

重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究

段振亚^{1,3} 苏海涛^{1,3} 王凤阳^{2,3} 张磊^{2,3} 王书肖^{2,3*} 余斌⁴

(1. 青岛科技大学机电工程学院, 青岛 266061; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084; 4. 广州市环境监测中心站, 广州 510000)

摘要: 垃圾焚烧是大气汞的重要排放源之一。为了解重庆市垃圾焚烧行业大气汞污染水平, 研究选取了重庆市典型生活垃圾焚烧厂和医疗垃圾焚烧厂, 采用美国环保署的 30B 标准方法对烟气汞排放进行了现场测试, 同时采集垃圾焚烧后的飞灰和炉渣样品进行分析。结果表明, 测试得到生活垃圾焚烧厂和医疗垃圾焚烧厂排放的烟气中汞质量浓度分别为 $(26.4 \pm 22.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(3.1 \pm 0.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 生活垃圾和医疗垃圾焚烧飞灰中汞含量分别为 $(5\,279.2 \pm 798.0) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(11\,709.5 \pm 460.5) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。生活垃圾焚烧过程中仅 0.7% 汞残留在炉渣中, 65.3% 在飞灰中, 烟气排放占 34.0%, 脱汞效率为 66.0%; 医疗垃圾焚烧过程中 0.2% 汞残留在炉渣中, 67.5% 存在飞灰中, 烟气排放占 32.3%, 脱汞效率为 67.7%。实测得到重庆市生活垃圾焚烧和医疗垃圾焚烧厂大气汞排放因子分别为 $(126.7 \pm 109.0) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(46.5 \pm 12.0) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与国内珠三角地区生活垃圾焚烧厂相比, 重庆市生活垃圾焚烧厂的大气汞排放因子较低。

关键词: 垃圾焚烧; 汞排放因子; 生活垃圾; 医疗垃圾; 分布特征

中图分类号: X51; X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0459-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.008

Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing

DUAN Zhen-ya^{1,3}, SU Hai-tao^{1,3}, WANG Feng-yang^{2,3}, ZHANG Lei^{2,3}, WANG Shu-xiao^{2,3*}, YU Bin⁴

(1. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China; 4. Guangzhou Environmental Monitoring Centre, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Waste incineration is one of the important atmospheric mercury emission sources. The aim of this article is to explore the atmospheric mercury pollution level of waste incineration industry from Chongqing. This study investigated the mercury emissions from a municipal solid waste incineration plant and a medical waste incineration plant in Chongqing. The exhaust gas samples in these two incineration plants were obtained using USA EPA 30B method. The mercury concentrations in the fly ash and bottom ash samples were analyzed. The results indicated that the mercury concentrations of the municipal solid waste and medical waste incineration plant in Chongqing were $(26.4 \pm 22.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $(3.1 \pm 0.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in exhaust gas respectively, $(5\,279.2 \pm 798.0) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $(11\,709.5 \pm 460.5) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ in fly ash respectively. Besides, the distribution proportions of the mercury content from municipal solid waste and medical waste in exhaust gas, fly ash, and bottom ash were 34.0%, 65.3%, 0.7% and 32.3%, 67.5%, 0.2% respectively; The mercury removal efficiencies of municipal solid waste and medical waste incineration plants were 66.0% and 67.7%, respectively. The atmospheric mercury emission factors of municipal solid waste and medical waste incineration plants were $(126.7 \pm 109.0) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $(46.5 \pm 12.0) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively. Compared with domestic municipal solid waste incineration plants in the Pearl River Delta region, the atmospheric mercury emission factor of municipal solid waste incineration plant in Chongqing was lower.

Key words: waste incineration; mercury emission factors; municipal solid waste; medical waste; distribution characteristics

重金属汞由于具有特殊的物理化学性质、易迁移性以及强毒性, 对环境和人类健康造成严重影响, 是全球关注的环境污染物^[1,2]。垃圾焚烧大气汞排放量占全球人为源大气汞排放总量的 8% 左右^[3,4], 而我国是全球垃圾焚烧大气汞排放最多的国家之一^[5]。近年来, 我国垃圾焚烧行业发展迅速 (2013 年生活垃圾焚烧量为 4 633.7 万 t, 2006 ~ 2013 年焚烧量平均年增长率为 22.2%)。垃圾焚烧的汞污染问题不容忽视^[6,7]。为评估我国垃圾焚烧行业大气汞排放现状, 王书肖等^[8]采用 $2.8 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ 的生活垃圾

焚烧大气汞排放因子估算了我国 2003 年生活垃圾焚烧大气汞排放量为 $10.4 \text{ t}^{[9,10]}$; UNEP 报告则依据 $1.0 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ 的大气汞排放因子算出了我国 2005 年生活垃圾焚烧大气汞排放量为 $2.1 \text{ t}^{[11]}$; Tian 等^[12]采用 $1.4 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ 的大气汞排放因子评估我国生活垃

