

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM<sub>2.5</sub> 清除作用 ..... 孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)

降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 ..... 董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)

北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 ..... 刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)

浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 ..... 徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)

2014 年 APEC 期间北京市 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 氧化性损伤能力研究 ..... 郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)

武汉市洪山区夏季 PM<sub>2.5</sub> 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 ..... 孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 翟程凯 (3714)

基于快速聚类方法分析常州市区 PM<sub>2.5</sub> 的统计特性 ..... 王振, 余益军, 徐圃青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)

PM<sub>2.5</sub> 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 ..... 杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)

树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 ..... 刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)

轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 ..... 樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴焯, 胡京南, 郝吉明 (3743)

基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 ..... 邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)

西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 ..... 张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)

生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 ..... 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)

三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 ..... 陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)

城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 ..... 廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)

基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 ..... 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)

贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 ..... 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)

多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 ..... 钱锋, 吴婕贻, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)

地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 ..... 何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)

昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 ..... 常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)

滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 ..... 丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)

紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 ..... 黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)

排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 ..... 焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)

快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 ..... 李洁, 肖琳 (3850)

一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 ..... 王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)

生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性 ..... 宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)

聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 ..... 赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)

典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 ..... 刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)

O<sub>3</sub>/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 ..... 陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)

蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 ..... 胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)

2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 ..... 孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)

不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 ..... 王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)

长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 ..... 付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)

焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 ..... 蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)

黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 ..... 刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)

苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 ..... 胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)

城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 ..... 黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)

菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 ..... 谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)

生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 ..... 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)

模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 ..... 曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)

生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 ..... 张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)

土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 ..... 王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)

土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 ..... 施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)

组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 ..... 王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)

几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 ..... 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)

蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 ..... 宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)

不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 ..... 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)

黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 ..... 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)

挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 ..... 黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)

中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 ..... 宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)

《环境科学》征订启事 (3827) 《环境科学》征稿简则 (4053) 信息 (3736, 3930, 4043)

# 生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究

段振亚<sup>1,3</sup>, 苏海涛<sup>1</sup>, 王凤阳<sup>2,3</sup>, 李智坚<sup>2,3</sup>, 李韶璞<sup>1</sup>, 王书肖<sup>2,3\*</sup>

(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)

**摘要:** 垃圾焚烧是大气汞的重要排放源之一, 为了解垃圾焚烧厂入炉垃圾中的汞含量和焚烧汞排放特征, 本研究选取了上海、广州和芜湖市 3 座典型生活垃圾焚烧厂, 对入炉垃圾进行连续采样分析, 采用 OH 法对排放烟气进行采样测试, 同时采集焚烧飞灰和炉渣样品进行汞含量分析。结果表明, 上海、广州、芜湖市生活垃圾焚烧厂入炉垃圾中汞含量分别为  $(0.39 \pm 0.04)$ 、 $(0.57 \pm 0.05)$ 、 $(0.27 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。广州市焚烧厂排放烟气汞质量浓度为  $(9.5 \pm 3.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 烟气中  $\text{Hg}_p$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^0$  分布比例分别为  $(0.9 \pm 0.8)\%$ 、 $(89.0 \pm 5.4)\%$ 、 $(10.1 \pm 4.6)\%$ ; 芜湖市焚烧厂排放烟气汞质量浓度为  $(24.1 \pm 6.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 烟气中  $\text{Hg}_p$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^0$  分布比例分别为  $(1.0 \pm 0.8)\%$ 、 $(65.4 \pm 27.6)\%$ 、 $(33.6 \pm 27.5)\%$ ; 不同焚烧工艺排放烟气中  $\text{Hg}^{2+}$  的分布比例不同。广州、芜湖市焚烧厂脱汞效率分别为 96.7%、33.7%; 上海、广州、芜湖市垃圾焚烧厂大气汞排放因子分别为  $(0.156 \pm 0.016)$ 、 $(0.019 \pm 0.002)$ 、 $(0.178 \pm 0.027) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 广州市焚烧厂大气汞排放因子略低于韩国、日本的生活垃圾焚烧厂, 上海、芜湖市垃圾焚烧厂大气汞排放因子与国内部分生活垃圾焚烧厂相接近。

**关键词:** 生活垃圾焚烧; 垃圾汞含量; 垃圾组分; 汞; 排放因子

中图分类号: X131; X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3766-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.10.013

## Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants

DUAN Zhen-ya<sup>1,3</sup>, SU Hai-tao<sup>1</sup>, WANG Feng-yang<sup>2,3</sup>, LI Zhi-jian<sup>2,3</sup>, LI Shao-pu<sup>1</sup>, WANG Shu-xiao<sup>2,3\*</sup>

(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)

**Abstract:** Municipal solid waste (MSW) incineration is one of the most important atmospheric mercury emission sources. To investigate the mercury concentrations of MSW and mercury emission characteristics in incineration plants, this study analyzed the MSW sampled in 3 typical MSW incineration plants in Shanghai, Guangzhou and Wuhu respectively. The exhaust gas samples in incineration plants were sampled by using OH (Ontario Hydro) method. The mercury concentrations in fly ash, and bottom ash samples were also analyzed. The results indicated that mercury concentrations of MSW in Shanghai, Guangzhou, and Wuhu incineration plants were  $(0.39 \pm 0.04) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $(0.57 \pm 0.05) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , and  $(0.27 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  respectively. The mercury concentrations of exhaust gas in Guangzhou, Wuhu MSW incineration plants were  $(9.5 \pm 3.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  and  $(24.1 \pm 6.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  respectively; Particulate mercury ( $\text{Hg}_p$ ), gaseous oxidized mercury ( $\text{Hg}^{2+}$ ), and gaseous elemental mercury ( $\text{Hg}^0$ ) represented  $(0.9 \pm 0.8)\%$ ,  $(89.0 \pm 5.4)\%$ ,  $(10.1 \pm 4.6)\%$  in Guangzhou MSW incineration plant, and  $(1.0 \pm 0.8)\%$ ,  $(65.4 \pm 27.6)\%$ ,  $(33.6 \pm 27.5)\%$  in Wuhu MSW incineration plant, respectively. Gaseous oxidized mercury ( $\text{Hg}^{2+}$ ) of exhaust gas in different incineration process showed different distribution proportions. Besides, mercury removal efficiency of Guangzhou, Wuhu MWS incineration plants was 96.7% and 33.7%, respectively. The atmospheric mercury emission factors of Shanghai, Guangzhou, and Wuhu MSW incineration plants were  $(0.156 \pm 0.016) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $(0.019 \pm 0.002) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $(0.178 \pm 0.027) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  respectively. Compared with MSW incineration plants in Japan and Korea, the atmospheric mercury emission factor of Guangzhou incineration plant was slightly lower; Atmospheric mercury emission factors of Shanghai and Wuhu MSW incineration plants were close to those of domestic fractional MSW incineration plants.

