: wangqin@nieh.chinacdc.cn; xudq@chinacdc.cn

其中 15 种元素含量进行了检测,通过分析其分布特征和聚集特性来推测其主要来源,为太原市现有大气污染治理措施的效果评价以及环保政策进一步的完善提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

主要仪器:电感耦合等离子体质谱(美国 PE, Nexion300D);XS105DU 型天平(瑞士 Mettler);微波消解仪(美国 CEM, Mars5);赶酸仪(上海博通化学科技, BHW-09C);中流量 PM<sub>2.5</sub> 采样器(武汉天虹仪器仪表)。

主要耗材和试剂:90 mm 石英滤膜(美国 PALL);大气颗粒物标准滤膜(STANDARD REFERENCE MATERIAL 2783, 美国国家标准与技术研究院);铝、砷、钙、镉、铬、铜、铁、钾、镁、锰、钠、镍、铅、钒和锌的标准储备液,  $\rho = 10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (美国安捷伦);硝酸(GR);盐酸(GR);氢氟酸(GR)。

### 1.2 PM<sub>2.5</sub> 样品采集和保存

在太原市城区三个采样点用 PM<sub>2.5</sub> 中流量采样器采集大气 PM<sub>2.5</sub>, 采样流量为  $100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 采样切割头距离楼顶地面距离为 1.5 m。三个采样点呈三角分布, 周围均以居民区为主, 其中 A 点尖草坪区解放北路, 位于市区偏北部, 临近太钢工业区和太原火车北站, B 点在迎泽区新建南路, 位于市中心西部, C 点在迎泽区双塔寺街, 位于市中心东部。采样共三期: 非采暖季在 2017 年 6 月 19 日—24 日(P1, 平均气温  $23.22 \text{ }^\circ\text{C}$ , 平均湿度  $56.22\%$ , 平均风速  $7.33 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 采暖季在 PM<sub>2.5</sub> 污染较轻的 2017 年 12 月 4 日—9 日(P2, 平均气温  $-2.09 \text{ }^\circ\text{C}$ , 平均湿度  $40.82\%$ , 平均风速  $7.64 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 和 PM<sub>2.5</sub> 污染较重的 2018 年 1 月 14 日—19 日(P3, 平均气温  $-2.45 \text{ }^\circ\text{C}$ , 平均湿度  $42.82\%$ , 平均风速  $6.55 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 每期连续采 6 d, 每天采样时长  $\geq 20 \text{ h}$ 。

### 1.3 PM<sub>2.5</sub> 样品中金属及类金属元素成分分析

参照 HJ 657—2013《空气和废气颗粒物中铅等金属元素的测定电感耦合等离子体质谱法》, 采用微波消解法对滤膜样品进行前处理, 使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定样品中 15 种金属及类金属元素含量。

样品前处理: 将滤膜均切成 8 份, 取其中 1 份置于聚四氟乙烯消解罐内底部, 依次加入硝酸 6.0 mL、盐酸 0.5 mL 和氢氟酸 0.5 mL, 将消解罐置于赶酸器进行预消解( $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 h), 再用微波消解( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , 20 min), 再赶酸( $160 \text{ }^\circ\text{C}$ )至 1.0 mL 左右, 最后用超纯水定容至 50.0 mL, 留待 ICP-MS 分析。

标准曲线的绘制: 用 5% 硝酸溶液将标准储备溶液逐级稀释至 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0, 50.0, 100.0 和  $200.0 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 用 ICP-MS 进行测定。

ICP-MS 工作条件: 射频(RF)功率 1 400 W; 载气流速  $0.92 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 采样深度 2 mm; 采样锥、截取锥为镍锥; 蠕动泵转速  $20.0 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 扫描次数 20; 积分时间 100 ms; 扫描方式为跳峰; 每个样品重复测量 3 次; 工作模式为标准(STD)模式。参照标准曲线, 采用在线内标法测定经前处理

后的样品溶液中各金属及类金属元素的浓度。

### 1.4 统计学方法

采用统计分析软件 SPSS 20 进行描述性统计, 比较大气 PM<sub>2.5</sub> 时间和空间分布的差异; 通过主成分分析法对 PM<sub>2.5</sub> 上金属和类金属元素的来源进行判别<sup>[3]</sup>; 采用富集因子(enrichment factor, EF)法辅助判断其主要来源<sup>[5-7]</sup>。

