

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

PM<sub>2.5</sub>浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例 ..... 吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)

北京地区近35年大气污染扩散条件变化 ..... 郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)

北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响 ..... 韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)

北京山谷风环流特征分析及其对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响 ..... 董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)

北京市建筑施工扬尘排放特征 ..... 薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)

生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征 ..... 吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)

广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O<sub>3</sub>与SOA的生成潜势 ..... 邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)

南京北郊大气臭氧周末效应特征分析 ..... 王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)

亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降 ..... 王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)

宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性 ..... 王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青耀,米持真一,吕森林(2273)

垃圾焚烧厂二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估 ..... 杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)

重庆市新型干法水泥厂汞排放特征 ..... 张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)

轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性 ..... 王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)

不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性 ..... 楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)

西江水氧同位素组成的空间变化及环境意义 ..... 许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)

基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程 ..... 韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)

三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较 ..... 姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)

滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征 ..... 王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)

香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算 ..... 罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焱,黄应平(2345)

大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价 ..... 张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)

海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成 ..... 齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)

两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用 ..... 王晨焱,姜括,谢文龙,汪磊(2373)

高地下水地区透水铺装控制径流污染的现场实验 ..... 金建荣,李田,时珍宝(2379)

稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚 ..... 张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)

超声、紫外增强H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/KI降解磺胺甲基嘧啶 ..... 魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)

不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比 ..... 姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)

铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果 ..... 郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周徽(2412)

组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析 ..... 张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)

温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响 ..... 张玲,彭党聪,常蝶(2429)

海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性 ..... 冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)

不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析 ..... 周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)

磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响 ..... 周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)

碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制 ..... 秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)

外源Ca<sup>2+</sup>对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响 ..... 任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)

膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析 ..... 张崇森,牛全睿,徐雨梅,王院梅,王岱,武少华(2477)

反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析 ..... 谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)

硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制 ..... 李欢,王磊,王亚楠(2496)

关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征 ..... 乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)

基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析 ..... 陈秀端,卢新卫(2513)

基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例 ..... 佟瑞鹏,杨校毅(2522)

Eh、pH和铁对水稻土砷释放的影响机制 ..... 钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)

典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系 ..... 陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)

复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果 ..... 陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)

两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果 ..... 田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)

大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性 ..... 王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)

源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响 ..... 杨宁伟,毕二平(2568)

地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响 ..... 罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)

长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)

基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径 ..... 袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)

广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价 ..... 王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)

活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响 ..... 甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏莞,周俊(2607)

工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展 ..... 王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)

《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)

# 重庆市新型干法水泥厂汞排放特征

张成<sup>1,2</sup>, 张雅惠<sup>1</sup>, 王永敏<sup>1</sup>, 王定勇<sup>1,2\*</sup>, 罗程钟<sup>3</sup>, 徐凤<sup>3</sup>, 何秀清<sup>3</sup>

(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3个新型干法水泥厂为研究对象, 分析典型水泥厂输入输出物料汞含量, 探讨水泥厂中汞的来源和去向, 研究重庆市典型新型干法水泥厂汞的排放特征, 估算其大气汞排放量和排放因子。结果表明, 3个水泥厂的汞主要来源为石灰石, 其次为煤。石灰石汞含量为 $(0.025 \pm 0.001) \sim (0.032 \pm 0.002) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 煤汞含量为 $(0.080 \pm 0.002) \sim (0.110 \pm 0.012) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。脱硫石膏汞含量较高, 为 $(0.447 \pm 0.007) \sim (0.525 \pm 0.009) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其余原料的汞含量均较小。3个水泥厂排放的汞主要进入了烟气, 脱硫石膏中的汞主要进入了水泥产品。3个水泥厂的大气汞排放量为 $(73.42 \pm 8.10) \sim (215.18 \pm 10.75) \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ , 大气汞排放因子( $EF_{\text{熟料}}$ 、 $EF_{\text{水泥}}$ )分别为 $(0.016 \pm 0.001) \sim (0.049 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $(0.011 \pm 0.000) \sim (0.036 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ , 明显低于以往水泥行业采用的国外汞排放因子。

**关键词:** 水泥厂; 汞排放; 排放因子; 回转窑; 重庆

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2287-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201611041

## Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing

ZHANG Cheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Ya-hui<sup>1</sup>, WANG Yong-min<sup>1</sup>, WANG Ding-yong<sup>1,2\*</sup>, LUO Cheng-zhong<sup>3</sup>, XU Feng<sup>3</sup>, HE Xiu-qing<sup>3</sup>

(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:** Three typical modern dry processing cement plants in Chongqing were chosen to investigate mercury emission characteristics and its source and fate through a mercury mass balance method by analyzing mercury contents in all input and output materials. The results showed that limestone was the main source of mercury in three cement plants followed by coal, and their mercury concentrations were  $(0.025 \pm 0.001) \sim (0.032 \pm 0.002) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $(0.080 \pm 0.002) \sim (0.110 \pm 0.012) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. The highest mercury level in all required input materials was  $(0.447 \pm 0.007) \sim (0.525 \pm 0.009) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  for gypsum, while the mercury content of other raw materials were very low. Most of the mercury released from these cement plants entered into flue gas, and the mercury of gypsum entered into cement. The mercury emission fluxes were calculated to be  $(73.42 \pm 8.10) \sim (215.18 \pm 10.75) \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$  in these three selected plants. The mercury emission factors for clinker and cement ( $EF_{\text{clinker}}$  and  $EF_{\text{cement}}$ ) were  $(0.016 \pm 0.001) \sim (0.049 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$  and  $(0.011 \pm 0.000) \sim (0.036 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ , respectively, which were significantly lower than that employed in cement industry according to the foreign mercury emission factors in the past.