**Key words:** municipal solid waste (MSW) incineration; mercury concentrations of MSW; MSW component; mercury; emission factors

汞是一种具有持久性、易迁移性和高度生物蓄积性的全球污染物, 环境汞污染问题已引起国内外学者的广泛关注<sup>[1~3]</sup>。垃圾焚烧是全球人为源大气汞排放的主要来源之一<sup>[4]</sup>, 也是《关于汞的水俣公约》控制汞污染的重点限制对象之一。随着我国城市化进程日益加快以及城市土地资源日趋紧张, 垃

圾焚烧法由于其减容、减量明显等优点正逐步取代

收稿日期: 2016-03-02; 修订日期: 2016-05-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2013CB430001); 山东省高等学校科技计划项目 (J15LC16)

作者简介: 段振亚 (1974~), 男, 博士, 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

填埋法成为城市垃圾处理首选的方法<sup>[5~7]</sup>; 在我国生活垃圾焚烧行业快速发展的同时, 由焚烧带来的汞污染问题不容忽视<sup>[8~11]</sup>. 为了解生活垃圾焚烧大气汞排放现状, 国内学者开展了大气汞排放清单估算研究; Hu 等<sup>[12]</sup> 估算 2010 年我国生活垃圾焚烧大气汞排放量为 6.1 t; Tian 等<sup>[13]</sup> 估算 2010 年我国生活垃圾焚烧大气汞排放量为 36.7 t; Chen 等<sup>[14]</sup> 估算 2010 年我国生活垃圾焚烧大气汞排放量为 4.7 t. 大气汞排放因子的不同导致学者算得的垃圾焚烧大气汞排放清单结果存在较大差异, 而国内关于生活垃圾焚烧厂大气汞排放因子的研究比较匮乏.

焚烧排放烟气中不同形态汞 ( $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^0$ 、 $\text{Hg}_p$ ) 决定汞在大气中的居留时间及迁移距离, 对汞的地球化学循环起着关键作用<sup>[15]</sup>. Pacyna 等<sup>[16]</sup> 评估欧洲生活垃圾焚烧排放烟气中  $\text{Hg}_p$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^0$  的分布比例分别 5%、85%、10%; Kim 等<sup>[17]</sup> 测得韩国 6 家生活垃圾焚烧厂排放烟气中  $\text{Hg}_p$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^0$  的分布比例为 3.3%、81.2%、15.5%; Takahashi 等<sup>[18]</sup> 测得日本生活垃圾焚烧厂排放烟气中  $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^0$  的分布比例为 92.5%、7.5%; 相比于国外, 国内关于生活垃圾焚烧排放烟气中汞的分布特征并不多. 为了解目前我国生活垃圾焚烧大气汞排放现状, 急需实测得到用于计算排放因子的垃圾中汞含量和焚烧汞排放特征数据. 本研究选择上海市、广州市、芜湖市典型生活垃圾焚烧厂, 测量焚烧厂入炉生活垃圾中汞含量, 同时分析焚烧厂排放烟气汞质量浓度和飞灰、炉渣中汞含量, 给出焚烧厂大气汞排放因子和汞排放特征, 旨在为我国垃圾焚烧行

业大气汞排放清单的建立提供实测的垃圾中汞含量和焚烧烟气汞的排放特征数据, 对控制我国生活垃圾焚烧行业大气汞排放具有重要意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 生活垃圾焚烧厂概况

目前国内的生活垃圾焚烧厂主要集中在中东部省市, 本研究选取了上海市、广州市和芜湖市三家生活垃圾焚烧厂; 由于我国生活垃圾仍主要采用混合收集方式, 选取的焚烧厂焚烧的垃圾均属于混合收集, 垃圾来源主要包括居民生活垃圾、商业垃圾、街道清扫垃圾等. 由于东部沿海城市的焚烧厂大多采用机械炉排炉焚烧工艺, 采用炉排炉焚烧工艺的上海市和广州市焚烧厂在地理位置和焚烧工艺上具有较好的代表性; 选取的芜湖市焚烧厂采用循环流化床焚烧工艺, 国内采用该焚烧工艺的生活垃圾焚烧厂达到 20 余家.

垃圾焚烧烟气经污控设施中的脱酸工艺、除尘装置以及活性炭喷射来减少排放烟气带来的污染, 在烟气净化过程中完成了协同脱汞. 脱酸工艺用于脱除焚烧烟气中  $\text{HCl}$ 、 $\text{SO}_x$  等酸性气体, 也可有效脱除烟气中  $\text{Hg}^{2+}$ ; 活性炭对烟气中重金属汞和二噁英等具有极强的吸附力, 喷射的活性炭与烟气混合后进入袋式除尘器, 布袋除尘器用于去除烟气中焚烧飞灰、石灰反应剂以及凝结的重金属. 由于“半干法 + 活性炭吸附 + 布袋除尘”烟气净化工艺(图 1)具有污染物脱除效率高和无副产物废水产生等特点, 统计国内采用该净化工艺生活垃圾焚烧厂的比例达到

