

# 燃煤电厂可吸入颗粒物中痕量元素的排放规律研究

李超, 李兴华, 赵瑜, 段雷

(清华大学环境科学与工程系, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

**摘要:** 在2个燃煤电厂除尘器入口和出口处利用荷电低压捕集器(ELPI)和稀释采样系统, 对烟气中的可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)进行现场采样, 对其中的痕量元素的粒径分布、富集机理和排放因子进行了研究。电厂除尘器前后PM<sub>10</sub>中痕量元素的质量粒径分布, 与PM<sub>10</sub>质量浓度粒径分布相似, 大多呈现双模态。初步推测所测痕量元素在亚微米颗粒上的富集过程由异相化学反应控制, 而在粗颗粒上的富集则可能由异相凝结或化学反应两种机制控制。相对富集因子的计算结果显示, 除了Mn在PM<sub>10</sub>中呈亏损趋势外, 其他元素在亚微米颗粒物中均有富集趋势。由于电除尘器对0.1~1 μm粒径范围内的颗粒物去除效率较低, 其对PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>中多数元素的去除效率均低于相应的除尘效率。除尘器后PM<sub>10</sub>中各元素的排放因子差别较大, 其排放总量及导致的环境效应值得关注。

**关键词:** 环境科学; 排放特征; 痕量元素; 可吸入颗粒物; 燃煤电厂; 富集; 粒径分布; 排放因子

中图分类号: X513

文献标识码: A

文章编号: 1673-7180(2008)05-0334-7

## Study on emission characteristics of trace elements in PM<sub>10</sub> from coal-fired power plant

LI Chao, LI Xinghua, ZHAO Yu, DUAN Lei

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing 100084)

**Abstract:** Through ELPI (Electrical Low-Pressure Impactor) and dilution sampling system, the mass size distribution, enrichment mechanism, and emission factor of trace elements in PM<sub>10</sub> was studied experimentally at the inlet and outlet of electrostatic precipitator (ESP) at two pulverized coal-fired boilers. Results showed that a bimodal mass size distribution of trace elements occurred, similar as that of PM<sub>10</sub>. It was presumed that the enrichment of trace elements in submicron mode should be controlled by heterogeneous chemical reaction, while the enrichment in supermicron mode by either chemical reaction or heterogeneous coagulation. According to the relative enrichment factors calculated, all studied elements showed enrichment trend in submicron mode except that Mn showed exhaustion trend in PM<sub>10</sub>. Since the removal efficiency of ESP is low in the particulate size range of

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB211601)

**作者简介:** 李超(1982-), 男, 硕士研究生

**通信联系人:** 段雷, 副教授, lduan@tsinghua.edu.cn

0.1-1  $\mu\text{m}$ , the removal efficiency of most trace elements is lower than that of particulate in  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ , and  $\text{PM}_{10}$ . Although the emission factors of trace elements varied much after ESP, the total emission of trace elements may be large and the environmental impacts should be much concerned.

**Key words:** environmental science; emission characteristics; trace element;  $\text{PM}_{10}$ ; coal-fired power plant; enrichment; particle size distribution; emission factor

可吸入颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )已成为突出的大气污染问题,受到国内外研究者的高度重视<sup>[1-4]</sup>。燃煤电厂是我国环境大气中  $\text{PM}_{10}$  的主要来源之一<sup>[5]</sup>。安装了除尘系统的燃煤电厂排放颗粒物的空气动力学直径集中在 0.1~10  $\mu\text{m}$  范围<sup>[1,6]</sup>,属于  $\text{PM}_{10}$  的范围。

煤是一种组成复杂的混合物,几乎包含了所有出现于元素周期表中的元素<sup>[7]</sup>。其中痕量元素(含量低于 100  $\mu\text{g/g}$ ,如 As、Cr、Pb、Hg 和 Sb 等)在煤燃烧后将有一部分随颗粒物排放,从而可能导致严重的环境污染<sup>[8-10]</sup>。近年来,我国关于煤燃烧产物中痕量元素含量与富集的研究也迅速开展<sup>[11-13]</sup>,但现场测试结果很少<sup>[14]</sup>。本研究利用荷电低压捕集器(ELPI)和稀释采样系统,对 2 个燃煤电厂除尘器前后烟气中的  $\text{PM}_{10}$  进行现场采样,对其中痕量元素的粒径分布、富集规律和排放因子进行了研究,以期为我国  $\text{PM}_{10}$  的排放控制提供依据。