### 1.5 质量控制

采样过程中采用现场空白滤膜进行质控, 检测过程中使用空白试剂和空白滤膜进行质控。ICP-MS 检测方法使用大气颗粒物标准滤膜和实际样品加标回收试验(15 种元素的加标回收率范围为  $83.0\% \sim 114.4\%$ )进行准确度验证。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PM<sub>2.5</sub> 及其附着金属和类金属元素污染特征

太原市城区 3 个采样点在各监测期间的 PM<sub>2.5</sub> 及其附着元素浓度水平见表 1。

#### 2.1.1 各期 PM<sub>2.5</sub> 浓度的分布情况

在三个监测期, 太原市城区 3 个采样点 PM<sub>2.5</sub> 日均浓度值分别为  $57.5 \sim 61.2$ ,  $68.1 \sim 96.9$  和  $125.3 \sim 140.0 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。各采样点 PM<sub>2.5</sub> 及其附着元素的日均浓度在各监测期整体上呈现的趋势为: 采暖季污染较重时期  $>$  采暖季污染较轻时期  $>$  非采暖季。

与以往在太原市开展的监测相比, 2017 年在采暖季 PM<sub>2.5</sub> 的日均浓度有明显的降低趋势; 张桂香等<sup>[9]</sup>于 2009 年在太原全市范围内开展的监测发现冬季 PM<sub>2.5</sub> 浓度为  $(289.2 \pm 104.8) \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 贾小花等<sup>[10]</sup>在 2011 年—2012 年冬季的监测显示 PM<sub>2.5</sub> 浓度高达  $(334.5 \pm 97.9) \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 崔井龙等<sup>[11]</sup>于 2012 年—2013 年对太原市迎泽区的监测也显示冬季 PM<sub>2.5</sub> 浓度为  $(212.8 \pm 78.7) \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 采暖季 PM<sub>2.5</sub> 浓度高于非采暖季。

#### 3.1.2 PM<sub>2.5</sub> 及其金属和类金属元素的浓度在不同采样点的差异

本研究对三个采样点的 PM<sub>2.5</sub> 及其附着 15 种元素的浓度进行方差分析, 发现三个时期的 PM<sub>2.5</sub> 浓度在各采样点间均无显著性的差异( $p > 0.05$ )。PM<sub>2.5</sub> 上附着的大多数元素的日均浓度在各采样点间无显著差异; 在非采暖季, Cu 元素的日均浓度在 A 点和 B 点要显著高于 C 点( $p < 0.01$ ); 在采暖季污染较轻时, Mg, Ca, Cr, Fe, Ni 和 Cu 元素的日均浓度在 A 点要显著高于 B 点和 C 点( $p < 0.01$ ); 在采暖季污染较重时, Ca 和 Fe 元素的日均浓度在 A 点要显著高于 B 点和 C 点( $p < 0.01$ )。

### 2.2 来源解析

#### 2.2.1 PM<sub>2.5</sub> 附着的金属及类金属元素的富集程度

采用富集因子法分析太原市大气 PM<sub>2.5</sub> 附着元素的来源, 选用地壳中普遍存在的元素 Al 为参考元素, 其他元素取中国 A 层土壤背景平均值<sup>[12]</sup>, 计算富集因子见表 2。结果表明, 太原市在三个采样期大气 PM<sub>2.5</sub> 附着的 14 种元素的 EF 值均  $< 10$ , 没有明显的人类活动造成其富集; Na, Mg, K, Ca 和 Fe 的 EF 值  $> 1$ , 该 5 种元素相对地壳中的组分而

表 1 各期 PM<sub>2.5</sub> 及其附着的金属及类金属元素成分在 3 个采样点的日均浓度 (ng · m<sup>-3</sup>)

Table 1 Daily mean concentrations of PM<sub>2.5</sub> and its metal and metalloid elements at 3 sampling points in three periods (ng · m<sup>-3</sup>)