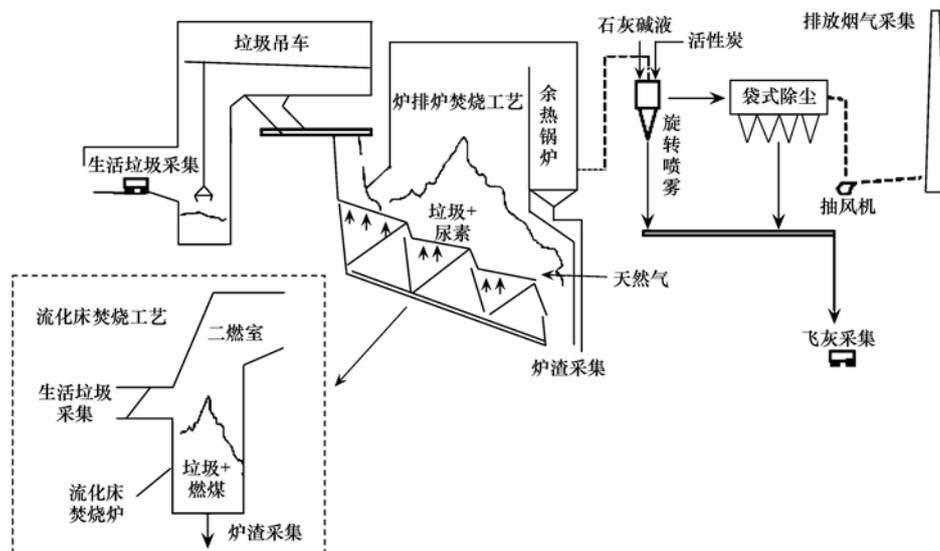


图 1 生活垃圾焚烧工艺以及样品采集点示意

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

90%以上. 本研究选取的焚烧厂污控设施为“半干法+活性炭吸附+布袋除尘”烟气净化工艺.

生活垃圾焚烧工艺以及样品采集点如图1所示,焚烧厂的焚烧工艺参数见表1所示.

表1 生活垃圾焚烧厂焚烧工艺参数

Table 1 Incineration technological parameters of municipal solid waste plants

工艺参数	上海市垃圾焚烧厂(A厂)	广州市垃圾焚烧厂(B厂)	芜湖市垃圾焚烧厂(C厂)
焚烧炉型	机械炉排炉	机械炉排炉	循环流化床焚烧炉
垃圾焚烧量/ $t \cdot d^{-1}$	1 000	750	460
助燃剂添加量/ $t \cdot d^{-1}$	—	—	40
垃圾焚烧温度/ $^{\circ}C$	850 以上	870 ~ 1 150	850 以上
石灰喷射量/ $t \cdot d^{-1}$	—	4	0.6
活性炭喷射量/ $t \cdot d^{-1}$	—	0.3	0.02
飞灰产量/ $t \cdot d^{-1}$	35	20	20
炉渣产量/ $t \cdot d^{-1}$	200	133	100
烟气排放量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	—	80 000	110 000

## 1.2 采样方法

### 1.2.1 生活垃圾样品采集和分类

考虑到采用消解法只能测量少量生活垃圾样品,容易造成测得的垃圾汞含量存在误差,本研究按照《生活垃圾采样和分析方法》(CJ/T 313-2009)中的网格法对生活垃圾取样<sup>[19]</sup>. 抓斗抓取混合均匀的2~3 t入炉垃圾到平台上,从中称取200 kg左右垃圾样品,采用四分法分选样品直至25 kg左右后称重,分别按厨余、纸类、橡塑、纺织、木竹、砖瓦陶瓷、玻璃、金属、灰尘类、其他类组分进行人工分拣;对于难以分拣的进行筛分(5 mm),筛上物继续分选,筛下物归为灰尘类组分. 分拣完成后对各组分依次称重,自然晾干后依此测量各组分重量后,对干燥后的生活垃圾各组分经破碎、粉碎后装入自封袋待测.

### 1.2.2 烟气样品采集

烟气样品测试采用美国试验材料学会(ASTM)的D6784标准方法(ontario hydro, OH方法)<sup>[20]</sup>;

OH方法用于测量排放烟气中气态活性汞( $Hg^{2+}$ )、气态元素汞( $Hg^0$ )、颗粒态汞( $Hg_p$ )含量和烟气总汞含量,烟气采样点位于烟囱排放前的开孔位置. 采样系统主要由石英取样管及加热装置、过滤装置(石英纤维滤膜)、一组放在冰浴中的吸收瓶、流量计和真空泵等组成,如图2所示. 通过采样管系统等速采集一定体积的烟气样品(取样管线的温度维持在 $120^{\circ}C$ ), $Hg_p$ 由位于取样枪后端的石英纤维滤膜捕获; $Hg^{2+}$ 由3个盛有 $1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$  KCl溶液的吸收瓶收集; $Hg^0$ 由1个装有5%  $HNO_3$ /10%  $H_2O_2$ 溶液的吸收瓶(用于去除烟气中的 $SO_2$ )和3个装有4%  $KMnO_4$ /10%  $H_2SO_4$ 溶液的吸收瓶收集;最后由1个盛有干燥剂的吸收瓶吸收烟气中的水分. 取样结束后,对样品进行前处理,对吸收液样品进行消解,最后用冷原子吸收光谱法(CVAAS)分析测定样品中的汞浓度,OH法测量的灵敏度约为 $0.5 \mu g \cdot m^{-3}$ .

