ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双效期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 38 卷 第 2 期
2017 年 2 月 15 日

目 次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 …… 姚利,刘进,潘月鹏,田世丽,王振波,韦霞,张国忠,周保华,王跃思(423)
海西城市群 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的污染特征及健康风险评价 …… 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
嵊泗地区大气 $PM_{2.5}$ 中汞形态污染及其与碳组分的关系 …… 程娜,钱冠磊,段炼,赵梦飞,修光利(438)
泰山夏季 $PM_{2.5}$ 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 …… 孟静静,侯战方,刘晓迪,邢继钊(445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 …… 张玉欣,安俊琳,王健宇,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 …… 尤翔宇,罗达通,刘湛,苏艳蓉(461)
南京城市交通甲烷排放特征 …… 张雪,胡凝,刘寿东,王淑敏,高韵秋,赵佳玉,张圳,胡勇博,李旭辉, 张国君(469)
2003 ~ 2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析…… 张宸赫,赵天良,王富,徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好(476)
基于增强回归树的城市 $PM_{2.5}$ 日均值变化分析: 以常州为例 …… 葛跃,王明新,孙向武,齐今笛(485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 …… 张成,张雅惠,王永敏,王定勇,徐凤,杨熹,何秀清(495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 …… 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠(502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 …… 高敏,仇天雷,秦玉成,王旭明(510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 …… 吴亚林,李帅东,江俊武,沈胤胤,黄昌春,黄涛,杨浩,余艳红,罗玉(517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 …… 李丽,蒲俊兵,李建鸿,张陶(527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 …… 张佳磊,郑丙辉,刘德富,王丽婧,谭纤茹(535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 …… 邱晓鹏,黄廷林,曾明正,史建超,曹占辉(547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 …… 林俊杰,刘丹,张帅,于志国,何立平,余顺慧(555)
湖泊水体中铁(Ⅲ)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 …… 蒋永参,彭云霄,刘广龙,周易勇,朱端卫(563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 …… 王卫东,郝瑞霞,张晓娴,万京京,钟丽燕(572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 …… 吴鹏,陆爽君,徐乐中,梁奇奇,沈耀良(580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 …… 姚程, 胡小贞,卢少勇,耿荣妹(589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 …… 何沅洁,刘江,江韬,黄京晶,成晴,陈宏(600)
TiO_2/膨润土复合材料对 Hg^{2+} 的吸附性能研究 …… 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇(608)
氨氮及 H_2O_2 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 …… 王永京,杜旭,金萌,冯思捷,杨凯,张明露,于建伟(616)
配水管网细菌活性影响因素 …… 王晓丹,赵新华(622)
施氏矿物的化学合成及其对含Cr(Ⅵ)地下水吸附修复…… 朱立超,刘元元,李伟民,牟海燕,王婉玉,石德智,王涛(629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 …… 侯瑞,金鑫,金鹏康,王晓昌(640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N_2O 的产生特性 …… 郭昌梓,张凤燕,刘富宇,朱超,裴立影(647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 …… 管勇杰,于德爽,李津,齐泮晴,魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 …… 王硕,徐巧,张光生,李激(665)
颗粒 + 絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 …… 孙延芳,韩晓宇,张树军,李星,曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 …… 戴晓虎,何进,严寒,李宁,丁月玲,董滨,戴翎翎(679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 …… 顾琼,金文标,陈远清,郭仕达,万超凡(688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 …… 魏欣,薛顺利,杨帆,李响,刘振鸿,薛罡,高品(697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价 …… 王静,刘明丽,张士超,鲁垠涛,姚宏(703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 …… 陈轶楠,马建华,段海静,魏林恒(711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 …… 杨雷峰,尹华,彭辉,李跃鹏(721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 …… 叶茜琼,吴蔓莉,陈凯丽,李炜,袁婧(728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 …… 罗路云,金德才,左晖,张卓,谭新球,张德咏,卢向阳,刘勇(735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 …… 邸琰茗,王广煊,黄兴如,郭逍宇(743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 …… 贺龙,李艳琴,李彬春,李君剑(752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 …… 刘琼,魏晓梦,吴小红,袁红朝,王久荣,李裕元,葛体达,吴金水(760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 …… 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,张霞,王旭东,张阿凤(769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 …… 聂文翰,戚志萍,冯海玮,孙玉静,支月娥,张进忠,张丹(783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 …… 成功,陈静,刘晶晶,张阿凤,王旭东,冯浩,赵英(792)
1 株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 …… 叶杰旭,林彤晖,骆煜昊,陈东之,陈建孟(802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 …… 谭文勃,马晓丹,黄聪,陈川,王爱杰(809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 …… 孙娜, 商和平,茹淑华,苏德纯(815)
施氮对小麦硒(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 …… 陈玉鹏,彭琴,梁东丽,宋卫卫,雷凌明,喻大松(825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 …… 李金丽,王振红,严雅萌,黄兵,罗专溪(832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 …… 马锋锋,赵保卫(837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量