从元素毒性及对环境 and 人体健康的影响考虑,

目前关注比较多的是美国清洁空气法(CAA)和资源保护与回收法(RCRA)中规定的元素,如 As、Be、Cd、Co、Cr、Hg、Ni、Mn、Pb、Sc 以及 Se 等<sup>[2]</sup>。而煤燃烧排放的特征元素是 Se、As、Cr、Co、Cu 和 Al<sup>[2]</sup>。综合以上两方面因素,本研究重点选择了以下痕量元素进行研究: Pb、Se、Mn、Cr、V、Ni、In 和 Sn。此外,还考虑了 Al 和 Fe 等地壳元素,以进行比较。

## 1 材料与方法

### 1.1 测试对象

在 2 个燃煤电厂进行烟气中  $\text{PM}_{10}$  排放的测试。测试期间,电厂生产设备均处于正常运行状态,锅炉负荷、燃用燃料及燃烧工况基本保持不变,如表 1 所示。燃煤的工业分析和元素分析结果见表 2。

表 1 各电厂实验工况

Tab. 1 Operating parameters during test run period

电厂序号	锅炉类型	发电量/MW	实验负荷/%	额定蒸汽量/t·h	除尘器	燃料
1	煤粉炉	200	85	670	静电除尘器	烟煤(大同煤)
2	煤粉炉	50	85	120	静电除尘器	褐煤

表 2 煤质工业分析及元素分析结果

Tab. 2 Proximate analysis and ultimate analysis result of coal

电厂序号	燃料	基碳/%	基氧/%	基氮/%	基氢/%	灰分/%	挥发分/%	硫分/%	低位热值/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
1	大同煤	51.44	-	-	-	32.65	25.17	1.01	20 100
2	褐煤	27.94	9.38	0.46	2.50	35.93	23.12	0.30	13 711

### 1.2 采样系统

采样系统主要由 ELPI (芬兰 Dekati 公司) 和稀释系统组成。该系统的详细描述参见文献[6]。其中 ELPI 测定大约 0.03~10  $\mu\text{m}$  粒径范围内分 12 级的颗粒物粒径分布<sup>[6]</sup>。采样点分别设在各电厂除尘器的入口和出口烟道,分别代表无控状态下的锅炉排放及经电除尘器控制后的实际排放。

### 1.3 分析测试

使用 Teflon 膜对颗粒物中元素进行采样,称重获得  $\text{PM}_{10}$  的质量粒径分布。颗粒物经微波消解后使用 Thermo 公司的 IRIS Intrepid II XSP 型 ICP-OES 测定其中的元素含量。

### 1.4 元素富集机理与富集因子

影响煤中痕量元素在颗粒物上分布的主要因素

是异相转化, 包括高温下的化学反应和低温下的物理凝结和凝聚等。一些学者根据痕量元素含量与颗粒粒径的关系, 提出了如下的富集模型<sup>[15-17]</sup>:

$$CE = k_1 + k_2 d_p^n \quad (1)$$

式中, CE 为痕量元素在粒径为  $d_p$  的颗粒上的质量分数,  $\mu\text{g/g}$ ;  $k_1, k_2$  为系数;  $n$  为浓度分布常数。不同的指数  $n$  反映不同的痕量元素富集机理, 如表 3 所示。其中  $K_n$  是努森(Kundsen)数, 即  $d_p/\lambda$ ,  $\lambda$  是分

