

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM_{2.5}中水溶性离子特征分析 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)

2013年北京市不同方位PM_{2.5}背景浓度研究 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)

APEC期间北京空气质量改善对比分析 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)

嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王聿(4348)

烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)

典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)

上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应 刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)

重庆金佛山降雪中飞灰颗粒物特征及来源解析 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)

利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)

低浓度CO₂在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)

红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)

中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征 安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)

基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射漫射衰减系数 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)

白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)

小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)

湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)

贵州纳朵洞洞穴水文地球化学变化特征及其环境意义 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈攀秋,刘肖(4455)

碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)

钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)

长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)

城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)

柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)

微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)

扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)

生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)

开放系统下方解石对磷的去除 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)

铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)

基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)

ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)

基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)

北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)

广州市小学生多环芳烃内暴露水平 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)

构建三元混合污染物的三维等效图 刘雪,刘树深,刘海玲(4574)

化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)

不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)

基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)

土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)

纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)

蜈蚣草中砷与铈的赋存特征及其相互作用 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)

纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)

黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)

耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化 马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)

浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)

缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)

华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)

再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)

《环境科学》第36卷(2015年)总目录 (4690)

《环境科学》征订启事(4347) 《环境科学》征稿简则(4454) 信息(4463,4530,4573,4581)

典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡

张雅惠¹, 张成^{1,2}, 王定勇^{1,2*}, 罗程钟³, 杨熹³, 徐凤³

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715; 3. 重庆市固体废物管理中心, 重庆 401117)

摘要: 以重庆市某钢铁企业各工艺单元的进出物料为研究对象, 分析样品总汞及各物料中汞的输入输出量, 初步探讨钢铁生产各工序汞的排放特性及其质量平衡. 结果发现, 各工艺输入物料汞含量为 $2.93 \sim 159.11 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中, 高炉所用块矿汞含量最高, 其次为烧结以及高炉用煤. 输出物料中汞含量为 $3.09 \sim 18.13 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 除尘灰汞含量最高, 其次为转炉渣. 该钢铁企业自备焦化厂汞输入量和输出量分别为 $1346.74 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 36.95 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $177.42 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 13.73 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, 焦化工序中的汞主要来源于焦煤的燃烧. 钢铁生产过程中烧结工序汞输入量最高, 为 $1075.27 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 60.89 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占钢铁生产总汞带入量的 68.06%, 其来源主要是铁矿粉. 固体输出物料中, 烧结工序输出汞量为 $14.15 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 0.38 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占总固体输出量 22.61%. 经估算, 该钢铁企业 2013 年汞排放量约为 553.83 kg, 汞排放因子为 $0.092 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ 钢产量. 为控制汞排放, 钢铁企业应结合生产实际, 进一步降低焦化以及烧结工序能耗水平, 或提高原料质量, 减少汞的输入.

关键词: 钢铁工业; 汞; 排放特征; 排放因子; 质量平衡

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4366-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.006

Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry

ZHANG Ya-hui¹, ZHANG Cheng^{1,2}, WANG Ding-yong^{1,2*}, LUO Cheng-zhong³, YANG Xi³, XU Feng³

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400715, China; 3. Chongqing Solid Wastes Management Center, Chongqing 401117, China)

Abstract: To preliminarily discuss the mercury emission characteristics and its mass balance in each process of the iron and steel production, a typical iron and steel enterprise was chosen to study the total mercury in all employed materials and estimate the input and output of mercury during the steel production process. The results showed that the mercury concentrations of input materials in each technology ranged $2.93\text{-}159.11 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ with the highest level observed in ore used in blast furnace, followed by coal of sintering and blast furnace. The mercury concentrations of output materials ranged $3.09\text{-}18.13 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and the mercury concentration of dust was the highest, followed by converter slag. The mercury input and the output in the coking plant were $1346.74 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 36.95 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ and $177.42 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 13.73 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively. In coking process, mercury mainly came from the burning of coking coal. The sintering process was the biggest contributor for mercury input during the iron and steel production with the mercury input of $1075.27 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 60.89 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ accounting for 68.06% of the total mercury input during this production process, and the ore powder was considered as the main mercury source. For the solid output material, the output in the sintering process was $14.15 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 0.38 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, accounting for 22.61% of the total solid output. The mercury emission amount from this studied iron and steel enterprise was estimated to be 553.83 kg in 2013 with the emission factor of $0.092 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ steel production. Thus, to control the mercury emissions, iron and steel enterprises should combine with production practice, further reduce energy consumption of coking and sintering, or improve the quality of raw materials and reduce the input of mercury.