**Key words:** cement plants; mercury emission; emission factors; rotary kiln; Chongqing

水泥是建筑行业三大基本材料之一,“十一五”以来,我国水泥产量呈现持续增长态势,2006~2014年均增长率超过了10%,到2014年我国水泥产量已达到23.5亿t,占世界水泥总产量的50%以上。水泥生产过程会排放大量的 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 等大气污染物<sup>[1,2]</sup>,同时也会排放大量的汞等重金属污染物<sup>[3-6]</sup>。2013年底新颁布的《水泥工业大气污染物排放标准》将汞与 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 和颗粒物并列为水泥工业限制排放的污染物之一<sup>[7]</sup>,明确水泥窑及窑尾余热利用系统汞及其化合物排放的限值为 $\leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于汞能通过大气进行长距离传输,受到

国内外的广泛关注。全球水泥生产排放的大气汞从1990年的114 t增加到2005年的189 t<sup>[8-10]</sup>,2010年达到了236 t<sup>[11]</sup>,约占全球人为大气汞总排放量的9%<sup>[12]</sup>,是人为大气汞主要排放源之一。

目前我国水泥行业大气汞排放多采用国外排放因子进行估算,缺乏实测研究,已有的研究也存在较

收稿日期: 2016-11-06; 修订日期: 2016-12-24

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(2013CF101); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015B036)

作者简介: 张成(1980~),男,博士,讲师,主要研究方向为环境污染化学, E-mail: zhcheng@126.com

\* 通信作者, E-mail: dywang@swu.edu.cn

大差异. Streets 等<sup>[13]</sup>估算出我国 1999 年水泥生产排放的大气汞为 22.7 t, Wu 等<sup>[14]</sup>估算的我国 2003 年水泥生产排放的汞为 35 t, 而根据 Zhang 等<sup>[15]</sup>的研究结果, 2010 年水泥行业大气汞排放量达到 98.3 t, 而 2003 年仅为 26.7 t, 与 Wu 等<sup>[14]</sup>的研究结果有较大差异. 以前的文献研究中, 通常采用  $0.065 \sim 0.1 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$  水泥作为估算我国水泥行业大气汞排放因子<sup>[8-10]</sup>, Streets 等<sup>[13]</sup>、Wu 等<sup>[14]</sup>采用的排放因子为  $0.04 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ . 张乐<sup>[16]</sup>分别对立窑和回转窑水泥厂大气汞排放进行了研究, 估算出立窑和回转窑的大气汞排放(以水泥计, 下同)因子分别为  $0.0069 \sim 0.14 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $0.138 \sim 0.229 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ . 李文俊<sup>[17]</sup>实测的 4 个水泥厂的大气汞排放因子分别为  $0.0036 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$  (立窑)、 $0.0033 \sim 0.012 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$  (回转窑). Wang 等<sup>[18]</sup>对四川和山东的 3 个  $5000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  的水泥厂烟气汞排放因子进行了测算, 按生产熟料和水泥的大气汞排放因子分别为  $0.044 \sim 0.072 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $0.038 \sim 0.063 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ . Wang 等<sup>[19]</sup>进一步对水泥生产过程的物质流和汞循环进行了研究, 发现生料磨系统中汞的质量流是主要贡献者, 约占水泥生产汞排放量的 57% ~ 73%.

重庆是我国西南地区最大的工业城市, 自 1997 年直辖以来, 随着城镇化的快速发展, 水泥生产和消耗量均逐年增加. 2001 年水泥总产量为 1 511 万 t, 2014 年高达 6 360 万 t<sup>[20]</sup>, 年均增加率约为 23%. 而目前国内有关水泥行业的汞排放特征研究还很少, 更缺乏重庆地区的水泥厂大气汞排放研究. 基于此, 本文以重庆市典型新型干法水泥厂为研究对象, 分析水泥生产过程输入输出物料汞含量及其排放特征, 估算其大气汞排放因子和排放量, 以期为进一步制定详细的区域人为源大气汞排放清单和控制水泥行业大气汞排放提供基础数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 监测对象概况

我国目前水泥生产主要有新型干法(回转窑)和立窑两种工艺. 2005 年以前, 我国水泥生产主要以立窑为主, 其水泥产量占总产量的 50% 以上. 近年来由于立窑的环境污染、资源利用效率和水泥产品质量等问题而逐步关停, 新型干法水泥窑在我国迅速兴起. 目前, 我国新型干法水泥产量占 85% 以上, 立窑仅占 10% 左右<sup>[21]</sup>. 立窑多采用的是布袋除尘器, 回转窑多采用静电除尘器. 新型干法水泥生产中, 静电除尘器和布袋除尘器的安装比例分别约

占 70% 和 30%<sup>[16,17,22]</sup>. 重庆的水泥厂约有 70 余家, 水泥年产量约为 6 300 万 t, 其中, 新型干法水泥产量所占比例约为 86.5%. 因此, 本次调查选取 3 个水泥厂, 均为新型干法生产工艺, 位于重庆市城市发展新区, 主要输入原料(石灰石)易于在附近石灰石矿厂获取. 3 个厂(A、B、C)均为  $5000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  左右的生产线, 烟气净化设备均为布袋除尘器. 是目前我国水泥行业的代表性生产规模企业, 也是重庆市水泥生产代表性企业.