收稿日期: 2015-08-15; 修订日期: 2015-09-30
基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2013CB430001); 山东省高等学校科技计划项目 (J15LC16); 广州市科技计划项目 (2014J4100089)

作者简介: 段振亚 (1974 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: zyduan88@163.com

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

圾焚烧大气汞排放量由 2003 年的 5.4 t 增至 2010 年的 36.7 t; Hu 等^[13]通过垃圾中汞含量和污控设施的脱汞效率评估了我国不同地区生活垃圾焚烧大气汞排放因子,得到我国 2010 年生活垃圾焚烧大气汞的排放量为 6.1 t。国内由于缺乏垃圾焚烧大气汞排放因子实测数据,学者一般采取国外的排放因子平均值来估算排放清单,但大气汞排放因子差异较大,使排放清单估算的不确定性增大。

垃圾焚烧大气汞排放因子对于准确评估垃圾焚烧汞污染现状十分重要,相比于国内,国外学者对垃圾焚烧大气汞排放因子研究较早; Pacyna 等^[5]认为 2000 年全球生活垃圾焚烧大气汞的排放因子为 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; Kim 等^[14]测得韩国 8 家生活垃圾焚烧厂和 2 家医疗垃圾焚烧厂的大气汞排放因子分别为 $5.9\sim 95.4\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $174.0\sim 1513.9\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; Takahashi 等^[15]对生活垃圾焚烧厂排放烟气进行连续监测得到日本生活垃圾焚烧厂大气汞排放因子为 $30\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; Chen 等^[16]测得 2010 年珠三角地区生活垃圾焚烧厂的大气汞排放因子为 $(208\pm 130)\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。大气汞排放因子受垃圾中汞含量、焚烧工艺以及污控设施等因素影响,在不同时间、不同

国家或地区,差异较大;国外的垃圾焚烧大气汞排放因子并不适用我国垃圾焚烧大气汞排放现状的评估,而国内关于垃圾焚烧大气汞排放特征的研究却不多。本研究以重庆市为研究背景,测试了生活垃圾和医疗垃圾焚烧厂排放的烟气汞质量浓度,分析了焚烧过程中烟气、飞灰、炉渣的汞分布特征,给出了重庆市生活垃圾和医疗垃圾焚烧厂的大气汞排放因子;旨在丰富和更新我国垃圾焚烧行业大气汞排放因子数据库,为我国垃圾焚烧大气汞排放清单的估算提供实测数据,对控制垃圾焚烧的汞排放以及制定控制对策建议具有重要参考意义。

1 材料与方法

1.1 垃圾焚烧厂概况

重庆某生活垃圾焚烧厂(A厂)日焚烧生活垃圾 1 200 t,该厂采用逆推式倾斜炉排炉焚烧炉焚烧工艺,炉内焚烧温度大于 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$,焚烧持续时间约 2 h;污控设施是国内 90% 以上生活垃圾焚烧厂采用的“半干法+活性炭吸附+布袋除尘”烟气处理技术;焚烧炉型和污控设施在国内垃圾焚烧行业具有较好的代表性,焚烧工艺以及样品采集点如图 1 所示。

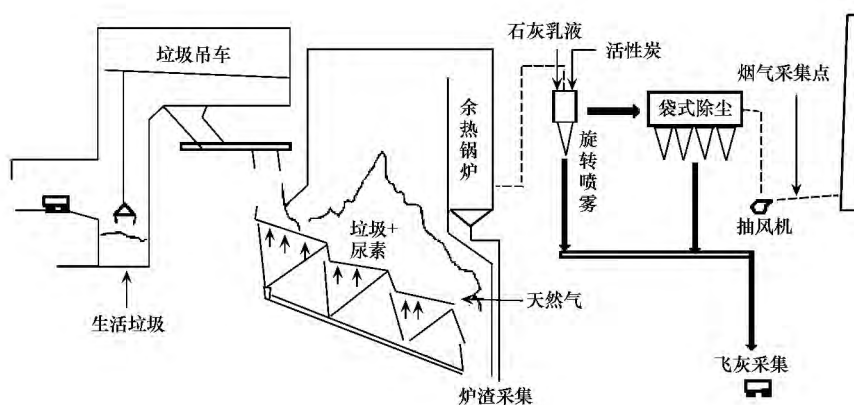


图 1 生活垃圾焚烧工艺以及样品采集点示意

Fig. 1 Schematic diagram of municipal solid waste incineration process and sampling sites