张成[1,2],张雅惠[1],王永敏[1],王定勇[1,2*],徐凤[3],杨熹[3],何秀清[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: 以重庆市两种锅炉类型[循环流化床锅炉(CFB)和煤粉炉(PC)]的 4 个燃煤电厂为研究对象,分析不同规模电厂输入输出物料汞含量,探讨电厂中汞的来源和去向,研究重庆市典型燃煤电厂汞的排放特征,估算其大气汞排放量和排放因子. 结果表明,4 个电厂的汞主要来源为煤,入炉煤汞含量为(80.77 ± 6.39) ~ (266.83 ± 4.71) μg·kg^{-1}. 4 个电厂排放的汞主要进入了固体废物,其中,CFB 电厂中汞的去向主要是粉煤灰,而 PC 电厂汞的去向主要是脱硫石膏和粉煤灰. 4 个电厂的汞脱除率为 72.89% ~ 96.05%,CFB 电厂高于 PC 电厂. 4 个电厂的大气汞排放因子($EF_{电}$、$EF_{煤}$)分别为 4.66 ~ 29.47 μg·(kW·h)$^{-1}$ 和 8.55 ~ 71.77 mg·t^{-1},大气汞排放量为 6.13 ~ 429.17 g·d^{-1}. 燃煤电厂的汞排放与煤中汞含量、锅炉类型、发电负荷、污控设备等因素有关. 为控制电厂汞排放,需改善燃煤机组的能效,提高烟气净化设备的除汞效率,加强燃煤电厂的固体废物利用监管.

关键词:燃煤电厂; 汞排放; 排放因子; 循环流化床锅炉; 煤粉炉

中图分类号: X511 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)02-0495-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201608055

Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing

ZHANG Cheng[1,2], ZHANG Ya-hui[1], WANG Yong-min[1], WANG Ding-yong[1,2*], XU Feng[3], YANG Xi[3], HE Xiu-qing[3]

(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: Four typical coal-fired power plants in Chongqing, representing two different boiler types (circulating fluidized bed boiler and pulverized coal boiler), were chosen to investigate mercury emission characteristics through a mercury mass balance method by analyzing mercury contents in all input and output raw materials in order to accurately estimate mercury emissions. The results showed coal with mercury concentrations ranging (80.77 ± 6.39)-(266.83 ± 4.71) μg·kg^{-1} could be a significant contributor of input mercury in these four studied power plants. Most mercury output from these power plants entered into solid waste with high proportion of mercury entering the fly ash in CFB plants and entering the fly ash and desulfurization gypsum in PC plants. Mercury removal efficiencies of studied plants were in the range of 72.89%-96.05%, and these efficiencies in CFB plants were higher than those in PC plants. The mercury emission factors for $EF_{electricity}$ and EF_{coal} of these four plants were 4.66-29.47 μg·(kW·h)$^{-1}$ and 8.55-71.77 mg·t^{-1}, respectively. The mercury emission was also calculated to be 6.13-429.17 g·d^{-1}. Mercury emissions from coal-fired power plants were associated with the content of mercury in coal, boiler type, generation load, pollution control equipment, and so on. To control the mercury emissions, more attention should be paid to improving the generation load, increasing the mercury removal efficiency of flue gas cleaning equipment, and strengthening the supervision of solid waste re-utilization.