### 1.2 样品采集与分析

于 2015 年 1 月, 分别采集 3 个水泥厂的输入输出物料, 主要包括石灰石、砂岩、煤、矿渣、生料、熟料、脱硫石膏、水泥等. 根据《化工产品采样总则》(GB/T 6678-2003)、《固体化工产品采样通则》(GB/T 6679-2003)采集样品. 每天采集 3 次, 连续采集 3 d, 每次取样约 1 kg. 采样后迅速用聚乙烯样品袋密封, 运至实验室冷冻保存. 样品经冷冻干燥后研磨过 100 目筛, 然后密封保存备用.

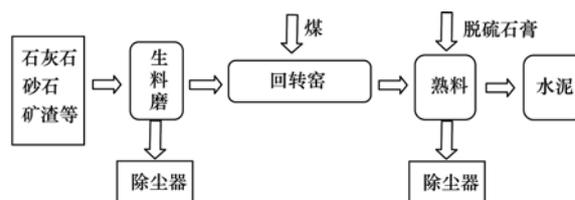


图 1 水泥厂流程示意

Fig. 1 A schematic representation of cement plants

### 1.3 样品分析与质量控制

样品总汞含量参照美国 EPA7473 方法<sup>[23]</sup>, 采用 DMA-80 固体样品汞直接分析仪(意大利麦尔斯特通公司生产)测定, 检出限为 0.005 ng. 质量控制采用土壤成分分析标准物质 GBW07405 (GSS-5) 进行, 其标定值为  $0.290 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 测定值为  $0.289 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 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 12%.

## 2 结果与讨论

### 2.1 水泥厂输入输出物料汞含量

#### 2.1.1 输入物料汞含量

生产水泥的主要原料为石灰石和黏土材料, 有时根据燃料品质和水泥品种, 掺加校正原料以补充某些成分的不足, 还可以利用工业废渣作为水泥的原料或混合材料进行生产. 石灰石是水泥生产的主要原料, 3 个水泥厂的石灰石汞含量均较低(表 1), 分别为  $(0.025 \pm 0.001)$ 、 $(0.032 \pm 0.002)$ 、 $(0.029 \pm 0.001) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 与 Wang 等<sup>[18]</sup>的研究结果相当

( $0.016 \sim 0.042 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 略高于李文俊<sup>[17]</sup>的测试结果  $0.011 \sim 0.028 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 我国石灰石汞含量总体较低, 杨海<sup>[22]</sup>对国内 15 个省的 167 个石灰石矿进行了分析, 发现各省的石灰石汞含量存在较大差异, 范围值为  $0.0076 \sim 0.2085 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (平均值为  $0.0425 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

当石灰质原料和黏土质原料配合所得生料成分不能满足配料方案要求时, 须根据所缺少的组分, 参加相应的校正原料, 主要有硅质原料、铝质原料和铁质原料. 本次调查的水泥厂中, A、B 厂添加了铁质原料, 其汞含量分别为  $(0.012 \pm 0.001) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(0.029 \pm 0.002) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , C 厂添加了硅质原料, 汞含量为  $(0.125 \pm 0.014) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 高于 A、B 厂的铁质原料汞含量.

煤是水泥生产的主要燃料, 3 个水泥厂煤中汞含量相差不大, 分别为  $(0.080 \pm 0.012)$ 、 $(0.093 \pm 0.008)$  和  $(0.110 \pm 0.015) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 均低于我国燃煤平均汞含量  $0.150 \sim 0.220 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[24,25]</sup>, 但明显高于李文俊<sup>[17]</sup>和 Wang 等<sup>[18]</sup>的测试结果. 脱硫石膏在熟料制水泥过程中加入, 主要充当水泥缓凝剂, 3 个水泥厂所用脱硫石膏主要来自周边燃煤电厂. 3 个水泥厂的脱硫石膏汞含量均较高, 分别为  $(0.447 \pm 0.027)$ 、 $(0.487 \pm 0.012)$ 、 $(0.525 \pm 0.019) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 其余原料的汞含量均较小, 其范围为  $(0.003 \pm 0.000) \sim (0.015 \pm 0.001) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

