

中国非燃煤大气汞排放量估算

王书肖¹, 刘敏¹, 蒋靖坤¹, 郝吉明¹, 吴烨², David G. Streets²

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

摘要: 根据各种非燃煤大气汞排放源的活动水平和排放因子, 估算了 1995~2003 年中国分省非燃煤大气汞的排放量。2003 年中国非燃煤大气汞排放量为 393t, 比燃煤汞排放多 137t。在非燃煤大气汞排放中, 84% 来自有色金属冶炼, 其中锌冶炼、铅冶炼、铜冶炼和黄金冶炼分别占总排放的 51%、18%、4% 和 11%。 Hg^0 、 Hg^{2+} 和 Hg^p 在中国非燃煤大气汞排放中所占比例分别为 77%、18% 和 5%。中国非燃煤汞排放在各地区间有较大差异, 排放量超过 $30\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 的省区包括湖南、河南和云南, 排放强度超过 $100\text{g}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 的省区包括上海、湖南、河南、辽宁和广东, 这些地区的主要汞排放源为有色金属冶炼和生活垃圾焚烧。1995~2003 年中国非燃煤大气汞排放的年均增长率为 9%, 其中生活垃圾焚烧排放的年均增长率最高, 达到 42%。

关键词: 汞; 排放量; 排放因子; 估算

中图分类号: X131.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)12-2401-06

Estimate the Mercury Emissions from Non-coal Sources in China

WANG Shu-xiao¹, LIU Min¹, JIANG Jing-kun¹, HAO Ji-ming¹, WU Ye², David G. Streets²

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

Abstract: Based on the activity level and emission factors, we estimated the provincial mercury emissions from non-coal sources during the period of 1995~2003 in China. In the year of 2003, non-coal mercury emissions in China reached 393 tonnes, which was 137 tonnes more than the emissions from coal combustion. Approximately 84% of the non-coal mercury emissions came from nonferrous metals smelting. The zinc production, lead production, copper production and gold production contributed respectively 51%, 18%, 4% and 11% of total non-coal mercury emissions. The shares of elemental mercury (Hg^0), oxidized mercury (Hg^{2+}) and particulate mercury (Hg^p) were 77%, 18% and 5%, respectively. The mercury emissions from non-coal sources in provinces including Hunan, Henan and Yunnan exceeded $30\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$. The emission intensity of Shanghai, Hunan, Henan and Liaoning exceeded $100\text{g}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$. Main emission sources in these provinces are nonferrous metals smelting and household waste burning. Mercury emissions from non-coal sources in China increased averagely 9 percent from 1995 to 2003, and the household waste burning increased extremely fast, with an average increase rate of 42 percent.

Key words: mercury; emissions; emission factors; estimate

上个世纪 90 年代以来, 环境中汞的浓度有所升高, 会通过土壤、水以及大气等多种环境介质对人体健康和生物造成危害^[1~3], 有关汞在大气中的排放、迁移、沉降和控制逐渐成为近年来大气污染防治的研究热点。与此相应的是, 各国政府对重要的汞排放源开始进行立法控制。2005-03, 美国环保局颁布了清洁空气汞法案(clean air mercury rule, CAMR), 在世界范围内第一次对燃煤电站的汞排放进行控制。2005-06, 加拿大也制定了汞控制法案草案, 对本国重要的汞排放源进行控制。

由于汞的迁移具有全球性的影响, 中国的汞排放清单是当前国内外汞污染问题研究中的热点之一, 一些学者先后采用不同的方法估算了中国燃煤汞的排放情况^[4~6]。冯新斌等初步估算 1994 年我国燃煤向大气排放汞量 296t^[4]。王起超等研究了中国煤炭的汞含量及主要用煤行业燃煤的汞排放因子, 认为 1995 年我国燃煤向大气中排汞量为 213.8t^[5]。