Key words: coal-fired power plants; mercury emission; emission factors; circulating fluidized bed boiler; pulverized coal boiler

有研究认为,我国人为活动每年向大气排放的汞约为 500 ~ 800 t,占全球排汞 30% 左右[1~5]. 其中,燃煤是最大的人为汞排放源之一,有研究表明,燃煤所排放的汞占全部人为排放的三分之一以上[6,7]. 电力生产作为煤炭消费的最大主体,其燃煤消耗量占到了煤炭消耗总量的一半. 因此,燃煤电厂产生的汞排放受到了国内外政府和学者的广泛关注. 近年来,国内外学者针对燃煤电厂汞排放和控制等方面进行了较多研究[8~11],且主要集中在电厂烟气中汞的测试和排放研究. Tang 等[8]通过分析燃煤电厂烟气汞实测浓度、输入输出物料的汞量,发现汞主要进入了粉煤灰、脱硫石膏和烟气(分别占总排放量的

收稿日期: 2016-08-09; **修订日期**: 2016-09-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430004); 重庆市环保局科技项目(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

10.80% ~ 61.5%、32.95% ~ 36.93%、2.77% ~ 52.23%). Wang[12]等分析了我国6个燃煤电厂汞的排放特征,发现进入烟气、脱硫石膏和粉煤灰的汞分别占总排放量的18.62% ~ 72.50%、12.73% ~ 63.19%、4.5% ~42.99%. 我国是燃煤消耗大国,有研究者对我国燃煤电厂的汞排放量进行了估算. 如Tian等[13]对我国2000 ~ 2010年燃煤电厂大气汞等有害金属排放的估算表明,我国燃煤电厂大气汞年排放量为118.54 t. 惠霖霖等[14]对我国燃煤电厂的物质流向进行了研究,估算出我国燃煤电厂2010年向大气、粉煤灰及脱硫石膏、水体排放的汞分别为101.3、167.4和3.0 t. 由于不同燃煤电厂的规模、煤炭消耗量及其汞含量、污控设备及其脱汞效率等有较大差异,使得不同电厂的汞排放与分布特征、大气汞排放因子具有一定差异.

重庆是我国西南地区最大的工业城市,近年来,随着城镇化的快速发展,能源消耗量逐年增加. 重庆目前有各类火力发电厂40余家,装机容量超过9 800 MW,电厂燃煤消耗量约2 240万t,约占重庆市燃煤总消耗量的50%. 而目前有关重庆地区的燃煤电厂汞排放研究还很缺乏,因此,本文以重庆市两种锅炉类型(循环流化床锅炉和煤粉炉)燃煤电厂为研究对象,分析不同规模电厂焚烧过程输入输出物料汞含量及其排放特征,估算燃煤电厂的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燃煤电厂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

目前,我国燃煤电厂使用的锅炉主要为循环流化床锅炉(CFB)和煤粉炉(PC)两类,所占比例分别为12%和88%[14]. 其中,循环流化床锅炉电厂几乎均使用静电除尘器(ESP),煤粉炉电厂主要安装静电除尘器(ESP)和高效布袋除尘器(EF),分别占93%和7%;我国燃煤电厂脱硫和脱硝设备的安装比例分别为86%和14%,主要工艺分别为石灰石-石膏湿法脱硫(WFGD)和选择性催化还原法(SCR)[14]. 本研究分别选择两种锅炉类型的燃煤电厂,共调查了4个燃煤电厂. 其中,A、B电厂为CFB锅炉,装机容量分别为2台135 MW机组和1台24 MW机组,C、D电厂为PC锅炉,装机容量分别为2台300 MW机组和2台600 MW机组. 4个电厂的基本信息见表1.

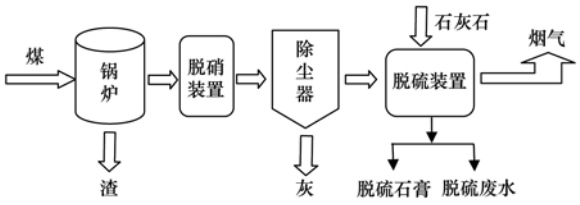
表1 燃煤电厂基本信息

Table 1 Basic information of coal-fired power plants

机组编号	A	B	C	D
装机容量/MW	2×135	24	2×300	2×600
发电量/亿(kW·h)·a^{-1}	17.74	1.30	24.23	53.15
锅炉类型	CFB	CFB	PC	PC
除尘装置	ESP	ESP	ESP	ESP
脱硫装置	炉内固硫+WFGD	炉内固硫	WFGD	WFGD
脱硝装置	/	/	低氮燃烧+SCR	SCR
煤消耗量/万t·a^{-1}	96.8	14.5	123.4	218.3
石灰石消耗量/万t·a^{-1}	5.0	1.4	9.3	22.3
炉渣产量/万t·a^{-1}	4.5	3.8	7.7	11.6
粉煤灰产量/万t·a^{-1}	18.8	2.5	39.4	70.0
脱硫石膏产量/万t·a^{-1}	6.9	1.7	19.7	13.7

