

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.12.007

# 燃煤电厂锅炉 PM<sub>2.5</sub> 现场实测与排放特征研究

杨建军<sup>1</sup>, 杜利劳<sup>2</sup>, 马启翔<sup>2</sup>, 林启才<sup>2</sup>, 卢立栋<sup>2</sup>, 刘赵梅<sup>2</sup>, 徐楠<sup>2</sup>, 申圆圆<sup>1</sup>

(1. 西安文理学院 生物与环境工程学院, 西安 710065; 2. 陕西省环境科学研究院, 西安 710061)

**摘要:**采用自设固定源 PM<sub>2.5</sub> 稀释采集系统对陕西省关中地区多个燃煤电厂烟气中的颗粒物开展了现场实测与样品化学源组分分析。结果表明:4 个燃煤电厂 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 占颗粒物比重差异较大 (PM<sub>2.5</sub> 占比范围为 6.92%~54.34%, PM<sub>10</sub> 占比范围为 36.36%~73.02%); 4 个燃煤电厂数浓度水平最高值 ( $2.0 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^5$  个/cm<sup>3</sup>) 差异较大, 相差约 1 个数量级; 燃煤电厂 PM<sub>2.5</sub> 小粒径段颗粒物质量浓度占比大多较低, 但其对 PM<sub>2.5</sub> 数浓度贡献却很大 (最小值 > 95%), 大粒径段颗粒物则相反; 煤粉炉 PM<sub>1</sub>/PM<sub>2.5</sub> 较大, 占比范围为 35.29%~51.35%, 循环流化床锅炉 PM<sub>1</sub>/PM<sub>2.5</sub> 较小, 占比范围为 16.62%~21.47%; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 是燃煤电厂 PM<sub>2.5</sub> 中最丰富的离子成分, 各电厂 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 占总离子浓度比重范围为 50.02~65.52%, Na<sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 位于第 2 或第 3 位; 各燃煤电厂主要检出无机元素是 Si、Al、Ca、Na、Fe、Na 等地壳元素; 燃煤电厂 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和颗粒物的排放因子范围分别为 0.001~0.028 kg/t、0.002~0.086 kg/t、0.003~0.236 kg/t; 除尘设施组合越复杂先进, 排放因子就可能越小。

**关键词:**燃煤电厂; PM<sub>2.5</sub>; 粒径分布; 水溶性离子; 无机元素; 排放因子

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2018)12-055-11

## Study on emission characteristics and field measurement of PM<sub>2.5</sub> in coal-fired power plant boilers

YANG Jianjun<sup>1</sup>, DU Lilao<sup>2</sup>, MA Qixiang<sup>2</sup>, LIN Qicai<sup>2</sup>, LU Lidong<sup>2</sup>,  
LIU Zhaomei<sup>2</sup>, XU Nan<sup>2</sup>, SHEN Yuanyuan<sup>1</sup>

(1. School of Biological and Environmental Engineering, Xi'an University of Arts and Science, Xi'an 710065, P.R.China; 2. Shaanxi Research Academy of Environmental Science, Xi'an 710061, P.R.China)

**Abstract:** Field experiments and chemical composition analysis of particle in flue gas from several coal-fired power plants in Guanzhong area of Shaanxi province was carried out with dilution and collection system of PM<sub>2.5</sub> in stationary sources designed by the team. The results show that the proportions of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in the particles of 4 coal-fired power plants are quite different. The proportion of PM<sub>2.5</sub> ranges from 6.92% to 54.34%, and the proportion of PM<sub>10</sub> ranges from 36.36% to 73.02%. Maximum values ( $2.0 \times 10^4$  to  $4.0 \times 10^5$ /cm<sup>3</sup>) of number concentration levels from 4 coal-fired power plants are quite different, and the

收稿日期: 2018-07-05

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划课题 (2012KTZB03-01)。

Supported by Plan Project of Shaanxi Province Science and Technology Co-Ordination and Innovation Project, China (2012KTZB03-01).

作者简介: 杨建军 (1975—), 男, 西安文理学院讲师, 博士, 主要从事大气污染控制研究与教学, (E-mail) yangjianjun\_05@163.com。

difference is about 1 order of magnitude. The mass concentration proportion of small particles to  $PM_{2.5}$  from coal-fired power plants is mostly low, but the small particles' contribution to  $PM_{2.5}$  number concentration is great (minimum value  $> 95\%$ ), and the situation of the large particles is quite the opposite. The  $PM_{10}/PM_{2.5}$  value of the pulverized coal boiler is large, the ratio range is between  $35.29\%$  and  $51.35\%$ , and the  $PM_{10}/PM_{2.5}$  value of the circulating fluidized bed boiler is small, the ratio range is between  $16.62\%$  and  $21.47\%$ .  $SO_4^{2-}$  is the most abundant ion component in  $PM_{2.5}$  of coal-fired power plants, and the proportion of  $SO_4^{2-}$  to total ion concentration ranges from  $50.02\%$  to  $65.52\%$ ,  $Na^+$  and  $Ca^{2+}$  ranking second or third. The main inorganic elements detected in the coal-fired power plants are Si, Al, Ca, Na, Fe, Na and other crustal elements. The emission factors' range of  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  and particles in the coal-fired power plants are 0.001 to 0.028 kg/t, 0.002 to 0.086 kg/t and 0.003 to 0.236 kg/t, respectively. The more complex and advanced the combination of dust removal facilities is, the smaller the emission factor is likely to be.