### 1.2.3 其他样品采集

采集烟气样品时,分别采集A、B、C厂煤粉、

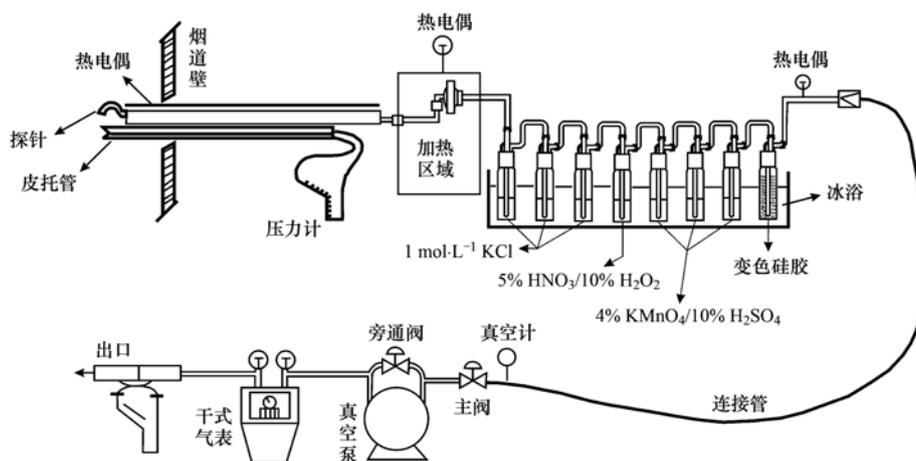


图2 OH法烟气汞采样系统

Fig. 2 Flue gas mercury sampling system of OH method

焚烧飞灰和炉渣样品,得到的固体样品避光自然风干,然后对煤粉和焚烧炉渣进行研磨并筛滤,飞灰样品用 200 目的不锈钢筛过滤,并用自封袋保存样品待测定。

### 1.3 固体和液体样品分析方法

粉碎后的垃圾固体样品、石英纤维滤膜、煤粉、焚烧飞灰和炉渣的汞含量均采用固体汞便携式分析仪(LumexRA-915<sup>+</sup>/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,可直接测量样品的汞含量,检测下限为  $5 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。烟气吸收液样品,使用冷原子吸收光谱法进行分析,分析仪器采用 F732-V 智能型测汞仪(上海华光,中国),分析精度为  $1 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.4 质量保证与质量控制

为保证测量的生活垃圾中各组分汞含量的准确性,对干燥后的垃圾各组分均经破碎和粉碎后制成粒径小于 0.5 mm 微粒,然后从均匀混合微粒样品中选样进行测量。焚烧厂的生活垃圾样品均采集测量 2 次,采样周期间隔 3d;固体样品中汞含量测量 3~4 次,测量石英纤维滤膜、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  $1\ 005.0 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),测量垃圾组分中汞含量采用的标准样品为土壤标样(汞含量为  $290.0 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),实测值误差在 10% 以内。

在生活垃圾样品采集的同时,对垃圾焚烧当天排放的烟气样品进行采集测量,于上午、中午和下午分别测量;排放烟气样品测量 5~6 次,每次烟气采样持续时间为 1h 左右,烟气样品采集量为  $0.6 \text{ m}^3$  左右(对应的生活垃圾焚烧量为 20~32 t),采集排放烟气的总体积为  $3 \text{ m}^3$  左右。烟气采样的全部玻璃器皿在使用前用 10% 硝酸溶液浸泡以除去器壁上吸附的汞;测定样品前做试剂空白试验,空白值不超过  $0.1 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$  或小于最小测试浓度的 10%,每批样品做 2 个空白试验。每个液体样品至少做 3 次平行测试,测试结果误差小于  $\pm 10\%$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生活垃圾中汞含量

#### 2.1.1 生活垃圾中各组分分布特征

对采集的 A、B 和 C 厂焚烧的入炉生活垃圾进行分类、称重和干燥后,得到垃圾分类后各组分分布比例,如表 2 所示。

表 2 焚烧厂焚烧的入炉生活垃圾各组分分布比例

Table 2 Proportion distribution of different components of MSW in incineration plants

序号	组分类别	焚烧厂						垃圾组分描述
		A		B		C		
		湿重/%	干重/%	湿重/%	干重/%	湿重/%	干重/%	
1	厨余	41.0	31.8	51.6	38.4	46.2	36.3	动、植物类食品的残余物
2	纸类	19.8	17.7	7.5	10.0	6.9	6.2	纸张、纸板、纸类包装盒、废弃卫生纸
3	橡塑	16.8	20.6	18.2	25.2	14.1	17.5	橡胶、塑料、塑料袋、塑料包装盒(杯)
4	纺织	2.7	3.6	3.1	3.4	4.3	5.8	布类(包括化纤布)、棉花等纺织品
5	木竹	0.9	1.4	4.7	6.4	4.8	6.5	一次性木筷及少量木材、花木
6	砖瓦陶瓷	3.1	5.1	0.5	0.9	2.0	2.6	废砖、瓦、瓷、石块、水泥块等块状制品
7	玻璃	5.8	10.0	1.3	2.2	1.3	2.0	酒瓶、调味品瓶、少量玻璃制品
8	金属	1.4	2.4	0.2	0.3	1.0	3.8	易拉罐瓶、酒类瓶盖、少量金属制品
9	其他类	0.1	0.2	—	—	—	—	废弃电池、荧光灯管、温度计、油漆、药品等
10	灰尘类	8.4	7.2	12.9	13.2	19.4	19.3	粒径小于 5 mm,按上述分类比较困难的颗粒,如尘土、灰砂和炉灰等

由于国内东西地区城市经济发展不平衡、地域差异、燃料结构差别大以及居民生活消费习惯的不同,生活垃圾组分构成随地域存在差别;杜吴鹏等<sup>[21]</sup>认为燃料结构、城市规模大小、城市经济水平以及地域差异是影响生活垃圾组分分布比例不同的主要原因,燃气区城市的生活垃圾中有机物(厨余和木竹组分)所占比例高于燃煤区,南方城市生活垃圾中的有机物比例高于北方城市,大城市生活垃

圾中的无机物(灰尘和砖瓦陶瓷组分)所占比例小于中小城市。测得上海市、广州市和芜湖市生活垃圾样品湿含量分别为 42.5%、46.3%、49.6%;生活垃圾主要由厨余、纸类、橡塑、纺织及玻璃类组分构成,其所占比重达到 77.6%~91.7%。上海市和广州市属于经济发达的一线城市,相比于三线城市芜湖市,城市人口和商业活动较多,城市居民生活消费水平较高;生活垃圾中可回收的纸类和橡塑类