Key words: iron and steel industry; mercury; emission characteristics; emission factor; mass balance

据估计,全球每年输入到大气中汞的总量约为 6 000 ~ 7 500 t, 其中, 人为源排放约占 $2/3$ ^[1]. 大气汞污染问题成为国内外研究热点之一^[2-5], 一些学者先后采用估算及实际测量等方式对人为汞排放进行过研究. 目前, 国内外一些学者对燃煤电厂^[6-11]、非燃煤等行业^[12-15]大气汞排放特征及排放清单进行了初步研究. 火电厂燃煤是大气汞排放最重要的来源, 其次为有色金属冶炼、水泥生产、生活垃圾焚烧、钢铁冶炼等^[15]. 有研究发现, 非燃煤行业大

气汞排放量比燃煤电厂高 2 倍^[15], 因此, 非燃煤汞排放也不容忽视. 钢铁行业作为非燃煤汞排放行业, 2011 年全球及中国钢铁工业汞排放量分别为

收稿日期: 2015-06-12; 修订日期: 2015-07-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430004); 重庆市环境保护局科技项目(2013CF-101)

作者简介: 张雅惠(1991~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气汞污染, E-mail: yhuizhang91@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

59.6 t 和 27.32 t^[16]. Pacyna 等^[17] 研究发现, 粗钢生产的汞排放因子为 0.04 g·t⁻¹ 钢产量, Fukuda 等^[18] 的研究结果与其相似. 目前, 由于能源紧缺和钢铁行业竞争加剧, 国内外学者更加重视钢铁企业能耗现状及节能问题^[19~22], 而针对我国钢铁行业汞排放特征的研究还很缺乏. 重庆是我国西部地区最大的工业城市, 直辖以来, 经济快速发展, 钢铁消耗量逐年增加. 本课题组曾对重庆市大气汞人为排放量进行估算, 初步估算了钢铁生产汞排放量^[23], 但缺乏对钢铁生产过程中的汞输入输出量的实际测试分析. 因此, 本研究以重庆某钢铁企业作为典型案例, 分析钢铁生产输入输出物料汞含量及其排放特征, 估算了钢铁生产汞排放因子, 以期为进一步制定详细的大气汞人为源排放清单和控制我国钢铁生产行业汞污染排放提供研究基础.

1 材料与方法

1.1 监测对象及基本概况

以重庆某钢铁企业为研究对象, 该钢铁企业拥有宽厚板、中板、热轧薄板、线材、棒材、型钢、冷轧等 7 条生产线, 年生产规模为 600 万 t. 采用铁-钢

界面“一罐制”、钢-轧界面“辊道输送链接”的短流程紧凑型布置以及全球首创的“干式 RH 真空冶炼工艺技术”被列入第五批“国家重点节能技术推广目录”. 各工艺环节均设置有除尘装置, 除此以外, 烧结工艺还设有 3 套脱硫装置, 环保设施健全, 具有较为完善的环境管理制度. 实现了工业用水 100% 循环使用, 废水零排放, 废渣全量回收利用, 二次能源全部实现高效回收利用, 自发电率近 80%. 该企业钢铁生产概况及主要输入输出物料如表 1 所示. 钢铁生产过程是由众多过程单元/工序构成的复杂系统^[23], 该钢铁生产工艺主要包括焦化、烧结、球团、高炉炼铁、转炉炼钢、以及石灰石焙烧等, 都会产生汞. 焦炉利用洗精煤生产焦炭, 用于高炉炼铁; 烧结机以无烟煤以及高炉筛下焦为固体燃料, 以混匀矿、白云石、生石灰、球团矿为原料生产烧结矿; 球团系统以铁矿粉与膨润土为原料生产球团矿; 高炉以烧结矿、球团矿为原料, 燃料为焦炭、煤粉, 产出铁水, 副产品为高炉渣; 高炉产出的铁水由炼钢转炉冶炼成钢水, 转炉原料为活性石灰、轻烧白云石以及萤石; 最后由连铸机铸成钢坯, 钢坯再由轧钢厂轧制成带钢或薄板作为产品外售.

表 1 监测对象生产概况

Table 1 Production situation of the monitoring object

生产环节	工艺设施	原料	产物	副产物
焦化	6×60 孔(6 m 碳化室) 焦炭: 351×10 ⁴ t·a ⁻¹	焦煤(主焦煤、1/3 焦煤、瘦煤)	焦炭	除尘灰
烧结	3×360 m ² 烧结机 烧结矿: 950×10 ⁴ t·a ⁻¹	铁矿粉、白云石、生石灰、球团矿、 烧结返矿、焦粉	烧结矿	烧结钢渣、除尘灰
球团	1 条链篦机-回转窑 球团矿: 200×10 ⁴ t·a ⁻¹	铁矿粉、膨润土	球团矿	除尘灰
高炉	3×2 500 m ³ 铁水: 580×10 ⁴ t·a ⁻¹	焦炭、喷吹煤、球团矿、烧结矿、块矿	铁水	高炉渣、除尘灰
转炉	3×210 t 钢水: 615.4×10 ⁴ t·a ⁻¹	活性石灰、轻烧白云石、萤石	钢坯	转炉渣、除尘灰