表 1 水泥厂原料汞含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

物料	A	B	C
石灰石	$0.025 \pm 0.001$	$0.032 \pm 0.002$	$0.029 \pm 0.001$
砂岩	$0.011 \pm 0.000$	$0.046 \pm 0.012$	—
矿渣	$0.007 \pm 0.001$	—	$0.011 \pm 0.000$
钢渣	—	$0.038 \pm 0.007$	$0.015 \pm 0.001$
粉煤灰	$0.003 \pm 0.000$	—	—
硅质原料	—	—	$0.125 \pm 0.014$
铁质原料	$0.012 \pm 0.001$	$0.029 \pm 0.002$	—
煤	$0.080 \pm 0.012$	$0.093 \pm 0.008$	$0.110 \pm 0.015$
脱硫石膏	$0.447 \pm 0.027$	$0.487 \pm 0.012$	$0.525 \pm 0.019$

### 2.1.2 输出物料和中间产物汞含量

水泥厂的输出物料主要为水泥产品(或熟料)和烟气. 3 个水泥厂的水泥汞含量均较低, 分别为  $(0.031 \pm 0.001)$ 、 $(0.037 \pm 0.001)$  和  $(0.028 \pm 0.002) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (图 2). 由于采样条件和采样设备的限制, 未对水泥厂的烟气汞排放进行监测, 因此, 本文采用质量平衡模型<sup>[26]</sup>对不同水泥厂向大气中排放的汞进行估算.

3 个水泥厂的窑尾灰汞含量有一定差异, 其中 B、C 厂的窑尾灰汞含量较高, 分别达到  $(0.361 \pm 0.026) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(0.392 \pm 0.089) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 而 A 厂的窑尾灰汞含量为  $(0.061 \pm 0.002) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 由于窑尾灰中含有的汞等重金属较难处理<sup>[27]</sup>, 水泥厂常采用返尘处理, 将除尘灰与原料混合, 一起作为生料再进入回转窑进行煅烧.

生料是水泥生产过程的中间产物, 由石灰质原料、黏土质原料、少量校正原料(有时还加入适量的矿化剂、晶种等)按比例配合, 粉磨到一定细度的物料. 3 个水泥厂的生料汞含量分别为  $(0.706 \pm 0.021)$ 、 $(0.582 \pm 0.026)$  和  $(0.339 \pm 0.033) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 可见在生料的制备中, 原料中的汞几乎都进入生料中; 同时, 由于水泥生产过程产生的除尘灰采用返程处理, 与生料混合后再次进入回转窑, 而除尘灰中汞含量较高, 经过除尘器脱除的汞再次进入系统, 因此, 生料汞浓度较高. 而 3 个水泥厂的熟料汞含量均很低, 分别为  $(0.005 \pm 0.000)$ 、 $(0.006 \pm 0.001)$  和  $(0.002 \pm 0.000) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 远低于生料汞含量.

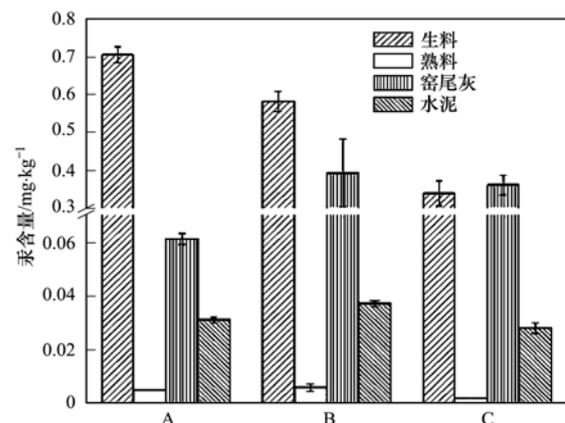


图 2 中间产物和输出物料汞含量

Fig. 2 Mercury contents of output materials and intermediate products

## 2.2 水泥厂汞的来源和去向

### 2.2.1 水泥厂汞的来源

根据 3 个水泥厂输入物料消耗量和汞含量、输出物料产生量和汞含量, 计算得到输入、输出物料的总汞量, 如表 2 所示. 从生产熟料来看[图 3 (a)], 3 个水泥厂的汞主要来源均为石灰石, 分别占总输入汞量的 76.17%、69.84% 和 62.59%. Wang 等<sup>[18]</sup>、Won 等<sup>[28]</sup>的研究也都表明水泥厂的汞主要来源为石灰石. 这主要是由于石灰石是生产的主要原料, 虽然其汞含量较低, 但由于其消耗量很大, 因此汞输入量也最大. 其次为煤, 3 个水泥厂的煤输

入汞量分别占 17.73%、16.61% 和 19.82%，C 厂的硅质原料汞输入量也占到了 13.91%，其他原料的汞输入量均较小，所占比例均低于 5%。

在熟料制水泥的过程中加入了脱硫石膏等物质，由于脱硫石膏的汞含量较高，3 个水泥厂的脱硫

石膏汞输入量分别占总输入量的 20.14%、23.67% 和 25.60% [图 3(b)]。加入脱硫石膏后，石灰石汞输入量所占比例有所下降，分别为 60.83%、53.31% 和 46.57%，煤汞输入量所占比例也分别下降为 14.16%、12.67% 和 14.75%。

表 2 水泥厂中汞的输入输出量/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$

Table 2 Mercury input and output of cement plants/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$