组分所占比例相比较,而灰土类组分所占的比例相对较小。

生活垃圾中汞的主要来源是其他类组分中扣式电池、荧光灯管、水银温度计等含汞废物<sup>[22]</sup>;含汞废物的种类及其汞含量,如表3所示;从中可知,不同种类含汞废物的汞含量差异较大,混入垃圾中扣式电池、荧光灯管以及水银温度计废物的数量决定生活垃圾中汞含量;测得上海市和广州市生活垃圾中扣式电池和荧光灯管废物数量较多,主要原因是经济发达、城市人口以及商业活动较多的城市中更

多废弃的高汞含量废物流入生活垃圾中导致。由于扣式电池和荧光灯管等高汞含量废物体积小、重量轻、产品种类多,且在生活垃圾分布不均匀,导致难以准确测量该类组分的比重。其他类组分中荧光灯管和水银温度计主要以破碎形态分布在垃圾中,在分拣过程中将其破碎的玻璃片均归入其他类组分中;尽管废弃电池中的圆柱形碱锰电池和锌锰电池占较大比重(90%以上),但由于扣式电池汞含量远高于普通的碱锰电池和锌锰电池,是垃圾中电池的主要汞输入源。

表3 其他类组分中电池、荧光灯、温度计及血压计的汞含量

Table 3 Mercury concentrations of batteries, fluorescent lamp, thermometers and sphygmomanometer in others components

废物种类	类型	汞含量	汞含量标准 <sup>[24,25]</sup>
电池	扣式碱锰电池	3.4 ~ 12.2 g·kg <sup>-1</sup> , 测量均值为 6.9 g·kg <sup>-1</sup> <sup>[23]</sup>	<20 g·kg <sup>-1</sup>
	扣式电池 锌-氧化银电池	0.3 ~ 8.9 g·kg <sup>-1</sup> , 测量均值为 5.0 g·kg <sup>-1</sup> <sup>[23]</sup>	<20 g·kg <sup>-1</sup>
	扣式电池 锌-空气电池	5.6 ~ 12.9 g·kg <sup>-1</sup> , 测量均值为 10.7 g·kg <sup>-1</sup> <sup>[23]</sup>	<20 g·kg <sup>-1</sup>
	纸板锌锰电池	—	<0.25 g·kg <sup>-1</sup>
	糊式锌锰电池	—	<0.25 g·kg <sup>-1</sup>
	圆柱形碱锰电池	—	<0.001 g·kg <sup>-1</sup>
荧光灯	双端荧光灯	3 ~ 10 mg·支 <sup>-1</sup> <sup>[22]</sup>	<5 mg·支 <sup>-1</sup>
	单端荧光灯	2 ~ 5 mg·支 <sup>-1</sup> <sup>[22]</sup>	<3 mg·支 <sup>-1</sup>
温度计	水银温度计	1.1 g·支 <sup>-1</sup> <sup>[22]</sup>	—

### 2.1.2 焚烧的生活垃圾中各组分的汞含量

分别测量 A、B、C 厂垃圾样品分类后各组分中汞含量(湿基),如图3所示。由于其他类组分在垃圾中分布不均匀、所占比重较小,且其他类组分中破碎的荧光灯管和温度计可能会污染灰尘类组分,因此将其他类组分与灰尘类组分混合构成混合类组分,直接测量破碎后混合类组分中汞含量。结果表明,垃圾中不同组分的汞含量存在较大差异,混合类组分中汞含量明显较高,且不同城市焚烧厂的混合类组分汞含量差异较大,波动范围为 1.07 ~ 3.72 mg·kg<sup>-1</sup>,原因是城市的经济发展水平以及居民生活方式不同,流入生活垃圾中荧光灯、扣式电池等含汞废物的数量存在差异导致该类组分汞含量波动较大。而占生活垃圾大部分比重的厨余、纸类、橡塑、纺织类、木竹、砖瓦陶瓷、玻璃和金属类组分的汞含量范围为 0.01 ~ 0.22 mg·kg<sup>-1</sup>,相比处于较低的水平。

### 2.1.3 焚烧厂入炉的生活垃圾中汞含量

根据焚烧的生活垃圾中不同组分的汞含量以及各组分在垃圾中组成比重,计算得到焚烧厂焚烧的入炉垃圾中汞含量,见式(1)。

$$H_{g_w} = \sum_{i=1}^9 C_i \cdot P_i \quad (1)$$

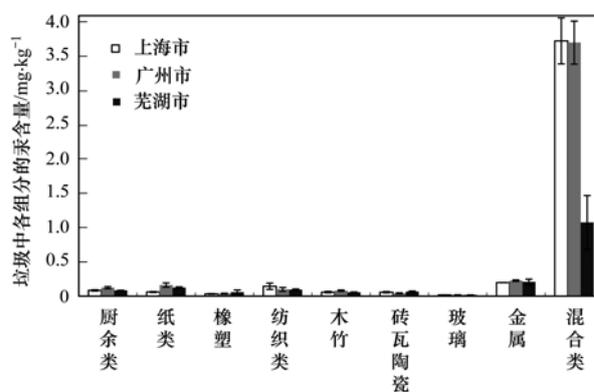


图3 生活垃圾中不同组分的汞含量

Fig. 3 Mercury concentrations of different components in MSW

式中,  $H_{g_w}$  为焚烧的入炉垃圾平均汞含量 (mg·kg<sup>-1</sup>);  $C_i$  为生活垃圾中各组分的汞含量 (mg·kg<sup>-1</sup>);  $P_i$  为相对应组分在垃圾中所占比重。

计算得到 A、B 和 C 这 3 个焚烧厂的入炉垃圾中平均汞含量分别为 (0.39 ± 0.04)、(0.57 ± 0.05)、(0.27 ± 0.08) mg·kg<sup>-1</sup>, 垃圾中混合类组分的含汞量分别占垃圾总汞量的 80.2%、84.3%、76.4%, 说明垃圾中汞的主要来源是由其他类组分构成的混合类组分。不同城市生活垃圾的汞含量存在差异, 测得广州市生活焚烧厂的入炉垃圾中汞含量相对较高, 原因是流入生活垃圾中高汞含量废物

