

# 中国燃煤汞排放清单的初步建立

蒋靖坤<sup>1</sup>, 郝吉明<sup>1\*</sup>, 吴焯<sup>2</sup>, David G. Streets<sup>2</sup>, 段雷<sup>1</sup>, 田贺忠<sup>1</sup>

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. Argonne National Laboratory, 9700 S. Cass Ave., Argonne, Illinois 60439, USA)

**摘要:**建立中国分省燃煤汞排放清单,对于研究汞的大气化学转化、迁移和沉降,制定中国汞污染控制对策具有重要意义。本研究按经济部门、燃料类型、燃烧方式和污染控制技术将排放源划分为 65 种不同类型,根据各类型的煤炭消费量、燃料汞含量和汞排放因子计算汞排放量,最终建立了分省燃煤汞排放清单。用 2 组原煤汞含量数据资料计算的 2000 年中国燃煤大气汞排放量分别为 161.6 t 和 219.5 t,其中绝大部分汞排放来自工业、电力和生活消费,分别占 46%、35%和 14%。 $Hg^0$ 、 $Hg^{2+}$ 和  $Hg_p$  在中国燃煤大气汞排放中所占的比例分别为 16%、61%和 23%。中国燃煤汞排放在各地区间有较大差异,排放量较大的省份有河南、山西、河北、辽宁和江苏,均超过 10t/a。

**关键词:**汞;燃煤;排放清单;排放因子;中国

中图分类号: X11 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)02-0034-06

## Development of Mercury Emission Inventory from Coal Combustion in China

JIANG Jing-kun<sup>1</sup>, HAO Ji-ming<sup>1</sup>, WU Ye<sup>2</sup>, David G. Streets<sup>2</sup>, DUAN Lei<sup>1</sup>, TIAN He-zhong<sup>1</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Argonne National Laboratory, 9700 S. Cass Ave., Argonne, Illinois 60439, USA)

**Abstract:** Mercury emission inventory by province from coal combustion in China was developed by combining fuel consumption, mercury content in fuel and emission factors after combustion in this study. The study is intended to provide an understanding of mercury transformation, transportation and deposition in atmosphere, as well as propose measures to control mercury pollution in China. Mercury emission sources were classified into 65 categories by economic sectors, fuel types, boiler types and pollution control technologies. For two different data sets of mercury content in coal the total amounts of mercury released into atmosphere in 2000 in China were estimated at about 161.6 tons and 219.5 tons, respectively. The biggest three source sectors were industry, power plants, and residential use, contributing 46%, 35% and 14% of total mercury emissions, respectively. The shares of elemental mercury ( $Hg^0$ ), oxidized mercury ( $Hg^{2+}$ ) and particulate mercury ( $Hg_p$ ) were 16%, 61% and 23%, respectively. The spatial distribution of mercury emissions from coal combustion in China is not uniform. Henan, Shanxi, Hebei, Liaoning and Jiangsu contributed large amounts of mercury emissions, exceeding  $10t \cdot a^{-1}$ .

**Key words:** mercury; coal combustion; emission inventory; emission factors; China

近 10 年来,自从有研究发现北欧、北美内陆偏远地区无明显工业污染源的湖泊中,鱼体内汞浓度的升高来自于大气中汞的长距离传输和沉降,有关汞的排放、迁移、沉降以及控制便成为大气污染防治的一个新兴研究领域<sup>[1,2]</sup>。2002 年美国政府的“净化天空”计划书已经将汞和  $SO_2$ 、 $NO_x$  一道列为计划削减的大气污染物。

据初步估算,亚洲人为活动向大气排放的汞从 1990 年占全球排放量的 30% 增至 1995 年的 56%,这与亚洲煤炭消费量的增加有密切关系<sup>[3]</sup>。中国是煤炭消费大国,其燃煤汞排放已经引起广泛关注,一些学者先后估算了 20 世纪 90 年代前期中国的燃煤汞排放状况<sup>[3-5]</sup>,但计算方法有所欠缺<sup>[6,7]</sup>。为了更全面、准确地了解中国燃煤汞排放状况,本研究首先按经济部门、燃料类型、燃烧方式和污染控制技术对排放源进行分类,然后基于各省生产原煤汞含量和