项目	物料	A	B	C
输入物料	石灰石	165.52 ± 6.0	177.56 ± 0.06	192.88 ± 1.85
	砂岩	4.35 ± 0.08	—	15.12 ± 4.68
	矿渣	5.13 ± 0.63	5.40 ± 0.08	—
	钢渣	—	5.04 ± 0.26	11.97 ± 8.65
	粉煤灰	1.94 ± 0.18	—	—
	硅质原料	—	39.46 ± 4.4	—
	铁质原料	1.85 ± 0.23	—	10.33 ± 0.02
	煤	38.52 ± 0.89	56.24 ± 6.04	45.86 ± 6.99
	脱硫石膏	54.79 ± 0.83	97.60 ± 1.71	85.66 ± 1.45
输出物料 (熟料或水泥)	熟料	22.14 ± 0.90	6.76 ± 0.74	27.21 ± 5.10
	水泥	198.68 ± 3.97	166.12 ± 11.41	233.15 ± 5.58
	烟气	73.42 ± 8.10	215.18 ± 10.75	128.67 ± 14.82

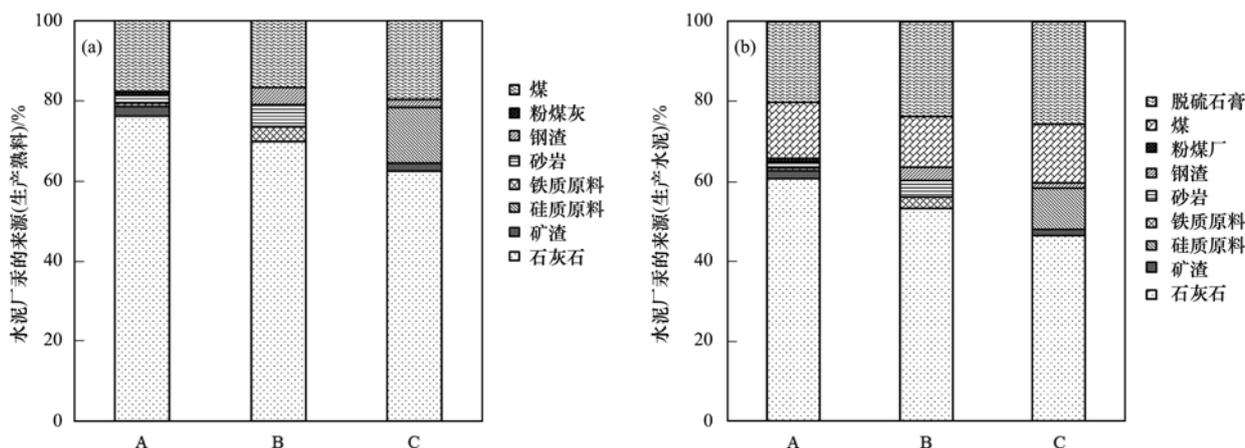


图 3 水泥厂汞的来源

Fig. 3 Source of mercury in cement plants

### 2.2.2 水泥厂汞的去向

根据水泥厂各物料的汞输入输出量及汞的迁移特征，采用质量平衡方法<sup>[26]</sup>，计算烟气、熟料、水泥的排放量(表 2)。以生产熟料来计算[图 4(a)]，A、B、C 水泥厂排放的汞主要进入了烟气，分别占总排汞量的 76.83%、82.54%、96.95%；进入熟料中的汞分别为 23.17%、17.46% 和 3.05%。Wang 等<sup>[18]</sup>的研究结果表明约有 93.9% ~ 98.1% 的汞进入了烟气，Yan 等<sup>[29]</sup>对 4 个水泥厂的研究也发现约有 94% ~ 98% 的汞进入了烟气。若以生产水泥来计算[图 4(b)]，A、B 厂排放的汞主要进入了水泥，分别占总排汞量的 73.02% 和 64.44%，排入烟气的汞分别为 26.98% 和 35.56%，C 厂进入水泥和烟气中的

汞相差不大，分别占 43.57% 和 56.43%。这主要是熟料制水泥加入了脱硫石膏，其汞含量高达  $(0.447 \pm 0.007) \sim (0.525 \pm 0.009) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。且脱硫石膏在制造水泥缓凝剂的过程中不经过高温，脱硫石膏中的汞几乎会全部进入水泥产品中。因此，脱硫石膏对烟气汞的贡献不大，烟气中的汞主要来源于石灰石和煤。

### 2.3 水泥厂大气汞排放

#### 2.3.1 大气汞排放因子

水泥生产是人为大气汞排放的重要排放源，而国际上估算我国水泥行业排放的大气汞量也常采用国外的排放因子<sup>[8-10]</sup>，国内现有的研究也存在一定差异。因此，在对 3 个典型水泥厂输入输出汞量分