**Keywords:** coal-fired power plant;  $PM_{2.5}$ ; particle size distribution; water-soluble ion; inorganic element; emission factor

近年来,中国许多城市源解析结果均显示燃煤排放是本区域大气污染的主要来源<sup>[1-3]</sup>。高强度的  $PM_{2.5}$  排放不仅会降低区域的环境质量,并且长期处于这种环境中的所有生物体也会受到严重危害<sup>[4-15]</sup>,所以控制燃煤  $PM_{2.5}$  排放已经成为中国政府及相关部门重点关注并急需解决的环境问题。

目前,国内有关  $PM_{2.5}$  方面的研究工作主要集中在大气环境中  $PM_{2.5}$  的时空分布,大气环境中  $PM_{2.5}$  排放源清单建立、源排放特性分析等方面,上述研究大多建立在自建研究平台基础之上,而基于现场实测的涉及燃煤电厂主要类型锅炉的排放数据及研究成果还是很少。分析相关文献<sup>[16-19]</sup>,更多研究只涉及  $PM_{2.5}$  排放方面(如质量浓度、数浓度、排放因子等),这些研究工作相对中国燃煤锅炉大气细颗粒物排放清单建立的需求来说还远远不够,此外已有研究也尚未对  $PM_{2.5}$  化学源组分开展充分的研究工作。

笔者根据稀释通道基本原理并借鉴美国及国内各大科研院设计的系列固定燃烧源颗粒物稀释采样系统,自主设计了燃煤锅炉  $PM_{2.5}$  稀释采集系统,应用这套系统对陕西省关中地区多个燃煤电厂烟气出口中的颗粒物开展了大量实测工作并对采集样品做了实验室分析,目的在于全面获得主要类型燃煤锅炉  $PM_{2.5}$  的质量浓度、数浓度、排放因子以及化学源组分排放情况,进而为中国新建燃煤电厂  $PM_{2.5}$  控制技术的选择、已建燃煤电厂污染控制设施的改造决策、区域  $PM_{2.5}$  控制政策的制定以及燃煤电厂  $PM_{2.5}$  排放清单的完善提供更多的技术资料支撑和更为科学的参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象基本情况

测试电厂基本情况如表 1 所示。

表 1 测试电厂基本情况

Table 1 Basic situation of tested power plant

电厂代号	燃料	燃料消耗量/ ( $t \cdot d^{-1}$ )	测试机组	规模/ MW	锅炉类型	额定蒸发量/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	测试工况/ %	污控设施组合	收到基灰分/%	空气干燥基灰分/%	干燥无灰基挥发分/%	干燥基全硫/%
A	混合烟煤 (彬长、麟北、华亭)	2 300	4# 机组	300	煤粉炉	1 025	85	SCR+ESP+WFGD+WESP	24.63	27.64	38.25	0.61
B	白水烟煤	700	1# 机组	550		220	95	SNCR+SCR+ESP+BAGHOUSE+WFGD	19.43	21.45	37.04	0.31

续表 1

电厂代号	燃料	燃料消耗量/ (t·d <sup>-1</sup> )	测试机组	规模/ MW	锅炉类型	额定蒸发量/ (t·h <sup>-1</sup> )	测试工况/ %	污控设施组合	收到基灰分/%	空气干燥基灰分/%	干燥无灰基挥发分/%	干燥基全硫/%
C	煤矸石(90%)+ 彬长烟煤(10%)	2 100	1# 机组	200	循环 流化床	705	80	SNCR+ BAGHOUSE+ WFGD	—	—	—	—
D	煤矸石(30%)+ 中煤(30%)+煤泥 (30%)+烟煤(10%)	450	1# 机组	12		75	85	ESP+ BAGHOUSE	49.43	52.88	12.90	0.89