重庆某医疗垃圾焚烧厂(B厂)日焚烧医疗垃圾 24 t,采用热分解炉焚烧工艺,垃圾在 $500\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 焚烧炉中热分解,焚烧时间为 5 h 左右;污控设施采用的是“半干法+活性炭吸附+布袋除尘”烟气处理技术,其焚烧工艺和样品采集点示意如图 2 所示。

1.2 样品采集

于 2014 年 8 月和 2015 年 1 月,分别采集了 A 厂 1、2 号焚烧炉和 B 厂 1 号焚烧炉正常工况运行时的烟气、飞灰、炉渣样品。烟气采样点在烟囱前

的烟道处,每次采样时长为 1 h 左右,采集方法采用美国的 EPA Method 30B^[17];该方法是通过采用适当的采样流速从烟气中采集已知体积的烟气,烟气被装有活性炭吸附剂的吸附管吸附,并通过分析吸附剂中汞含量得到排放烟气汞质量浓度;活性炭在吸附管中分成两段串联吸附,之后烟气经过加热线进入冷凝除水、干燥剂除水、采样泵、流量计等环节,实现采样体积的计算;具体采样步骤:测试前对已安装吸附管的采样系统进行检漏(泄漏率小于采样流量的 4%);打开烟道法兰孔盖,插入探头

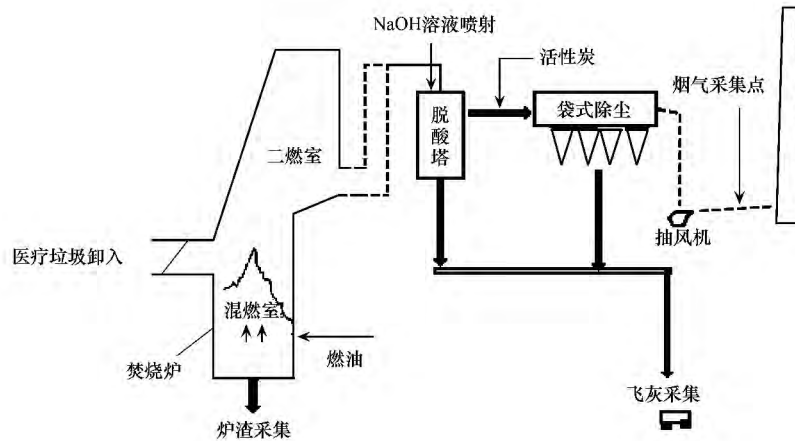


图2 医疗垃圾焚烧工艺以及样品采集点示意

Fig. 2 Schematic diagram of medical waste incineration process and sampling sites

后打开真空泵,开始样品采样;采样结束时,记录流量计最终读数和其它基本参数。

1.3 分析方法

垃圾焚烧后的飞灰和炉渣、活性炭吸附剂中的汞含量均采用固体汞便携式分析仪(LumexRA-915 + /Pyro-915,俄罗斯)分析测量;该仪器采用解析技术将样品中的汞转化为单质汞,然后采用塞曼效应进行背景校正技术,利用汞原子蒸气对254 nm共振辐射的吸收来进行分析定量,可直接测量样品中的汞含量,检测下限为 $0.5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

测量步骤为:将进样舟放在电子天平(称重到0.1 mg)上调零,称取2~3次标准样品,测量其汞含量得到标准曲线;然后用进样舟称取各待测样品的质量后,将进样舟放入热解炉中,在操作软件中输入样品的名称及质量,计算峰值面积即得样品中汞含量,在标准曲线上自动差值计算得出样品汞浓度;烟气采样后的活性炭吸附剂样品全部称重后进行测量。

1.4 质量保证与控制

为了保证烟气采样测量精度和数据的有效性,每次测试时使用两根吸附管进行平行双样的采集;且每根活性炭吸附管由两部分构成,第一部分用来捕集烟气中的汞,第二部分作为辅助部分捕集在第一部分穿透的汞,第一部分的捕集率需达到95%以上;吸附管空白样品分析无汞污染。

每个固体样品均测量3~4次,测量飞灰和炉渣样品中汞含量采用的标准样品为煤灰SRM1633c(汞含量为 $1005 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),测量活性炭吸附剂样品中汞含量采用的标准样品为煤样SRM 1632 d(汞含量为 $92.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),标准样品实测值误差在