	A 点 (Mean±SD)			B 点 (Mean±SD)			C 点 (Mean±SD)		
	P1 n=6	P2 n=5	P3 n=6	P1 n=6	P2 n=5	P3 n=6	P1 n=6	P2 n=5	P3 n=6
PM <sub>2.5</sub> *	59.7±10.6	96.9±41.8	140.0±34.3	57.5±11.1	71.1±33.3	137.3±47.4	61.2±13.0	68.1±26.0	125.3±44.4
Na	306.4±175.6	707.0±289.2	1 171.1±313.8	279.9±95.9	627.0±248.1	1 211.5±531.6	337.3±86.2	569.6±199.6	1 043.4±493.3
Mg	142.5±108.8	607.1±197.8	794.6±217.9	132.9±31.9	345.4±77.5	597.9±221.7	148.3±66.9	337.9±89.5	497.2±195.5
Al	522.8±154.8	1934.5±591.8	2 678.9±878.4	442.1±106.8	1 316.8±389.1	2 143.9±815.5	754.0±554.8	1 287.6±420.3	1 728.2±739.2
K	294.4±199.6	1 309.7±586.5	1 574.6±446.1	321.4±150.9	968.2±453.3	1 461.7±648.8	357.6±150.9	948.4±400.1	1 345.4±666.8
Ca	664.8±386.8	2 365.5±929.3	2 781.1±1 072.6	494.3±206.7	1 081.5±337.4	1 703.0±416.7	534.4±280.8	1 209.1±424.5	1 355.5±351.3
V	0.3±0.3	1.9±1.2	3.7±1.6	0.1±0.1	0.7±0.7	2.7±1.4	0.1±0.1	0.8±0.7	2.3±1.4
Cr	18.2±12.3	36.4±12.6	47.8±11.6	25.3±12.1	11.3±5.3	41.1±19.0	17.1±10.0	16.4±7.1	42.4±25.6
Mn	39.2±13.5	83.6±21.0	108.8±26.4	36.2±12.5	64.2±27.1	110.6±45.1	29.8±9.1	58.6±21.2	102.6±43.1
Fe	760.7±327.6	2 040.9±400.5	2 774.0±410.2	716.4±174.6	965.5±301.2	1 911.7±480.0	594.5±161.3	961.8±333.9	1 667.2±483.5
Ni	1.8±1.9	16.0±7.2	19.7±12.0	3.3±3.1	4.9±0.6	18.1±10.7	5.3±10.3	6.7±2.4	19.5±18.1
Cu	80.8±34.4	81.9±29.1	107.1±9.9	67.4±22.3	34.9±18.0	93.6±37.7	16.6±13.0	15.7±8.9	43.6±28.1
Zn	53.8±27.0	243.5±150.8	326.6±189.9	53.5±30.3	239.7±131.2	398.6±243.3	61.8±23.3	245±113.8	370.2±268.8
As	3.2±3.2	9.6±6.6	13.6±7.0	3.4±2.9	10.2±2.9	18.2±13.4	5.8±5.4	9.9±3.7	15.3±9.2
Cd	0.8±0.2	1.7±0.9	2.5±1.2	0.9±0.7	1.4±0.8	3.4±2.8	1.1±0.4	1.4±0.7	3.5±3.2
Pb	58.0±31.5	160.6±72.0	229.8±130.8	65.9±72.5	110.6±46.6	295.6±253.4	93.1±61.2	113.5±38.1	306.7±287.2

\* The unit of PM<sub>2.5</sub> is μg · m<sup>-3</sup>

言, 已在大气中被富集, 既有自然来源也有人来源。吕佳莉等<sup>[13]</sup>曾对 2012 年太原市 PM<sub>2.5</sub> 附着的 Cd 等元素的 EF 值进行计算, 发现 Cd 和 Pb 的 EF 值均大于 10, Cu 和 Zn 的 EF 值大于 1 且小于 10, 说明当年燃煤、工业和汽车尾气排放对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献较大。而本研究中这 4 种元素的 EF 值均小于 1, 可能与近年来太原市在这三种来源实施了严格的控制措施有关。

表 2 采样期间 PM<sub>2.5</sub> 中金属及类金属元素成分的 EF 值  
Table 2 EF values of metal and metalloid elements in PM<sub>2.5</sub> during sampling

	EF		
	P1	P2	P3
Na	3.19	3.81	2.92
Mg	1.38	1.82	1.48
K	2.16	2.87	2.45
Ca	1.70	2.10	1.38
Fe	3.10	2.84	2.19
Cu	0.03	0.02	0.01
Zn	0.01	0.02	0.02
As	0.01	0.01	<0.01
Cd	0.10	0.12	0.08
Pb	0.07	0.07	0.06
V, Cr, Mn, Ni	<0.01	<0.01	<0.01

另外, 如前所述 PM<sub>2.5</sub> 的日均浓度呈现采暖季污染较重时期 > 采暖季污染较轻时期 > 非采暖季的趋势。但其附着的主要元素如 Na, Mg, K, Ca 和 Fe 元素的 EF 值在采暖季污染较重时期低于较轻时期, 是因为在采暖季污染较重时

