

2005 年中国燃煤大气砷排放清单

田贺忠, 曲益萍

(北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 燃煤排放的砷是引起大气环境污染和经济损失的重要痕量元素之一. 对燃煤大气砷排放进行估算可以为砷排放法规政策的制定和选择适宜的燃煤砷污染控制技术提供依据. 采用基于燃料消耗的排放因子法, 按照经济部门、燃烧方式和除尘设施将燃煤排放源进行分类, 根据各省区不同排放类型的煤炭消耗量和燃煤平均砷含量, 建立了 2005 年中国燃煤大气砷排放清单. 2005 年中国燃煤生产和消耗量分别为 2 119.8 和 2 099.8 Mt. 燃煤导致的大气砷排放总量估算约为 1 564.4 t, 其中排放量最大的省区是山东 (144.4 t), 其次是湖南 (141.1 t)、河北 (108.5 t)、河南 (77.7 t)、江苏 (77.0 t) 等, 燃煤大气砷排放主要集中在中东部省区; 绝大部分燃煤大气砷排放来自工业 (818.8 t) 和电力部门 (303.4 t), 分别占燃煤大气砷排放总量的 52.3% 和 19.4%; 2005 年中国燃煤排放的砷大约有 375.5 t 是以气态形式排放到大气中, 占排放总量的 24%. 总体上, 在全国范围内燃煤大气砷污染排放控制的重点是电力和工业部门; 而对于新疆、甘肃、青海、贵州等地区, 还应关注生活消费燃煤引起的砷中毒事件.

关键词: 砷; 煤; 燃烧; 排放清单; 中国

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-0956-07

Inventories of Atmospheric Arsenic Emissions from Coal Combustion in China, 2005

TIAN He-zhong, QU Yi-ping

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Anthropogenic arsenic (As) emitted from coal combustion is one of key trace elements leading to negative air pollution and national economy loss. It is of great significance to estimate the atmospheric arsenic emission for proposing relevant laws or regulations and selecting proper pollution control technologies. The inventories of atmospheric arsenic emissions from coal combustion in China were evaluated by adopting the emission factor method based on fuel consumption. Arsenic emission sources were firstly classified into several categories by economic sectors, combustion types and pollution control technologies. Then, according to provincial coal consumption and averaged arsenic concentration in the feed fuel, the inventories of atmospheric arsenic emission from coal combustion in China in 2005 were established. Coal output and consumption in China in 2005 were 2 119.8 and 2 099.8 Mt, respectively. The total emissions of arsenic released into the atmosphere in 2005 in China were estimated at about 1 564.4 t, and Shandong ranked the largest province with 144.4 t arsenic release, followed by Hunan (141.1 t), Hebei (108.5 t), Henan (77.7 t), and Jiangsu (77.0 t), which were mainly concentrated in the eastern and central provinces of China. The arsenic emissions were largely emitted by industry sector (818.8 t) and thermal power generation sector (303.4 t), contributing 52.3% and 19.4% of the totals, respectively. About 375.5 t arsenic was estimated to be released into the atmosphere in the form of gas phase in China in 2005, with a share of 24% of the totals. In general, arsenic pollution control from coal combustion should be highlighted for the power and industry sectors in the whole country. However, arsenic poisoning caused by residential coal burning should also be paid great attention in some areas such as Xinjiang, Gansu, Qinghai and Guizhou.

Key words: arsenic; coal; combustion; emission inventory; China

长期以来,燃煤排放的各种污染物及其对环境与公众健康的影响引起了全球范围内的广泛关注,而砷是其中危害最大的物质之一^[1~4].虽然砷在煤中含量通常并不高,但由于耗煤量巨大,使得燃煤成为大气中砷的主要来源^[5,6].据统计,我国每年由于燃煤造成环境污染的经济损失近百亿,其中砷污染排放造成的环境与经济损失不容忽视^[7].近年来,国内外一些学者先后建立了汞、砷等燃煤痕量金属元素的排放清单或对其排放量进行了估算.其中,文献^[8~11]估算了全球范围内燃煤造成的大气汞、砷的排放量;文献^[12~17]对中国有关污染源的大气汞、

砷等污染物的排放状况进行了估算.本研究采用基于燃料消耗的排放因子法,根据中国各省区不同行业煤炭消费状况,生产原煤的平均砷含量以及煤炭在不同省区间的传输矩阵,对 2005 年中国燃煤导致的大气砷排放清单及其部门行业、地区分布特征进行了估算与分析,进而提出了燃煤砷污染控制的建议和措施,可为燃煤砷排放法规政策的制定和选择

收稿日期: 2008-05-14; 修订日期: 2008-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20677005); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2005CB422207)

作者简介: 田贺忠 (1970~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气污染控制与规划, E-mail: hztian@bnu.edu.cn

适宜的燃煤砷污染控制技术提供依据.