蒋靖坤等建立了中国分省燃煤汞排放清单, 用 2 组原煤汞含量数据计算得到 2000 年中国燃煤大气汞排放量分别为 161.6t 和 219.5t^[6]。Pacyna 等认为 1995 年全球人为源大气汞排放为 1900t, 其中亚洲地区排放 1204t, 而中国的汞排放量占亚洲总排放量的 50%^[7]。由此可见, 仅考虑燃煤的汞排放就不能全面地反映中国的汞排放情况, 而详细、准确的汞排放清单对于我国选择适用的汞污染控制技术和制定合理的环境保护政策都有着十分重要的意义。本研究首次对中国各种非燃煤大气汞排放源进行了调研, 确定了各种类型源的排放因子, 并基于各省的排放数据, 计算了 1995~2003 年我国非燃煤汞的排放量。

收稿日期: 2005-12-08; 修订日期: 2005-12-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB422201)

作者简介: 王书肖(1974~), 女, 博士, 主要研究方向为大气污染排放与控制对策。E-mail: shxwang@tsinghua.edu.cn

1 研究方法

1.1 计算方法

中国非燃煤大气汞排放量的计算公式为:

$$Q_T(t) = \sum_i \sum_j Q_{ij}(t) \tag{1}$$

$$Q_{ij}(t) = \sum_j F_{ij}(t) C_j \tag{2}$$

其中, Q 为排放量, F 为各种污染源的消耗量或者生产量, C 为基于汞的排放因子, T 表示全国, i 表示省(直辖市、自治区), j 为不同的排放源, t 表示年份.

1.2 研究范围和排放源类型

研究区域包括 31 个省、自治区及直辖市(香港、澳门特别行政区和台湾省暂未考虑), 时间范围为 1995~ 2003 年, 重点分析了 2003 年排放数据.

研究主要涉及有色金属冶炼、钢铁冶炼、水泥工业、氯碱工业、生活垃圾焚烧以及石油燃烧 6 种大气汞排放源. 在以前的研究中, 还把生物质燃烧作为重要的大气汞排放源, 但是考虑到生物质内的汞主要来自大气, 燃烧后又释放回大气中, 故未将其计入中国非燃煤大气汞的排放中.

1.3 汞排放形态和排放因子

大气中的汞主要有 3 种形态: 气态元素汞(Hg^0)、气态二价汞(Hg^{2+}) 和颗粒态汞(Hg^P), 烟气中 Hg^0 、 Hg^{2+} 和 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, 在大气中的传输特性也有所不同. Hg^0 可进行长距离传输, 参与全球汞循环, 且在大气中的停留时间较长; Hg^{2+} 可扩散到几十到几百 km, 易溶于水, 易随降水降至地面; Hg^P 一般在排放源附近沉降^[8].

各种排放源的排放因子和排放形态分布因子如表 1 所示.

2 结果与讨论

2.1 2003 年中国非燃煤大气汞排放量

按照公式(1)、(2) 计算出中国非燃煤大气汞排放量, 如表 2 所示. 各种排放源活动水平的数据来自统计年鉴, 锌、铅、铜产量的数据来自《中国有色金属工业年鉴》^[12~ 20], 黄金产量的数据来自《中国经济贸易年鉴》^[21~ 23]、《中国黄金年鉴》^[24], 钢铁和水泥产量的数据来自《中国统计年鉴》^[25~ 33]、氯碱工业参考高旭东的研究^[34], 1995~ 2000 年的生活垃圾焚烧量根据装机容量, 采用 0.91 的容量系数确定, 2001~ 2003 年的数据来自《中国城市建设统计

年报》^[35~ 37], 石油消耗量来自《中国能源统计年鉴》^[38~ 41].

表 1 中国非燃煤汞排放因子

Table 1 Emission factors of mercury from non-coal sources in China

排放源	排放因子	形态分布因子 ^[7]		
		Hg ⁰	Hg ²⁺	Hg ^P
有色金属冶炼				
锌冶炼	83.4g/t ^[8]	0.80	0.15	0.05
铅冶炼	43.6g/t ^[8]	0.80	0.15	0.05
铜冶炼	9.6g/t ^[8]	0.80	0.15	0.05
黄金冶炼(大规模生产)	0.79t/t ^[8]	0.70	0.30	0
黄金冶炼(手工生产)	15.0t/t ^[8]	0.70	0.30	0
钢铁冶炼	0.040g/t ^[1]	0.80	0.15	0.05
水泥工业	0.040g/t ^[2]	0.80	0.15	0.05
氯碱工业	18.5g/t ^[8]	0.70	0.30	0
生活垃圾焚烧	2.8g/t ^[9]	0.20	0.60	0.20
石油燃烧				
燃料油燃烧	0.014g/t ^[10]	0.50	0.40	0.10
汽油、柴油和煤油	0.058g/t ^[10]	0.50	0.40	0.10