PM<sub>2.5</sub> 中作为参考元素 Al 的日均浓度是采暖季污染较轻时期的 1.46 倍。Al 主要来自土壤尘, 表明土壤扬尘可能是造成采暖季污染较重时期 PM<sub>2.5</sub> 浓度高于采暖季污染较轻时期的主要原因。另一方面, 在采暖季污染较轻时期 Al 的日均浓度是非采暖季的 2.67 倍, 但 Na, Mg, K, Ca 和 Fe 元素的 EF 值在采暖季污染较轻时期仍高于非采暖季, 说明造成采暖季污染较轻时期 PM<sub>2.5</sub> 浓度高于非采暖季的主要原因除了土壤扬尘, 还可能与建筑扬尘、生物质燃烧和冶金工业等来源有关。

2.2.2 PM<sub>2.5</sub> 附着的金属及类金属元素主成分分析

分别将三个时段 PM<sub>2.5</sub> 附着的 15 种元素采用主成分分析法进行来源解析, 结合元素组成与各类污染源排放特征元素表<sup>[14]</sup>, 从结果(表 3)可以看出: 在非采暖期 PM<sub>2.5</sub> 附着的 15 种元素的主要来源是土壤扬尘(贡献率为 32.03%)、建筑施工(30.52%)以及冶金工业排放(18.26%); 在采暖期污染较轻时, 主要来源是建筑施工、土壤扬尘和冶金工业排放的混合源(37.98%), 建筑施工和生物质燃烧混合源(37.05%)和土壤扬尘(16.55%); 在采暖期污染较重时主要来自建筑施工和生物质燃烧混合源(40.62%), 建筑施工、土壤扬尘和冶金工业排放的混合源(35.52%)和土壤扬尘(13.96%)。各期的主成分累积贡献率达 80.81%~91.58%, 均可代表各时段 PM<sub>2.5</sub> 附着的 15 种元素成分的主要来源。

本研究中, 在采暖期生物质燃烧源对 PM<sub>2.5</sub> 附着的金属与类金属元素的贡献高于非采暖期, 这与采暖期在城市周边地区可能存在燃烧农林废弃物的情况有关; 采暖期冶金工业的贡献低于非采暖期, 可能与太原市“秋冬季攻坚措施”中采取的错峰生产有关; 采暖期污染较重和污染较轻时期的主要来源较为一致, 均为建筑施工、土壤扬尘、冶金工业排放

表 3 PM<sub>2.5</sub> 中金属与类金属元素的旋转成分矩阵和因子分析结果Table 3 Rotation composition matrix and factor analysis results of metal and metalloid elements in PM<sub>2.5</sub>

	P1				P2			P3		
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3
Na	0.90	0.15	0.17	-0.02	0.45	0.88	0.03	0.93	0.33	0.02
Mg	0.93	0.21	0.08	0.12	0.95	0.18	0.23	0.15	0.97	0.01
Al	0.57	-0.06	0.61	0.05	0.90	0.31	0.15	0.16	0.96	-0.10
K	0.78	0.20	0.25	-0.20	0.53	0.83	0.13	0.85	0.50	-0.02
Ca	0.83	0.25	-0.18	0.26	0.91	0.26	0.22	-0.04	0.93	-0.06
V	0.89	0.04	-0.01	-0.14	0.86	0.42	0.16	0.35	0.90	-0.11
Cr	-0.08	0.84	0.31	0.03	0.30	0.03	0.94	-0.19	0.04	0.95
Mn	0.28	0.87	0.21	-0.02	0.57	0.70	0.25	0.87	0.40	0.19
Fe	0.55	0.77	0.02	-0.02	0.78	0.24	0.57	0.21	0.89	0.21
Ni	0.06	0.17	0.78	0.12	0.23	-0.06	0.95	-0.16	-0.25	0.89
Cu	0.27	0.63	-0.36	-0.27	0.67	0.26	0.31	-0.08	0.62	-0.15
Zn	0.10	0.25	0.71	-0.07	0.21	0.95	0.00	0.96	0.01	-0.17
As	-0.01	-0.07	0.91	0.02	-0.08	0.86	-0.10	0.96	0.05	-0.09
Cd	0.09	-0.07	0.08	0.94	0.38	0.91	0.03	0.90	-0.10	-0.34
Pb	-0.08	-0.03	0.01	0.98	0.48	0.81	0.14	0.89	-0.09	-0.35
贡献率%	30.52	18.26	18.11	13.92	37.98	37.05	16.55	40.62	35.52	13.96