1 估算方法学

1.1 估算方法

估算 2005 年中国燃煤大气砷排放量的计算公式表示如下:

$$Q_{i,j} = C_{i,j}M_{i,j}R_{i,j}(1 - P_{i,j}) \tag{1}$$

$$Q_i = \sum Q_{i,j} \tag{2}$$

$$Q_T = \sum Q_i \tag{3}$$

式中, Q 为大气砷排放量, t; C 为燃煤中平均砷含量, %; M 为燃煤消耗量, t; R 为燃烧装置的砷释放比例, %; P 为除尘器等污染控制设施对砷的去除效率, %; T 为全国; i 为不同的省(市、自治区); j 为不同的排放源类型.

1.2 燃煤生产与消耗

根据中国能源统计年鉴^[18]和中国煤炭工业年鉴^[19], 2005 年中国各省(市、自治区)煤炭生产与分行业部门消耗量见表 1, 香港、澳门特别行政区及台湾省暂未统计.

从表 1 中可以看出, 2005 年中国主要煤炭生产省(市、自治区)包括山西、内蒙古、陕西、河南、山东、贵州、黑龙江、河北、四川、安徽、云南、辽宁等. 这些省(市、自治区)煤炭生产量均超过 50.0 Mt. 而煤炭消耗最多的省(市、自治区)主要有山东、河北、江苏、河南、山西、内蒙古、辽宁、浙江、广东、贵州、安徽、湖南、湖北等, 均超过 60.0 Mt. 同时可以看出, 各省

(市、自治区)的煤炭生产和煤炭消耗在数值上有不同程度的差异. 其中差异较大的有山西、内蒙古、陕西, 生产量多于消耗量分别为 441.45、149.89、112.29 Mt; 江苏、浙江、广东、山东, 消耗量多于生产量分别为 128.59、95.78、92.28、89.86 Mt. 煤炭生产和消耗量的巨大差异是由于不同省区煤炭资源赋存条件、产业结构, 以及经济发展水平等的巨大差异导致的煤炭在不同省(市、自治区)间的输入和输出.

考虑到煤炭在各省区间的流动, 生产原煤和消费原煤的平均砷含量见图 1. 其中, 大部分省(市、自治区)生产原煤的砷含量主要来源于崔凤海等^[20]研究结果. 吉林、安徽、广东、重庆、湖南五省则是在陈冰如等^[21]测得的砷含量范围的基础上, 结合文献^[22~25]的研究结果, 得出各省区生产原煤的平均砷含量. 而各省区消费原煤的砷含量则是根据 2005 年各省区生产原煤的平均砷含量以及煤炭在不同省区间的传输矩阵, 进行计算得出的结果.

从图 1 中可以看出, 大多数省(市、自治区)的生产原煤和消费原煤中砷含量相差不大, 而吉林、浙江、福建、湖北、湖南、广东和广西等省份差异明显. 以浙江省为例, 生产原煤和消费原煤的砷含量相差 7 mg/kg 左右. 虽然浙江是煤炭消耗大省, 但其自身生产的煤炭数量很少, 消费原煤大多依靠外省的调入. 而供给浙江煤炭的省份主要有黑龙江、山西、山东、甘肃等, 这些省份的生产原煤中砷含量较低, 所以导致浙江省消费原煤和生产原煤中砷含量差距较大.