10%以内。

2 结果与讨论

2.1 垃圾焚烧排放大气汞质量浓度

图3为测得重庆A厂和B厂的烟气汞质量浓度。A厂2号焚烧线排放的烟气汞的平均质量浓度为 $(6.7 \pm 4.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,1号焚烧线的烟气汞的平均质量浓度为 $(45.4 \pm 7.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均低于国家最新标准《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485-2014)的限值 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [18];A厂1、2号焚烧线排放的烟气汞质量浓度波动较大,但由于两条焚烧线的焚烧工艺、污控设施以及活性炭喷射量相一致,推测1号焚烧线排放的烟气汞质量浓度较高主要是由于焚烧的生活垃圾汞含量偏高导致。A厂生活垃圾焚烧大气汞排放平均质量浓度为 $(26.4 \pm 22.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;将测试结果与国外学者的研究结果相比,远高于Takahashi等[15]测得日本生活垃圾焚烧厂的 $0.046 \sim 4.56 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以及Kim等[14]对韩国8家生活垃圾焚烧厂测试得到的 $1.96 \sim 4.71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 大气汞排放质量浓度。林建伟等[19]测得重庆三峡库区生活垃圾中汞的平均含量为 $790.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于韩国的 $414.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以及日本的 $153.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生活垃圾样品中汞的平均含量[14,15];可能是由于重庆市缺乏完善的生活垃圾分类回收体系,荧光灯、含汞电池、水银温度计等常见的含汞废物混入焚烧的生活垃圾中[20,21],导致垃圾焚烧后大气汞排放质量浓度较高。A厂测试结果低于刘明等[22]测得的珠三角地区生活垃圾焚烧厂的 $(51.4 \pm 28.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 大气汞排放平均质量浓度。

测得重庆B厂排放的大气汞平均质量浓度为

(3.1 ± 0.8) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与 Mukherjee 等^[24] 给出的芬兰医疗垃圾焚烧大气汞排放质量浓度 $2.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 接近, 远低于国家最新的排放标准限值 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 也低于 Kim 等^[14] 测得韩国 2 家医疗垃圾焚烧厂 $51.5 \sim 123.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的大气汞排放质量浓度. 可能的原因是, 测试厂采用喷射活性炭去除二噁英, 该技术具有较好的协同脱汞能力^[23], 而 Kim 等^[14] 所测的韩国医疗垃圾焚烧厂未使用活性炭吸附剂, 因而其大气汞排放浓度较高.

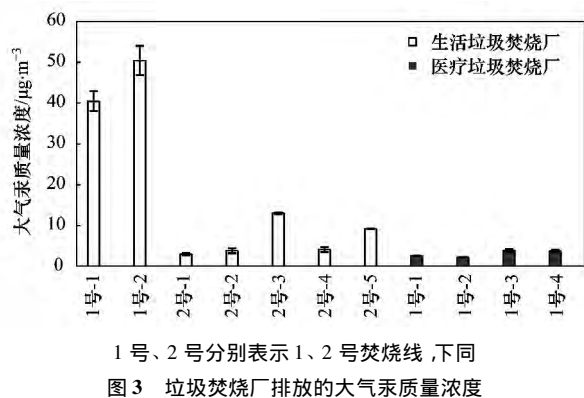


图 3 垃圾焚烧厂排放的大气汞质量浓度
Fig. 3 Atmospheric mercury concentration in municipal waste and medical waste incineration plants

2.2 垃圾焚烧飞灰、炉渣中汞含量

垃圾焚烧飞灰产生率以及飞灰中汞含量的高低不同可直接反映出焚烧厂污控设施的脱汞能力, 因此在烟气采样时, 同步采集的 A、B 厂垃圾焚烧飞灰中汞含量测试结果如图 4 所示; A、B 厂飞灰中平均汞含量分别为 (5279.2 ± 798.0) $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、(11709.5 ± 460.5) $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

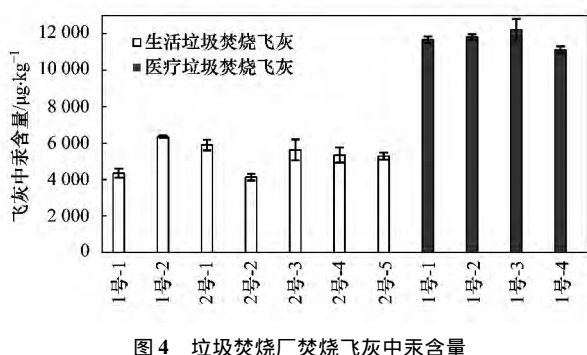


图 4 垃圾焚烧厂焚烧飞灰中汞含量
Fig. 4 Mercury concentration in fly ash in municipal waste and medical waste incineration plants

表 1 为 A 厂生活垃圾焚烧飞灰中汞含量与学者对国内其它地区采用相同污控设施的生活垃圾焚烧厂飞灰中汞含量测试结果的比较^[16 20 25~29], 结果显示焚烧飞灰中汞含量处于 $3000 \sim 9670 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的范围内; 受飞灰产生率(飞灰产生量与垃圾焚烧