的数量较多导致。

## 2.2 生活垃圾焚烧的汞排放特征

### 2.2.1 垃圾焚烧排放烟气汞质量浓度和形态分布

采用 OH 法测得 B、C 厂垃圾采样时排放烟气汞的平均质量浓度分别为  $(9.5 \pm 3.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(24.1 \pm 6.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 低于《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485-2014) 的限值  $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ <sup>[26]</sup>。测得 B、C 厂排放烟气汞质量浓度高于 Takahashi 等<sup>[18]</sup> 给出日本生活垃圾焚烧厂的  $0.1 \sim 4.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  以及 Kim 等<sup>[17]</sup> 测得韩国生活垃圾焚烧厂的  $2.0 \sim 4.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  烟气汞排放质量浓度。表 4 为近年来学者测得国内采用相同污控设施的生活焚烧厂烟气汞排放质量浓度; 受焚烧的生活垃圾汞含量、焚烧工艺以及焚烧厂污控设施脱汞效率不同的影响, 国内不同地区垃圾焚烧厂排放的烟气汞质量浓度存在差异, 结果显示焚烧厂排放烟气汞质量浓度处于  $9.5 \sim 59.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的范围内; 其中采用炉排炉焚烧工艺的焚烧厂排放烟气汞质量浓度波动较大, 而采用流化床焚烧工艺的焚烧厂排放烟气汞质量浓度相比波动较小。本研究测得的 B 厂排放烟气汞质量浓度相比较低, 可能原因是该厂污控设施对烟气汞的脱除效率较高。虽然国内生活垃圾焚烧厂的排放烟气汞质量浓度均达标<sup>[30]</sup>, 但仍高于国外的生活垃圾焚烧厂; 主要原因是未对生活垃圾中的含汞废物进行分类处理, 焚烧厂焚烧的入炉垃圾中汞含量高, 使得排放烟气汞质量浓度相对较高。

采用 OH 法测试了 B、C 焚烧厂生活垃圾焚烧排放烟气汞的形态分布, 如表 5 所示; B 厂排放烟

表 4 生活垃圾焚烧厂排放烟气汞质量浓度

Table 4 Atmospheric mercury concentrations in municipal solid waste incineration plants

焚烧厂	焚烧工艺	年份	烟气汞质量浓度 $/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	文献
杭州	流化床	2000	28.0	[27]
广州	炉排炉	2010	16.4	
佛山	炉排炉	2010	38.4	[14]
深圳	炉排炉	2010	59.0	
中山	炉排炉	2010	42.0	
东莞-1	流化床	2011	$16.1 \pm 1.5$	[28]
东莞-2	流化床	2011	$23.0 \pm 15.8$	
重庆	炉排炉	2015	$26.4 \pm 22.7$	[29]
广州	炉排炉	2015	$9.5 \pm 3.9$	本研究
芜湖	流化床	2015	$24.1 \pm 6.0$	

气中  $\text{Hg}_p$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^0$  所占比例分别为  $(0.9 \pm 0.8)\%$ 、 $(89.0 \pm 5.4)\%$ 、 $(10.1 \pm 4.6)\%$ , C 厂排放烟气  $\text{Hg}_p$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^0$  所占比例分别为  $(1.0 \pm 0.8)\%$ 、 $(65.4 \pm 27.6)\%$ 、 $(33.6 \pm 27.5)\%$ , 焚烧排放烟气中  $\text{Hg}^{2+}$  的分布比例较高; 由于布袋除尘器对  $\text{Hg}_p$  有很好的脱除效率(大于 95%)<sup>[31]</sup>, 使烟气中  $\text{Hg}_p$  的分布比例较小, 仅占 1% 左右。受焚烧工艺以及垃圾中氯元素含量等因素影响, 采用炉排炉焚烧工艺的 B 厂排放烟气中  $\text{Hg}^{2+}$  的分布比例略高于采用流化床焚烧工艺的 C 厂。本研究测试结果与 Chen 等<sup>[14]</sup> 给出分别采用炉排炉和流化床焚烧工艺的焚烧厂排放烟气中  $\text{Hg}^{2+}$  的 95.5%、63.8% 分布比例相接近, 但相比于 Takahashi 等<sup>[18]</sup> 测得日本采用流化床焚烧工艺生活垃圾焚烧厂排放烟气中  $\text{Hg}^{2+}$  的 92.5% 分布比例, 采用流化床焚烧工艺的 C 厂排放烟气中  $\text{Hg}^{2+}$  分布比例较低。

表 5 垃圾焚烧厂排放烟气汞的形态分布

Table 5 Mercury speciation in flue gas for MSW incineration plants

焚烧厂	炉型	烟气采样次数	汞的形态分布/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$			烟气汞质量浓度 $/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
			$\text{Hg}_p$	$\text{Hg}^{2+}$	$\text{Hg}^0$	
B	炉排炉(GFC)	5	$0.07 \pm 0.04$	$8.60 \pm 3.94$	$0.83 \pm 0.23$	$9.50 \pm 3.90$
C	流化床炉(CFBC)	6	$0.22 \pm 0.15$	$16.64 \pm 9.85$	$7.20 \pm 5.50$	$24.06 \pm 6.01$

### 2.2.2 垃圾焚烧过程中汞分布特征

对烟气采样时同步采集的 B、C 厂垃圾焚烧飞灰和炉渣汞含量进行分析测量, 结合烟气排放量、飞灰和炉渣的产生量, 得到焚烧过程中汞的分布特征, 如表 6 所示。B 厂焚烧飞灰中汞含量为  $(26.8 \pm 1.8) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 高于 C 厂焚烧飞灰的  $(1.6 \pm 0.1) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  汞含量, 原因是 B 厂入炉垃圾的汞输入量以及污控设施协同脱汞效率相比较, 导致焚烧烟气中汞更多的吸附在飞灰中。垃圾焚烧过程中 B 厂

烟气、飞灰和炉渣汞分布比例分别为 3.3%、96.6%、0.1%, C 厂烟气、飞灰和炉渣汞分布比例则分别为 66.3%、33.6%、0.1%; 垃圾焚烧过程仅有 0.1% 左右的汞残留在焚烧炉渣中, 其余的汞进入焚烧飞灰和最终排放烟气中。

B、C 厂排放烟气汞所占比例存在较大差异, 主要原因是焚烧厂的焚烧工艺和入炉垃圾中汞含量不同, 使进入污控设施的烟气中汞的质量浓度和汞形态分布不同, 以及污控设施对烟气汞的脱除能力不同

(B厂污控设施中喷射相比于垃圾焚烧量的石灰碱液量和吸附剂活性炭量均高于C厂,B厂污控设施的脱汞效率较高). B、C厂污控设施的脱汞效率分别为

96.7%、33.7%,B厂脱汞效率高于UNEP工具包中给出的采用“半干法/干法+汞吸附剂+布袋除尘”烟气净化工艺生活垃圾焚烧厂的90%脱汞效率<sup>[32]</sup>.