1.2 样品采集及分析

为了对钢铁工业汞污染进行全面监测, 采集了各生产工序所需原料: ①焦煤, 包括主焦煤、1/3 焦煤、瘦煤; ②铁矿粉; ③白云石; ④生石灰; ⑤焦粉; ⑥球团矿; ⑦烧结返矿; ⑧膨润土; ⑨焦炭; ⑩喷吹煤; ⑪块矿; ⑫活性石灰; ⑬轻烧白云石; ⑭萤石. 以及各生产工序输出物料: ①焦炭; ②烧结矿; ③球团矿; ④高炉渣; ⑤转炉渣; ⑥除尘灰. 各类型的样品均分别采集 3 组. 未干燥样品经冷冻干燥后研磨过 100 目筛, 然后密封冷冻保存. 干燥样品过筛后直接密封冷冻保存. 样品总汞含量参照美国 EPA7473 方法进行分析^[24], 采用 DMA-80 固体

样品汞直接分析仪测定. 质量控制采用标准参考物质(GBW07405)进行, 其总汞的标定值为 290 μg·kg⁻¹, 实验测定值 289.2 μg·kg⁻¹ ± 6 μg·kg⁻¹. 每批次测定均设置 3 个平行样品. 平行样品测定结果的相对标准偏差均小于 15%.

1.3 汞排放因子估算

由于采样条件和采样设备的限制, 未对钢铁生产过程中的烟气汞排放进行采样和测试, 本研究根据各物料输入输出量及其质量平衡估算烟气汞排放量和排放因子. 其中, 钢铁生产过程各物料汞输入输出量计算公式如下:

$$m_i = W_i \cdot C_i \quad (1)$$

$$m_{\text{烟气}} = m_{\text{in}} - m_{\text{out}} = (m_1 + m_2 + m_3) - (m_4 + m_5 + m_6 + m_7) \quad (2)$$

式中, m_{in} 、 m_{out} 分别代表每天钢铁生产过程输入及输出汞量 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$), W_i 代表各物料消耗或产出量 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$), C_i 代表各物料中汞含量 ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), $m_{\text{烟气}}$ 为烟气汞排放量 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$), m_1 、 m_2 、 m_3 分别代表烧结、高炉、转炉这 3 个生产工艺中汞的输入量 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$), m_4 、 m_5 、 m_6 、 m_7 分别代表烧结、高炉、转炉、除尘灰(除烧结外)排放的汞量 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$).

由此估算钢铁生产过程的汞排放因子为:

$$F = m_{\text{烟气}}/M \quad (3)$$

式中, F 为钢铁生产过程中大气汞排放因子 ($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$), M 为每天该钢铁企业粗钢的生产量 (t).

2 结果与分析

2.1 焦化工序输入、输出物料汞含量分析

焦化工序所用炼焦煤以重庆周边地区为主, 主要为焦煤、1/3 焦煤和瘦煤. 焦煤以天府和南桐煤为主, 平均汞含量分别为 $222.41 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 10.61 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $24.37 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.89 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 1/3 焦煤以荣昌、永川、渡市、石板煤为主, 平均汞含量为 $31.39 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.27 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 瘦煤以四川

宣汉为主, 汞含量平均值为 $165.14 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 6.51 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 焦炉煤以主焦煤、1/3 焦煤、瘦煤为 1:1:1 比例计算, 平均汞含量为 $106.64 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 4.18 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 略低于我国煤中平均汞含量 $150 \sim 220 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ [25]. 进入焦化工序的煤是各种牌号的炼焦煤经洗煤工艺后配合使用. 有研究表明[26], 因洗煤方法和煤种的不同, 洗煤能去除煤中 11% ~ 71% 的汞. 朱海波等[27] 研究认为传统洗煤方式能去除原煤中 30% 左右的汞, 因此炼焦所用的洗精煤按原煤经洗煤后的 30% 汞含量计算, 即炼焦用洗精煤汞含量为 $74.65 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 2.93 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

如图 1, 焦化工序输出物料主要为焦炭, 其平均汞含量为 $18.13 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 1.42 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占焦炉原煤总汞的 17%, 与朱海波等[27] 研究结果(焦炭中的汞占原煤总汞的 22%) 基本一致. 焦化工序生产的焦炭经筛分后, 大于 25 mm 的冶金焦经输送机送至高炉炼铁, 小于 25 mm 的焦炭即焦粉经输送机送往烧结厂用于烧结工艺. 焦化工序的主要副产物为除尘灰, 占各工序产生的总除尘灰 20%, 其平均汞含量为 $11.92 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.40 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其他副产物包括煤尘、焦尘、焦油渣、再生器残渣等, 但由于输出量过少, 以及现场取样条件限制, 均不考虑在输出物料内.