说明:“—”表示无此数据。

测试期间,各电厂研究对象机组负荷 $\geq 80\%$ ,且长时间处于较为稳定状态;燃料及其构成基本不变;锅炉及除尘、脱硫等系统正常运行。

## 1.2 样品采集系统构建

本研究自主设计的燃煤锅炉 PM<sub>2.5</sub> 稀释采集系统主要包括进气子系统、稀释子系统、采样子系统三大子系统,系统概图如图 1 所示。

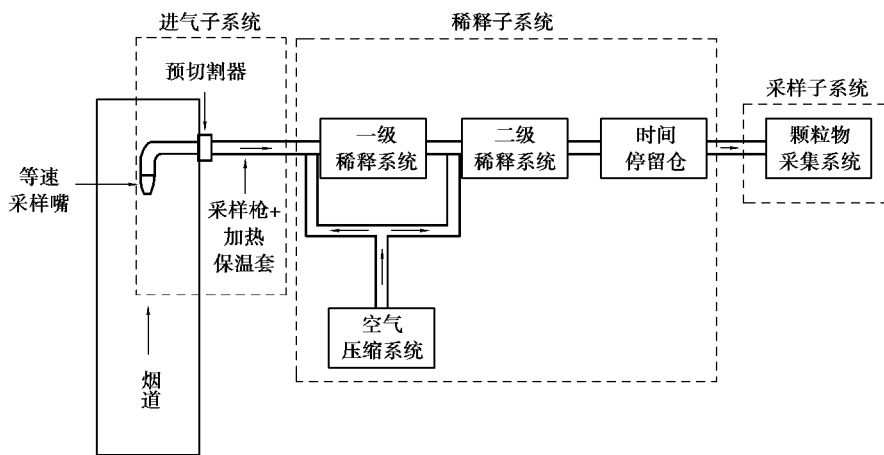


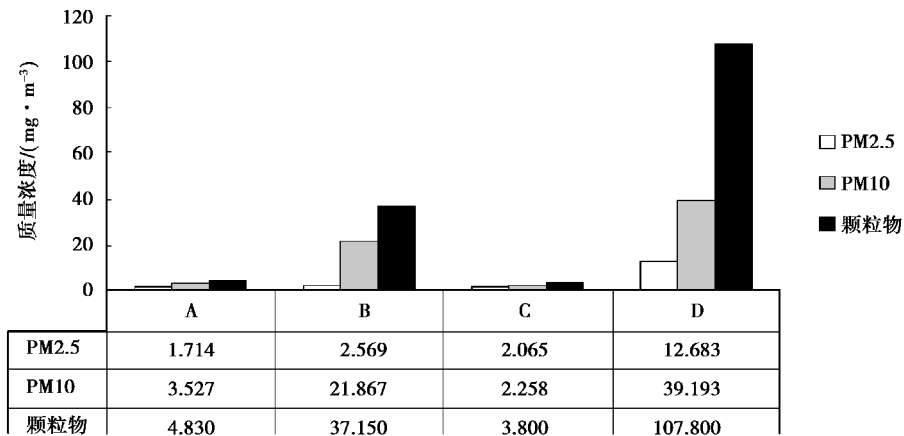
图 1 燃煤锅炉 PM<sub>2.5</sub> 稀释采集系统

Fig.1 The dilution and collection system of PM<sub>2.5</sub> for coal-fired boiler

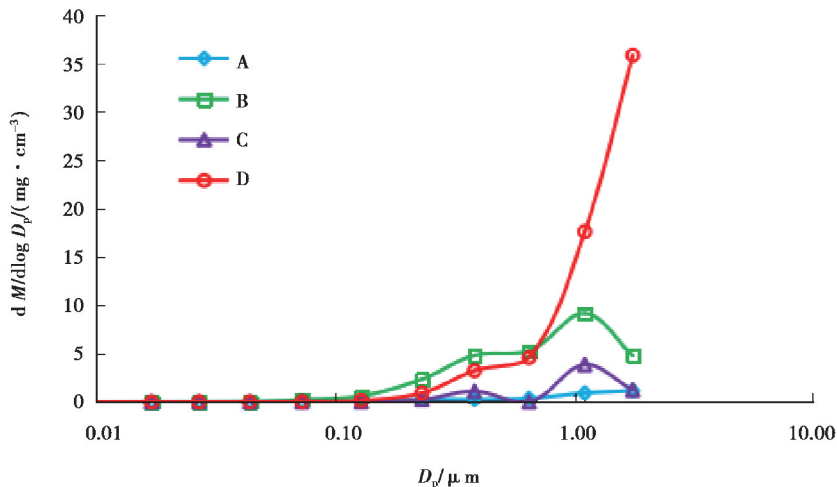
进气子系统主要包括等速采样嘴、旋风预切割器、采样枪、加热(保温)等部件或装置;稀释子系统主要包括空气压缩机、空气过滤器、空气干燥器、压缩空气加热装置、一级稀释器、二级稀释器、FPS-4000 细颗粒采样仪(芬兰 Dekati 公司)等部件或装置;采样子系统主要包括 ELPI+(电动低压冲击器,芬兰 Dekati 公司)、真空泵、笔记本电脑、颗粒物采集器(BGI PQ200 环境级精细颗粒物采样器)等装置或部件。

等速采样嘴是保证烟气进入采样嘴的流速与烟道内采样点的烟气流速相等,从而确保烟气中颗粒物不被超采或少采。旋风切割器是为解决由于烟气中颗粒物浓度过高最终导致后续系统过载而专门设计的预除尘装置。加热(保温)装置可防止颗粒物在采样管道中出现热泳沉积和冷凝现象,通常加热温度略高于烟气温度。空气过滤器(过滤颗粒物)及干燥器(去除水分)均是为了保证进入稀释器中的气体干洁。一级稀释空气温度接近烟气温度,从而保证稀释后烟气不发生冷凝,二级稀释空气温度接近常温空气,从而保证稀释后烟气温度接近环境空气温度。FPS-4000 细颗粒采样仪是为了保证烟气浓度被精准稀释,烟气温度、压力、流速被精准控制而专门设计的一套细颗粒物稀释系统。采样子系统采用多通道观测及采样,烟气经第 1 通道后进入 ELPI+在线测试系统(理论流速 1 L/min),在这一系统中可以对不同层级颗粒物的质量浓度、数浓



图 2 测试电厂 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和颗粒物的质量浓度Fig.2 The mass concentration of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and particles of the tested power plants

由图 2 可看出, A、C 电厂 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和颗粒物的质量浓度在 4 个测试电厂中均较低, B、D 电厂均较高。B 电厂颗粒物排放浓度较高的主要原因是该电厂脱销脱硫设施刚改造完毕尚未验收, 但测试结果提示现有运行条件下颗粒物排放浓度还不能达到《关中地区重点行业大气污染物排放限值》(DB61/941—2014) 中的排放限值(20 mg/m<sup>3</sup>), 尚需对其整个系统做优化调试和必要完善; D 电厂颗粒物排放浓度不达标的主要原因是其燃料构成较为复杂(该电厂设立目的一是为本集团及周边企业提供电力, 二是资源化利用本集团下属煤矿企业产生的固体废弃物)以及污控设施组合单一。此外, A、B、C、D 电厂 PM<sub>2.5</sub> 占颗粒物比重分别为 35.49%, 6.92%, 54.34% 和 11.77%, PM<sub>10</sub> 占颗粒物比重分别为 73.02%, 58.86%, 59.43% 和 36.36%, 由此可看出, A、C 电厂 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 占颗粒物比重均较大, B、D 电厂 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 占颗粒物比重均较小, 这表明 A、C 电厂相对 B、D 电厂来说, 粒径较小颗粒物排放较多, 粒径较大颗粒物排放较少, 这与燃料种类、锅炉类型、除尘设施及其组合以及电厂管理水平等因素有着主要关联。

图 3 测试电厂 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度粒径分布特征Fig.3 The size distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> mass concentration in the tested power plants