1) 钢铁冶炼排放包括矿物排放和燃料排放, 此处采用总排放因子; 2) 水泥工业排放因子中剔除了燃煤排放汞, 根据水泥能耗系数(以标煤计) 0.196t/t^[11]把汞排放因子由 0.065g/t^[11]调整为 0.040 g/t

表 2 2003 年中国非燃煤大气汞排放

Table 2 Mercury emissions from non-coal sources in China, 2003

排放源	大气汞排放量/t	Hg ⁰ /t	Hg ²⁺ /t	Hg ^P /t
有色金属冶炼	332.18	261.28	56.53	14.38
锌冶炼	199.25	159.40	29.89	9.96
铅冶炼	70.65	56.52	10.60	3.53
铜冶炼	17.63	14.10	2.64	0.88
黄金冶炼(大规模生产)	16.15	11.31	4.85	0
黄金冶炼(手工生产)	28.50	19.95	8.55	0
钢铁冶炼	8.89	7.11	1.33	0.44
水泥工业	34.48	27.58	5.17	1.72
氯碱工业 ¹⁾	0	0	0	0
生活垃圾焚烧	10.36	2.07	6.22	2.07
石油燃烧	7.53	3.77	3.01	0.75
燃料油燃烧(固定源)	0.53	0.27	0.21	0.05
汽油、柴油和煤油	7.00	3.50	2.80	0.70
总计	393.44	301.81	72.26	19.37

1) 2001 年中国水银法工艺已经全部淘汰^[34]

不考虑生物质燃烧和钢铁冶炼的排放, 2003 年中国各种非燃煤排放源共向大气排放汞 393.44t, 约有 77% 的 Hg^0 、18% 的 Hg^{2+} 和 5% 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 1a 以上.

2.2 2003 年中国大气汞排放量的部门分布

为了更全面地了解中国汞排放情况, 图 1 给出了 2003 年中国所有汞排放的部门分布. 其中燃煤大气汞的排放数据来自清华大学同美国阿贡实验室的

合作研究^[42]. 2003 年, 中国各种排放源共向大气中排放汞 650t. 各排放源中有色金属冶炼和燃煤的大气汞排放量最高, 分别占总排放量的 52% 和 39%, 其次是水泥工业, 其排放量占总排放量的 5%, 其它污染源如生活垃圾焚烧以及石油燃烧等的贡献要小得多, 仅占总排放量的 4%.

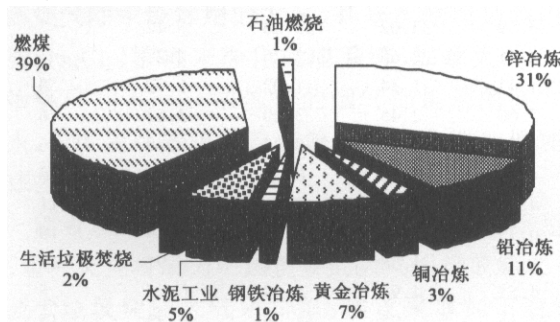


图 1 2003 年中国大气汞排放的部门分布

Fig. 1 Mercury emissions from different sectors in China, 2003

有色金属冶炼行业包括锌冶炼、铅冶炼、铜冶炼和黄金冶炼, 其排放量占总排放量的 52%, 其中锌冶炼行业的排放因子最高, 而且锌的产量高于铅和铜的产量, 所以锌冶炼行业的排放对总排放的影响很大. 有色金属冶炼的大气汞排放因子主要取决于各类金属矿山的含汞量以及烟气处理设施. 冶金行业安装的烟气冷却净化系统和除尘装置以及 SO_2 烟气制酸, 都会大大减少有色金属冶炼过程大气汞排放量. 黄金冶炼是大气汞的重要排放源. 在中国存在一些“三小”金矿开采企业, 即小规模乡镇村办和个体私营采金企业. 这类企业混汞提金的排放因子较高, 由此造成矿山生产区及其周围空气中汞浓度的严重超标.