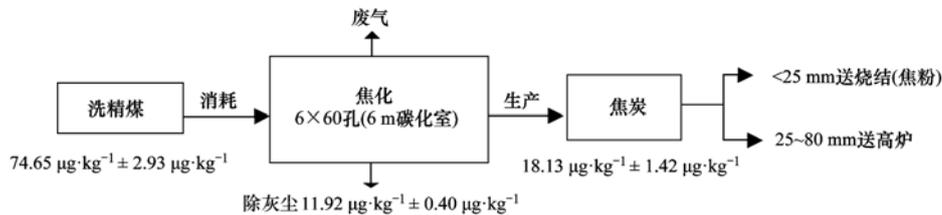


图 1 焦化工序物料与汞含量构成

Fig. 1 Material for coking and constitution of mercury content

2.2 烧结工序输入、输出物料汞含量分析

烧结工艺即将各种铁矿粉颗粒粘结成块的过程, 输入物料包括铁矿、白云石、生石灰、焦粉、球团矿和无烟煤. 其中, 铁矿粉主要有澳大利亚铁矿粉、印尼粉、自产氧化铁、伊朗粉、接龙粉、高硅巴粉、辽宁精矿和外购氧化铁等, 汞含量为 $2.50 \sim 305.29 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $52.94 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 2.58 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 烧结工序主要利用国内矿以及部分国外进口矿, 一般成分稳定, 杂质较少, 烧结用成品混匀矿平均汞含量为 $52.94 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 2.58 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 烧结用白云石的目的是使烧结矿中含有适当的 MgO , 对烧结过程有良好作用, 可以提高烧结矿的质量, 所取白云石平均汞含量为 $20.18 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 1.32 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 生石灰的作用是在烧结过程中与其它矿物发生矿化反应, 其平均

汞含量为 $16.15 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 14.90 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 焦粉、无烟煤和球团矿(自产球)的平均汞含量分别为 $18.13 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 1.42 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $135.48 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.09 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.09 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.33 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 从图 2 中可知, 烧结工序所用原料中, 汞含量最高为无烟煤, 其次为焦粉. 烧结工艺的主要输出物料为烧结矿、烧结钢渣以及除尘灰, 其汞平均值分别为 $3.13 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.06 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $4.51 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.06 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $11.92 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.40 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 此外, 有部分烧结矿返回到烧结炉中, 其汞含量为 $6.66 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.27 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 为避免重复, 在质量平衡分析中烧结返矿不考虑在输入物料内.

2.3 球团工艺输入、输出物料汞含量分析

球团工艺与烧结工艺作用类似, 即用铁矿粉等

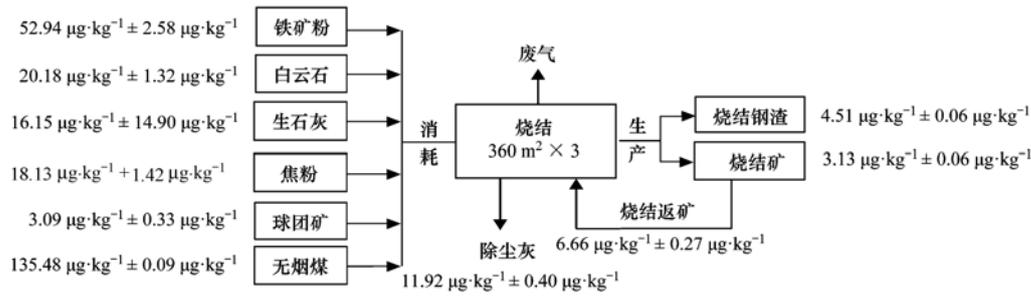


图2 烧结系统物料与汞含量构成

Fig. 2 Material for sintering and constitution of mercury content

含铁粉料固结成为具有一定强度和冶金性能的球型含铁原料,主要输入物料包括铁矿粉和膨润土. 其中,铁矿粉主要利用国外进口低硫矿,平均汞含量为 $51.43 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 1.75 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与烧结用混匀矿汞含量相当. 膨润土由于其具有很强的黏结性以及高

温稳定性,因此被广泛应用于球团矿的制作工艺中,其平均汞含量为 $3.68 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.14 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图3). 输出物料为球团矿,汞平均值为 $3.09 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.33 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 副产物为除尘灰,其平均汞含量为 $11.92 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.40 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

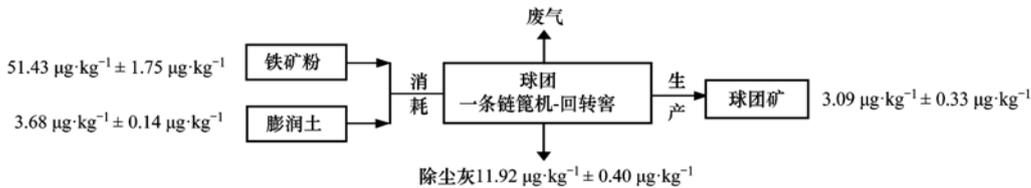


图3 球团工序物料与汞含量构成

Fig. 3 Material for pelletizing and constitution of mercury content

2.4 高炉炼铁工艺输入、输出物料汞含量分析

高炉炼铁工艺的主要输入物料包括焦炭、喷吹煤、球团矿、烧结矿和块矿. 其中,焦炭来源于焦炉,焦炭作为发热剂,在风口前燃烧放出大量热量并产生煤气,煤气在上升过程中将热量传给炉料,使高炉内的各种物理化学反应得以进行. 除此以外,焦炭还有还原剂、料柱骨架、渗碳剂等功能,焦炭的汞平均含量为 $18.13 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 1.42 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图4). 无烟喷吹煤平均汞含量为 $135.48 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.09 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与殷立宝等^[28]测算的无烟煤汞含量 $174 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 相当. 块矿包括马来块矿、印尼块矿、