子平均自由程。  $K_n \gg 1$  和  $K_n \ll 1$  分别代表自由分子区域和连续区域。分子平均自由程在环境空气状况下约为  $0.2 \mu\text{m}$ , 在燃烧状况下约为  $1.0 \mu\text{m}$ 。由此可知, 不同粒径范围颗粒物上痕量元素的富集机理可能有所不同。因此, 研究痕量元素富集机理时应按亚微米颗粒( $<1 \mu\text{m}$ )和粗颗粒( $>1 \mu\text{m}$ ) 2 种范围分别讨论。

表 3 不同富集模型的参数<sup>[15]</sup>

Tab. 3 Parameters of different enrichment model

富集控制机理	适用范围	指数值
外部扩散 (异相凝结)	$K_n \gg 1$	-1
外部扩散 (异相凝结)	$K_n \ll 1$	-2
外部表面动力学 (异相化学反应)	所有粒径	-1
内部表面动力学 (矿物融合和聚结)	所有粒径	0

为了比较痕量元素在不同粒径颗粒上的富集程度, 还可计算相对  $\text{PM}_{10}$  的富集因子<sup>[18]</sup>:

$$\text{REF}_i = \frac{c_{fi}}{c_i} \quad (2)$$

式中,  $\text{REF}_i$  为组分  $i$  的相对富集因子;  $c_i$  为组分  $i$  在  $\text{PM}_{10}$  中的平均含量,  $\mu\text{g/g}$ ;  $c_{fi}$  为组分  $i$  在不同粒径的飞灰中的含量,  $\mu\text{g/g}$ 。

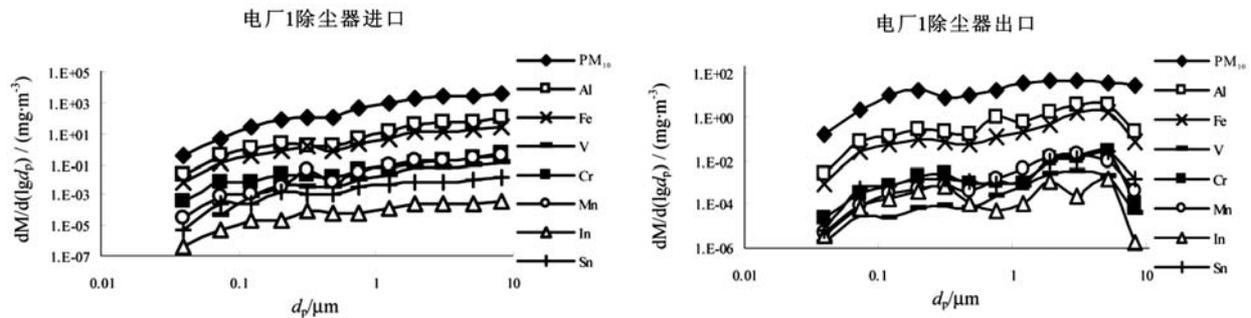
## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{PM}_{10}$ 中元素的粒径分布

各电厂除尘器前后  $\text{PM}_{10}$  及其中元素的质量粒径分布如图 1 所示。由图可知, 各电厂除尘器前后  $\text{PM}_{10}$

的质量浓度粒径分布相似, 都呈双峰分布: 亚微米模态的峰值出现在  $0.2\sim 0.4 \mu\text{m}$  粒径范围内, 而粗颗粒模态的峰值在  $>10 \mu\text{m}$  (除尘器前) 或者  $2.0\sim 4.0 \mu\text{m}$  (除尘器后)。经过除尘器后粗颗粒模态的平均直径向小粒径偏移, 是因为大部分粗颗粒能被除尘器所捕集。上述结果与相关报道<sup>[6,19]</sup>是一致的。

从图 1 中还可看出,  $\text{PM}_{10}$  中元素的质量粒径分布也大多显示双模态。其中亚微米模态的峰值粒径稍小于  $\text{PM}_{10}$  的峰值粒径。痕量元素在  $\text{PM}_1$  和  $\text{PM}_{2.5}$  中的比例明显高于其在  $\text{PM}_{10}$  中的比例, 表明挥发性痕量元素在亚微米区间存在较强的富集作用。