1.2 样品采集与处理

于2015年1月,分别采集4个燃煤电厂的输入输出物料,其中,输入物料主要为入炉煤和石灰石,输出物料主要为炉渣、粉煤灰和脱硫石膏. 入炉煤取自混合后的输煤带,石灰石取自堆场,炉渣取自输渣皮带,粉煤灰取自除尘器采样口,脱硫石膏取自皮带机(见图1),采集煤样30 min后再采集灰、渣、石膏样品,每天采集3次,连续采集5 d,测量后取平均值. 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.



A、B电厂无脱硝装置

图1 燃煤电厂流程及采样点示意

Fig. 1 Flow chart and sampling locations in tested power 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[15]，采用 DMA-80 固体样品汞直接分析仪测定. 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 0.29×10^{-6} mg·kg^{-1}，测定值与标准值的相对偏差为 5%. 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 10%.

2　结果与讨论

2.1　不同燃煤电厂输入物料汞含量

4 个燃煤电厂的输入物料均为煤和石灰石. 入炉煤均为重庆本地原煤和外地煤炭按一定比例混合而成，4 个电厂入炉煤汞含量存在一定差异(图 2)，A、B、C、D 厂分别为(215.75 ± 2.42)、(245.33 ± 5.89)、(80.77 ± 6.39)和(266.83 ± 4.71) μg·kg^{-1}. 其中，A、B 和 D 电厂的入炉煤汞含量均较高，与我国燃煤平均汞含量相当[16,17]，高于 Tang 等[8]对 4 个电厂的入炉煤测试结果(23.30 ~ 43.27 μg·kg^{-1}). 而 C 电厂的入炉煤汞含量明显低于我国平均值[16]，也低于王圣等[9]测得我国 6 个燃煤电厂的入炉煤中汞含量(139.19 ~ 220.00 μg·kg^{-1}).

石灰石是燃煤电厂的另一原料，刁星等[18]采用原子荧光光谱法对 5 个燃煤电厂的入炉煤及石灰石进行分析，入炉煤汞含量为 0.06 ~ 0.24 mg·kg^{-1}，石灰石中未检出汞. 本试验分析结果表明，A、B、C 这 3 个电厂的石灰石汞含量较低，分别为(14.96 ± 0.76)、(6.75 ± 0.38)、(19.53 ± 1.65) μg·kg^{-1}，而 D 电厂的石灰石含量高达(75.67 ± 2.56) μg·kg^{-1}，是其它 3 个电厂的 4 ~ 12 倍.

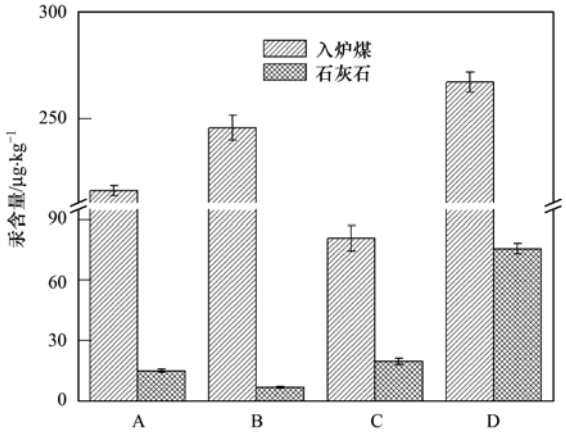


图 2　燃煤电厂原料汞含量

Fig. 2　Mercury contents of input materials in power plants

2.2　不同燃煤电厂输出物料汞含量

燃煤电厂的输出物料主要为炉渣、粉煤灰、脱硫石膏和烟气. 4 个燃煤电厂的炉渣汞含量分别为(3.29 ± 0.26)、(2.73 ± 0.33)、(9.16 ± 1.78)和(183.94 ± 8.05) μg·kg^{-1}(图 3). A、B、C 电厂的炉渣汞含量较低，D 电厂的炉渣汞含量较高. 燃煤锅炉中的温度超过1 000℃，一般情况下，大部分汞在煤炭燃烧过程被释放出来，少部分残留在底渣中. 炉渣中汞含量较高可能是由于原煤的性质、燃烧工况等因素的影响.