綦江块矿、澳大利亚块矿等. 分析表明,綦江块矿汞含量为 $22.78 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.96 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,远低于外来块矿,马来块矿、印尼块矿和澳大利亚块矿的汞含量分别高达 $152.95 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 8.96 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $307.77 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 15.94 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $152.95 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 1.95 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 几种块矿汞含量平均值为 $159.11 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 6.95 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 球团矿和平均汞含量分别为 $3.09 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.33 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.13 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.06 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

高炉炼铁成品为铁水,副产物为高炉渣,主要由矿石的脉石和熔剂、燃料灰分等熔化后组成,其主要

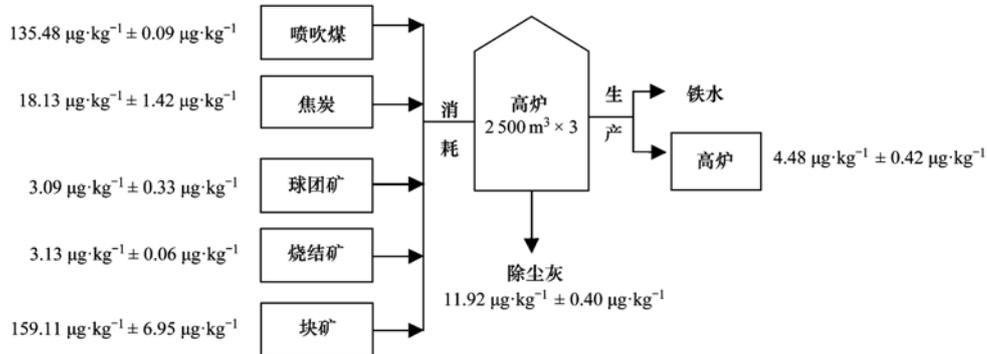


图4 高炉炼铁工序物料与汞含量构成

Fig. 4 Material for blast furnace ironmaking and constitution of mercury content

成分为 CaO、MgO、SiO₂ 等. 高炉渣的汞含量平均值为 4.48 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.42 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 此外, 高炉炼铁还会产生炉尘, 经除尘处理与煤气等分离, 即除尘灰, 其平均汞含量为 11.92 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.40 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.5 转炉炼钢工艺输入、输出物料汞含量分析

转炉炼钢工艺输入物料主要有活性石灰、轻烧白云石和萤石. 其中, 萤石和轻烧白云石汞平均含量较高, 分别为 32.50 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 2.92 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 18.96 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 3.20 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 5), 活性石灰平均汞含量较低, 为 2.93 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.10 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 轻烧白云石的作用是减少炉衬中的 MgO 向炉渣中转移, 加速石灰熔化, 促进前期化渣, 延长炉衬寿命.

转炉用萤石具有增强渣钢间的界面反应能力, 以及增加转炉喷溅, 加剧对炉衬的侵蚀等功能, 转炉的副产物转炉渣平均汞含量为 9.07 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.02 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

钢铁冶炼过程中, 除烧结工序使用双室四电场电除尘器外, 其余工序设置的除尘装置均为布袋除尘器, 各工序的废气经除尘装置后都会产生除尘灰, 球团工序、高炉炼铁、转炉炼钢产生的除尘灰为统一采集, 其平均汞含量均为 11.92 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.40 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

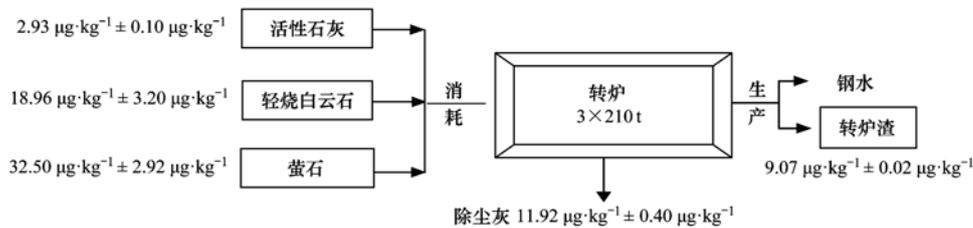


图 5 炼钢工序物料与汞含量构成

Fig. 5 Material for steelmaking and constitution of mercury content

2.6 汞质量平衡分析

根据各物料每年消耗量及其汞含量, 估算钢铁企业每日各工序汞输入量, 见表 2. 分析得出, 该钢铁生产过程汞总输入量为 1 579.93 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 73.52 \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 其中汞输入量最高为烧结工序 1 075.27 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 60.89 \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占钢铁生产输入汞总量的 68.06%. 烧结工序中汞主要来源于铁矿粉, 铁矿粉作为烧结工序的主原料必不可少, 应使用成分更稳定, 杂质含量更少的高品位含铁原料, 降低烧结工序汞输入量. 其次为高炉炼铁, 其汞带