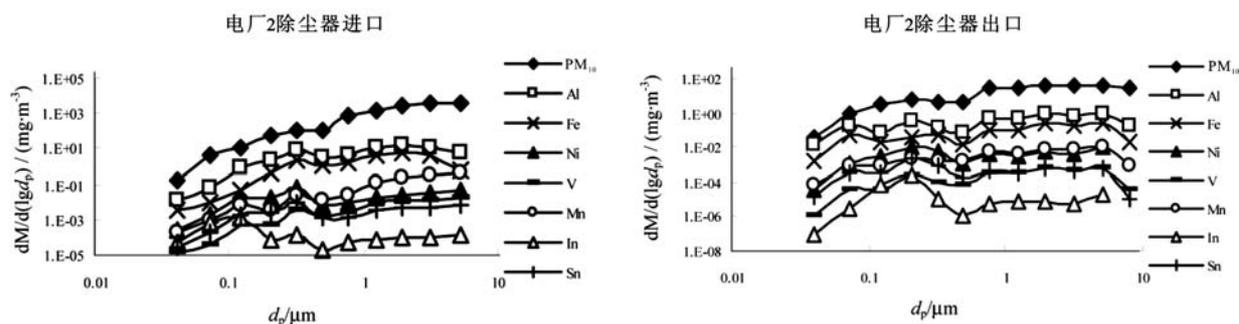


图1 电除尘器前后 PM<sub>10</sub> 中元素的质量粒径分布

Fig.1 Mass size distribution of trace element in PM<sub>10</sub> before and after ESP

表4 元素富集模型拟合的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficient of element enrichment model fitted

电厂序号元素	亚微米(<1μm)		粗颗粒(1~10 μm)		PM <sub>10</sub> (<10 μm)	
	<i>n</i> =-1	<i>n</i> =-1	<i>n</i> =-1	<i>n</i> =-2	<i>n</i> =-1	<i>n</i> =-1
1 Pb	0.269 8	0.146 9	0.041 9	0.091 3		
	Se	0.073 4	0.778 4	0.661 2	0.262 4	
	Ni	0.446 1	0.571 8	0.424 2	0.572 6	
	V	0.314 6	0.693 3	0.572 2	0.009 7	
	Cr	0.845 4	0.677 5	0.536 9	0.883 0	
	Mn	0.108 4	0.051 1	0.069 9	0.207 2	
	In	0.642 8	0.859 2	0.926 8	0.847 7	
	Sn	0.315 4	0.232 0	0.354 0	0.903 2	
2 Pb	0.870 5	0.888 2	0.835 6	0.876 2		
	Ni	0.783 1	0.439 2	0.581 1	0.843 4	
	V	0.725 1	0.792 2	0.884 6	0.794 9	
	Mn	0.852 6	0.150 3	0.315 9	0.879 2	
	In	0.938 6	0.729 5	0.833 8	0.949 8	
	Sn	0.684 1	0.753 7	0.852 8	0.776 9	

## 2.2 PM<sub>10</sub> 中痕量元素的富集机理

根据表 2 总结的痕量元素富集机理, 分为 4 种情况对发生富集的元素分别进行拟合: 对整个 PM<sub>10</sub> 粒径范围(<10 μm)进行 *n*=-1 拟合; 对亚微米颗粒(<1 μm)进行 *n*=-1 拟合; 对粗颗粒(1~10 μm)分别进行 *n*=-1 和 *n*=-2 两种情况的拟合。各电厂产生 PM<sub>10</sub> 中痕量元素含量与粒径的模型拟合结果列于表 4。分析拟合结果, 以出现频率最大的机理作为该元素在 PM<sub>10</sub> 上的可能富集机理, 若两种机理出现频率相当, 则表明该元素的富集可能是两种机理的共同

作用。由于所测电厂较少, 一些初步结果列于表 5。

由表 4 可知, 并非所有元素在每个电厂均显示出较好的规律性, 同时一些元素在不同电厂拟合的机理也有所不同, 导致这种差异的可能因素目前不得而知。根据表 5, 所测痕量元素在亚微米颗粒上的富集机制均由异相化学反应控制, 而在粗颗粒上的富集机制则有所不同: Cr、Mn 和 Sn 仍为异相化学反应控制, Ni 和 In 由异相凝结和化学反应两种机制同时控制, 而 V 和 Se 由异相凝结控制。