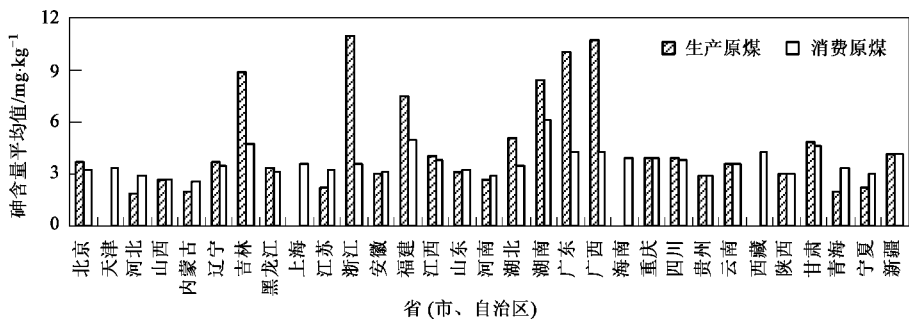


图 1 2005 年各省区生产原煤和消费原煤平均砷含量
Fig. 1 Averaged arsenic concentration of produced and consumed coal by province in China, 2005

1.3 燃煤大气砷排放因子确定

1.3.1 排放源分类

本研究按照经济部门、燃烧炉类型和除尘设施对燃煤排放源进行了分类. 经济部门划分为电力(包括供热)、工业(包括建筑业)、生活消费和其他 4 类;

燃烧炉类型划分为煤粉炉、层燃炉、流化床等 6 种不同的燃烧方式; 除尘设施则包括电除尘器、湿式除尘器和机械除尘器以及无专门除尘设施 4 类. 各类排放源的能源分配比例参考了蒋靖坤等^[17]的研究数据.

表 1 2005 年中国各省(市、自治区)燃煤生产与消耗量¹⁾/kt
Table 1 Coal output and consumption by province in China in 2005/kt

省(市、自治区)	煤炭生产	煤炭消耗	电力耗煤	工业耗煤	生活耗煤	其他耗煤
北京	7 491.7	26 118.9	12 992.2	6 557.2	2 335.0	4 234.5
天津	0	33 713.2	23 012.0	8 576.6	889.8	1 234.8
河北	80 625.1	158 346.1	78 424.9	61 495.5	14 205.4	4 220.3
山西	554 158.8	112 708.5	69 802.0	31 678.2	8 178.3	3 050.0
内蒙古	257 107.8	107 220.5	70 854.3	21 612.4	8 112.5	6 641.3
辽宁	63 882.9	103 342.4	67 163.6	27 731.7	5 471.6	2 975.5
吉林	26 579.8	62 194.2	36 773.9	16 907.8	2 614.8	5 897.7
黑龙江	97 367.1	63 531.0	44 242.4	16 861.9	1 173.6	1 253.1
上海	0	41 782.8	31 218.6	8 886.3	728.2	949.7
江苏	25 857.0	154 446.8	109 315.8	42 116.3	1 203.5	1 811.2
浙江	506.4	96 288.8	60 831.2	33 623.3	1 300.0	534.3
安徽	78 360.2	73 760.7	33 228.6	33 438.5	5 800.0	1 293.6
福建	15 802.2	47 348.4	22 582.5	20 740.3	2 559.1	1 466.5
江西	20 511.4	33 966.5	19 591.6	11 576.5	2 622.8	175.6
山东	130 874.3	220 730.7	127 036.3	82 087.4	6 228.0	5 379.0
河南	149 582.7	135 697.9	83 050.5	39 146.5	12 199.8	1 301.1
湖北	10 934.0	70 298.8	30 288.9	32 259.1	4 680.0	3 070.8
湖南	49 043.9	71 146.1	20 025.4	37 822.7	6 012.6	7 285.4
广东	3 040.7	95 322.5	68 212.6	25 223.6	964.6	921.7
广西	6 169.6	31 782.5	15 500.0	15 455.8	185.6	641.1
海南	0	3 383.8	2 289.5	938.4	0	155.9
重庆	33 131.9	28 641.9	10 813.1	13 887.7	1 550.0	2 391.1
四川	79 052.1	61 890.5	31 360.1	23 739.6	5 796.0	994.8
贵州	107 955.0	75 266.1	32 509.9	26 088.6	10 358.0	6 309.6
云南	65 249.4	46 774.9	20 494.9	19 544.2	3 875.3	2 860.5
西藏						
陕西	156 306.6	44 020.5	26 611.1	10 217.0	4 002.9	3 189.5
甘肃	35 042.5	33 715.0	18 907.0	9 689.4	3 957.0	1 161.6
青海	5 587.8	6 786.9	3 606.3	2 123.6	785.0	272.0
宁夏	26 542.9	25 096.1	16 184.1	7 228.6	1 202.1	481.3
新疆	33 051.7	34 440.4	19 592.5	8 225.9	4 307.9	2 314.1
全国	2 119 815.5	2 099 763.4	1 206 516.0	695 480.6	123 299.4	74 467.6