由图 3 可知, A 电厂 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度呈单峰分布, 峰值出现在 1.764 μm 积聚模态(accumulation mode, 0.08~2.00 μm)<sup>[20]</sup> 粒径段; B 电厂 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度呈单峰分布, 峰值出现在 1.110 μm 积聚模态粒径段; C 电

厂  $PM_{2.5}$  质量浓度呈双峰分布, 峰值出现在  $0.384, 1.110 \mu\text{m}$  2 个积聚模态粒径段; D 电厂  $PM_{2.5}$  质量浓度呈单峰分布, 峰值出现在  $0.017 \mu\text{m}$  爱根核模态 (Aitken,  $<0.080 \mu\text{m}$ )<sup>[20]</sup> 粒径段。此外, 4 个电厂  $PM_{2.5}$  在爱根核模态各粒径段的质量浓度总体较低且变化较为平缓, 在积聚模态各粒径段的质量浓度总体较高且变化较为剧烈。

研究文献[21]认为, 燃煤锅炉中爱根核模态颗粒物一般是由高温下排放的过饱和气态物质冷凝而成, 而积聚模态细颗粒物主要通过爱根核模态颗粒物的碰并、凝聚、吸附等作用长大而成, 或由挥发性组分凝结及气粒转化而成。此外, 4 个电厂排放的  $PM_{10}$  质量浓度主要集中在  $0.231 \sim 7.342 \mu\text{m}$  这一积聚模态和粗离子模态 (coarse particle mode,  $>2.000 \mu\text{m}$ )<sup>[20]</sup> 范围内, 尤其是 B、D 电厂在这一区间的质量浓度显著高于其他两个电厂, 这可能与运行参数不稳定 (B 电厂)、除尘装置总效率较低及燃料构成 (D 电厂) 有关。

## 2.2 $PM_{2.5}$ 数浓度

从图 4 可知, A 电厂  $PM_{2.5}$  数浓度呈双峰分布, 峰值出现在  $0.017, 0.073 \mu\text{m}$  2 个爱根核模态粒径段; B 电厂  $PM_{2.5}$  数浓度呈单峰分布, 峰值出现在  $0.017 \mu\text{m}$  爱根核模态粒径段; C 电厂  $PM_{2.5}$  数浓度呈多峰分布, 峰值出现在  $0.017, 0.073, 0.384$  和  $1.110 \mu\text{m}$  2 个爱根核模态和 2 个积聚模态粒径段; D 电厂  $PM_{2.5}$  数浓度呈多峰分布, 峰值出现在  $0.017, 0.073$  和  $0.231 \mu\text{m}$  2 个爱根核模态和一个积聚模态粒径段。该图还表明 A、C、D 电厂  $PM_{2.5}$  在爱根核模态和积聚模态的数浓度水平均较低 (最高值依次为  $2.9 \times 10^4, 2.0 \times 10^4, 3.6 \times 10^4$  个/ $\text{cm}^3$ ) 且变化平缓, 而 B 电厂在整个爱根核模态和积聚模态小粒径段 ( $0.080 \mu\text{m} < D_p < 0.231 \mu\text{m}$ ) 的数浓度水平 (最高值  $4.0 \times 10^5$  个/ $\text{cm}^3$ , 最低值  $8.2 \times 10^4$  个/ $\text{cm}^3$ ) 明显高于其他测试电厂 (最高值相差约 1 个数量级) 且在 2 个模态过渡段变化剧烈。

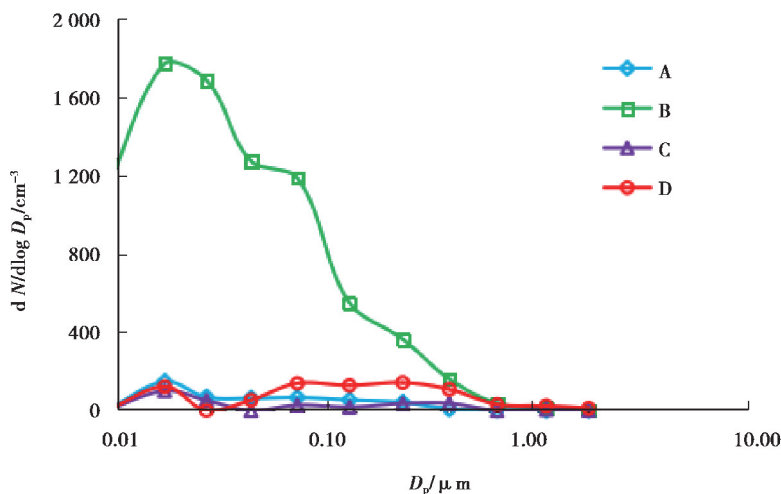


图 4 测试电厂  $PM_{2.5}$  数浓度粒径分布特征

Fig.4 The size distribution characteristics of  $PM_{2.5}$  number concentration in the tested power plants

文献[22-23]认为, 亚微米颗粒的形成主要由挥发的元素凝聚而成, 一般可用汽化-凝结机理来描述, 该机理主要包括均相成核和异相凝结两个过程。均相成核是气体本身核化形成气溶胶粒子, 主要形成纳米级粒子 ( $<50 \text{ nm}$ ); 异相凝结是饱和气体在粒子表面上的凝结过程, 是超细颗粒物 ( $<100 \text{ nm}$ ) 和亚微米颗粒物 ( $<1 \mu\text{m}$ ) 的重要形成机制。因此, A、C、D 3 个电厂数浓度水平相近及与 B 电厂数浓度水平存在显著差异的根本原因应与燃煤特性 (如燃煤挥发份产率, 一般情况下褐煤挥发份为  $38\% \sim 65\%$ , 烟煤挥发份为  $10\% \sim 55\%$ , 无烟煤挥发份  $\leq 10\%$ , 该特性可直接影响可挥发和可凝结气态污染物的总量, 进而影响爱根核模态和积聚模态颗粒物的数浓度水平) 以及锅炉运行参数 (如燃烧温度, 不同燃烧温度会促使煤中不同沸点痕量元