表5 痕量元素在 PM<sub>10</sub> 上的可能富集机理

Tab. 5 Possible enrichment mechanism of trace element in PM<sub>10</sub>

元素	亚微米颗粒 (<1 μm)	粗颗粒 (1~10 μm)
Se	-	异相凝结
Ni	异相化学反应	异相凝结 + 化学反应
V	异相化学反应	异相凝结
Cr	异相化学反应	异相化学反应
Mn	异相化学反应	异相化学反应
In	异相化学反应	异相凝结 + 化学反应
Sn	异相化学反应	异相化学反应

2.3 PM<sub>10</sub> 中痕量元素的相对富集因子

利用式(2)计算除尘设施前后痕量元素在 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>5</sub> 上的相对富集因子, 结果列于表 6。总体上看, 除尘器前 Pb、Se、Ni、V、Cr、In 和 Sn 等元素在 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>5</sub> 上的相对富集因子随颗粒

物粒径的减小而增大, 表明它们在亚微米颗粒物中有富集趋势。相对而言, Ni、In 和 Sn 的富集程度较高。但是, Mn 的相对富集因子随颗粒物粒径的增大而增大, 在 PM<sub>10</sub> 中可能呈亏损趋势。

表6 除尘器前后元素在 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>5</sub> 上的相对富集因子Tab. 6 Relative enrichment factor of trace element in PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>5</sub> before and after ESP

元素	电厂	除尘前			除尘后		
		PM <sub>1</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>5</sub>	PM <sub>1</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>5</sub>
Pb	1	1.33	1.07	0.96	0.67	0.45	1.08
	2	1.36	1.64	1.22	1.36	1.64	1.22
Se	1	2.18	0.78	0.69	2.99	1.41	1.10
	2	-	-	-	-	-	-
Ni	1	2.54	1.09	0.91	0.26	0.75	1.12
	2	6.14	1.59	1.13	2.41	1.29	1.06
V	1	1.18	0.94	0.88	0.42	1.28	1.17
	2	1.88	1.16	1.02	1.37	1.18	1.07
Cr	1	1.68	0.82	0.74	0.51	0.56	0.76
	2	-	-	-	-	-	-
Mn	1	0.97	1.07	1.37	0.39	1.21	1.10
	2	0.89	0.94	0.95	1.34	1.09	1.03
In	1	3.37	1.51	1.19	1.50	1.14	0.91
	2	11.42	2.22	1.36	4.24	1.76	1.31
Sn	1	2.73	1.31	1.05	0.48	0.56	0.73
	2	5.72	1.61	1.15	3.31	1.59	1.25

与除尘器前有所不同, 除尘器后多数元素在 PM<sub>1</sub> 中的相对富集因子有所下降, 而在 PM<sub>5</sub> 中保持不变或者略有升高。导致这些变化的主要原因是除尘器对各粒径区间颗粒的不同分级去除效率。一般而言, 电除尘器的最低分级效率出现在

0.1~1 μm 粒径范围内<sup>[6]</sup>, 因此除尘器后这个粒径段的颗粒物所占比例有所增加。

2.4 除尘器对 PM<sub>10</sub> 中痕量元素的去除效率

由于痕量元素的不同存在形态以及在不同粒径颗粒物的非均匀分布(富集或亏损), 除尘器对不

同元素的去除效率并不相同。本研究测得各电厂除尘器对  $PM_1$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  及其中痕量元素的去除效率，结果列于表 7。表中还给出了除尘器后各痕量

元素的排放因子（按消耗单位质量燃料释放的污染量计）。

表 7 除尘设施对各元素的分级去除效果和  $PM_{10}$  中痕量元素的排放因子

Tab. 7 Grade efficiency of trace element by ESP and emission factor of trace element in  $PM_{10}$