各省间煤炭传输矩阵,确定各省消费煤炭的汞含量,结合各省区内各类排放源的煤炭消费量和排放因子,计算了 1995~2002 年间的汞排放量,进而给出中国各行业、各省区的汞排放清单。

### 1 研究方法

#### 1.1 计算方法

中国燃煤大气汞排放量计算公式<sup>[8]</sup>:

$$Q_{i,j}(t) = c_{i,j} M_{i,j} R_{i,j} (1 - P_{i,j}) \quad (1)$$

$$Q_i(t) = \sum_j Q_{i,j}(t) \quad (2)$$

$$Q_T(t) = \sum_i Q_i(t) \quad (3)$$

收稿日期: 2004-05-13; 修订日期: 2004-09-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB211600)

作者简介: 蒋靖坤(1980~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制。

\* 通讯联系人, E-mail: hjmrdn@tsinghua.edu.cn

式中,  $Q$  为大气汞排放量;  $c$  为燃料中汞含量;  $M$  为燃料消费量;  $R$  为燃料燃烧时汞的释放比例;  $P$  为烟气净化设施对烟气中汞的脱除率;  $T$  表示全国;  $t$  表示年份;  $i$  为省(自治区、直辖市);  $j$  为排放源类型.

### 1.2 研究范围和排放源类型

目前中国尚未对西藏做能源统计,故未计算其排放,香港、澳门特别行政区和台湾省暂未考虑,研究区域包括中国大陆 30 个省、自治区及直辖市.研究年份为 1995 ~ 2002 年,重点分析了 2000 年排放

表 1 中国燃煤汞排放因子

Table 1 Emission factors of mercury from coal combustion in China

经济部门	燃料类型 / 燃烧方式	污染控制技术	能源分配比例	释放比例/ %	脱除率/ %	形态分布因子		
						Hg <sup>0</sup>	Hg <sup>2+</sup>	Hg <sub>p</sub>
生活消费	原煤/传统炉灶	无	0.19	83	0	0.09	0.03	0.88
	原煤/加强型炉灶	无	0.41	83	0	0.09	0.03	0.88
	原煤/茶浴炉	无	0.40	83	0	0.09	0.03	0.88
	型煤/型煤炉	无	1.00	98	0	0.09	0.03	0.88
工业	原煤/层燃炉	湿式除尘器	0.29	83	6.5	0.2	0.78	0.02
	原煤/层燃炉	机械式除尘器	0.58	83	0.1	0.2	0.78	0.02
	原煤/层燃炉	无	0.04	83	0	0.09	0.03	0.88
	原煤/流化床	湿式除尘器	0.09	91	6.5	0.2	0.78	0.02
	原煤/炼焦炉	无	1.00	63	0	0.07	0.58	0.35
	洗精煤/炼焦炉	无	1.00	63	0	0.07	0.58	0.35
电厂	原煤/煤粉炉	电除尘器	0.86	99	30.6	0.2	0.78	0.02
	原煤/煤粉炉	湿式除尘器	0.06	99	6.5	0.2	0.78	0.02
	原煤/层燃炉	湿式除尘器	0.07	98	6.5	0.2	0.78	0.02
	原煤/层燃炉	机械式除尘器	0.01	98	0.1	0.2	0.78	0.02
其他	原煤/层燃炉	无	1.00	83	0	0.09	0.03	0.88
	洗精煤/层燃炉	无	1.00	83	0	0.09	0.03	0.88
	焦炭/层燃炉	无	1.00	83	0	0.09	0.03	0.88
	型煤/层燃炉	无	1.00	83	0	0.09	0.03	0.88

### 1.3 能源消费状况

各省区分行业、分燃料能源消费状况可由中国能源统计年鉴获得.根据中国农业统计资料、中国农村能源年鉴、中国电力企业联合会统计资料和中国机械工业年鉴等统计资料可确定各省区不同排放源类型的能源分配比例,即燃料在各行业内不同排放源之间的分配比例,进而可计算出各类排放源的能源消费量<sup>[9,10]</sup>.