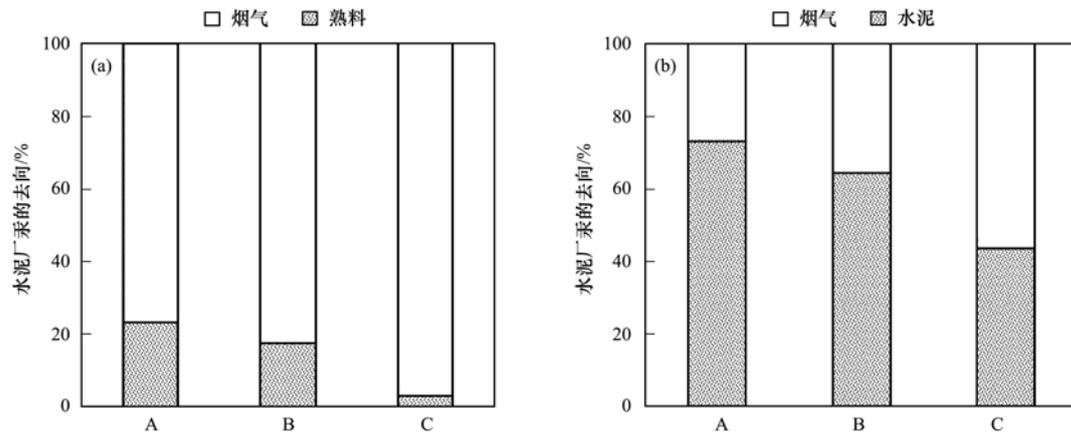


图4 水泥厂汞的去向

Fig. 4 Mercury fate in cement plants

析的基础上,进一步估算3个水泥厂的大气汞排放量和排放因子。由于本文未采集烟气进行测量分析,因此采用质量平衡模型对大气汞排放因子进行估算。Wang等<sup>[18]</sup>同时对水泥厂烟气汞实测浓度、输入输出物料汞含量进行了分析,并进行了质量平衡分析,其质量平衡率达到101%~127%。也有研究者采用质量平衡模型对燃煤电厂汞排放进行研究<sup>[26,30,31]</sup>,质量平衡率能达到80.0%~116.1%。表明质量平衡模型具有较高的可靠性,可以用来计算大气汞排放因子。目前有关水泥行业大气汞排放因子主要有2种方法表示,即分别以生产熟料和水泥来计算大气汞排放因子<sup>[16~18]</sup>,计算公式如下:

$$EF_{\text{熟料}} = Hg_{\text{烟气}} / M_{\text{熟料}} \quad (1)$$

$$EF_{\text{水泥}} = Hg_{\text{烟气}} / M_{\text{水泥}} \quad (2)$$

式中, $EF_{\text{熟料}}$ 和 $EF_{\text{水泥}}$ 分别为以水泥厂熟料产量和水泥产量计算的大气汞排放因子, $g \cdot t^{-1}$ ;  $Hg_{\text{烟气}}$ 为水泥厂大气汞排放量, $g \cdot d^{-1}$ ;  $M_{\text{熟料}}$ 和 $M_{\text{水泥}}$ 分别为水泥厂

熟料和水泥产量, $t \cdot d^{-1}$ 。

根据公式(1)和(2),计算得到3个水泥厂的 $EF_{\text{熟料}}$ 分别为 $(0.016 \pm 0.001)$ 、 $(0.049 \pm 0.001)$ 、 $(0.028 \pm 0.001) g \cdot t^{-1}$ (表3),平均值为 $(0.031 \pm 0.017) g \cdot t^{-1}$ ;3个水泥厂的 $EF_{\text{水泥}}$ 分别为 $(0.011 \pm 0.000)$ 、 $(0.036 \pm 0.001)$ 、 $(0.020 \pm 0.001) g \cdot t^{-1}$ ,平均值为 $(0.022 \pm 0.013) g \cdot t^{-1}$ 。同时,对国内外水泥生产过程的大气汞排放因子进行了比较(表3)。李文俊等<sup>[17]</sup>采用实测方法对4个水泥厂的大气汞排放因子进行了计算,其中,立窑加布袋除尘器的水泥厂 $EF_{\text{水泥}}$ 为 $0.0036 g \cdot t^{-1}$ 水泥,回转窑加布袋除尘器的 $EF_{\text{水泥}}$ 为 $0.0033 \sim 0.012 g \cdot t^{-1}$ 。Wang等<sup>[18]</sup>对四川和山东的3个 $5000 t \cdot d^{-1}$ 的水泥厂烟气汞排放因子进行了测算,其 $EF_{\text{熟料}}$ 和 $EF_{\text{水泥}}$ 分别为 $0.044 \sim 0.072 g \cdot t^{-1}$ 和 $0.038 \sim 0.063 g \cdot t^{-1}$ 。本研究结果略低于Wang等<sup>[18]</sup>的结果,与张乐<sup>[16]</sup>的结果相当,但高于李文俊<sup>[17]</sup>的结果,这可能与水泥厂的生产工

表3 水泥厂汞排放因子比较

Table 3 Comparison of mercury emission factors of cement plants with other studies

工艺	除尘装置	Hg 排放因子		文献
		以熟料计/ $g \cdot t^{-1}$	以水泥计/ $g \cdot t^{-1}$	
—	—	—	0.065~0.1	[10]
立窑	布袋除尘	—	0.0036	[17]
立窑	湿式除尘	0.14	—	[16]
立窑	布袋除尘	0.0069	—	[16]
回转窑	静电除尘	0.0229	—	[16]
回转窑	布袋除尘	0.0138	—	[16]
回转窑	布袋除尘	—	0.0033~0.012	[17]
回转窑	布袋除尘+静电除尘	0.026~0.034	—	[28]
回转窑	静电除尘	0.001~0.027	—	[32]
回转窑	布袋除尘+静电除尘	0.044~0.072	0.038~0.063	[18]
A厂:回转窑	布袋除尘	0.016±0.001	0.011±0.000	本研究
B厂:回转窑	布袋除尘	0.049±0.001	0.036±0.001	本研究
C厂:回转窑	布袋除尘	0.028±0.001	0.020±0.001	本研究