4 个电厂的粉煤灰汞含量具有较大差异，分别为(1 055.43 ± 5.89)、(1 314.06 ± 10.12)、(54.42 ± 2.33)和(395.33 ± 9.69) μg·kg^{-1}. 从图 3 中可以看出，循环流化床锅炉燃煤电厂(A、B 电厂)排放的粉煤灰中汞含量明显高于煤粉锅炉燃煤电厂(C、D 电厂)，可见 A、B 电厂的除尘设备脱汞效率较好. 可能是循环流化床相比煤粉炉更易获得颗粒态汞(Hg^p)[19,20]，飞灰能吸附烟气中的大量的汞[21,22]，进入锅炉的汞主要富集在飞灰中而被除尘器捕集.

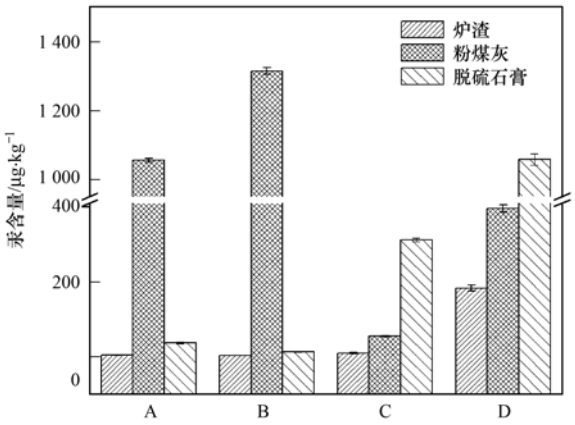


图 3　燃煤电厂输出物料汞含量

Fig. 3　Mercury contents of output materials in power plants

4 个燃煤电厂的脱硫石膏汞含量分别为(37.24 ± 2.42)、(12.60 ± 0.85)、(312.72 ± 4.75)和(1 057.65 ± 16.58) μg·kg^{-1}. A、B 两个电厂的脱硫石膏汞含量明显低于 C、D 两个电厂，这与 4 个电厂的粉煤灰汞含量正好相反，这主要是由于 A、B 电厂中大量的汞在除尘设备中被去除，而 C、D 电厂脱硫设备去除了较多的汞，因而脱硫石膏中汞含量较高. 脱硫设备在去除 SO_2 等污染物的同时，对烟气中的汞也有脱除效果，WFGD 温度相对较低，有利于 Hg^0 的氧化和 Hg^{2+} 的吸收. 由于采样条件和采样设备的限制，未对电厂的烟气汞排放进行监测，因此，本研究采用质量平衡模型[17]对不同电厂向大气中排放的汞进行估算.

2.3 燃煤电厂汞的来源和去向

根据燃煤电厂各物料的汞输入输出量及汞的迁移特征,建立质量平衡计算公式如下:

$$Hg_{输入} = Hg_{输出} \quad (1)$$

$$Hg_{输入} = Hg_{煤} + Hg_{石灰石} \quad (2)$$

$$Hg_{输出} = Hg_{炉渣} + Hg_{脱硫石膏} + Hg_{粉煤灰} + Hg_{烟气} \quad (3)$$

式中,$Hg_{输入}$、$Hg_{输出}$分别代表燃煤电厂汞的输入及输出量($g\cdot d^{-1}$),$Hg_{煤}$、$Hg_{石灰石}$代表入炉煤和石灰石的汞输入量($g\cdot d^{-1}$),$Hg_{炉渣}$、$Hg_{脱硫石膏}$、$Hg_{粉煤灰}$、$Hg_{烟气}$分别代表燃煤电厂产生的废物汞排放量($g\cdot d^{-1}$).