素部分或全部挥发成气态,而这些元素蒸汽在温度较低的炉膛尾部烟道中逐渐冷却,最终经过一系列物理化学变化富集在亚微米细微粒子表面<sup>[24]</sup>。燃烧温度不同也会影响到挥发份产率的大小,进而引起细微粒子数浓度的改变)密切相关。

此外,笔者还对 PM<sub>2.5</sub> 小粒径段(这里取 PM<sub>1</sub> 粒径段,即亚微米粒径段)和大粒径段颗粒物的质量浓度/数浓度占比做了计算,结果如表 3。

表 3 PM<sub>2.5</sub> 小粒径段与大粒径段颗粒物质量浓度/数浓度占比

Table 3 The mass and number concentration proportion of small and large particle size in PM<sub>2.5</sub>

质量浓度占比/%		数浓度占比/%	
小粒径段 (D50%≤1.0 μm)	大粒径段 (1.0 μm<D50%≤2.5 μm)	小粒径段 (D50%≤1.0 μm)	大粒径段 (1.0 μm<D50%≤2.5 μm)
35.29	64.71	99.63	0.37
51.35	48.65	99.83	0.17
21.47	78.53	97.81	2.19
16.62	83.38	95.54	4.46

从表 3 可看出,各电厂 PM<sub>2.5</sub> 小粒径段颗粒物质量浓度占比大多均较低,但其对 PM<sub>2.5</sub> 数浓度贡献却很大(最小值>95%),大粒径段颗粒物则相反。文献[16]认为,颗粒物数浓度对人类健康有着重要影响并且能够更加全面表征固定污染源中颗粒物产污特性。所以,以上研究数据提示燃煤电厂及环境保护部门在关注燃煤锅炉颗粒物排放时不能仅仅只关注颗粒物质量浓度这个单一指标,而应采取切实手段减少燃煤锅炉排放中颗粒物的数浓度水平。另外,从表 3 还可看出,煤粉炉 PM<sub>1</sub>/PM<sub>2.5</sub> 较大,占比范围为 35.29%~51.35%,循环流化床锅炉 PM<sub>1</sub>/PM<sub>2.5</sub> 较小,占比范围为 16.62%~21.47%,这主要是由于煤中成灰元素汽化温度(沸点)存在差异所致,如 Ca、Mg 元素沸点分别为 1 484 °C 和 1 090 °C,高于循环流化床锅炉的运行温度(一般在 900 °C 左右),但低于煤粉炉的运行温度(一般在 1 500 °C 左右),Na、K 元素沸点分别为 883 °C 和 759 °C,完全低于循环流化床锅炉的运行温度(一般在 900 °C 左右),这种差异致使汽化元素总量在煤粉炉中一般多于循环流化床。由于亚微米颗粒多产生于挥发元素的凝聚过程,并可用汽化-凝结机理来进行描述,所以可认为煤粉炉内汽化-凝结机理是 PM<sub>2.5</sub> 中亚微米颗粒物形成的主导因素,循环流化床内矿物破碎与颗粒聚结机理是 PM<sub>2.5</sub> 中积聚模态大粒径段(1 μm<D<sub>p</sub><2 μm)颗粒物与粗粒子模态颗粒物形成的主导因素。

### 2.3 PM<sub>2.5</sub> 化学源组分

图 5 和图 6 表明:1)除 Br<sup>-</sup> 外,其他 10 种离子在各电厂排放 PM<sub>2.5</sub> 中均有不同程度检出;2)SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 是各燃煤电厂排放 PM<sub>2.5</sub> 中最丰富的离子成分,各电厂 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 质量浓度占离子质量总浓度的比重分别为 58.08%, 65.52%, 63.24%, 50.02%,这可能与 A、B、C 3 个电厂采用的脱硫方式(均为 WFGD,该法会致使脱硫产物 CaSO<sub>4</sub> 或烟气中硫酸雾滴干燥后进入 PM<sub>2.5</sub> 中),以及 D 电厂的脱硫效率较低(炉内喷钙脱硫效率低于 WFGD 法)有关;3)Na<sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 位于各电厂排放 PM<sub>2.5</sub> 中离子质量浓度值的第 2 或第 3 位,Na<sup>+</sup> 质量浓度高主要是由燃煤及其他矿物中 Na 的化合物(如钠长石(NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)、食盐(氯化钠)、智石(硝酸钠)、纯碱(碳酸钠))经系列反应生成所致,A、B、C 3 个电厂 Ca<sup>2+</sup> 质量浓度高的主要原因与其湿法脱硫副产物 CaSO<sub>4</sub> 有关,D 电厂 Ca<sup>2+</sup> 质量浓度高应与其干法脱硫副产物 CaSO<sub>4</sub> 有关;4)其他离子的检出量很小,各电厂这些离子的质量浓度总值分别占全部离子质量浓度总值的比重分别为 7.99%, 10.64%, 7.09% 和 15.28%;5)各电厂主要检出无机元素以 Si、Al、Ca、Na、Fe、Na 等地壳元素为主,其中,Si、Al、Ca、Fe 等地壳元素多来源于矿石燃料,S 主要来源于煤炭燃烧。