入量为 496.79 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 11.68 \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占总量的 31.44%, 高炉中的汞大部分来源于喷吹煤以及焦炭. 球团工艺汞输入量为 291.91 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 9.95 \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 汞的主要来源为铁矿粉. 由于球团工艺所输出的球团矿全部分别进入烧结以及高炉, 为避免重复计算, 球团工艺未单独列入. 转炉炼钢汞输入量最少, 为 7.87 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 0.95 \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占总量 0.50%. 综合以上分析, 整个钢铁生产过程, 汞主要来源于各工序所用煤, 烧结以及球团所用铁矿粉以及焦化工序产生的焦炭.

表 2 不同工艺汞输入量

Table 2 Mercury input in each technology

工序	输入物料	V/t·d ⁻¹	W/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	汞输入量/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	合计/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$
焦化	焦煤	12 628.8	106.64 ± 2.93	1 346.74 ± 36.95	1 346.74 ± 36.95
	铁矿粉(烧结)	18 419.2	51.43 ± 1.75	947.30 ± 32.29	
	白云石	1 969.9	20.18 ± 1.32	39.75 ± 2.59	
烧结	生石灰	1 660.3	16.15 ± 14.90	26.81 ± 24.72	1 075.27 ± 60.89 (m_1)
	焦粉	821.9	18.13 ± 1.42	14.90 ± 1.17	
	无烟煤	337.0	135.48 ± 0.09	45.66 ± 0.03	
	球团矿	274.0	3.09 ± 0.33	0.85 ± 0.09	
	焦炭	6 038.4	18.13 ± 1.42	109.48 ± 8.56	
高炉	喷吹煤	2 383.6	135.48 ± 0.09	322.93 ± 0.21	496.79 ± 11.68 (m_2)
	球团矿	520.5	3.09 ± 0.33	1.61 ± 0.17	
	块矿	394.5	159.11 ± 6.95	62.77 ± 2.74	
	活性石灰	843.0	2.93 ± 0.10	2.46 ± 0.08	
转炉	轻烧白云石	252.1	18.96 ± 3.20	4.78 ± 0.81	7.87 ± 0.95 (m_3)
	萤石	19.5	32.50 ± 2.92	0.63 ± 0.06	

根据各物料每年输出量及其汞含量, 分析得出(见表 3), 该企业钢铁生产过程中, 固体产物汞输出量为 $62.58 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 3.40 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, 其中烧结工序汞输出量为 $14.15 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 0.38 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$. 烧

结工序固体产物汞输出量占固体产物总汞输出量的 22.61%. 由于烧结矿作为烧结工序的输出物料已全部进入高炉, 因此在质量平衡分析中 m_4 不包括烧结矿.

表 3 不同工艺汞输出量

Table 3 Mercury output in each technology

工序	输出物料	V/t·d ⁻¹	W/μg·kg ⁻¹	汞输出量/g·d ⁻¹	合计/g·d ⁻¹
焦化	焦炭	9 616.4	18.13 ± 1.417	174.35 ± 13.63	177.42 ± 13.73
	除尘灰(焦化)	257.64	11.92 ± 0.40	3.07 ± 0.10	
烧结	烧结矿	26 027.4	3.13 ± 0.06	81.47 ± 1.43	14.15 ± 0.38(m_4)
	烧结钢渣	1 095.9	4.51 ± 0.06	4.94 ± 0.07	
	除尘灰(烧结)	772.92	11.92 ± 0.40	9.21 ± 0.31	
高炉	高炉渣	6904.1	4.48 ± 0.42	30.93 ± 2.90(m_5)	48.43 ± 3.02
转炉	转炉渣	1591.0	9.07 ± 0.02	14.43 ± 0.02(m_6)	
除尘灰(球团、高炉、转炉)		257.64	11.92 ± 0.40	3.07 ± 0.10(m_7)	

根据表 2 和表 3 中数据及质量平衡公式估算, 钢铁生产过程中烟气汞排放量为 $1 517.35 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 70.12 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$. 2013 年, 该钢厂钢坯生产量为 $600 \times 10^4 \text{ t}$, 由此估算出该钢铁企业 2013 年汞排放量约为 553.83 kg, 汞排放因子(以粗钢计, 下同)为 $0.092 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$. 与 UNEP 发布的全球汞排放调查报告中粗钢生产的汞排放因子 $0.04 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ 相比^[17], 我国的粗钢生产汞排放因子略高, 同时, 也高于 Fukuda 等^[18] 的研究结果($0.0488 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$). 这可能是由于未对钢铁

生产过程中的烟气汞排放进行测试, 仅根据各物料输入输出量及其质量平衡来进行估算, 因此, 估算结果可能偏高. Fukuda 等^[18] 主要针对焦化、烧结以及高炉排汞进行了研究, 其结果表明, 烧结过程中的汞排放占总排放量的 90% 以上, 并且烧结过程的除尘与脱硫装置可明显降低汞的释放. 烧结系统的静电除尘的脱汞率为 21%, 同时运行静电除尘器及脱硫装置的脱汞率为 38%. 而本研究针对整个钢铁生产过程, 烧结过程汞的排放仅占总排放的 68.06%,