大气汞的第 2 大排放源为燃煤排放, 在燃煤排放中工业、电力和生活消费为主要排放部门. 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 $1.18 \times 10^8 \text{t}$, 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^[8].

2.3 中国非燃煤汞排放的地理分布

表 3 给出了中国各省非燃煤大气排放量以及根据 1995 年和 2003 年的数据计算出的年均增长率. 可见, 非燃煤汞排放的地区分布极不平衡, 不同省区

间差异显著. 2003 年, 非燃煤大气汞年排放量均超过 30t 的省区主要是有色金属冶炼行业发达的湖南、河南、云南 3 省. 这些地区的锌、铅和黄金产量分别占全国总产量的 44%、63% 和 35%, 其大气汞排放量占到全国总排放量的 40%. 总体来说, 中国非燃煤大气汞排放主要集中在有色金属冶炼行业较发达的省区.

与排放量类似, 不同省区间排放强度的差异也较为显著. 2003 年中国非燃煤大气汞排放强度平均为 $42 \text{ g} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 其中上海的排放强度最高, 达到 $591 \text{ g} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 其排放源主要为铜冶炼、生活垃圾焚烧和钢铁冶炼, 这 3 种排放源的排放量占总排放量的 74%; 湖南、河南、辽宁和广东 4 个省区的排放强度也在 $100 \text{ g} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 以上. 湖南的主要排放源为锌冶炼和铅冶炼, 河南的主要排放源为铅冶炼和黄金冶炼, 辽宁的主要排放源为锌冶炼, 广东省的主要排放源为有色金属冶炼和生活垃圾焚烧, 其中垃圾焚烧的排放量约占总排放量的 15%. 总的来说, 全国共有 19 个省区的排放强度超过全国平均水平, 西藏、新疆、青海等面积较大的省区其大气汞排放强度很低.

2.4 1995~2003 年中国非燃煤大气汞排放趋势

图 2 给出了 1995~2003 年中国非燃煤大气汞排放量的变化趋势. 中国非燃煤大气汞排放量并不是持续快速增加, 而是在 1996 年出现峰值后开始出现一定幅度的回落, 1997 又开始增大. 出现这种变化趋势与中国有色金属产量及石油消耗量在 1996 年出现峰值, 1997 年有所回落, 1998 年继续增长的变化趋势是一致的.

中国非燃煤大气汞排放量的年均增长率为 9%, 而生活垃圾焚烧排放的增长率最快, 达到 42%, 远远超过总排放的年均增长率. 这主要是由于随着城市生活垃圾污染越来越严重, 垃圾焚烧技术在中国也得到快速发展. 从 1988 年中国第 1 座日处理量 300t 的垃圾焚烧发电厂投入使用, 截至 2003 年, 中国已有 47 座生活垃圾焚烧厂, 装机容量达到 $1.5 \times 10^4 \text{ t/d}$, 年处理量达到 $3.70 \times 10^6 \text{t}$. 目前, 中国的生活垃圾焚烧厂主要分布在北京、辽宁、黑龙江、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、四川等地, 而辽宁、广东和四川 3 个省区 2003 年非燃煤大气汞排放量均已超过 20t, 属于排放量较高的地区, 生活垃圾焚烧量的持续增长也增加了这些地区的大气汞排放. 虽然 2003 年中国生活垃圾焚烧向大气中排放汞 10.4t, 仅占总排放量的 2%, 但是随着生活垃圾焚

表 3 1995~ 2003 年中国各省非燃煤大气汞排放量¹⁾/t

Table 3 Geographical distribution of mercury emissions from non coal sources in China, 1995~ 2003/t