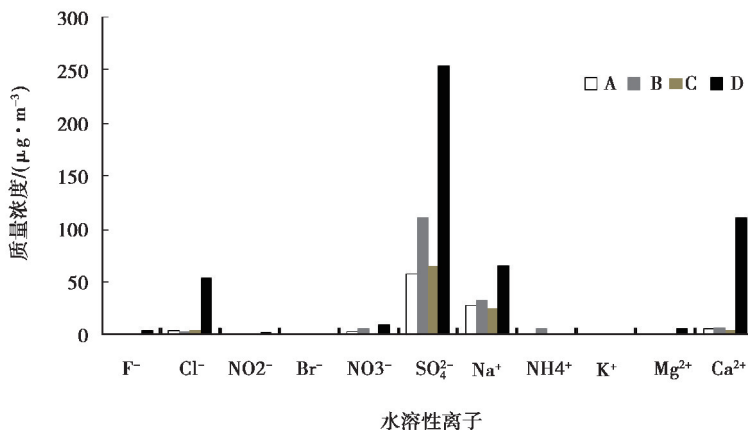


图 5 各测试电厂稀释烟气(稀释比 6)中 PM<sub>2.5</sub> 水溶性离子及质量浓度

Fig.5 The water soluble ions and mass concentration of PM<sub>2.5</sub> in dilution flue gas (dilution ratio 6) of the tested power plants

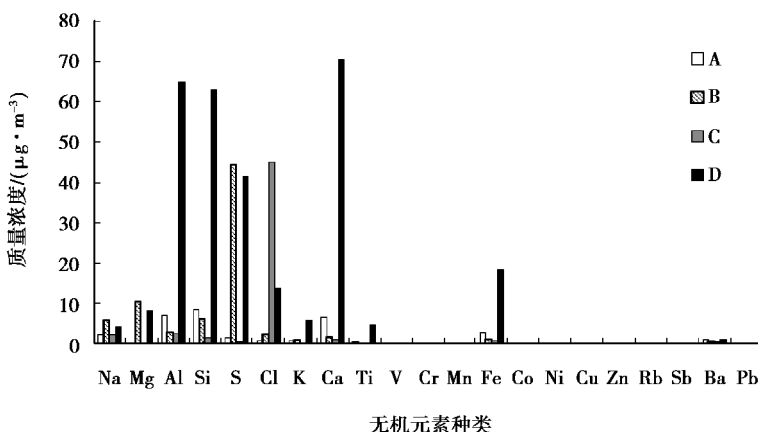


图 6 各测试电厂稀释烟气(稀释比 6)中 PM<sub>2.5</sub> 无机元素及质量浓度

Fig.6 The inorganic elements and mass concentration of PM<sub>2.5</sub> in dilution flue gas (dilution ratio 6) of the tested plants

2.4 颗粒物排放因子

基于实测数据,根据前述公式计算了各电厂 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>及颗粒物的排放因子,具体如表 4 所示。

表 4 各燃煤电厂颗粒物排放因子

Table 4 Particles emission factors in the coal-fired power plants

电厂序号	燃料	锅炉类型	额定蒸发量/ (t · h <sup>-1</sup> )	测试工况/ %	除尘方式	排放因子/(kg · t <sup>-1</sup> )			数据来源
						PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM	
A	混合烟煤 (彬长、麟北、华亭)	煤粉炉	1 025	85	静电除尘+湿法 脱硫+湿电除尘	0.001	0.002	0.003	
B	白水烟煤		220	95	电袋除尘+湿法脱硫	0.003	0.025	0.042	
C	煤矸石(90%)+ 彬长烟煤(10%)	循环 流化床	705	75	电袋除尘+湿法脱硫	0.001	0.002	0.003	本研究
D	煤矸石(30%)+ 中煤(30%)+ 煤泥(30%)+ 烟煤(10%)		75	85	电袋除尘	0.028	0.086	0.236	



续表 4

电厂 序号	燃料	锅炉 类型	额定蒸发量/ (t·h <sup>-1</sup> )	测试 工况/ %	除尘方式	排放因子/(kg·t <sup>-1</sup> )			数据 来源
						PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM	
E	山西大同口泉煤 (80%) + 煤气(20%)		220	80	静电除尘	0.450	1.190		
F	准噶尔煤	煤粉炉	2 023	90	静电除尘	0.030	0.100		文献 [21]
G	山西混煤(60%富兴 优+40%木瓜界)		2 045	100	静电除尘	0.120	0.230		
H	无烟煤		670	95	布袋除尘	0.020	0.120		
I	煤矸石	循环 流化床	75	75	静电除尘	2.040	4.860		
J	山西大同煤	煤粉炉	670	100	静电除尘+湿法脱硫	0.170	0.260	0.300	
K	混合烟煤		435	80	静电除尘+湿法脱硫	0.070	0.140	0.190	
L		链条炉		100	旋风除尘	0.032	0.034		
M				100	静电除尘	0.032	0.034		
N	煤	煤粉炉	—	100	文丘里水膜除尘	0.020	0.021	—	文献 [19]
O					100	静电除尘	0.087	0.178	
P				100	静电除尘	0.035	0.085		
Q	淮南煤			80		0.186	0.355	0.385	
R	大同煤			93		0.127	0.296	0.309	
S	富动 24(内蒙)			83	静电除尘+湿法脱硫	0.122	0.225	0.257	文献 [17]
T	澳煤+平三煤	—	—	82		0.076	0.162	0.181	
U	神混 1# 煤			100		0.075	0.146	0.156	
V	神木煤			85		0.079	0.142	0.156	