2.3.1 燃煤电厂汞的来源

根据4个燃煤电厂输入物料(煤和石灰石)消耗量和汞含量、输出物料(炉渣、脱硫石膏和粉煤灰)产生量和汞含量,结合公式(1)~(3)计算得到输入、输出物料的总汞量,如表2和图4所示. 4个电厂的入炉煤汞输入量均占主要部分,石灰石带入的汞量远小于煤带入的汞量,4个电厂的入炉煤汞输入量占总输入汞量的比例均高于97%. D电厂由于装机容量和燃煤消耗量最大,且燃煤汞含量也最高,其汞输入量高达(1 595.64 ±9.60) $g\cdot d^{-1}$.

表2 燃煤电厂中汞的输入输出量/$g\cdot d^{-1}$

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

电厂	A	B	C	D
煤输入汞量	572.22 ±6.42	97.58 ±1.91	273.00 ±9.52	1 595.64 ±9.60
石灰石输入汞量	2.05 ±0.10	0.25 ±0.01	4.99 ±0.42	46.20 ±1.56
炉渣输出汞量	0.40 ±0.08	0.28 ±0.03	1.93 ±0.37	58.63 ±2.57
粉煤灰输出汞量	544.14 ±3.03	90.82 ±0.70	58.74 ±2.51	758.17 ±10.58
脱硫石膏输出汞量	7.05 ±0.46	0.60 ±0.04	168.91 ±2.57	395.88 ±6.21
烟气输出汞量	22.67 ±0.48	6.13 ±0.35	48.41 ±1.06	429.17 ±7.25

2.3.2 燃煤电厂汞的去向

根据公式(1)~(3),计算得到输出物料(固体废物和烟气)汞的排放量,如图4所示. 4个电厂排放的汞主要进入了固体废物,分别占总排汞量的96.05%、93.73%、82.59%和73.86%. 其中,A、B电厂中汞的去向主要是粉煤灰,分别占总排放量的94.75%和92.83%,与文献[23,24]的研究结果相近;其次是烟气,分别占3.95%和6.27%;进入炉渣和脱硫石膏的汞量较少,均低于1%,与樊保国等[25]的研究结果相近(0.10% ~0.90%). C、D电厂中汞的去向与A、B电厂有较大差异. C电厂(装机容量为2×300 MW)中的汞主要进入了脱硫石膏,其排汞量约为60.76%,其次是粉煤灰和烟气,分别占21.13%和17.41%. D电厂(装机容量为2×600 MW)中汞的主要去向为粉煤灰,约为46.18%,其次是烟气和脱硫石膏,分别占26.14%和24.11%. 而樊保国等[25]对300 MW和600 MW的2个PC锅炉电厂(污控设施为SCR + ESP + WFGD)汞排放特性进行了测试,2个电厂排放的汞主要进入了飞灰(分别为85.1%和69.17%).

4个电厂的汞脱除率分别为96.05%、93.72%、82.46%和72.89%. A、B电厂明显高于C、D电厂,这可能与4个电厂的锅炉类型、装机容量、除尘效率等因素有关. 惠霖霖等[14]调查发现,