地区	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	年均增长率/%
北京	0.78	3.43	0.76	1.41	1.41	0.84	1.75	1.12	1.20	6
天津	2.03	1.89	2.14	1.09	0.64	0.90	0.83	0.88	1.03	- 8
河北	8.76	7.00	7.26	7.04	5.93	6.45	6.36	9.22	10.42	2
山西	1.33	1.51	1.71	1.45	1.69	2.16	3.55	4.42	5.34	19
内蒙古	2.56	4.17	5.34	6.51	6.10	6.23	6.08	6.29	7.32	14
辽宁	30.57	43.31	38.67	35.00	33.75	33.59	33.02	25.68	26.42	- 2
吉林	2.48	2.44	2.20	2.23	2.35	2.41	2.65	2.26	2.23	- 1
黑龙江	1.94	2.01	1.96	1.94	1.43	1.41	1.34	1.52	1.99	0
上海	2.23	2.13	2.31	1.59	2.13	2.60	2.45	3.20	3.67	6
江苏	5.83	5.60	5.36	3.99	5.49	6.55	7.16	8.93	9.48	6
浙江	3.32	4.86	3.58	3.02	3.78	4.29	4.66	6.59	9.12	13
安徽	4.01	2.59	4.78	4.80	4.46	4.84	4.85	5.45	9.33	11
福建	0.84	0.98	0.83	0.91	1.08	0.99	1.34	1.47	1.84	10
江西	3.60	4.40	3.99	4.05	3.49	4.22	4.58	7.49	8.95	12
山东	4.57	3.85	4.34	4.16	4.04	4.51	4.94	5.63	6.75	5
河南	13.00	17.34	15.96	17.03	22.85	27.15	32.05	32.20	40.72	15
湖北	3.37	5.02	4.04	4.51	4.91	5.20	5.92	6.17	6.31	8
湖南	27.79	26.58	42.77	46.93	54.38	66.11	70.79	70.46	81.27	14
广东	10.46	34.71	15.71	16.68	20.57	20.89	21.18	23.03	23.86	11
广西	6.96	23.11	8.95	10.62	12.85	14.90	18.97	16.11	16.41	11
海南	0.11	0.17	0.16	0.14	0.17	0.19	0.19	0.36	0.23	10
重庆	0.50	0.50	0.95	0.71	0.86	0.92	0.84	1.79	1.62	16
四川	7.72	8.70	4.96	7.11	10.43	11.64	14.52	20.01	24.31	15
贵州	11.35	9.85	5.50	4.49	15.96	5.30	6.43	11.23	11.34	0
云南	5.76	18.61	18.94	20.80	9.03	27.82	30.27	33.39	34.09	25
西藏	1.54	0.02	0.01	0.00	1.96	0.02	0.02	0.02	0.05	- 35
陕西	15.71	9.34	9.14	9.02	21.85	14.22	16.01	17.80	19.35	3
甘肃	6.49	24.23	19.86	20.50	5.82	16.14	16.58	20.70	20.39	15
青海	0.61	0.87	1.86	1.62	0.96	2.25	1.76	1.32	2.73	21
宁夏	0.21	0.12	0.13	0.11	0.12	1.18	0.69	0.52	1.20	24
新疆	5.05	5.67	5.35	5.36	5.85	3.73	3.80	2.55	4.48	- 1
总计	191.45	275.01	239.51	244.81	266.37	299.67	325.57	347.81	393.44	9

1) 台湾省资料暂缺, 下同

烧的进一步发展, 垃圾焚烧可能产生的大气汞污染也会越来越严重.

表 3 给出了 1995~ 2003 年中国每个省区非燃

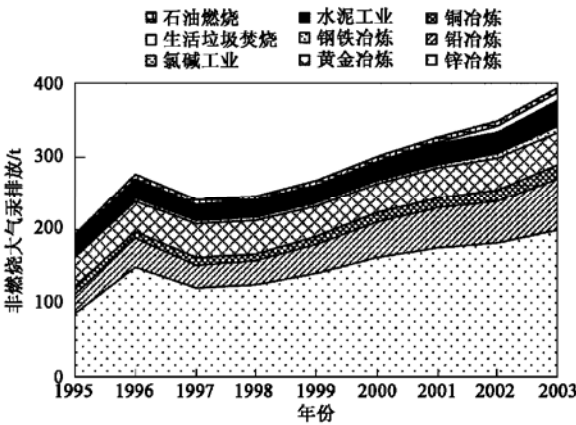


图 2 1995~ 2003 年中国非燃煤大气汞排放量
Fig. 2 Mercury emissions from non coal sources
in China, 1995~ 2003