量的比值)和活性炭喷射率(活性炭喷射量与垃圾焚烧量的比值)不同的影响, 我国不同地区的垃圾焚烧飞灰中汞含量存在较大波动, 但相比于 Song 等^[29] 测得韩国生活垃圾焚烧飞灰的 $48445 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 汞含量, 均处于较低值. A 厂飞灰产生率、活性炭喷射率以及飞灰中活性炭所占比例分别为 3.3%、0.03%、0.91%, 而 Song 等给出的韩国生活垃圾焚烧厂飞灰产生率、活性炭喷射率以及飞灰中活性炭所占比例则分别为 1.2%、0.26%、21.67%. 焚烧飞灰中汞含量的高低主要受飞灰产生率、活性炭喷射率、活性炭吸附能力等因素影响; 即飞灰产生率越低、活性炭喷射率越高, 则飞灰中活性炭所占比例较大; 在活性炭吸附能力相近的情况下, 飞灰对汞的吸附能力就越强, 导致飞灰中汞含量偏高^[23].

目前关于医疗垃圾焚烧飞灰中汞含量的研究较少, B 厂焚烧飞灰汞含量低于 Tan 等^[30] 测得浙江省某医疗垃圾焚烧厂的 $18478.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 飞灰汞含量. A、B 厂的活性炭喷射率相近, 但医疗垃圾焚烧时间较长和烟气排放量大, 使 B 厂 0.8% 的飞灰产生率明显低于 A 厂 3.3% 的飞灰产生率; 提示在活性炭喷射率相近的情况下, 医疗垃圾焚烧飞灰产生率较小, 导致焚烧飞灰中汞含量较高.

表 1 生活垃圾焚烧飞灰中汞含量

Table 1 Mercury concentration in fly ash in municipal solid waste incineration

地区	飞灰中汞含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	文献
珠三角地区	6480	[16]
三峡库区	8520	[20]
杭州	4800	[25]
上海	8400	[26]
哈尔滨	3083	[27]
重庆	5279	本研究
全国(15家焚烧厂)	9670	[28]
韩国	48445	[29]

A、B 厂焚烧炉渣中平均汞含量分别为 (16.3 ± 7.9) $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、(2.5 ± 0.1) $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均远小于飞灰中汞含量, 如图 5 所示; 由于医疗垃圾焚烧时间较长, 焚烧的垃圾中汞更多地释放至气相中, 医疗垃圾焚烧炉渣中汞含量低于生活垃圾焚烧炉渣.

2.3 垃圾焚烧过程中汞的分布特征

由烟气汞质量浓度、飞灰和炉渣中汞含量以及烟气排放量、飞灰和炉渣的产生量, 可得到垃圾焚烧过程中汞的分布特征, 如表 2 所示. 重庆 A 厂 1 号焚烧线烟气、飞灰以及炉渣的汞分布比例为 53.2%、46.4%、0.4%; 而 2 号焚烧线烟气、飞灰

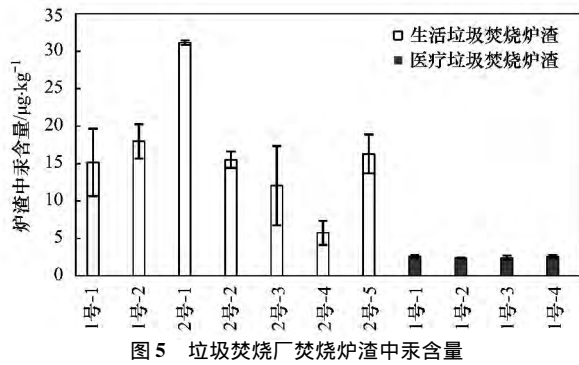


图5 垃圾焚烧厂焚烧炉渣中汞含量

Fig. 5 Mercury concentration in bottom ash in municipal waste and medical waste incineration plants

以及炉渣的汞分布比例为 14.7%、84.1%、1.2%。表中 A 厂 1、2 号焚烧线的飞灰和炉渣中汞输出量

表2 垃圾焚烧的汞分布特征

Table 2 Mercury distribution characteristics during the waste combustion

垃圾类型	炉型	汞输出量和分布比例	烟气	飞灰	炉渣	
生活垃圾	炉排炉	1 号	输出量/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	131.0	114.4	0.7
			汞的分布比例/%	53.2	46.4	0.4
		2 号	输出量/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	19.0	109.0	1.6
			汞的分布比例/%	14.7	84.1	1.2
医疗垃圾	热分解炉	1 号	输出量/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	1.1	2.3	0.008
			汞的分布比例/%	32.3	67.5	0.2