### 1.4 各省间煤炭传输矩阵

省间煤炭流动会影响各省消费煤炭的汞含量,使之与生产煤炭的汞含量存在差异<sup>[6]</sup>.故研究各省间煤炭的流动,对于计算各省区燃煤汞排放量有重要意义.本研究根据国家煤矿安全监察局(原煤炭工业部)的统计资料和中国能源统计年鉴<sup>[9,10]</sup>,建立了各省间原煤、洗精煤和焦炭的传输矩阵,型煤在各省间基本无流动.

数据.

按经济部门、燃料类型、燃烧方式和污染控制技术对排放源进行分类.经济部门划分为工业、电力、生活消费,以及其他(含交通运输、建筑业、商业等)4 大类;燃料类型包括原煤、洗精煤、型煤和焦炭;燃烧方式划分为煤粉炉、层燃炉、流化床、旋风炉、型煤炉等 9 类;污染控制技术则包括电除尘器、湿式除尘器和机械式除尘器(包括旋风除尘器和重力沉降室等).如此得到 65 种不同的排放源,其中耗煤量较大的种类列于表 1<sup>[5,7,13~17]</sup>.

### 1.5 煤炭汞含量

原煤汞含量同成煤环境有密切关系,中国各省生产原煤的汞含量如表 2 所示,分 2 组数据.组 1 的数据来自于美国地质调查局(USGS),USGS 在中国各大中型煤矿共采集分析了 331 个煤样;组 2 收集了文献中各省区原煤汞含量数据<sup>[5,7,11]</sup>,约 1500 个煤样.中国多数煤中汞处于  $0.01 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  到  $1.0 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  之间,从少数煤样品中检测到汞达  $2 \sim 6 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,USGS 测量的数据普遍低于文献中的数据.结合 2000 年各省煤炭产量,用组 1 和组 2 数据计算的中国煤炭平均汞含量分别为  $0.15 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.20 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,均高于世界原煤的平均汞含量  $0.13 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[12]</sup>.本研究将按 2 组数据分别计算中国燃煤汞排放量.

根据各省生产原煤汞含量和各省间原煤传输矩阵,可计算各省消费原煤的汞含量,表 2 给出了

表 2 2000 年各省生产和消费原煤汞含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Table 2 Mercury content in produced and consumed coal of different provinces in 2000/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 

省区	组 1		组 2		省区	组 1		组 2	
	生产原煤	消费原煤	生产原煤	消费原煤		生产原煤	消费原煤	生产原煤	消费原煤
北京	0.54	0.25	0.34	0.22	河南	0.21	0.21	0.26	0.26
天津 <sup>1)</sup>		0.16		0.20	湖北	0.16	0.15	0.16 <sup>3)</sup>	0.19
河北	0.14	0.15	0.13	0.15	湖南	0.14	0.14	0.07	0.09
山西	0.15	0.15	0.19	0.19	广东	0.05	0.14	0.25	0.26
内蒙古	0.15	0.15	0.28	0.27	广西	0.33	0.24	0.28	0.36
吉林	0.07	0.09	0.33	0.28	海南	0.05 <sup>4)</sup>	0.14	0.25 <sup>4)</sup>	0.19
辽宁	0.18	0.16	0.17	0.17	贵州	0.2	0.20	0.52	0.52
黑龙江	0.06	0.07	0.12	0.13	云南	0.13	0.13	0.36	0.36
安徽	0.19	0.18	0.28	0.25	四川 <sup>5)</sup>	0.09	0.09	0.18	0.18
福建	0.07	0.08	0.08	0.09	甘肃	0.05	0.05	0.05 <sup>3)</sup>	0.05
江苏	0.34	0.22	0.07	0.16	宁夏	0.22	0.22	0.22 <sup>3)</sup>	0.22
江西	0.27	0.26	0.16	0.17	青海	0.04	0.04	0.04 <sup>3)</sup>	0.04
浙江	0.35 <sup>2)</sup>	0.17	0.35 <sup>2)</sup>	0.23	陕西	0.13	0.13	0.1	0.10
上海 <sup>1)</sup>		0.16		0.21	新疆	0.02	0.02	0.03	0.03
山东	0.12	0.13	0.2	0.20					

1) 天津和上海不产原煤 2) 浙江大学研究报告(未发表) 3) 因无数据,采用组 1 数据 4) 该省无数据,因同广东省在同一聚煤区,采用广东省的数据 5) 包括重庆市.