表6 垃圾焚烧厂焚烧过程中汞分布特征

Table 6 Mercury distribution characteristics during the municipal solid waste combustion in MSW incineration plants

焚烧厂	炉型	煤粉		焚烧飞灰		炉渣		排放烟气	
		汞含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	汞输入量 /g·d <sup>-1</sup>	汞含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	汞输入量 /g·d <sup>-1</sup>	汞含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	汞输入量 /g·d <sup>-1</sup>	汞质量浓度 /μg·m <sup>-3</sup>	汞输入量 /g·d <sup>-1</sup>
B	GFC	—	—	26.8±1.8	536.0±36.0	(2.7±0.7)×10 <sup>-3</sup>	0.4±0.1	9.5±3.9	18.2±7.5
C	CFBC	(59.0±18.0)×10 <sup>-3</sup>	2.4±0.7	1.6±0.1	32.0±2.0	(2.0±0.8)×10 <sup>-3</sup>	0.2±0.1	24.1±6.0	63.5±15.8

### 2.2.3 垃圾焚烧厂大气汞排放因子

根据焚烧厂入炉生活垃圾中汞含量以及污控设施的脱汞效率,可计算得到生活垃圾焚烧厂的大气汞排放因子,见式(2).

$$E_F = C_w \cdot (1 - \eta_A) \quad (2)$$

式中, $E_F$ 为大气汞排放因子(mg·kg<sup>-1</sup>); $C_w$ 为垃圾中的汞含量(mg·kg<sup>-1</sup>); $\eta_A$ 为污控设施的脱汞效率.

计算得到B、C厂大气汞排放因子分别为(0.019±0.002)mg·kg<sup>-1</sup>、(0.178±0.027)mg·kg<sup>-1</sup>;根据Zhang等<sup>[33]</sup>给出上海市生活垃圾焚烧厂污控设施的60%脱汞效率得到A厂大气汞排放因子为(0.156±0.016)mg·kg<sup>-1</sup>.对比可知,尽管B厂焚烧的入炉垃圾中汞含量较高,但由于污控设施的脱汞效率相比较较高,B厂大气汞排放因子低于A、C厂,也略低于国外学者测得韩国、日本生活垃圾焚烧厂的0.026~0.047mg·kg<sup>-1</sup>大气汞排放因子<sup>[17,34]</sup>.与国内生活垃圾焚烧厂相比,A、B、C厂的大气汞排放因子均低于Chen等<sup>[14]</sup>测得珠三角地区部分生活垃圾焚烧厂的(0.208±0.130)mg·kg<sup>-1</sup>大气汞排放因子,A、C厂大气汞排放因子略高于段振亚等<sup>[29]</sup>测得重庆市生活垃圾焚烧厂的(0.127±0.109)mg·kg<sup>-1</sup>大气汞排放因子.

垃圾焚烧厂入炉生活垃圾中汞含量越低以及污控设施的脱汞效率越高,生活垃圾焚烧的大气汞排放因子就越低.国内绝大多数生活垃圾焚烧厂的污控设施采用国内外主流的“半干法+活性炭吸附+布袋除尘”烟气净化工艺,但由于受焚烧烟气汞的质量浓度高低、脱酸塔喷射的碱液量、活性炭吸附剂的喷射量、活性炭的吸附能力以及除尘布袋优劣等不同因素影响,不同焚烧厂的协同脱汞效率存在差异;而通过增加石灰碱液的喷射量、优化布袋除尘设备、提高活性炭喷射速率等措施均可有效提高污控设施的脱汞效率.本研究测试的广州市焚烧厂

由于污控设施管理较好(石灰碱液量以及活性炭喷射量相比较多)以及采用了选择性非催化还原脱硝(SNCR)技术,汞污染控制能力已达到较高的水平.但国内大部分的生活垃圾焚烧厂由于焚烧的垃圾中汞含量较高以及污控设施的协同脱汞能力有限,大气汞排放因子仍高于发达国家的生活垃圾焚烧厂.因此,不仅国内的垃圾焚烧厂需不断优化和改进污控设施来提高协同脱汞效率,政府部门也应尽快建立完善的含汞废物回收法律法规,并加大投资促进有害垃圾的回收和循环利用形成产业化,来减少焚烧的生活垃圾中汞含量,这不仅解决了含汞废物的处理难的问题,更是关系到环境保护以及人民身体健康.

### 3 结论

(1)上海、广州、芜湖市生活垃圾焚烧厂的入炉垃圾中80%以上比重的厨余、纸类、橡塑、纺织类、木竹、砖瓦陶瓷、玻璃和金属类组分中汞含量范围为0.01~0.22mg·kg<sup>-1</sup>,低于混合类组分的1.07~3.72mg·kg<sup>-1</sup>汞含量,混合类组分的含汞量占生活垃圾总汞量的80%左右;混入生活垃圾中荧光灯管、扣式电池等含汞废物的数量是影响垃圾汞含量不同的主要因素,测得广州市焚烧厂的入炉生活垃圾中汞含量相对较高.

(2)由于国内的城市生活垃圾中含汞废物未进行分类处理,测得广州、芜湖市焚烧厂排放烟气汞质量浓度高于日本、韩国的生活垃圾焚烧厂,分别为(9.5±3.9)μg·m<sup>-3</sup>、(24.1±6.0)μg·m<sup>-3</sup>.