煤大气汞的排放量, 其中云南、宁夏和青海的增长速度最快, 年均增长率均超过 20%. 云南的非燃煤大气汞排放量较大, 其主要排放源为有色金属冶炼; 宁夏非燃煤大气汞的排放量为 1.20t, 仅占全国总排放量的 0.3%, 但是其铅冶炼行业汞排放量增长很快, 由 1995 年的 0.14t 增长到 2003 年的 0.95t, 年均增长率达到 27%; 青海非燃煤大气汞的排放量也较低, 2003 年的排放量仅为 2.73t, 但是其增长速度很快, 年均增长率达到 21%, 铅冶炼、锌冶炼和水泥工业是青海省大气汞的主要排放源, 也是排放量增长较快的部门.

2.5 汞排放控制建议

考虑到我国在今后相当长一段时期内经济和能源消费仍将保持持续稳定增长, 将面临人为源汞排放进一步增长的压力. 目前发达国家越来越关注中国汞排放的长距离传输对全球汞循环的影响, 因此, 我国需要尽早制定汞污染防治预案, 以应对国际间

的关注和压力. 本研究仅就此提出一些初步的建议.

有色金属行业尤其是锌冶炼行业是排汞大户, 应重点治理. 目前, 有色金属行业对烟气汞的回收已有不少技术可用, 并且有些技术已经取得显著效果. 其中 Boliderr-Norzink 法^[43]是目前国际上有色金属冶炼烟气除汞最常用的方法, 其基本原理是利用卤化物(HgCl_2) 溶液来净化反应系统. 加拿大的 Trali 锌冶炼厂和 Kivcet 法炼铅的烟气都是采用该方法脱汞, 中国葫芦岛锌厂曾试验的氯络合法的原理也和该方法相同.

随着垃圾数量的增长和垃圾焚烧技术的不断发展, 垃圾焚烧将成为中国重要的大气汞排放源之一. 为减少垃圾焚烧大气汞排放, 建议采取如下对策: ①严格执行中国城市生活垃圾焚烧污染控制标准, 规范垃圾焚烧工艺发展; ②合理开展垃圾分类工作, 回收可利用、可再生的资源, 减少垃圾焚烧中汞的来源; ③合理设计焚烧方案. 采用流化床、混烧等技术, 提高燃烧效率.

电力、水泥等行业应采取综合控制措施, 在削减 SO_2 和 NO_x 等污染物排放的同时控制大气汞排放.

3 结论

(1) 2003 年中国燃煤和非燃煤源共向大气中排放汞 650t, 其中有色金属冶炼和燃煤的大气汞排放量最高, 分别占总排放量的 52% 和 39%. 中国各种非燃煤排放源向大气排放汞 393t, 其中 77% 为 Hg^0 , 18% 为 Hg^{2+} , 5% 为 Hg^P .

(2) 中国非燃煤汞排放在各地区间有较大差异, 排放量超过 $30\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 的省区包括湖南、河南和云南, 这些省区的主要排放源为有色金属冶炼和生活垃圾焚烧.

(3) 1995~2003 年各种排放源大气汞排放量的年均增长率为 9%, 其中生活垃圾焚烧、铅冶炼、锌冶炼、铜冶炼、水泥生产、石油燃烧的汞排放年均增长率分别为 42%、13%、11%、7%、8% 和 7%.

(4) 由于相关领域的测试和调研数据比较缺乏, 本研究对非燃煤汞排放的估计还有较大的不确定性. 一方面, 国家对许多涉汞行业还缺乏权威性的统计结果; 另一方面, 汞排放计算过程中的许多关键数据, 如排放因子, 国内还没有公认的测试结果, 只能暂时直接引用国外的测量和统计值. 建议对我国重要的汞排放源的排放特征进行深入研究, 以建立更为准确的中国汞排放清单.