1) 香港、澳门特别行政区及台湾省暂未统计,下同

1.3.2 排放源大气砷排放因子

不同排放源的大气砷排放因子与燃烧炉的砷释放率以及除尘设施的砷脱除率有关.韩军等^[26]对燃煤过程中痕量元素排放因子的研究表明,煤粉炉的砷释放率为 94.01%.而王运泉等^[27]研究表明煤粉炉砷的释放率为 99.7%.戴财胜等^[28]对循环流化床锅炉煤燃烧过程中砷的析出特性研究发现,流化床锅炉砷的释放率为 45.2%.王起超等^[29]研究微量元素在燃烧产物中的分配,结果表明层燃炉砷的释放比例为 77.18%.Ondov 等^[30]的研究结果显示湿法除尘砷的去除率为 96.3%,电除尘器砷的去除率为 88.5%.罗春广等^[31]认为电除尘器对砷的脱除率为 96%.黄亚继等^[32]研究发现机械除尘器对砷的去除效率在 35%左右.Labus^[33]在研究波兰重金属排放时将生活消费燃煤砷释放率定为 55%.燃煤大气砷

排放因子的综合统计分析结果见表 2.

2 结果与讨论

2.1 2005 年中国燃煤大气砷排放量

根据 2005 年中国各省区煤炭生产与消费统计数据,结合前面确定的各省区燃煤平均含砷量,及不同燃烧设施大气砷释放脱除率等,利用公式(1)~(3),估算 2005 年中国燃煤大气砷排放总量为 1 564.4 t.其中排放量最多的省份是山东,达 144.4 t.其次是湖南(141.1 t)、河北(108.5 t)、河南(77.7 t)、江苏(77.0 t)、吉林(68.2 t)、辽宁(67.7 t)、广东(63.2 t)、贵州(62.7 t)、湖北(61.5 t)、浙江(60.4 t)等,燃煤大气砷排放量均超过 60.0 t.排放量最低的为海南省(西藏燃煤量很低,未计算其砷排放),为 2.4 t.其次是青海、宁夏等,排砷量均低于 15.0 t.

表 2 中国燃煤砷排放因子
Table 2 Arsenic emission factor of coal combustion in China

经济部门	燃烧方式	除尘设施	能源分配比例	释放率/%	脱除率/%
电厂	煤粉炉	电除尘器	0.86	94.01 ^[26] ; >99.7 ^[27]	88.5 ^[30] ; 96 ^[31]
	煤粉炉	湿式除尘器	0.06	94.01 ^[26] ; >99.7 ^[27]	96.3 ^[30]
	层燃炉	湿式除尘器	0.07	77.18 ^[29]	96.3 ^[30]
	层燃炉	机械除尘器	0.01	77.18 ^[29]	35 ^[32]
工业	层燃炉	湿式除尘器	0.29	77.18 ^[29]	96.3 ^[30]
	层燃炉	机械除尘器	0.58	77.18 ^[29]	35 ^[32]
	层燃炉	无	0.04	77.18 ^[29]	0
	流化床	湿式除尘器	0.09	45.2 ^[28]	96.3 ^[30]
生活消费	传统炉灶	无	0.19	55 ^[33]	0
	加强炉灶	无	0.41	55 ^[33]	0
	茶浴炉	无	0.4	55 ^[33]	0
其它	层燃炉	无	1	77.18 ^[29]	0

2.2 燃煤大气砷排放的部门分布特征

2005 年中国燃煤导致的大气砷排放的部门分布特征见图 2. 可见, 在全国燃煤大气砷排放总量 1 564.4 t 中, 工业燃煤排砷量最多, 高达 818.8 t, 占 52.3%; 其次是电力燃煤排砷, 排放量为 303.4 t, 约占 19.4%; 生活消费和其它燃煤排砷量分别为 231.6 t 和 210.6 t, 所占比例分别为 14.8% 和 13.5%. 考虑到煤炭消耗量的差异, 各部门消耗单位煤炭排砷量分别为: 电力 0.25 mg/kg; 工业 1.2 mg/kg; 生活消费 1.9 mg/kg; 其它 2.8 mg/kg. 不同部门单位煤炭消耗大气砷排放系数的巨大差别, 主要是由于各部门燃烧设备结构与运行特性, 以及配套污染控制装置的砷去除效率等的差异造成的. 虽然电力和工业部门单位煤耗排砷量相对较小, 但是由于煤炭消费数量巨大, 所以两部门合计贡献了 71.7% 的燃煤大气砷排放. 因此, 总体上对我国燃煤砷污染排放的控制还应该以工业和电力部门为重.