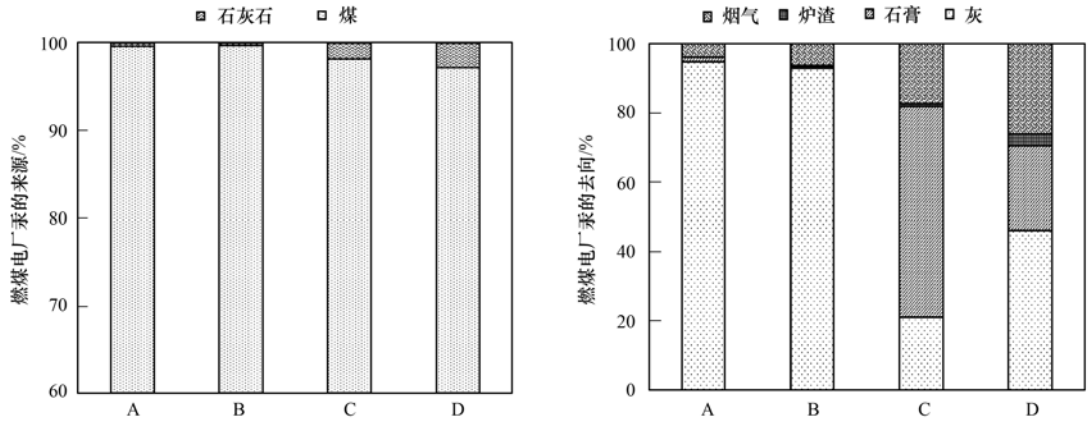


图4 燃煤电厂汞的来源和去向

Fig. 4 Source and destination of mercury in power plants

ESP 的去除效率受锅炉类型的影响较大,使用流化床锅炉的 ESP 平均脱汞效率明显高于煤粉炉,相比煤粉炉,循环流化床更易获得颗粒态汞(Hg^p)[19,20]. 有研究发现,电厂发电负荷越高时,除尘、脱硫设备运行水平相对较好,脱除烟气中的汞相对较多[9]. 本研究也发现了此现象,A、B 电厂的发电负荷高于 C、D 电厂,其汞脱除率也更高.

有研究表明,燃煤电厂进入水体中的汞较少,约为2%左右[14]. 陈敏敏等[24]对我国12个省16家电厂的32台机组进行了监测,发现新鲜水、煤泥废水、冲灰废水及其他废水中的汞含量极低,多为无法检出. 本试验中,由于 B、D 电厂未采集到脱硫工艺水及废水样品,A、C 电厂的废水排放量也较少,因此未考虑向废水排放的 Hg.

2.4　燃煤电厂大气汞排放

2.4.1　大气汞排放因子

由于汞在大气中可进行长距离传输而受到广泛关注,燃煤电厂向大气排放的汞也是国内外学者研究的重点内容之一. 为进一步分析重庆市燃煤电厂大气汞排放特征,对 4 个电厂的汞排放因子进行分析. 由于本研究未采集烟气汞进行分析,因此采用质量平衡模型对大气汞排放因子进行估算. Wang 等[12]的研究结果发现通过烟气汞实测浓度和输入输出物料汞含量估算的质量平衡率能达到 86.5% ~116.1%,可见质量平衡模型具有较高的精度和可靠性. 大气汞排放因子采用王圣等[9]和 Wang 等[12]的计算方法分别进行计算,公式如下:

$$EF_{电} = Hg_{烟气}/EG_{电} \quad (4)$$

$$EF_{煤} = Hg_{烟气}/M_{煤} \quad (5)$$

式中,$EF_{电}$ 为以单位发电量计算的大气汞排放因子,$\mu g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$; $EF_{煤}$ 为以单位煤炭消耗量计算的大气汞排放因子(以 Hg/coal 计),$mg\cdot t^{-1}$; $Hg_{烟气}$ 为电厂大气汞排放量,$kg\cdot d^{-1}$,$EG_{电}$ 为电厂的发电量,$MW\cdot d^{-1}$; $M_{煤}$ 为电厂的煤炭消耗量,$t\cdot d^{-1}$.

根据公式(4),计算得到 4 个电厂的 $EF_{电}$ 分别为 4.66、17.21、7.29、29.47 $\mu g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$(表3),均低于于丽新等[26]对辽宁某 300 MW 电厂的研究结果[38.72 $\mu g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$]. 王圣等[9]对国内某6个燃煤电厂进行现场测试,算出的大气汞排放因子为 14.09 ~ 56.08 $\mu g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$,且发现汞排放因子与电厂装机容量及发电负荷呈负指数关系,而本试验未发现此现象. 根据公式(5),计算得到4个电厂的 $EF_{煤}$ 分别为 8.55、15.41、14.32、71.77 $mg\cdot t^{-1}$,Wang 等[12]采用实测方法对 6 个 PC 锅炉电厂的 $EF_{煤}$ 进行了计算,其中装有 ESP + WFGD 的电厂 $EF_{煤}$ 为 25 ~ 75 $mg\cdot t^{-1}$,装有 SCR + ESP + WFGD 的电厂为 11 $mg\cdot t^{-1}$,而装有 ESP + CFB-FGD + FF 的电厂 $EF_{煤}$ 为 131 $mg\cdot t^{-1}$. 本研究发现,A、B 电厂(CFB 锅炉)汞排放因子与 C 电厂(PC 锅炉)相当,但明显低于 D 电厂(PC 锅炉). 装有 ESP + WFGD + 炉内固硫的电厂 $EF_{煤}$ 低于 Wang 等[12]的相同污控设施电厂(Wang 等调查的电厂均为 PC 锅炉),而装有 SCR + ESP + WFGD 的电厂 $EF_{煤}$ 均高于 Wang 等[12]调查的相同污控设施电厂. 这可能是与电厂的锅炉类型、原煤汞含量、发电负荷及污控设备等因素有关.