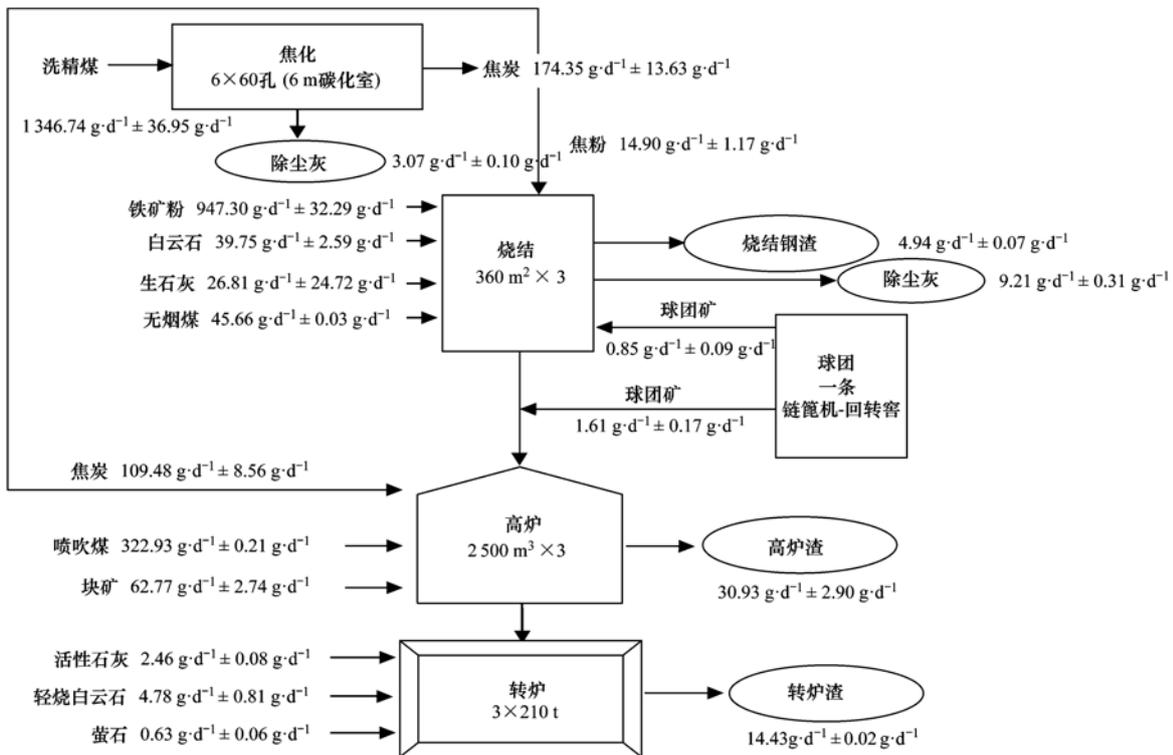


图 6 钢铁生产汞行为分析

Fig. 6 Mercury behavior analysis in iron and steel production

因此除烧结工序以外,高炉、球团、转炉的汞排放也不容忽视,这也可能是导致本研究汞排放因子较高的原因.同时,与世界主要产钢国钢铁工业的能源结构相比,中国煤炭所占比例高于其它国家,而天然气和燃料油的比重明显低于发达国家^[29].除此以外,钢铁生产过程中污控措施对汞的去除效率不同,这可能成为我国钢铁行业汞排放因子比国外略高的原因.

钢铁企业是一个耗能大、过程复杂的系统.钢铁生产过程中涉及汞的环节有焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢等.对上述各生产环节分别进行汞行为分析,见图6.该钢铁厂生产过程中产生的固体废物有高炉渣、钢渣、水处理污泥、氧化铁皮、废钢、烧结脱硫渣、脱硫石膏、除尘灰等,每年产生的固体废物总量为439.26万t,综合利用率达到97.6%.流程的连续、紧凑和高效化程度综合地反映整个企业效率和效益的好坏.目前我国越来越重视大气污染物的治理问题,作为重要污染源,包括钢铁行业在内的工业生产不容忽视.

3 结论

(1)该钢铁企业生产过程各工艺输入物料中,高炉所用块矿汞含量最高,达 $159.11 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 6.95 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其次为烧结以及高炉用煤.输出物料中,除尘灰汞含量最高,为 $18.13 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 1.42 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其次为转炉渣.

(2)钢铁生产过程中,烧结工序汞总输入量占钢铁生产输入汞总量的68.06%,远高于其他工序.且烧结工序固体产物汞输出量也较大,占固体产物总汞输出量的22.61%.