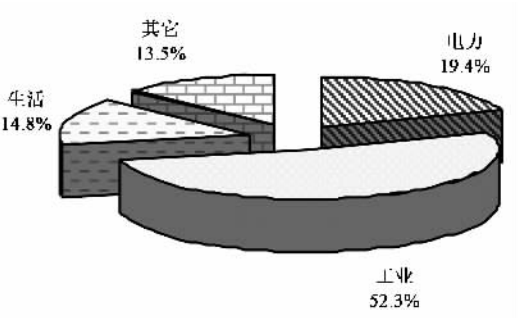


图 2 2005 年中国燃煤大气砷排放的部门分布
Fig. 2 Distribution of arsenic emissions from coal combustion by sector in China, 2005

2.3 燃煤大气砷排放的地区分布特征

2005 年中国燃煤大气砷排放量的地区分布见

图 3. 可见, 与全国范围内燃煤砷排放的部门分布相比, 各地区燃煤砷排放的部门分布显示出不同的特征. 电力燃煤排放砷所占比例最大的地区是上海和广东, 分别为 36.0% 和 34.3%. 而广西和浙江则成为工业燃煤排砷比例最大的 2 个省份 (分别为 74.7% 和 66.5%). 生活消费燃煤大气排砷比例最大的是新疆维吾尔自治区, 高达 28.4%, 其次是甘肃、青海、贵州等. 虽然在全国范围内, 砷污染排放控制的重点是电力和工业部门, 但是对于新疆、甘肃、青海、贵州等生活消费排砷比重较大的地区, 还应该关注居民为满足基本生活需要在室内直接燃烧煤炭导致的砷中毒.

2.4 六大行政区燃煤大气砷排放分布

中国有 6 大行政区, 分别是华北、东北、华东、中南、西南和西北. 2005 年中国 6 大行政区燃煤大气砷排放分布见图 4. 可见, 排放量最高的是华东地区, 达 440.3 t, 占全国总排砷量的 28.1%. 华东地区包括上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西和山东 7 个省份. 其中山东是全国范围内排砷量最大的省, 排砷量占整个华东地区排砷量的 32.8%. 中南地区包括河南、湖北、湖南、广东、广西和海南, 大气排砷量为 374.9 t, 占全国总排砷量的 24.0%. 其中湖南、河南两省居全国各省 (市、自治区) 排砷量的第 2 和第 4 位. 这 2 个省份排放的砷占中南地区排砷总量的 58.4%. 华北、东北、西南和西北地区大气排砷量依次为 267.3、168.9、193.2 和 119.9 t, 所占比例分别为 17.1%、10.8%、12.3% 和 7.7%.

2.5 燃煤大气砷排放的形态分布

研究烟气中砷的形态分布对正确评价砷在自然环境中的迁移规律以及选择合适的砷污染控制技术具有重要意义. 砷在烟气中主要以颗粒态和气态的

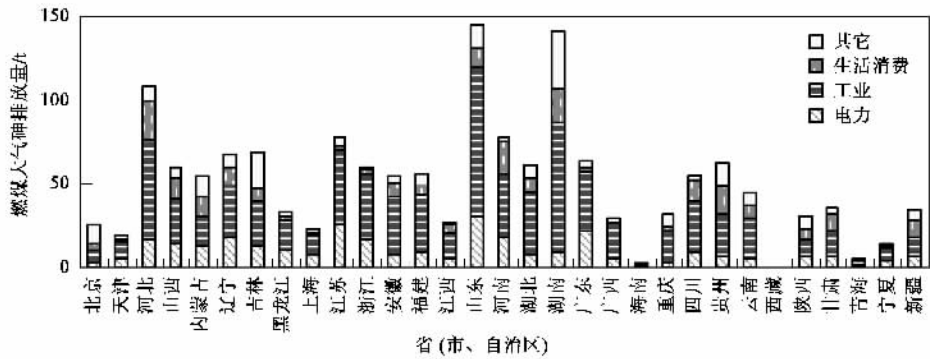


图 3 2005 年中国各省燃煤大气砷排放量及其构成

Fig. 3 Distribution of arsenic emissions from coal combustion by province in China, 2005