电厂序号	元素	去除效率/%			排放因子 <sup>1)</sup> / $mg \cdot t^{-1}$		
		$PM_1$	$PM_{2.5}$	$PM_{10}$	$PM_1$	$PM_{2.5}$	$PM_{10}$
1	Pb	94.2	97.8	97.3	1.08	1.84	7.96
	Se	67.6	71.0	72.2	3.30	3.65	4.75
	V	97.6	95.8	98.4	0.39	2.70	6.88
	Cr	93.2	93.1	94.7	5.17	12.6	46.0
	Mn	96.0	92.8	96.7	2.34	16.5	42.5
	In	50.2	62.1	73.6	1.07	1.86	3.14
	Sn	25.4	59.6	90.0	4.45	11.3	41.1
	颗粒物	92.1	96.5	98.1	46.0 <sup>1)</sup>	106 <sup>1)</sup>	196 <sup>1)</sup>
2	Pb	44.6	59.1	77.2	12.5	32.5	37.9
	Ni	76.1	77.6	78.6	90.2	120	181
	V	89.9	93.6	95.2	2.99	6.36	10.6
	Mn	83.9	94.3	96.3	42.4	84.9	154
	In	86.4	86.7	87.1	1.27	1.32	1.41
	Sn	71.5	77.7	82.7	15.7	18.9	22.6
	颗粒物	95.4	97.9	98.8	161 <sup>1)</sup>	408 <sup>1)</sup>	791 <sup>1)</sup>

1) 颗粒物的排放因子单位为 g/t

由表 7 可知，除尘器对不同粒径颗粒中元素的去除规律与对颗粒物的去除规律相似，即对  $PM_1$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  中元素的去除效率依次增大，但是在同一粒径区间内对颗粒物及其中元素的去除效率有所不同。由于除尘器对颗粒物的最低去除率出现在  $0.1 \sim 1 \mu m$  区间内，因此除尘器对在亚微米颗粒，尤其是超细颗粒物中明显富集的痕量元素，如 Se、Ni、In 和 Sn 等，其去除效率低于总除尘效率，对无明显富集趋势的元素的去除率和颗粒物的总去除效率基本一致，而个别有亏损趋势的元素（如 Mn）去除率则略大于总去除效率。除尘器后  $PM_{10}$  中各元素的排放因子差别较大，其中排放因子较大的元素有 Ni、Mn、Cr、Sn 和 Pb 等。

### 3 结论

(1) 利用 ELPI 和稀释采样系统，获得了电厂除尘器前后  $PM_{10}$  中元素的质量粒径分布，它与  $PM_{10}$  质量浓度粒径分布相似，大多呈现双模态。其中亚

微米模态的峰值出现在粒径  $0.2 \mu m$  左右，稍小于  $PM_{10}$  的峰值粒径。同时，痕量元素在  $PM_1$  和  $PM_{2.5}$  中的比例明显高于其在  $PM_{10}$  中的比例，表明它们在亚微米区间存在较强的富集作用。

(2) 利用实测数据对痕量元素的富集模型进行了参数拟合，初步推测了各元素在不同粒径颗粒物上的富集控制机理，并计算了相对富集因子。但是，由于测试电厂较少，结果存在较大的不确定性。

(3) 由于痕量元素在细颗粒上的富集，同时电除尘器对  $0.1 \sim 1 \mu m$  粒径范围内的颗粒物去除效率较低，使得除尘器对  $PM_1$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  中元素的去除效率依次增大。除尘器对明显富集元素的去除率低于其除尘效率。

(4) 由于耗煤量大，同时现有除尘设备的去除效率较低，电厂排放的痕量元素及其环境影响值得关注。

### 【参考文献】(References)

[1] Sloss L L, Smith I M.  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ : an international