及炉渣汞的分布比例为 32.3%、67.5%、0.2%；国内外关于医疗垃圾焚烧大气汞排放的研究较少，最新的 UNEP 工具包列出了采用“半干法/干法 + 汞吸附剂 + 布袋除尘”污控设施的生活垃圾和医疗垃圾焚烧过程中烟气、灰渣的汞分布比例均为 10%、90%^[31]；A、B 厂排放的烟气汞的分布比例高于 UNEP 给出的参考值，说明重庆市与国外垃圾焚烧厂的脱汞效率仍有一定的差距，优化改进焚烧工艺仍是今后控制垃圾焚烧汞污染的重要工作之一。

2.4 垃圾焚烧大气汞排放因子

准确的垃圾焚烧大气汞排放因子能够直接反映出垃圾焚烧厂大气汞的排放现状，也是垃圾焚烧大气汞排放清单估算的重要前提之一；且结合排放因子和污控设施的脱汞效率给出的焚烧垃圾中汞含量可作为垃圾中汞含量测试结果准确性的重要判断指标。垃圾焚烧大气汞排放因子采用下式计算。

$$E_F = c_{\text{Hg}} \cdot V_G / M_w$$

式中 E_F 为大气汞排放因子 ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)； c_{Hg} 为排放的烟气汞质量浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)； V_G 为烟气排放量 ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)； M_w 为垃圾焚烧量 ($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)。

计算得到重庆 A、B 厂的大气汞排放因子分别

相近，说明两条焚烧线的脱汞能力相当，而 1 号线焚烧的垃圾中汞含量偏高导致排放的烟气汞分布比例较高。A 厂垃圾焚烧过程中烟气、飞灰、炉渣汞的平均分布比例为 34.0%、65.3%、0.7%。Chen 等^[16]对珠三角地区 4 家采用相同焚烧工艺和污控设施的生活垃圾焚烧厂进行了测试，结果表明，烟气汞排放的比例分别为 69.4%、88.74%、64.1% 和 61.0%。与之相比，重庆 A 厂排放烟气汞的分布比例较小；主要原因是珠三角地区部分生活垃圾焚烧厂的污染治理设施管理不到位^[22]，而 A 厂的污控工艺管理相对比较严格，导致 A 厂排放烟气汞的分布比例较小。

测得 B 厂的医疗垃圾焚烧过程中烟气、飞灰以

为 (126.7 ± 109.0) $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、(46.5 ± 12.0) $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。为了对比国内外垃圾焚烧厂大气汞排放现状，将重庆市垃圾焚烧厂的大气汞排放因子和污控设施脱汞效率相比于国内外学者关于其它国家或地区的垃圾焚烧厂的研究结果，如表 3 所示。

本研究测得 A、B 厂的脱汞效率分别为 66.0%、67.7%；A 厂脱汞效率显著低于 UNEP 报告中给出美国 115 家采用相同污控设施生活垃圾焚烧厂的 91.5% 脱汞效率^[31]；也低于 Kim 等^[14]测得韩国 8 家生活垃圾焚烧厂的 85% 脱汞效率以及 Takahashi 等^[32]给出的日本 88 家生活焚烧厂的 81.7% 脱汞效率；日本、美国、韩国等垃圾焚烧技术发达的国家，烟气污控技术更加完善，对污染物排放标准要求更高，焚烧厂的脱汞效率相对处于较高水平。A 厂的脱汞效率高于 Chen 等^[16]测得珠三角地区生活垃圾焚烧厂的脱汞效率，主要原因是该地区部分生活垃圾焚烧厂的污染治理设施管理不到位导致。重庆 B 厂脱汞效率低于 Kim 等^[14]测得韩国 2 家垃圾焚烧厂 89.2% 的脱汞效率。通过调研发现，虽然重庆、深圳、广州等地垃圾焚烧厂引进了国外的焚烧技术，但由于我国的垃圾没有分类处理导致垃圾中汞含量较高以及污控设施管理不到位（如活

表3 测试结果与其它垃圾焚烧厂脱汞效率和大气汞排放因子的比较

Table 3 Comparison of emission reduction efficiencies and atmospheric mercury emission factors in waste incineration plants

国家/地区	焚烧厂数量/家	垃圾种类	污控设施	脱汞效率 /%	排放因子 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	垃圾中汞含量 ¹⁾ / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	文献
韩国	8	生活垃圾	干法/湿法+活性炭+布袋	85.0	47.2	414.7	[14]
日本	88	生活垃圾	干法+活性炭+布袋	81.7	26.0~30.0	142.1~163.9	[32]
美国	115	生活垃圾	半干法+活性炭+布袋	91.5	—	—	[31]
珠三角地区	6	生活垃圾	半干法+活性炭+布袋	29.2	208.0±130.0	293.8	[16]
韩国	2	医疗垃圾	湿法+活性炭+布袋	89.2	773.2	7159.2	[14]
重庆	1	生活垃圾	半干法+活性炭+布袋	66.0	126.7±109.0	372.6	本研究
重庆	1	医疗垃圾	半干法+活性炭+布袋	67.7	46.5±12.0	144.0	本研究