2000 年各省消费原煤汞含量.研究表明,传统的洗煤方式能去除原煤中 30%左右的汞<sup>[13,15]</sup>.根据各省洗煤用原煤的汞含量、入洗原煤量和产出洗精煤量,可计算各省生产洗精煤的汞含量.再结合各省间洗精煤传输矩阵,可得出各省消费洗精煤的汞含量.同样根据各省生产型煤用原煤的汞含量、洗精煤的汞含量、投入原煤和洗精煤量、以及产出型煤量,计算出各省生产的型煤汞含量.型煤在各省间基本无流动,因此取各省消费型煤的汞含量同生产型煤的汞含量一致.炼焦过程中,进入焦炭的汞占洗精煤或原煤中总汞的 22%<sup>[5,14]</sup>,同理可计算各省生产和消费焦炭的汞含量.

### 1.6 汞的排放因子和形态分布

煤燃烧过程中,汞将经历复杂的物理和化学变化,最后大部分进入烟气中,小部分残留在底灰和熔渣中.综合本研究的部分实测数据和国内外研究机构的燃煤汞排放测试结果,燃烧时汞的释放比例取值如下:电力行业煤粉炉和层燃炉排入底灰和炉渣的汞比例分别为 1%和 2%<sup>[13,15]</sup>;工业及民用层燃炉和流化床锅炉排入底灰和炉渣的汞比例分别为 17%和 9%<sup>[5,16]</sup>;炼焦炉有 37%的汞进入焦炭和煤焦油等产品中<sup>[5,14]</sup>;民用型煤炉排入底灰和炉渣的汞比例为 2%;建筑业和商业等其他行业采用与工业及民用层燃炉同样的汞释放比例.烟气净化设施对烟气中汞的脱除率分别为:电除尘器,30.6%<sup>[5,13,15,17]</sup>;湿式除尘器,6.5%<sup>[13,17]</sup>;机械式

除尘器,0.1%<sup>[13,17]</sup>.如此得到各类排放源的汞释放比例(汞排放因子),如表 1 所示.

燃煤排入大气的汞可分为 3 种形态:气态元素汞( $\text{Hg}^0$ )、气态二价汞( $\text{Hg}^{2+}$ )和颗粒态汞( $\text{Hg}_p$ ).烟气中  $\text{Hg}^0$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 和  $\text{Hg}_p$ 的相对比例称为汞的形态分布.不同形态的汞在大气中的物理和化学特性差别很大.煤燃烧时,在通常的炉膛温度范围内,煤中的汞几乎全部以  $\text{Hg}^0$ 的形式进入烟气中.在烟气冷却过程中,部分  $\text{Hg}^0$ 同其它燃烧产物相互作用转化为  $\text{Hg}^{2+}$ 和  $\text{Hg}_p$ .故汞排放的形态分布同煤的特性、燃烧工况、烟气温度、烟气组成、飞灰特性和烟气净化设施有密切关系.本研究基于文献[13]的实测数据,计算了各类排放源的形态分布(见表 1).

## 2 结果与讨论

### 2.1 全国燃煤汞排放清单

按照公式(1)、(2)和(3)计算 2000 年中国燃煤汞排放量.采用组 1 数据,2000 年中国各行业燃煤共向大气排放 161.6t 汞,排入灰渣或洗选废液的汞为 61.2t.采用组 2 数据,2000 年中国燃煤排入大气中的汞量为 219.5t,排入灰渣或洗选废液的汞 82.7t.2 组数据的平均汞含量相差较大,致使燃煤大气汞排放量差额达 57.9t.已有研究表明中国煤的平均汞含量约为  $0.15\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,而其他研究者计算中国燃煤汞排放时采用的平均汞含量均大于  $0.20\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,以这些偏大的参数计算的排量必然

偏大<sup>[7]</sup>.2000 年中国燃煤排入大气的汞约有 16 % 的  $Hg^0$ ,61 % 的  $Hg^{2+}$  和 23 % 的  $Hg_p$ . $Hg^{2+}$  和  $Hg_p$  的大气停留时间只有几天, $Hg^0$  则可以在大气中停留 1 年以上.中国燃煤排放的大气汞主要是  $Hg^{2+}$  和  $Hg_p$ ,大气停留时间较短,不容易进行长距离传输.