参考文献:

- [1] US Environmental Protection Agency. Mercury Study Report to Congress, Volume II: An Inventory of Anthropogenic Mercury Emissions in the United States. EPA-452/R-97-004 [R]. Washington DC: USEPA, 1997.
- [2] United Nations Environment Programme (UNEP). Global Mercury Assessment [R]. Switzerland: Geneva, UNEP Chemicals, 2002.
- [3] Slemr F, Brunke E G, Ebinghaus R, *et al.* Worldwide trend of atmospheric mercury since 1977 [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30 (10): 1516.
- [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] 王超起, 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] 黄文辉, 杨宜春. 中国煤中的汞[J]. 中国煤田地质, 2002, 14 (增刊): 37~40.
- [7] Pacyna, E G, Pacyna, J M. Global emission of mercury from anthropogenic sources in 1995[J]. Water, Air & Soil Pollut., 2002, 137: 149~165.
- [8] 蒋靖坤. 中国大气汞排放和控制初步研究[D]. 北京: 清华大学, 2004. 1~79.
- [9] UNECE/EMEP. Atmospheric Emission Inventory Guidebook, 3rd Edition [R]. Copenhagen: European Environment Agency, 2004.
- [10] US Environmental Protection Agency. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources [M]. Research Triangle Park: US EPA, 1995.
- [11] 周大地, 戴彦德, 郁聪, 等. 2020 年中国可持续能源情景 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [12] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 中国有色金属工业年鉴 1996 [M]. 北京: 中国有色金属工业年鉴编辑委员会, 1996.
- [13] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 中国有色金属工业年鉴 1997 [M]. 北京: 中国有色金属工业年鉴编辑委员会, 1997.
- [14] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 中国有色金属工业年鉴 1998 [M]. 北京: 中国有色金属工业年鉴编辑委员会, 1998.
- [15] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 中国有色金属工业年鉴 1999 [M]. 北京: 中国有色金属工业年鉴编辑委员会, 1999.
- [16] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 中国有色金属工业年鉴 2000 [M]. 北京: 中国有色金属工业年鉴编辑部, 2000.
- [17] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 中国有色金属工业年鉴 2001 [M]. 北京: 中国有色金属工业年鉴编辑部, 2001.
- [18] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 中国有色金属工业年鉴 2002 [M]. 北京: 中国有色金属工业年鉴编辑部, 2002.
- [19] 中国有色金属工业协会. 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 中国有色金属工业年鉴 2003 [M]. 北京: 中国有色金属工业年鉴编辑部, 2003.
- [20] 中国有色金属工业协会. 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 中国有色金属工业年鉴 2004 [M]. 北京: 中国有色金属工业年鉴编辑部, 2004.
- [21] 中国经济贸易年鉴编辑委员会. 中国经济贸易年鉴 2000 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2000.

- [22] 中国经济贸易年鉴编辑委员会. 中国经济贸易年鉴 2001 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2001.
- [23] 中国经济贸易年鉴编辑委员会. 中国经济贸易年鉴 2002 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2002.
- [24] 中国黄金年鉴编辑委员会. 中国黄金年鉴 2002~ 2003 [M]. 北京: 中国黄金协会, 2004.
- [25] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 1996 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1996.
- [26] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 1997 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1997.
- [27] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 1998 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1998.
- [28] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 1999 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1999.
- [29] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2000 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2000.
- [30] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2001 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [31] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2002 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2002.
- [32] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2003 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2003.
- [33] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2004 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- [34] 高旭东. 我国烧碱工业状况与发展趋势 [J]. 氯碱工业, 2002, (10): 1~ 8.
- [35] 建设部综合财务司. 中国城市建设统计年报 2001 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [36] 建设部综合财务司. 中国城市建设统计年报 2002 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [37] 建设部综合财务司. 中国城市建设统计年报 2003 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [38] 国家统计局工业交通统计司. 中国能源统计年鉴 (1991~ 1996) [M]. 北京: 中国统计出版社, 1998.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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 (2004) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2005.
- [42] Streets D G, Wu Y, Wang S X, *et al.* Trends in Emissions of Mercury from Coal Combustion in China: 1995 through 2003 [A]. In: Tsinghua University. International Workshop on Mercury Control from Coal Combustion [C]. 2005. 13~ 17.
- [43] 《铅锌冶金学》编委会. 铅锌冶金学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 718~ 721.