和生物质燃烧。

本研究的来源解析结果,与历年来的相关研究基本一致<sup>[6-8]</sup>。刘旭辉等<sup>[6]</sup>对 2016 年太原市中心 PM<sub>2.5</sub> 的来源解析结果为燃煤、钢铁冶金和机械工业(非采暖季贡献率 42.96%,采暖季 44.61%),机动车排放(非采暖季 16.57%,采暖季 30.83%),以及沙尘、地面扬尘和水泥尘(非采暖季 22.09%,采暖季 11.29%)等;杨弘等<sup>[7]</sup>对 2012 年—2013 年太原市采暖季的来源解析结果为冶金工业(41.32%)、燃煤(34.49%)、机动车排放(16.75%)等;李丽娟等<sup>[8]</sup>对 2012 年初太原市采暖季的来源解析为土壤风沙尘(43.46%)、煤烟尘(15.69%)、机动车尾气(13.41%)、工业粉尘(9.89%)和建筑尘(9.03%)。在前两项研究中冶金工业是最主要的来源,高于本研究在非采暖期的贡献率 18.26%,和污染较重时期的建筑、土壤以及冶金工业的混合源的贡献率 35.52%;与此三项研究结果相比较,机动车排放和燃煤在本研究中已不是主要来源。另外可看出虽然近年来的环境管理措施对于太原市城区的冶金工业、机动车和燃煤污染有一定成效,但是冶金工业、土壤扬尘和建筑扬尘一直以来都是太原市的主要来源,而且在本研究的监测期间生物质燃烧源的贡献在采暖季凸显。

### 3 结 论

以上结果表明,太原市城区三个采样点的 PM<sub>2.5</sub> 日均浓

度,以及 PM<sub>2.5</sub> 附着的除了 Cu 和 Cr 元素之外的其他 13 种金属及类金属元素成分的日均浓度,均是在采暖季显著高于非采暖季。在采暖季 PM<sub>2.5</sub> 超标的天数明显高于非采暖季。与以往在太原市开展的监测研究相比,采暖季 PM<sub>2.5</sub> 的日均浓度有明显的降低趋势,可能与太原市 9 月发布的“秋冬季攻坚措施”在采暖季对各类工程作业实施错峰停工,对工业企业实施错峰生产和运输等措施有关。

根据 PM<sub>2.5</sub> 及其附着元素浓度分布特征,结合富集因子和主成分分析的结果可以看出,在非采暖季,大气中 PM<sub>2.5</sub> 及其附着金属和类金属元素的主要来源是土壤扬尘、建筑扬尘和冶金工业;在采暖季污染较轻和污染较重期间的主要来源均是建筑扬尘、生物质燃烧、土壤扬尘和冶金工业。与以往针对太原市的相关研究结果相比,太原市大气 PM<sub>2.5</sub> 及其附着的金属及类金属元素的主要来源中,冶金工业、机动车和燃煤带来的污染得到了一定程度的控制,土壤扬尘、建筑扬尘和冶金工业的污染一直存在,在采暖季生物质燃烧带来的污染也需要被关注。要进一步减少 PM<sub>2.5</sub> 污染,改善太原市大气环境质量,还应继续加强对冶金工业、土壤尘、建筑扬尘和采暖期生物质燃烧的控制。