图 1 为 1995 ~ 2002 年中国燃煤大气汞排放量变化图,2 组数据计算的结果均反映了相同的变化规律,即中国燃煤大气汞排放量并不是持续快速增加,排放量增长到 1996 年的峰值后开始出现一定幅度的回落,1999 年排放量降到几年来最低值后又开始增大.这种变化趋势同 1995 ~ 2002 年中国煤炭消费量变化趋势相吻合.

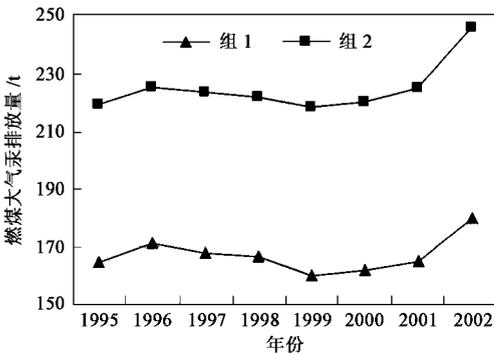


图 1 1995 ~ 2002 年中国燃煤大气汞排放量  
Fig.1 Mercury emissions from coal combustion in China, 1995 ~ 2002

1996 年中国煤炭消费量(各地区煤炭消费量的总和)增至 14.99 亿 t 后,受国内经济结构转变,能

源消费结构调整以及大力推行能源节约政策等诸多因素的影响,1997 ~ 1999 年中国煤炭消费量有所下降,1999 年中国煤炭消费量已降为 14.29 亿 t<sup>[9,10]</sup>,1999 年燃煤大气汞排放量比 1996 年减少了 5%.自 2000 年起,煤炭消费量开始回升,大气汞排放量也逐渐增大.2001 年煤炭消费量已超过 1996 年,达 15.19 亿 t<sup>[9,10]</sup>,但其燃煤大气汞排放量仍低于 1996 年,这主要是因为燃煤锅炉安装高效烟气净化装置的比例也在增加.2002 煤炭消费量较之 2001 年的增加量更是高达 1.38 亿 t<sup>[9,10]</sup>,而 2002 年燃煤大气汞排放量的增长率也高达 9%.

2.2 各省区燃煤汞排放清单

图 2 给出了 2000 年中国分省区燃煤汞排放量计算结果.由图 2 可见,中国燃煤大气汞排放量的地区分布极不平衡,不同省区间差异显著,主要集中在人口密集、工业集中和经济发展较快的中东部省区.这是由于不同省区间能源消费量及其结构的显著差异造成的.

采用 2 组原煤汞含量数据,燃煤大气汞排放量均超过  $10t \cdot a^{-1}$  的省区包括河南、山西、河北、辽宁和江苏,全部位于中东部地区.边远省区燃煤大气汞排放量则相对较小,海南、青海、新疆等边远省区的燃煤大气汞排放量还不及  $1t \cdot a^{-1}$ ,其他中部省区的大气汞排放量则大都介于  $1 \sim 10t \cdot a^{-1}$  之间.这种地域分布特征同中国  $SO_2$  和  $NO_x$  排放的地域分布特征非常相似<sup>[8]</sup>.