艺、原料组成、石灰石产地及汞含量、煤汞含量、污控设备等因素有关。但本研究结果明显低于国外的水泥生产大气汞排放因子(0.065 ~ 0.1 g·t<sup>-1</sup>水泥),因此,以往对国内水泥生产过程的大气汞排放估算结果可能过高。

### 2.3.2 大气汞排放量估算

根据质量平衡,3个水泥厂排入大气中的汞量分别为(73.42 ± 8.10)、(215.18 ± 10.75)、(128.67 ± 14.82)g·d<sup>-1</sup>。Wang等<sup>[18]</sup>对3个处理规模均为5000 t·d<sup>-1</sup>的水泥厂汞排放特征进行了研究,发现3个水泥厂烟气汞排放量为186.2 ~ 409.2 g·d<sup>-1</sup>。A、B厂处理规模同为5000 t·d<sup>-1</sup>,大气汞排放量明显低于Wang等<sup>[18]</sup>的研究结果,C厂大气汞排放量较高,约为其他2个水泥厂的2~3倍。根据3个水泥厂的大气汞排放因子和水泥年产量,计算得到3个水泥厂的大气汞年排放量分别为(26.80 ± 2.96)、(78.54 ± 3.92)、(46.96 ± 5.21)kg。

目前,关于大气汞排放因子的计算主要采用实测烟气计算、质量平衡模型、修正因子模型等,不同模型估算结果均存在不确定性,各有优缺点。刁星等<sup>[26]</sup>采用质量平衡模型、修正因子模型和烟气计算模型对燃煤电厂的汞排放量进行了估算,发现采用烟气计算模型比其他2种模型的估算结果偏高。Wang等<sup>[18]</sup>在对水泥厂烟气汞实测浓度、输入输出物料汞含量分析基础上,进行了质量平衡分析,其质量平衡率达到101%~127%。一些研究者在对燃煤电厂烟气汞实测浓度、输入输出物料汞含量的分析基础上,进行质量平衡分析,质量平衡率达到80.0%~116.1%<sup>[30,31]</sup>,表明质量平衡模型具有较高的可靠性。本文采用质量平衡模型参数均来自实际测定结果,几个水泥厂生料组成、原料和燃料消耗量及其汞含量、采样分析过程的误差等方面可能使得质量平衡模型估算结果存在不确定性。我国水泥产量巨大,超过了全球水泥总产量的一半以上,全国各类水泥企业3500余家<sup>[21]</sup>。但目前国内有关水泥生产过程中汞排放的测试和研究还很缺乏,不同区域也存在一些差异,因此,还需广泛开展水泥生产过程的汞排放测试研究,建立相对准确的水泥行业大气汞排放估算模型。

### 3 结论

(1)3个水泥厂的原料主要为石灰石,其汞含量较低;燃料煤的汞含量低于我国燃煤平均汞含量;脱硫石膏主要来自燃煤电厂,汞含量较高。水泥产品

汞含量均较低,窑尾灰汞含量较高,返尘后与原料混合导致生料汞浓度较高;熟料汞含量远低于生料汞含量。

(2)3个水泥厂的汞主要来源为石灰石,其次为煤。石灰石和煤中的汞主要进入了烟气,脱硫石膏中的汞主要进入了水泥产品。

(3)3个水泥厂的EF<sub>熟料</sub>和EF<sub>水泥</sub>平均值分别为(0.031 ± 0.017)g·t<sup>-1</sup>和(0.022 ± 0.013)g·t<sup>-1</sup>,大气汞年排放量为(26.80 ± 8.10)~(78.54 ± 10.75)kg。重庆市新型干法水泥生产大气汞排放因子明显低于国外的排放因子,以往对国内水泥行业的大气汞排放估算结果可能过高。