## References

- [ 1 ] Smith A H, Marshall G, Yuan Y, et al. *Environmental Health Perspectives*, 2006, 114(8): 1293.
- [ 2 ] Lanphear B P, Hornung R, Khoury J, et al. *Environmental Health Perspectives*, 2005, 113(7): 894.
- [ 3 ] CHEN Xi, DU Peng, GUAN Qing, et al(陈曦, 杜鹏, 关清, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2015, 35(6): 1724.
- [ 4 ] ZHAO Yan, FENG Li-hong, LIU Hong-liang, et al(赵岩, 冯利红, 刘洪亮, 等). *Journal of Environment and Health(环境与健康杂志)*, 2016, 33(4): 320.
- [ 5 ] LIU Xu-hui, GUO Jian-e, MA Li-gang, et al(刘旭辉, 郭建娥, 马利刚, 等). *Preventive Medicine Tribune(预防医学论坛)*, 2017, (8): 564.
- [ 6 ] YANG Hong, ZHANG Jun-qiu, WANG Wei, et al(杨弘, 张君秋, 王维, 等). *Environmental Monitoring in China(中国环境监测)*, 2015, (2): 24.
- [ 7 ] LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, et al(李丽娟, 温彦平, 彭林, 等). *Environmental Science(环境科学)*, 2014, (12): 4431.
- [ 8 ] General Office, the People's Government of Taiyuan(太原市人民政府办公厅). <http://www.taiyuan.gov.cn/doc/2017/09/30/175939.shtml>, 2017-9-5.
- [ 9 ] ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, et al(张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 等). *Environmental Science(环境科学)*, 2015, (3): 780.
- [ 10 ] JIA Xiao-hua, XIE Jing-fang, MA Xiang, et al(贾小花, 解静芳, 马翔, 等). *China Environmental Science(中国环境科学)*, 2013, 33(4): 599.
- [ 11 ] CUI Jing-long, ZHANG Zhi-hong, XIA Na, et al(崔井龙, 张志红, 夏娜, 等). *Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报)*, 2016, 36(5): 1566.
- [ 12 ] China National Environmental Monitoring Centre(中国环境监测总站). *Element Background Values of Soil in China(中国土壤元素背景值)*. Beijing: China Environmental Science Press(北京: 中国环境科学出版社), 1990.
- [ 13 ] LÜ Jia-li, LI Meng, XIE Jing-fang, et al(吕佳莉, 李萌, 解静芳, 等). *Environmental Science and Technology(环境科学与技术)*, 2016, 39(4): 126.
- [ 14 ] XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, WANG Hao-fei, et al(熊秋林, 赵文吉, 王皓飞, 等). *Ecology and Environment Sciences(生态环境学报)*, 2016, 25(7): 1181.

## Characteristics and Sources Analysis of Element in Ambient PM<sub>2.5</sub> in Taiyuan City

LIU Zhe<sup>1</sup>, LIU Liu<sup>2</sup>, YANG Yi-bing<sup>3</sup>, LI Xin<sup>4</sup>, SHI Jian-ping<sup>5</sup>, WANG Qin<sup>1\*</sup>, XU Dong-qun<sup>1\*</sup>

1. National Institute of Environmental Health, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100021, China
2. Chaoyang District Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100021, China
3. Division of Non-communicable Disease Control and Community Health, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102206, China
4. Shanxi Provincial People's Hospital, Taiyuan 030012, China
5. Taiyuan Center for Disease Control and Prevention, Taiyuan 030012, China

**Abstract** In 2017—2018, the concentrations and sources of ambient fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and its 15 elements (Al, As, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, V, Zn) in three sampling points (Jiefang North Road Jiancaoping District, Xinjian South Road and Shuangtasi Street Yingze District) in Taiyuan city were investigated during the non-heating season, the light pollution period in heating season and the heavy pollution period in heating season. The samples were collected continuously by medium flow particle samplers in 6 days with more than 20 hours each day, and the concentrations of the 15 elements were determined by ICP-MS after pretreatment of microwave digestion. The spatial and temporal distribution characteristics were analyzed by descriptive statistical method. The main sources of PM<sub>2.5</sub> were analyzed by enrichment factor method (EF) and the principal component analysis method (PCA). The concentrations of PM<sub>2.5</sub> and its 15 elements showed the tendency of the heavy pollution period in heating season > the light pollution period in heating season > the non-heating season. There were no significant differences in concentrations of PM<sub>2.5</sub> and most of the 15 elements between the 3 sampling points ( $p < 0.01$ ). The main

sources of the 15 elements in the non-heating season was soil, construction and metallurgical industry with the contribution of 32.03%, 30.52% and 18.26%. The main sources in the light pollution period in heating season was the mixed source of construction, soil and metallurgical industry, the mixed source of construction and biomass combustion and soil with the contribution of 37.98%, 37.05% and 16.55%. The main sources in the heavy pollution period in heating season was the mixed source of construction and biomass combustion, the mixed source of construction, soil and metallurgical industry and soil with the contribution of 40.62%, 35.52% and 13.96%. Compared with previous studies, the results of this research showed that although the control measures of  $PM_{2.5}$  in Taiyuan had been effective in recent years, the management and control of pollution sources such as metallurgical industry, motor vehicles and coal burning should be further strengthened.

**Keywords** ICP-MS;  $PM_{2.5}$ ; Elements; Principal component analysis

(Received Nov. 26, 2018; accepted Feb. 25, 2019)

\* Corresponding authors