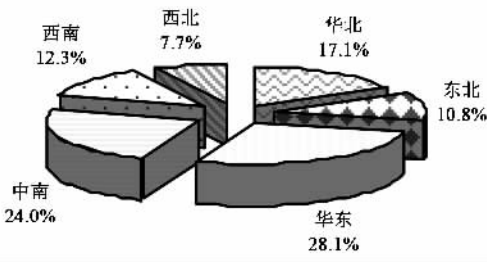


图 4 2005 年中国 6 大行政区燃煤大气砷排放分布

Fig. 4 Arsenic emissions of coal combustion from six administrative areas in China, 2005

形式存在,其中气态砷对环境和人体健康的危害尤其显著.目前,国内外学者对飞灰中砷形态特性研究较多而对烟气中砷形态分布的研究较少.Reddy 等^[34]对燃煤电厂的煤、底灰、飞灰、烟气以及烟气中的颗粒取样分析发现,砷在烟气中以气态存在的约占 24%.如果按照这个比例估算,那么 2005 年我国燃煤排放的大气砷中大约有 375.5 t 是以气态形式排放到大气中.

与文献^[35~38]的研究相比,本研究考虑了由于煤炭在不同省区间传输造成各省区生产原煤与实际消耗燃煤的平均含砷量变化,不同省区内各部门煤炭消耗量构成的差异,以及不同行业燃烧设备及配套污染控制措施的砷去除率造成的排放系数差异等多种因素.因此,尽管本研究中的全国生产原煤平均含砷量数据 4.01 mg/kg 与王明仕等^[38]的 3.96 mg/kg 相近,但由于计算年份,燃煤消耗总量及行业构成,以及选取的排放系数等多方面的差别导致结果存在一些差异.

2.6 排放清单的不确定性分析

本研究采用基于燃料消耗的排放因子估算方法来建立燃煤大气砷污染排放清单.影响排放清单的

不确定因素主要包括:煤炭生产与消费数据及其跨省区传输的可靠性;分省煤炭平均砷含量数据的可靠性以及排放系数的可靠性三方面.

本研究中采用的煤炭生产和消费数据以及不同省区间的煤炭传输数据来自中国能源统计年鉴和中国煤炭工业年鉴^[18,19],能够比较好地保证数据的可靠性.

各个省(市、自治区)生产原煤中的平均砷含量数据主要参考了文献^[20~25]的相关研究结果.崔凤海等^[20]按国标收集和测定全国各地 1 000 多个煤样的砷含量数据并进行统计分析,得出了各个省(市、自治区)的砷含量平均值.陈冰如等对我国 24 个省市 110 个煤矿样中的砷含量进行测定给出了砷的含量范围.收集和测定的煤炭样品覆盖范围广泛且具有代表性,从而保证了各个省(市、自治区)煤炭中砷含量数据的可靠性.

各种污染控制设施对砷的脱除率是决定砷排放因子可靠性的关键参数.本研究参考了国内外近年来相关最新研究成果,确定了不同燃烧设备及配套污染设备的燃煤砷释放及脱除率.总起来看,有关燃煤电厂电除尘器对燃煤砷去除效率的研究相对较多,研究结果也比较一致^[30,31,35~37].而湿式除尘器和机械除尘器对砷的去除效率的研究相对较少,不确定性相对较高,今后将进一步加强相关方面的资料收集及试验研究.

3 燃煤砷污染排放控制措施选择

由于砷具有挥发性和富集于细小颗粒的性质,导致常规除尘设备对砷的去除效率较低.目前,还没有成熟的燃煤砷污染排放的专门控制技术,对于燃煤砷污染的控制措施主要包括洗煤脱砷、燃烧中固砷以及发展动力配煤技术等 3 个方面.从 2005 年中

国大气砷排放清单结果可以看出,对不同的部门和地区,燃煤砷污染排放的控制应采用不同的措施.对大部分地区来说,特别是上海、广东、广西、浙江等电力和工业燃煤排砷比例较大的省份,应尽可能通过煤炭洗选等提高燃烧前和燃烧后砷的脱除效率.据统计,世界上一些主要产煤国的原煤入洗率高达 90%,有的国家煤炭入洗率已达到 100%^[39],而中国煤炭工业协会提供的数据表明,中国原煤入洗率由 2000 年的 25.9% 增加到 2006 年的 35.7%^[40].虽然入洗率有所提高,但与世界其他国家相比,提升的空间还很大.另外,开发经济有效的洗选技术也是提高燃烧前砷脱除效率的重要措施.由于常规除尘器对砷的去除效率不高,燃烧后除砷可以考虑开发联合脱除污染物技术,有研究表明,烟气脱硫(FGD)的同时可以去除 96%~100% 的砷^[41].对于新疆、甘肃、青海、贵州等生活消费燃煤排砷比例较大的地区来说,应限制高砷煤的开发和使用,改善民用燃煤炉灶,减少砷的排放,防止砷中毒事件的发生.