### 参考文献:

- [1] Ibrahim H G, Okasha A Y, Elatrash M S, *et al.* Emissions of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and PM<sub>s</sub> from cement plant in vicinity of Khoms city in northwestern Libya[J]. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2012, **1**: 620-628.
- [2] 张晓岭, 卢益, 蹇川, 等. 西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 35-40.  
Zhang X L, Lu Y, Jian C, *et al.* Atmospheric emission of PCDD/Fs from modern processing cement kilns with preheating in the southwest area, China[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 35-40.
- [3] Wang X S. Magnetic properties and heavy metal pollution of soils in the vicinity of a cement plant, Xuzhou (China)[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, **98**: 73-78.
- [4] Bermudeza G M A, Morenoc M, Invernizzi R, *et al.* Heavy metal pollution in topsoils near a cement plant: the role of organic matter and distance to the source to predict total and HCl-extracted heavy metal concentrations[J]. *Chemosphere*, 2010, **78**(4): 375-381.
- [5] Ogunbileje J O, Sadagoparamanujam V M, Anetor J I, *et al.* Lead, mercury, cadmium, chromium, nickel, copper, zinc, calcium, iron, manganese and chromium (VI) levels in Nigeria and United States of America cement dust[J]. *Chemosphere*, 2013, **90**(11): 2743-2749.
- [6] Sikkema J K, Alleman J E, Ong S K, *et al.* Mercury regulation, fate, transport, transformation, and abatement within cement manufacturing facilities: review[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(20): 4167-4178.
- [7] 江梅, 李晓倩, 纪亮, 等. 我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4759-4766.  
Jiang M, Li X Q, Ji L, *et al.* Revision process and thinking of emission standard of air pollutants for cement industry[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4759-4766.
- [8] Pacyna E G, Pacyna J M. Global emission of mercury from anthropogenic sources in 1995[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, **137**(1): 149-165.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] UNEP. Global mercury assessment 2013: sources, emissions, releases and environmental transport [R]. Geneva, Switzerland: UNEP Chemicals Branch, 2013.
- [13] Streets D G, Hao J M, Wu Y, *et al.* Anthropogenic mercury emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(40): 7789-7806.
- [14] 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.
- [15] Zhang L, Wang S X, Wang L, *et al.* Updated emission inventories for speciated atmospheric mercury from anthropogenic sources in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(5): 3185-3194.
- [16] 张乐. 燃煤过程汞排放测试及汞排放量估算研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.  
Zhang L. Research on mercury emission measurement and estimate from combustion resources [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [17] 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.  
Li W J. Characterization of atmospheric mercury emissions from coal-fired power plant and cement plant [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [18] 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.
- [19] Wang F Y, Wang S X, Zhang L, *et al.* Characteristics of mercury cycling in the cement production process [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **302**: 27-35.
- [20] 重庆市统计局, 国家统计局重庆调查总队. 2015 年重庆统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.  
Chongqing Municipal Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Chongqing. Chongqing statistical yearbook 2015 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [21] 中国水泥协会. 中国水泥年鉴(2015) [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2016.  
China Cement Association. China cement almanac (2015) [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2016.
- [22] 杨海. 中国水泥行业大气汞排放特征及控制策略研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014.  
Yang H. Study on atmospheric mercury emission and control strategies from cement production in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [23] US EPA method 7473 (SW-846) Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry [S].
- [24] 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.  
Jiang J K, Hao J M, Wu Y, *et al.* Development of mercury emission inventory from coal combustion in China [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(2): 34-39.
- [25] 王起超, 马如龙. 煤及其灰渣中的汞 [J]. *中国环境科学*, 1997, **17**(1): 77-79.  
Wang Q C, Ma R L. The mercury in coal and its cinder [J]. *China Environmental Science*, 1997, **17**(1): 77-79.
- [26] 刁星, 苑春刚, 桂兵, 等. 燃煤电厂固体废弃物中汞分布特征及排放量估算 [J]. *环境化学*, 2016, **35**(2): 229-236.  
Diao X, Yuan C G, Gui B, *et al.* Mercury distribution in solid waste and mercury emission estimation from coal-fired power plants [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(2): 229-236.
- [27] Zheng Y J, Jensen A D, Windelin C, *et al.* Review of technologies for mercury removal from flue gas from cement production processes [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, **38**(5): 599-629.
- [28] Won J H, Lee T G. Estimation of total annual mercury emissions from cement manufacturing facilities in Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **62**: 265-271.
- [29] Yan D H, Peng Z, Ding Q, *et al.* Distribution of Hg, As and Se in material and flue gas streams from preheater-precaciner cement kilns and vertical shaft cement kilns in China [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2015, **65**(8): 1002-1010.
- [30] Wang S X, Zhang L, Li G H, *et al.* Mercury emission and speciation of coal-fired power plants in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(3): 1183-1192.
- [31] Tian H Z, Liu K Y, Zhou J Y, *et al.* Atmospheric emission inventory of hazardous trace elements from China's coal-fired power plants—temporal trends and spatial variation characteristics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(6): 3575-3582.
- [32] Mlakar T L, Horvat M, Vuk T, *et al.* Mercury species, mass flows and processes in a cement plant [J]. *Fuel*, 2010, **89**(8): 1936-1945.

## CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM <sub>2.5</sub> Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years .....	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer .....	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing .....	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing .....	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers .....	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O <sub>3</sub> and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station .....	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O <sub>3</sub> in Northern Suburb of Nanjing .....	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China .....	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential .....	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator .....	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing .....	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems .....	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel .....	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ <sup>18</sup> O and δD Isotope Composition in Xijiang River .....	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed .....	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir .....	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake .....	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River .....	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake .....	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination .....	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters .....	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level .....	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron .....	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation .....	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels .....	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis .....	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater .....	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition .....	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria .....	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater .....	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge .....	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress .....	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-ni, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors .....	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge .....	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-ni, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers .....	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism .....	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains .....	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics .....	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs .....	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil .....	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice .....	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice .....	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As .....	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene .....	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil .....	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions .....	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cao, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N <sub>2</sub> O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain .....	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling .....	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi .....	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions .....	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review .....	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)