本研究中燃煤电厂 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和颗粒物的排放因子范围分别为 0.001~0.028 kg/t, 0.002~0.086 kg/t 和 0.003~0.236 kg/t, 而表 4 研究文献中 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和颗粒物的排放因子范围分别为 0.020~2.040 kg/t, 0.021~4.860 kg/t 和 0.156~0.385 kg/t, 本研究排放因子范围与表 4 研究文献中排放因子部分范围重合, 具有较好可比性。主要原因有: 1) A 电厂末端采用的除尘方式是湿电除尘器, 而国内外许多实验均已证明其对细颗粒物的去除效果很好<sup>[25-27]</sup>, 所以其 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的排放因子水平很低; 2) I 电厂额定蒸发量最小 (75 t/h)、除尘方式为静电除尘, 而文献[28]中认为排放因子与额定蒸发量和除尘设施密切相关 (锅炉额定蒸发量越大, 除尘器效率越高, 排放因子越小), 所以 I 电厂 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 排放因子水平很高; 3) E 电厂在燃料中掺烧了 20% 的煤气, 煤气燃烧形成的主要是细颗粒物, 因此该电厂 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的排放因子相对较高。如不包括 A、I、E 3 个电厂, 本研究 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和颗粒物的排放因子范围 (0.001~0.028 kg/t, 0.002~0.086 kg/t 和 0.003~0.236 kg/t) 与表 4 研究文献中的排放因子范围 (0.020~0.186 kg/t, 0.021~0.355 kg/t 和 0.156~0.385 kg/t) 就更为接近。此外, 还可看出, 除尘设施组合越复杂、先进, 排放因子一般就可能越小, 如 A 电厂在除尘设施末端增加了先进的湿电除尘装置, 其 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 排放因子就在所有电厂中最小, PM 排放因子也很低, 这主要是由于在大多情况下不同除尘设施对颗粒物均具有去除作用, 而其区别仅在于各除尘设施作

用的粒径段及去除效率有所不同而已。

### 3 结 论

1) 4个燃煤电厂  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  占颗粒物比重差异较大( $PM_{2.5}$  占比范围为 6.92%~54.34%,  $PM_{10}$  占比范围为 36.36%~73.02%), 这主要与燃料种类、锅炉类型、除尘设施及其组合以及电厂管理水平等因素有关。

2) 4个燃煤电厂数浓度水平最高值差异较大, 最大为  $4.0 \times 10^5$  个/ $cm^3$ , 最小为  $2.0 \times 10^4$  个/ $cm^3$ , 相差约 1 个数量级, 这与燃煤特性以及锅炉运行参数密切相关。

3) 各燃煤电厂  $PM_{2.5}$  小粒径段颗粒物质量浓度占比大多较低, 但其对  $PM_{2.5}$  数浓度贡献却很大(最小值 > 95%); 大粒径段颗粒物则相反, 其质量浓度占比大多较高, 但对  $PM_{2.5}$  数浓度贡献却很小(最大值 < 5%)。

4) 煤粉炉  $PM_1/PM_{2.5}$  较大, 占比范围为 35.29%~51.35%, 循环流化床锅炉  $PM_1/PM_{2.5}$  较小, 占比范围为 16.62%~21.47%。煤粉炉内汽化-凝结机理是  $PM_{2.5}$  中亚微米颗粒物形成的主导因素, 循环流化床内矿物破碎机理与颗粒聚结机理是  $PM_{2.5}$  中积聚模态大粒径段颗粒物与粗粒子模态颗粒物形成的主导因素。

5)  $SO_4^{2-}$  是燃煤电厂排放  $PM_{2.5}$  中最丰富的离子成分, 各电厂  $SO_4^{2-}$  占总离子质量浓度比重范围为 50.02%~65.52%,  $Na^+$  和  $Ca^{2+}$  位于第 2 或第 3 位; 各燃煤电厂主要检出无机元素以 Si、Al、Ca、Na、Fe、Na 等地壳元素为主。

6) 燃煤电厂  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  和颗粒物的排放因子范围分别为 0.001~0.028 kg/t, 0.002~0.086 kg/t 和 0.003~0.236 kg/t。一般情况, 除尘设施组合越复杂先进, 排放因子就可能越小。

### 参考文献:

- [1] 张丹, 赵丽, 陈刚才, 等. 不同燃烧过程颗粒物粒径排放特征[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3239-3246.  
ZHANG Dan, ZHAO Li, CHEN Gangcai, et al. The particle size distribution characteristics of different combustion sources[J]. China Environmental Science, 2015, 35(11): 3239-3246. (in Chinese)
- [2] 徐昶, 沈建东, 何曦, 等. 杭州无车日大气细颗粒物化学组成形成机制及光学特性[J]. 中国环境科学, 2013, 33(3): 392-401.  
XU Chang, SHEN Jiandong, HE Xi, et al. Chemical composition, formation mechanism and optical properties of atmospheric fine particles during the World Car Free Day in Hangzhou [J]. China Environmental Science, 2013, 33(3): 392-401. (in Chinese)
- [3] McNallan M J, Yurek G J, Elliott J F. The formation of inorganic particulates by homogeneous nucleation in gases produced by the combustion of coal [J]. Combustion and Flame, 1981, 42: 45-60.
- [4] Hildemann L M, Markowski G R, Cass G R. Chemical composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol[J]. Environmental Science & Technology, 1991, 25(4): 744-759.
- [5] 黄德生, 张世秋. 京津冀地区控制  $PM_{2.5}$  污染的健康效益评估[J]. 中国环境科学, 2013, 33(1): 166-174.  
HUANG Desheng, ZHANG Shiqiu. Health benefit evaluation for  $PM_{2.5}$  pollution control in Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. China Environmental Science, 2013, 33(1): 166-174. (in Chinese)
- [6] 邵龙义, 杨书申, 时宗波, 等. 城市大气可吸入颗粒物物理化学特征及生物活性研究[M]. 北京: 气象出版社, 2006.  
SHAO Longyi, YANG Shushen, SHI Zongbo, et al. Study on physico-chemistry and bioreactivity of inhalable particulates in urban air[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006. (in Chinese)
- [7] Nemmar A, Hoet P H M, Vanquickenborne B, et al. Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans[J]. Circulation, 2002, 105(4): 411-414.
- [8] Daigle C C, Chalupa D C, Gibb F R, et al. Ultrafine particle deposition in humans during rest and exercise [J]. Inhalation Toxicology, 2003, 15(6): 539-552.
- [9] Vinikoor-Imler L C, Davis J A, Luben T J. An ecologic analysis of county-level  $PM_{2.5}$  concentrations and lung cancer incidence and mortality [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011, 8(6): 1865-1871.
- [10] Schneider A, Neas L M, Graff D W, et al. Association of cardiac and vascular changes with ambient  $PM_{2.5}$  in diabetic individuals[J]. Particle and Fibre Toxicology, 2010, 7(1): 14.
- [11] Krewski D, Jerrett M, Burnett R T, et al. Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality [J]. Research Report (Health Effect Institute), 2009, 140: 5.
- [12] Ito K, Mathes R, Ross Z, et al. Fine particulate matter constituents associated with cardiovascular hospitalizations and mortality in