1) 垃圾中汞含量根据垃圾焚烧厂的大气汞排放因子和污控设施的脱汞效率计算得到

性炭喷射率低、布袋维护保养不及时等),使国内垃圾焚烧厂的脱汞效率相对较低。

国外学者测得韩国和日本的生活垃圾焚烧厂大气汞排放因子处在 $26 \sim 47.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内,低于 A 厂的大气汞排放因子; 尽管韩国生活垃圾中汞含量与重庆生活垃圾的相近,但韩国垃圾焚烧厂污控设施的脱汞效率较高,其大气汞排放因子仅为 A 厂的 $1/3$ 左右; 虽然 Takahashi 等^[32]测得日本生活垃圾焚烧厂的脱汞效率低于韩国生活垃圾焚烧厂,但由于日本具备完善的生活垃圾分类处理法规使其垃圾中汞含量较低,日本垃圾焚烧厂的大气汞排放因子比较低。由于 A 厂的脱汞效率较高,大气汞排放因子低于 Chen 等^[16]测得珠三角生活垃圾焚烧厂的 $(208 \pm 130) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 大气汞排放因子。综合分析得到,焚烧的垃圾中汞含量越低以及污控设施的脱汞效率越高,垃圾焚烧厂大气汞排放因子就越低; 相比于通过垃圾分类处理来减少垃圾中汞含量来降低大气汞排放因子的方法,通过优化升级国内垃圾焚烧厂的烟气污控工艺以及对加强污控设施的管理措施,可更有效地降低生活垃圾焚烧大气汞排放因子。

随着国家新的减排标准《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485-2014)的实施,对生活垃圾焚烧厂的大气汞排放要求更加严格,焚烧厂为达到新的大气汞排放标准,会对烟气净化设备进行优化改造; 本研究测得重庆生活垃圾焚烧厂的焚烧炉型和污控设施在国内垃圾焚烧行业具有一定的代表性,因此该厂大气汞排放因子以及污控设施的脱汞效率在一定程度上反映了目前我国垃圾焚烧大气汞排放现状。但是由于垃圾焚烧大气汞排放受垃圾组分组成、焚烧工艺、污控设施等因素的影响,差异较大; 虽然测得重庆生活垃圾焚烧厂排放的大气汞质量浓度符合国家最新的排放标准,但若要弄清楚我国目前大气汞排放现状,仍需要在今后的研究工作中对垃圾焚烧厂的大气汞排放特征进行监测。

我国关于医疗垃圾焚烧大气汞排放因子的实测数据较少,相比于 Kim 等^[14]测得韩国 2 家医疗垃圾焚烧厂的 $773.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 排放因子,重庆医疗垃圾焚烧厂大气汞排放因子较低; 主要原因是虽然韩国医疗垃圾焚烧厂的脱汞效率较高,但韩国的医疗垃圾中汞含量高以及较高的烟气汞排放质量浓度导致大气汞排放因子偏高。随着我国医疗垃圾焚烧量逐年上升,本研究测得重庆医疗垃圾焚烧厂大气汞排放因子以及医疗垃圾焚烧过程中汞的分布特征,丰富了我国医疗垃圾焚烧行业大气汞排放因子数据库。

3 结论

(1) 重庆市生活垃圾和医疗垃圾焚烧厂大气汞排放平均质量浓度分别为 $(26.4 \pm 22.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $(3.1 \pm 0.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均低于国家最新的排放标准限值 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(2) 重庆市生活垃圾焚烧飞灰中汞含量低于医疗垃圾焚烧飞灰,飞灰产生率和活性炭喷射率的不同可能是影响飞灰中汞含量高低的主要因素。

(3) 重庆市生活垃圾和医疗垃圾焚烧厂的脱汞效率分别为 66.0%、67.7%; 脱汞效率与国外的垃圾焚烧厂仍有一定的差距,优化改进烟气净化工艺仍是控制垃圾焚烧汞污染的重要工作。

(4) 重庆市生活垃圾和医疗垃圾焚烧厂大气汞排放因子分别为 $(126.7 \pm 109.0) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $(46.5 \pm 12.0) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 相比于日本、韩国等垃圾焚烧技术发达国家的垃圾焚烧厂,重庆市生活垃圾焚烧厂的大气汞排放因子较高。

参考文献:

- [1] Schroeder W H, Munthe J. Atmospheric mercury—an overview [J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(5): 809-822.
- [2] UNEP. Global mercury assessment 2013: sources, emissions, releases and environmental transport [R]. Geneva, Switzerland: UNEP Chemicals Branch, 2013.