2 组数据中,贵州省的燃煤大气汞排放量差别

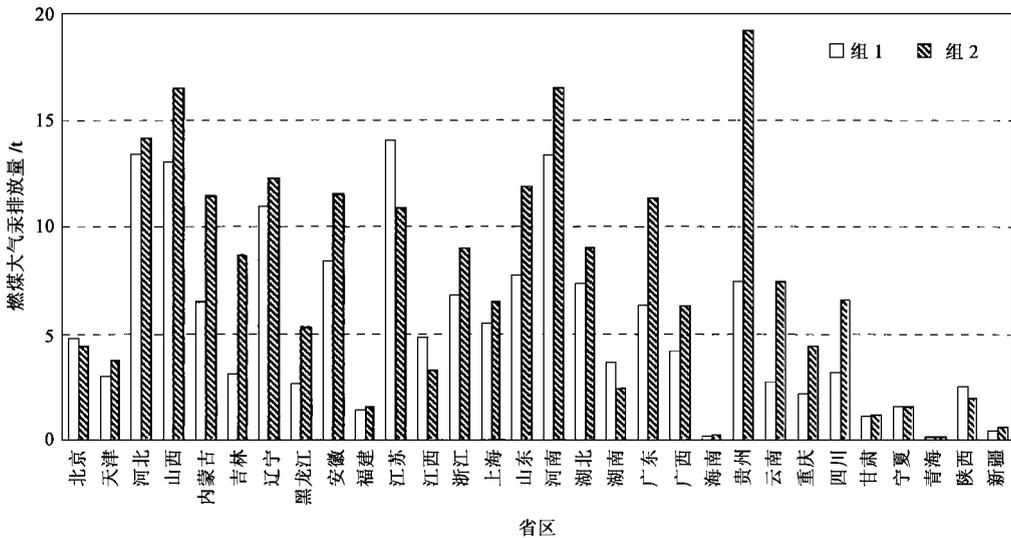


图 2 2000 年各省燃煤大气汞排放量

Fig.2 Provincial mercury emissions from coal combustion in 2000

最大,这主要因为 2 组数据中贵州省原煤汞含量差别显著,USGS 测量的贵州省原煤汞含量为  $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,接近全国的平均水平,而其他学者测量的数据显示贵州省原煤汞含量远高于全国平均水平,为  $0.52 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,这也导致其燃煤大气汞排放量位居全国之首.另外,山西、河南、广东、内蒙古、江苏和山东等省区用 2 组数据计算出的燃煤大气汞排放量差别也很明显.

### 2.3 各行业燃煤汞排放清单

如图 3 所示,各经济部门中工业燃煤大气汞排放量最高,占排放总量的 45%~46%;其次是电力部门和生活消费,所占比例分别为 33%~36%和 14%~15%;其他部门如交通运输、建筑业和商业等的贡献要小得多,总和仅占排放总量的 5%左右.这同各部门的煤炭消费和污染控制状况有密切关系.

工业部门是中国耗煤量最大的经济部门,虽然中国大部分工业锅炉都安装了除尘装置,但主要为湿式除尘器和机械式除尘器,这 2 类除尘器对烟气中汞的去除效率较低,所以工业部门燃煤大气汞排放量始终最高.中国生活消费年耗煤量大于 1.8 亿 t,且生活消费无任何污染控制措施,故其燃煤大气汞排放量所占比例较高,另外由于中国大部分家庭的厨房通风设施很差,燃煤大气汞排放很容易对居民健康造成严重影响.2000 年中国工业部门和生活消费耗煤量比 1996 年有所降低<sup>[10]</sup>,它们的大气汞排放量也有所减少.

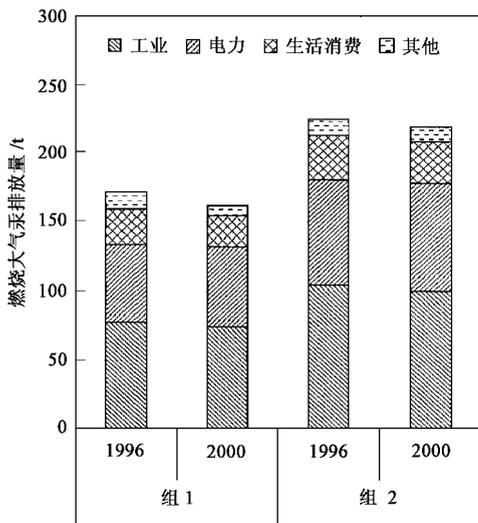


图 3 中国各行业燃煤大气汞排放量

Fig. 3 Mercury emissions from coal combustion by sectors in China

发电耗煤量占全国煤炭消费总量的 37.8%<sup>[10]</sup>,使得火电厂成为中国重要的燃煤大气汞排放源.20 世纪 70 年代以前,中国绝大部分火电厂均采用湿式除尘器和机械式除尘器.从 80 年代中期电除尘器的应用被纳入火电厂设计规范以来,电除尘器平均每年以约 4~5 个百分点的幅度增加.电除尘器对烟气中汞的脱除率比湿式除尘器和机械式除尘器高.故尽管 2000 年中国电力行业煤炭消费量比 1996 年有所增加,但电厂向大气排放的汞量却变化不大.这是因为电厂安装的烟气净化设施逐渐向汞脱除率较高的电除尘器发展,1996 年电厂安装电除尘器的比例为 63.3%,到 2000 年则已增加为 86.3%,电厂煤炭消费量的增加引起的汞排放增加被因改进净化装置而减少的汞排放所抵消.