- perspective[J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, 65-66: 127~141.
- [2] Morawska L, Zhang J F. Combustion sources of particles: health relevance and source signatures[J]. *Chemosphere*, 2002, 49: 1045~1058.
- [3] Horvath H. Size segregated light absorption coefficient of the atmospheric aerosol[J]. *Atmospheric Environment*, 1993, 27A: 317~384.
- [4] Bergin M H, Cass G R, Xu J, et al. Aerosol radioactive, physical and chemical properties in Beijing during June, 1999[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106D: 17969~17980.
- [5] 张强, Klimont Z, Streets D G, 等. 中国人为源颗粒物排放模型及2001年排放清单估算[J]. *自然科学进展*, 2006, 12(2): 223~231.  
ZHANG Q, Klimont Z, Streets D G, et al. Emission model of anthropogenic PM and estimation of emission inventory in 2001 in China[J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 12(2): 223~231. (in Chinese)
- [6] 易红宏, 郝吉明, 段雷, 等. 电厂除尘设施对PM<sub>10</sub>排放特征影响研究[J]. *环境科学*, 2006, 27(10): 1921~1927.  
YI Honghong, HAO Jiming, DUAN Lei, et al. Influence of dust catchers on PM<sub>10</sub> emission characteristics of power plants[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(10): 1921~1927. (in Chinese)
- [7] Raask E. The mode of occurrence and concentration of trace elements in coal[J]. *Fuel*, 1985, 64(1): 97~118.
- [8] Xu M H, Yan R, Zheng C G, et al. Status of trace element emission in a coal combustion process: a review[J]. *Fuel Processing Technology*, 2003, 85: 215~237.
- [9] Sandelin K, Backman R. Trace elements in two pulverized coal-fired power stations[J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35(5): 826~834.
- [10] Nraigu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals[J]. *Nature*, 1988, 333: 134~139.
- [11] 王起超, 邵庆春, 周朝华, 等. 不同粒度飞灰中16种微量元素的含量分布[J]. *环境污染与防治*, 1998, 20(5): 37~41.  
WANG Qichao, SHAO Qingchun, ZHOU Chaohua, et al. Grain size distribution of 16 trace elements in fly ash of burning coal[J]. *Environmental Pollution and Control*, 1998, 20(5): 37~41. (in Chinese)
- [12] 欧阳中华, 曾汉才, 陆晓华, 等. 煤燃烧中产生的细微粒子中重金属元素富集性的实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 1996, 2(2): 111~120.  
OUYANG Zhonghua, ZENG Hancan, LU Xiaohua, et al. The investigation of the enrichment of heavy metals in fine particles in coal combustion[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 1996, 2(2): 111~120. (in Chinese)
- [13] 韩军, 徐明厚, 程俊峰, 等. 燃煤锅炉中痕量元素排放因子的研究[J]. *工程热物理学报*, 2002, 23(6): 770~772.  
HAN Jun, XU Minghou, CHENG Jimfeng, et al. Study of trace element emission factor in coal-fired boilers[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2002, 23(6): 770~772. (in Chinese)
- [14] 岳勇, 姚强, 陈雷, 等. 燃煤锅炉颗粒物粒径分布和痕量元素富集特性实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(18): 74~79.  
YUE Yong, YAO Qiang, CHEN Lei, et al. Experimental study on characteristics of particulate matter size distribution and trace elements enrichment in emissions from a pulverized coal-fired boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(18): 74~79. (in Chinese)
- [15] Linak W P, Wendt J O L. Trace element transformation mechanisms during coal combustion[J]. *Fuel processing technology*, 1994, 39: 173~198.
- [16] Helble J J. Trace element behavior during coal combustion: results of a laboratory study[J]. *Fuel Processing Technology*, 1994, 65-66: 311~341.
- [17] Senior C L, Zeng T, Che J. Distribution of trace elements in selected pulverized coals as a function of particle size and density[J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, 63: 215~241.
- [18] Meij R. Trace element behaviors in coal-fired power plants[J]. *Fuel processing technology*, 1994, 39: 199~217.
- [19] 郭欣, 陈丹, 郑楚光, 等. 燃煤锅炉可吸入颗粒物排放规律研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(3): 587~592.  
GUO Xin, CHEN Dan, ZHENG Chuguang, et al. Experimental study on emission characteristics of PM<sub>10</sub> in coal-fired boilers[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(3): 587~592. (in Chinese)