- New York City [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, 119 (4): 467-473.
- [13] Zeger S L, Dominici F, McDermott A, et al. Mortality in the Medicare population and chronic exposure to fine particulate air pollution in urban centers(2000—2005)[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2008, 116(12): 1614-1619.
- [14] Nelin T D, Joseph A M, Gorr M W, et al. Direct and indirect effects of particulate matter on the cardiovascular system [J]. *Toxicology Letters*, 2012, 208(3): 293-299.
- [15] Wu S W, Deng F R, Huang J, et al. Blood pressure changes and chemical constituents of particulate air pollution: results from the healthy volunteer natural relocation (HVNR) study [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2013, 121(1): 66-72.
- [16] 尹连庆, 赵浩宁, 殷春肖, 等. 不同类型燃煤锅炉 PM<sub>2.5</sub> 产污特性及其控制效果[J]. *热力发电*, 2014, 43(7): 110-114.  
YIN Lianqing, ZHAO Haoning, YIN Chunxiao, et al. Emission and control of PM<sub>2.5</sub> in flue gas for different types of coal-fired boilers [J]. *Thermal Power Generation*, 2014, 43(7): 110-114. (in Chinese)
- [17] 王圣, 朱法华, 王慧敏, 等. 基于实测的燃煤电厂细颗粒物排放特性分析与研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(3): 630-635.  
WANG Sheng, ZHU Fahua, WANG Huimin, et al. Fine particle emission characteristics from coal-fired power plants based on field tests [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(3): 630-635. (in Chinese)
- [18] 赵丽, 张丹, 周志恩, 等. 重庆市典型工业源颗粒物排放特征[J]. *环境工程技术学报*, 2015, 5(6): 447-454.  
ZHAO Li, ZHANG Dan, ZHOU Zhien, et al. A study on emission characteristics of particulate matters from typical industrial combustion sources in chongqing city[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2015, 5(6): 447-454. (in Chinese)
- [19] 周楠, 曾立民, 于雪娜, 等. 固定源稀释通道的设计和场外测试研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(5): 764-772.  
ZHOU Nan, ZENG Limin, YU Xuena, et al. The design and field test of a dilution tunnel for stationary sources [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(5): 764-772. (in Chinese)
- [20] Wolf M E, Hidy G M. Aerosols and climate: anthropogenic emissions and trends for 50 years[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, 102(D10): 11113-11121.
- [21] 郝吉明, 段雷, 易红宏, 等. 燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
HAO Jimin, DUAN Lei, YI Honghong, et al. Physicochemical characteristics of inhalable particulates from combustion sources [M]. Beijing: Science China Press, 2008. (in Chinese)
- [22] Sarofim A F, Howard J B, Padia A S. The physical transformation of the mineral matter in pulverized coal under simulated combustion conditions[J]. *Combustion Science and Technology*, 1977, 16(3/4/5/6): 187-204.
- [23] 贺克斌. 燃煤飞灰电除尘特性的模拟与分析[D]. 北京: 清华大学, 1990.  
HE Keping. Simulation and analysis of coal-fired fly ash ESP characteristics [D]. Beijing: Tsinghua University, 1990. (in Chinese)
- [24] Helble J J. Trace element behavior during coal combustion: results of a laboratory study. *Fuel Processing Technology*, 1994, 39 (1/2/3): 159-172.
- [25] 莫华, 朱法华, 王圣, 等. 湿式电除尘器在燃煤电厂的应用及其对 PM<sub>2.5</sub> 的减排作用[J]. *中国电力*, 2013, 46(11): 62-65.  
MO Hua, ZHU Fahua, WANG Sheng, et al. Application of wet electrostatic precipitator in coal-fired power plants and its effect on Pemiission reduction of PM<sub>2.5</sub> [J]. *Electric Power*, 2013, 46(11): 62-65. (in Chinese)
- [26] 丁承刚, 时超林, 郭士义, 等. 湿式静电除尘器对可吸入颗粒物不同粒径段脱除效率分析[J]. *发电设备*, 2015, 29(6): 454-457.  
DING Chenggang, SHI Chaolin, GUO Shiyi, et al. Removal efficiency of wet electrostatic precipitator for inhalable particles of different sizes [J]. *Power Equipment*, 2015, 29(6): 454-457. (in Chinese)
- [27] 杨志燕. 湿式电除尘器收集 PM<sub>2.5</sub> 微细粉尘的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.  
Yang Zhiyan. Experimental study on collection of fine particle by wet electrostatic precipitator [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014. (in Chinese)
- [28] 温彦平, 宋翀芳, 成娜, 等. 燃煤锅炉烟尘颗粒物中 PM<sub>2.5</sub> 排放规律研究[J]. *太原理工大学学报*, 2014, 45(6): 712-717.  
WEN Yanping, SONG Chongfang, CHENG Na, et al. Research on the Emissions Characteristics of PM<sub>2.5</sub> from Coal-fired Boiler[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2014, 45(6): 712-717. (in Chinese).