### 2.4 中国和美国燃煤汞排放状况的比较

按组 2 的数据,2000 年中国工业和生活消费燃煤大气汞排放量分别为 100.4t 和 30.4t,美国这 2 个部门燃煤排入大气中的汞只有  $20.7 \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $0.5 \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ <sup>[17]</sup>,尽管组 1 的数据较低,2000 年中国这 2 个部门分别为 74.1t 和 22.4t,也远高于美国的排放水平.这是因为中国这 2 个部门的能源消费以煤炭为主,2000 年工业和生活消费耗煤量分别占全国煤炭消费总量的 45%和 13%<sup>[10]</sup>.而美国工业和生活消费的耗煤量较低,分别占总耗煤量的 11.5%和 0.2%<sup>[18]</sup>.因此,为有效控制大气汞污染,应鼓励这 2 个部门采用天然气等低污染的替代燃料,逐步改善以煤为主的能源结构.

表 3 为中国和美国电力行业燃煤汞排放对照表.美国煤炭使用主要集中在电力生产,其原煤在使用前大部分都要经过洗选处理,另外美国对电厂烟气净化程度要求较高,除安装高效的电除尘器或布袋除尘器降低烟尘排放量外,还有占总数 22%左右的电厂安装了烟气脱硫和脱硝装置<sup>[13]</sup>,这些污染控制措施都能减少燃煤过程的汞排放.中国电厂用原煤入洗比例很低,为 1%左右,且目前仅有少量电厂装有脱硫和脱硝设施.据统计,2000 年中国仅有约

表 3 中国和美国电力行业燃煤汞排放状况比较/t

Table 3 The comparison of mercury emissions from coal-fired electric utilities between China and United States /t

国家	原煤中的汞	排入大气的汞	洗煤去除	进入底灰	烟气净化去除
中国 组 1	81.2	57.7	0.7	0.9	21.9
中国 组 2(2000 年)	109.1	77.5	1.0	1.2	29.5
美国(1999 年) <sup>[13,19]</sup>	108.6	48	33.6	1.1	25.9

中国电力行业以煤炭为主要能源.2000 年火力

4 000 MW 机组安装了烟气脱硫系统,不及电站总装机容量容量的 1 %<sup>[9,10]</sup>.因此尽管中国电厂消费煤炭所含的汞量同美国相当或低于美国,但燃煤大气汞排放量却高于美国.

### 2.5 汞排放控制措施

通过与美国的对比,可知中国燃煤汞污染控制除了要逐步调整以煤为主的能源结构外,还应加强燃烧前和燃烧后的脱汞力度.

燃烧前增加原煤的入洗率.2000 年中国原煤入洗率仅为 16.6%,且洗选后的洗精煤主要用于炼焦<sup>[10]</sup>.因此,建议尽快提高中国原煤的入洗率,同时要改进洗选技术.原煤中的汞主要络合在矿物相和有机相中.传统的洗煤方式只能去除矿物相中的汞,特别是黄铁矿中的汞.研究表明,新的洗煤技术能同时去除矿物相和有机相中的汞,去除率为 40%~82%<sup>[13]</sup>.

燃烧后脱汞应改进现有的大气污染物控制设备,工业部门可以考虑增加布袋除尘器的使用比例,因为布袋除尘器对烟气中的汞脱除率较高,约为 58%<sup>[13,17]</sup>,而电力行业在增加电除尘器使用比例的同时,建议增加脱硫脱硝装置的使用比例.同时还应积极开发新的汞污染控制技术,如开发联合脱除污染物技术,在除尘、脱硫和脱硝的同时去除烟气中的汞.

### 3 结论

(1)用 USGS 测量数据和文献中数据计算的中国煤炭平均汞含量分别为  $0.15 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.20 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,均高于世界煤炭的平均汞含量  $0.13 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ .

(2)用 2 组数据计算 2000 年中国燃煤大气汞排放量分别为 161.6 t 和 219.5 t.绝大部分汞排放来自工业、电力和生活消费,分别占 46%、35% 和 14%,其他部门如交通运输、建筑业、商业等仅占总量的 5%. $\text{Hg}^0$ 、 $\text{Hg}^{2+}$  和  $\text{Hg}_p$  在燃煤大气汞排放中所占的比例分别为 16%、61% 和 23%.1995 年~2002 年中国燃煤大气汞排放量并不是随着经济发展持续增大,1997~1999 年有一定幅度的回落,自 2000 年起排放量又开始逐渐增加,同中国煤炭消费量变化趋势相吻合.

(3)中国燃煤汞排放地区分布很不平衡,排放量较大的省区包括河南、山西、河北、辽宁和江苏,2000 年燃煤大气汞排放量均在 10t 以上.两组数据中,贵州省的燃煤大气汞排放量差别最大.

(4)控制中国燃煤汞污染应逐步改善以煤为主

的能源结构;提高原煤入洗率,采用高效的煤炭洗选技术;改进现有的大气污染物控制设施,积极开发新的汞污染控制技术.

参考文献:

- [1] Slemr F, Brunke E G, Ebinghaus R, *et al.* Worldwide trend of atmospheric mercury since 1977 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(10): 1516.
- [2] Thomas D B, Dennis N S, Richard A H, *et al.* Mercury measurement and its control: What we know, have learned, and need to further investigate [J]. *Air & Waste Manage. Assoc.*, 1999, **6**: 1~99.
- [3] Pacyna E G, Pacyna J M. Global emissions of mercury from anthropogenic sources in 1995 [J]. *Water, Air & Soil Pollut.*, 2002, **137**: 149~165.
- [4] 冯新斌,洪业汤.中国燃煤向大气排放汞量的估算[J]. *煤矿环境保护*, 1996, **10**(3): 10~13.
- [5] 王起超,沈文国,麻状伟.中国燃煤汞排放量估算[J]. *中国环境科学*, 1999, **19**(4): 318~321.
- [6] Feng Xinbin, Jonas S, Oliver L, *et al.* Occurrence, emissions and deposition of mercury during coal combustion in the province Guizhou, China [J]. *Water, Air & Soil Pollut.*, 2002, **139**: 311~324.
- [7] 黄文辉,杨宜春.中国煤中的汞[J]. *中国煤田地址*, 2002, **14**(增刊): 37~40.
- [8] Hao Jiming, Tian Hezhong, Lu Yongqi. Emission inventories of  $\text{NO}_x$  from commercial energy consumption in China, 1995~1998 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 552~560.
- [9] 国家统计局工业交通统计司.中国能源统计年鉴(1997~1999)[M].北京:中国统计出版社,2001.
- [10] 国家统计局工业交通统计司,国家发展和改革委员会能源局.中国能源统计年鉴(2000~2002)[M].北京:中国统计出版社,2004.
- [11] 张军营,任德贻,许德伟,等.煤中汞及其对环境的影响[J]. *环境科学进展*, 1999, **7**(3): 100~104.
- [12] 赵继尧,唐修义,黄文辉.中国煤中微量元素的丰度[J]. *中国煤田地质*, 2002, **14**(增刊): 50~13.
- [13] US Environmental Protection Agency. Control of mercury emissions from coal-fired electric utility boilers: interim report. EPA-600/R-01-109. Washington DC: USEPA, 2002.
- [14] 洪冰,朱咏焯,冯新斌,等.城市管道煤气生产中汞的分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2002, **25**(5): 3~5.
- [15] 朱珍锦,薛来,谈仪,等.300 MW 煤粉锅炉燃烧产物中汞的分布特征研究[J]. *动力工程*, 2002, **22**: 1594~1597.
- [16] 王起超,马如龙.煤及其灰渣中的汞[J]. *中国环境科学*, 1997, **17**(1): 76~79.
- [17] US Environmental Protection Agency. Mercury study report to congress. EPA-452/R-97-003. Washington DC: USEPA, 1997.
- [18] US Department of Energy. State energy data report 1996, DOE/EIA-0214(96). Washington DC: USDOE, 1999.
- [19] US Environmental Protection Agency. Characterization and management of residues from coal-fired power plants. EPA-600/R-02-083. Washington DC: USEPA, 2002.