- [3] 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. 化学进展, 2009, **21**(2-3): 436-457.
- [4] Pirrone N, Cinnirella S, Feng X, *et al.* Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(13): 5951-5964.
- [5] Pacyna E G, Pacyna J M, Steenhuisen F, *et al.* Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000 [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(22): 4048-4063.
- [6] Cheng H F, Hu Y N. China needs to control mercury emissions from municipal solid waste (MSW) incineration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(21): 7994-7995.
- [7] Wang S X, Zhang L, Wang L, *et al.* A review of atmospheric mercury emissions, pollution and control in China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, **8**(5): 631-649.
- [8] 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.
- [9] Wu Y, Wang S X, Streets D G, *et al.* Trends in anthropogenic mercury emissions in China from 1995 to 2003 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(17): 5312-5318.
- [10] UNECE/EMEP. Joint EMEP/CORINAIR atmospheric emission inventory guidebook [R]. (3rd ed.). Copenhagen: European Environment Agency, 2004.
- [11] AMAP/UNEP. Technical background report to the global atmospheric mercury assessment [R]. Geneva, Switzerland: UNEP Chemicals Branch, 2008.
- [12] Tian H Z, Gao J J, Lu L, *et al.* Temporal trends and spatial variation characteristics of hazardous air pollutant emission inventory from municipal solid waste incineration in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(18): 10364-10371.
- [13] Hu D, Zhang W, Chen L, *et al.* Mercury emissions from waste combustion in China from 2004 to 2010 [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **46**: 359-366.
- [14] Kim J H, Park J M, Lee S B, *et al.* Anthropogenic mercury emission inventory with emission factors and total emission in Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(23): 2714-2721.
- [15] Takahashi F, Shimaoka T, Kida A. Atmospheric mercury emissions from waste combustions measured by continuous monitoring devices [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, **62**(6): 686-695.
- [16] Chen L G, Liu M, Fan R F, *et al.* Mercury speciation and emission from municipal solid waste incinerators in the Pearl River Delta, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **447**: 396-402.
- [17] 赵士彬, 蔡同锋, 时志强. 基于30B方法对燃煤电厂烟气中汞排放情况的分析[J]. *资源节约与环保*, 2014, (5): 71-72.
- [18] GB 18485-2014, 生活垃圾焚烧污染控制标准[S].
- [19] 林建伟, 王里奥, 赵建夫, 等. 三峡库区生活垃圾的重金属污染程度评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(1): 104-108.
- [20] 丁世敏, 刘元元, 王里奥, 等. 三峡库区垃圾焚烧飞灰中汞的污染特性[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2009, **32**(10): 1197-1201.
- [21] 杜芳, 刘阳生. 焚烧源汞污染控制技术进展及我国大气汞污染控制紧迫性[J]. *环境工程*, 2009, **27**(S): 265-268.
- [22] 刘明, 陈来国, 许振成, 等. 珠三角地区生活垃圾焚烧厂汞的排放特征[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 2953-2958.
- [23] 陈振松. 活性炭粉末在布袋除尘器上吸附汞研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2011.
- [24] Mukherjee A B, Melanen M, Ekqvist M, *et al.* Assessment of atmospheric mercury emissions in Finland [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **259**(1-3): 73-83.
- [25] Shi D Z, Wu W X, Lu S Y, *et al.* Effect of MSW source-classified collection on the emission of PCDDs/Fs and heavy metals from incineration in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **153**(1-2): 685-694.
- [26] Zhang H, He P J, Shao L M. Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration in Shanghai [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **156**(1-3): 365-373.
- [27] Bie R S, Li S Y, Wang H. Characterization of PCDD/Fs and heavy metals from MSW incineration plant in Harbin [J]. *Waste Management*, 2007, **27**(12): 1860-1869.
- [28] 杨立波. 生活垃圾焚烧飞灰中二噁英与汞的分布特性研究[D]. 上海: 上海大学, 2013.
- [29] Song G J, Kim K H, Seo Y C, *et al.* Characteristics of ashes from different locations at the MSW incinerator equipped with various air pollution control devices [J]. *Waste Management*, 2004, **24**(1): 99-106.
- [30] Tan Z X, Xiao G. Leaching characteristics of fly ash from Chinese medical waste incineration [J]. *Waste Management and Research*, 2012, **30**(3): 285-294.
- [31] UNEP. Toolkit for identification and quantification of mercury releases, reference report and guideline for inventory level 2 [R]. Geneva, Switzerland: UNEP Chemicals Branch, 2013.
- [32] Takahashi F, Kida A, Shimaoka T. Statistical estimate of mercury removal efficiencies for air pollution control devices of municipal solid waste incinerators [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(22): 5472-5477.