4 结论

(1)本研究采用基于燃料消耗的排放因子法,估算出 2005 年中国燃煤大气砷排放总量为 1 564.4 t,其中排放最高的是山东省,排放量为 144.4 t.总体而言,燃煤大气砷排放主要来源于人口密集,经济发展较快的中东部省区,燃煤大气砷污染对环境和公众健康的影响应引起高度重视.

(2)中国燃煤大气砷排放主要来自工业和电力部门,分别占燃煤砷总排放量的 52.3% 和 19.4%,生活消费和其它燃煤排放分别占 14.8% 和 13.5%.

(3)对于燃煤砷排放污染的控制,在整体提高洗煤效率和开发洗煤技术、联合污染物脱除技术的基础上,对贵州等个别高砷煤地区,还应该控制高砷煤开采和使用,改善炉灶,减少民用锅炉燃煤砷排放,防止砷毒害事件发生.

参考文献:

[1] Furinsky E. Characterization of trace element emissions from coal combustion by equilibrium calculations[J]. *Fuel Process Technol.*, 2000, **63**: 29-44.

[2] Yu G Q, Sun D J, Zheng Y. Health effects of exposure to natural arsenic in groundwater and coal in China: an overview of occurrence [J]. *Environ Health Persp*, 2007, **115**(4): 636-642.

[3] Liu G J, Zheng L G, Duzgoren-Aydin N S, *et al.* Health effects of arsenic, fluorine, and selenium from indoor burning of Chinese coal [J]. *Rev Environ Contam Toxicol*, 2007, **189**: 89-106.

[4] Vahter M. Health effects of early life exposure to arsenic[J]. *Basic*

Clin Pharmacol Toxicol, 2008, **102**(2): 204-211.

[5] 张军营, 任德贻, 钟秦, 等. CaO 对煤中砷挥发性的抑制作用 [J]. *燃料化学学报*, 2000, **28**(3): 198-200.

[6] 郭欣, 郑楚光, 贾小红. 煤粉锅炉燃烧产物中汞, 砷分布特征研究[J]. *工程热物理学报*, 2004, **25**(4): 714-716.

[7] 张慧娟, 杨永清, 史香, 等. 煤中砷对环境和人类健康的危害[J]. *科技情报开发与经济*, 2005, **15**(6): 138-139.

[8] Pacyna E G, Pacyna J M, Steenhuisen F, *et al.* Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000 [J]. *Atmos Environ*, 2006, **40**(22): 4048-4063.

[9] Hylander L D, Herbert R B. Global emission and production of mercury during the pyrometallurgical extraction of nonferrous sulfide ores[J]. *Environ Sci Technol*, 2008, **42**(16): 5971-5977.

[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] Sterling R O, Helble J J. Reaction of arsenic vapor species with fly ash compounds: kinetics and speciation of reaction with calcium silicates[J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(10): 1111-1119.

[12] 雒昆利, 张新民, 陈昌和, 等. 我国燃煤电厂砷的大气排放量初步估算[J]. *科学通报*, 2004, **49**(19): 2014-2019.

[13] Streets D G, Hao J M, Wu Y, *et al.* Anthropogenic mercury emissions in China[J]. *Atmos Environ*, 2005, **39**(40): 7789-7806.

[14] Zhao Y C, Zhang J Y, Huang W C, *et al.* Arsenic emission during combustion of high arsenic coals from southwestern Guizhou, China [J]. *Energy Convers Manage*, 2008, **49**(4): 615-624.

[15] Zhang Q, Streets D G, He K, *et al.* NO_x emission trends for China, 1995-2004: The view from the ground and the view from space[J]. *J Geophys Res*, 2007, **112**: 1-18.

[16] 王书肖, 刘敏, 蒋靖坤, 等. 中国非燃煤大气汞排放量估算 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 2401-2406.