(3)该钢铁企业自备焦化厂由于燃煤消耗量大,有大量的汞输入,汞输入量为 $1346.74 \text{g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 36.95 \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,固体产物总汞输出量为 $177.42 \text{g}\cdot\text{d}^{-1} \pm 13.73 \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$.

(4)初步估算该钢铁企业2013年汞排放量约为553.83kg,烟气汞排放因子(以粗钢计)为 $0.092 \text{g}\cdot\text{t}^{-1}$,略高于国外钢铁行业汞排放因子.钢铁企业应结合生产实际,进一步降低焦化以及烧结工序能耗水平或提高原料质量,减少汞的输入,控制汞排放.

参考文献:

[1] Mason R, Pirrone N. Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere: Emissions, Measurements and Models [M]. New York: Springer, 2009. 1-47.

- [2] Xu J Y, Bravo A G, Lagerkvist A, *et al.* Sources and remediation techniques for mercury contaminated soil [J]. *Environment International*, 2015, **74**: 42-53.
- [3] Ariya P A, Amyot M, Dastoor A, *et al.* Mercury physicochemical and biogeochemical transformation in the atmosphere and at atmospheric interfaces: A review and future directions [J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115** (10): 3760-3802.
- [4] Gustin M S, Amos H M, Huang J, *et al.* Measuring and modeling mercury in the atmosphere: a critical review [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15** (10): 5697-5713.
- [5] 朱琼宇,程金平,魏雨晴,等.霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征[J].*环境科学*,2015,**36**(2):373-378.
- [6] Wang K L, Omdorff W, Cao Y, *et al.* Mercury transportation in soil via using gypsum from flue gas desulfurization unit in coal-fired power plant [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(9): 1858-1864.
- [7] Ancora M P, Zhang L, Wang S X, *et al.* Economic analysis of atmospheric mercury emission control for coal-fired power plants in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **33**: 125-134.
- [8] 李文俊.燃煤电厂和水泥厂大气汞排放特征研究[D].重庆:西南大学,2011.19-25.
- [9] GB 13223-2011,火电厂大气污染物排放标准[S].
- [10] 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.
- [11] Landis M S, Ryan J V, ter Schure A F H, *et al.* Behavior of mercury emissions from a commercial coal-fired power plant: the relationship between stack speciation and near-field plume measurements [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(22): 13540-13548.
- [12] 马杰,朱云,王亚杰,等.广东省工业点源大气汞排放清单更新研究[J].*环境科学学报*,2013,**33**(9):2369-2377.
- [13] Zhu W, Li Z G, Chai X L, *et al.* Emission characteristics and air-surface exchange of gaseous mercury at the largest active landfill in Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **79**: 188-197.
- [14] Wang F Y, Wang S X, Zhang L, *et al.* Mercury enrichment and its effects on atmospheric emissions in cement plants of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **92**: 421-428.
- [15] 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.
- [16] 熊樱,苗沛然,李卫波,等.中国钢铁工业烟气汞排放管理及控制分析[A].见:第二届重金属污染防治技术及风险评估研讨会暨重金属污染防治专委会2012年首届学术年会论文集[C].北京:中国环境科学学会,2013.7-11.
- [17] Pacyna E G, Pacyna J M, Sundseth K, *et al.* Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020 [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(20): 2487-2499.

- [18] Fukuda N, Takaoka M, Doumoto S, *et al.* Mercury emission and behavior in primary ferrous metal production [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(22): 3685-3691.
- [19] 李士琦, 纪志军, 吴龙, 等. 钢铁企业能源消耗分析及节能措施[J]. *工业加热*, 2010, **39**(5): 1-3, 13.
- [20] 陈光, 李玲云, 丁毅, 等. 钢铁企业系统能耗影响因素分析[J]. *钢铁*, 2014, **49**(4): 86-89.
- [21] 张文娟, 王宝, 刘青, 等. 钢厂能耗分析与评价的研究进展[J]. *过程工程学报*, 2011, **11**(3): 533-540.
- [22] Matsuda K, Tanaka S, Endou M, *et al.* Energy saving study on a large steel plant by total site based pinch technology [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, **43**: 14-19.
- [23] 张成, 杨永奎, 王定勇. 重庆大气汞人为排放及其预测[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(8): 904-908.
- [24] US EPA method 7473, Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry [S].
- [25] 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): 5-13, 17.
- [26] Pavlish J H, Sondreal E A, Mann M D, *et al.* Status review of mercury control options for coal-fired power plants [J]. *Fuel Processing Technology*, 2003, **82**(2-3): 89-165.
- [27] 朱海波, 梅凡民, 陈敏. 西安市工业燃煤汞排放清单[J]. *环境保护科学*, 2008, **34**(2): 96-98.
- [28] 殷立宝, 糕玉群, 徐齐胜, 等. 中国燃煤电厂汞排放规律[J]. *中国电机工程学报*, 2013, **33**(29): 1-9.
- [29] 徐世杰. 世界主要国家钢铁工业节能环保发展战略[J]. *冶金信息导刊*, 2007, **44**(4): 1-2, 5.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zeolite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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
欧阳自远 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)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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

国内外公开发行人