(3)广州市焚烧厂(GFC)排放烟气中Hg<sup>2+</sup>分布比例为(89.0±5.4)%,高于芜湖市焚烧厂(CFBC)排放烟气中Hg<sup>2+</sup>的(65.4±27.6)%分布比例,排放烟气中Hg<sub>0</sub>分布比例均为1%左右,焚烧工艺以及污控设施对烟气中各形态汞的脱除能力不同导致排放烟气汞的分布形态存在差异.

(4)上海市、广州市、芜湖市垃圾焚烧厂大气汞排放因子分别为 $(0.156 \pm 0.016)$ 、 $(0.019 \pm 0.002)$ 、 $(0.178 \pm 0.027) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,广州市焚烧厂大气汞排放因子略低于韩国、日本的生活垃圾焚烧厂,上海、芜湖市垃圾焚烧厂的大气汞排放因子与国内部分生活垃圾焚烧厂相接近。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Wang S X, Zhang L, Zhao B, *et al.* Mitigation potential of mercury emissions from coal-fired power plants in China [J]. *Energy & Fuels*, 2012, **26**(8): 4635-4642.
- [ 2 ] Schroeder W H, Munthe J. Atmospheric mercury-an overview [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(5): 809-822.
- [ 3 ] Gao Y S, Zhang Z, Wu J W, *et al.* A critical review on the heterogeneous catalytic oxidation of elemental mercury in flue gases [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(19): 10813-10823.
- [ 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 ] 张益, 赵由才. 生活垃圾焚烧技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [ 6 ] 柴晓利, 赵爱华, 赵由才. 固体废物焚烧技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [ 7 ] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [ 8 ] Cheng H F, Hu Y A. China needs to control mercury emissions from municipal solid waste (MSW) incineration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(21): 7994-7995.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 汤庆合, 丁振华, 江家骅, 等. 大型垃圾焚烧厂周边环境汞影响的初步调查[J]. *环境科学*, 2005, **26**(1): 196-199.
- [ 11 ] 王俊坚, 赵宏伟, 钟秀萍, 等. 垃圾焚烧厂周边土壤重金属浓度水平及空间分布[J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 298-304.
- [ 12 ] Hu D, Zhang W, Chen L, *et al.* Mercury emissions from waste combustion in China from 2004 to 2010 [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **62**: 359-366.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] Pacyna J M, Münch J. Anthropogenic mercury emission in Europe[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 1991, **56**(1): 51-61.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] CJ/T 313-2009, 生活垃圾采样和分析方法[S].
- [ 20 ] ASTM. Designation: D6784- 02. Standard test method for elemental, oxidized, particle-bound, and total mercury in flue gas generated from coal-fired stationary sources (Ontario-Hydro Method) [S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials International, 2008.
- [ 21 ] 杜吴鹏, 高庆先, 张恩琛, 等. 中国城市生活垃圾排放现状及成分分析[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(5): 85-90.
- [ 22 ] Cheng H F, Hu Y A. Mercury in municipal solid waste in China and its control: a review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(2): 593-605.
- [ 23 ] 郭仁宏, 吴胜丰, 黄宇斌, 等. 扣式电池含汞量调查和汞限量的建议[J]. *电池工业*, 2005, **10**(3): 177-180.
- [ 24 ] 菅小东, 沈英娃, 曹国庆. 中国电池生产用汞量调查分析及削减对策[J]. *环境科学与管理*, 2008, **33**(10): 10-13, 16.
- [ 25 ] 王璟, 王卓, 张俊斌, 等. 我国电光源领域重金属污染现状及管理建议[J]. *中国照明电器*, 2012, (6): 1-4.
- [ 26 ] GB 18485-2014, 生活垃圾焚烧污染控制标准[S].
- [ 27 ] 岑可法, 徐旭, 谷月玲, 等. 工业废弃物和生活垃圾流化床焚烧技术的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2000, **34**(1): 1-8.
- [ 28 ] 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.
- [ 29 ] 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 等. 重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 459-465.
- [ 30 ] GB 18485-2001, 生活垃圾焚烧污染控制标准[S].
- [ 31 ] Zhang L, Wang S X, Wu Q R, *et al.* Were mercury emission factors for Chinese non-ferrous metal smelters overestimated? Evidence from onsite measurements in six smelters [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **171**: 109-117.
- [ 32 ] UNEP. Toolkit for identification and quantification of mercury releases, reference report and guideline for inventory level 2 [R]. Geneva Switzerland: UNEP Chemicals Branch, 2013.
- [ 33 ] 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.
- [ 34 ] 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.

## CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM <sub>2.5</sub> Under Air Heavy Pollution in Beijing .....	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes .....	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing .....	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province .....	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> in Beijing During 2014 APEC .....	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Summer in Hongshan District, Wuhan .....	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM <sub>2.5</sub> Based on <i>k</i> -means Analysis .....	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM <sub>2.5</sub> .....	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion .....	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles .....	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China .....	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China .....	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants .....	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River .....	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model .....	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region .....	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis .....	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause .....	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming .....	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake .....	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments .....	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water .....	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i> .....	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies .....	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process .....	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species .....	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China .....	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O <sub>3</sub> /UV .....	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose .....	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater .....	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow .....	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary .....	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater .....	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau .....	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge .....	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate .....	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX .....	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China .....	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields .....	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO <sub>2</sub> Fixation Bacterial Communities and Their CO <sub>2</sub> Assimilation Contents .....	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System .....	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments .....	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil .....	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer .....	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels .....	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt .....	DONG Bing-bing, CHEN Yu-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes .....	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues .....	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE ) P. O. Box 2871 , Beijing 100085 , China Tel : 010-62941102 , 010-62849343 ; Fax : 010-62849343 E-mail : hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street , Beijing 100717 , China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation ( Guoji Shudian ) , P. O. Box 399 , Beijing 100044 , China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行