[17] 蒋靖坤, 郝吉明, 吴焯, 等. 中国燃煤汞排放清单的初步建立 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 34-39.

[18] 国家统计局工业交通统计司. 中国能源统计年鉴 2006[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.

[19] 国家煤矿安全监察局. 中国煤炭工业年鉴 2005[M]. 北京: 中国煤炭工业年鉴编辑部, 2006.

[20] 崔凤海, 陈怀珍. 我国煤中砷的分布及赋存特征[J]. *煤炭科学技术*, 1998, **26**(12): 44-46.

[21] 陈冰如, 杨绍晋, 钱琴芳, 等. 中国煤矿样中砷、硒、铬、铀、钍元素的含量分布[J]. *环境科学*, 1989, **10**(6): 23-26.

[22] 王运泉, 任德贻, 雷加锦, 等. 煤中微量元素分布特征初步研究[J]. *地质科学*, 1997, **32**(1): 65-72.

[23] 李大华, 陈坤, 邓涛, 等. 中国西南地区煤中砷的分布及富集因素探讨[J]. *中国矿业大学学报*, 2002, **31**(4): 419-422.

[24] 郑刘根, 刘桂建, 高连芬, 等. 中国煤中砷的含量分布、赋存状态、富集及环境意义[J]. *地球学报*, 2006, **27**(4): 355-366.

[25] 王明仕, 郑宝山, 刘晓静, 等. 中国煤砷含量评价[J]. *环境科学*, 2006, **27**(3): 420-423.

[26] 韩军, 徐明厚, 程峻峰. 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.

[27] 王运泉, 任德贻, 谢洪波. 燃煤过程中微量元素的分布及逸

- 散规律[J]. 煤矿环境保护, 1995, **9**(6): 25-28.
- [28] 戴财胜, 李方文. 流化床煤燃烧过程中砷析出特性研究[J]. 煤炭学报, 2005, **30**(1): 109-113.
- [29] 王起超, 邵庆春, 康淑莲, 等. 煤中 15 种微量元素在燃烧产物中的分配[J]. 燃料化学学报, 1996, **24**(2): 137-142.
- [30] Ondov J M, Ragaini R C, Biermann A H. Elemental emissions from a coal-fired power plant: Comparison of a venturi wet scrubber system with a cold-side electrostatic precipitator[J]. Environ Sci Technol, 1979, **13**(5): 598-607.
- [31] 罗春广, 马熙华. 燃煤砷污染及控制技术研究现状[J]. 内蒙古环境科学, 2008, **20**(1): 60-63.
- [32] 黄亚继, 金保升, 仲兆平, 等. 痕量元素在气化产物中分布规律的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, **24**(11): 208-213.
- [33] Labus K. Heavy-metal emission from coal combustion in southwestern Poland[J]. Energy, 1995, **20**(11): 1115-1119.
- [34] Reddy M S, Basha S, Joshi H V. As, Hg, and Se flue gas sampling in a coal-fired power plant and their fate during coal combustion[J]. Environ Sci Technol, 2003, **37**(22): 5262-5267.
- [35] Yi H H, Hao J M, Duan L, *et al.* Characteristics of inhalable particulate matter concentration and size distribution from power plants in China[J]. J Air Waste Manage, 2006, **56**: 1243-1251.
- [36] 易红宏, 郝吉明, 段雷, 等. 电厂除尘设施对 PM₁₀ 排放特征影响研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 1921-1927.
- [37] Yi H H, Hao J M, Tang X L, *et al.* Fine particle and trace element emissions from an anthracite coal-fired power plant equipped with a bag-house in China[J]. Fuel, 2008, **87**: 2050-2057.
- [38] 王明仕, 杨娜娜, 朱建明, 等. 中国燃煤砷排放量估算[J]. 煤炭转化, 2008, **31**(2): 1-3, 7.
- [39] 潘伟尔. 中国到底需要多少煤炭[J]. 中国煤炭, 2001, **27**(2): 33-40.
- [40] 陈燕. 煤炭行业节能减排取得新突破[N]. 经济日报, 2007-11-07.
- [41] Lvarez-Ayuso E A, Querol X, Tomas A. Environmental impact of a coal combustion-desulphurisation plant: Abatement capacity of desulphurization process and environmental characterization of combustion by-products[J]. Chemosphere, 2006, **65**: 2009-2017.