表 3　不同燃煤电厂汞排放因子比较

Table 3　Mercury emissions factors of four power plants

电厂	装机容量/MW	大气汞排放量/$g\cdot d^{-1}$	汞脱除率/%	发电量/亿$(kW\cdot h)\cdot a^{-1}$	$EF_{电}$/$\mu g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$	$EF_{煤}$/$mg\cdot t^{-1}$
A	2×135	22.67	96.05	17.74	4.66	8.55
B	24	6.13	93.72	1.30	17.21	15.41
C	2×300	48.41	82.46	24.23	7.29	14.32
D	2×600	429.17	72.89	53.15	29.47	71.77

2.4.2　大气汞排放量估算

根据质量平衡计算公式,估算 4 个燃煤电厂排入大气中的汞量分别为 22.67、6.13、48.41、429.17 $g\cdot d^{-1}$(表3). 刁星等[18]对 5 个装机容量为 300 ~ 600 MW 的燃煤电厂汞排放特征进行了研究,发现 5 个电厂烟气汞排放量为 97.27 ~ 348.57 $g\cdot d^{-1}$. A、B、C 电厂的大气汞排放量远低于刁星等[18]的研究结果,D 电厂大气汞排放量较高,约为其他 3 个电厂的 9 ~ 71 倍. D 电厂年发电量最高,燃煤消耗量也最大,且其煤中汞含量也是 4 个电厂中最高的,达到$(266.83 \pm 4.71)\ \mu g\cdot kg^{-1}$,因此,其大气汞排放量较高. 根据 4 个电厂的大气汞排放因子和年发电量,计算得到 4 个电厂的大气汞年排放量分别为 8.27、2.24、17.67、156.65 kg.

不同模型估算结果均存在不确定性,各有优缺点. 刁星等[18]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. Tang 等[8]、Wang 等[12]分别对燃煤电厂烟气汞实测浓度、输入输出物料汞含量进行了分析,并进行了质量平衡分析,其质量平衡率分别达到 80.0% ~110.0% 和 86.5% ~116.1%,表明质量平衡模型具有较高的可靠性. 本研究采用质量平衡模型参数均来自实际测定结果,原料的来源、消耗量及浓度变化、燃烧工况、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. 因此,还需进一步研究建立相对准确的电力行业大气汞排放估算模型.

总体来说,燃煤电厂的汞排放与煤种及其消耗量、煤中汞含量、锅炉类型、除尘和脱硫设备等密切相关[9,18]. 本研究发现,重庆的几个燃煤电厂中粉煤炉型燃煤电厂汞排放较高,需要重点控制大型煤粉炉型的燃煤电厂大气汞排放. 同时,为减少燃煤电厂的汞排放量,应改善燃煤机组的能效,提高除尘、湿法脱硫等烟气净化设备的汞去除效率. 此外,由于燃煤电厂产生的粉煤灰及脱硫石膏中的汞含量较高,且常用来进行二次利用,如粉煤灰可用来生产水泥和制砖,脱硫石膏可用于制备水泥缓凝剂及墙体材料等,这些利用过程也会产生汞的释放进入大气环境[14]. 因此,还需要关注燃煤电厂固体废物利用过程的二次汞排放问题.

3 结论

4 个燃煤电厂的汞主要来自原煤,排放的汞主要进入了固体废物,A、B 电厂中的汞主要进入了粉煤灰(92.83% ~94.75%),C、D 电厂中的汞主要分别进入了脱硫石膏(60.76%)和粉煤灰(46.18%). 4 个电厂的汞脱除率为 72.89% ~96.05%,使用循环流化床锅炉的电厂高于煤粉炉电厂. 4 个电厂的大气汞排放因子($EF_{电}$、$EF_{煤}$)分别为 4.66 ~29.47 $\mu g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$和 8.55 ~71.77 $mg\cdot t^{-1}$,大气汞年排放量为 2.24 ~156.65 kg. 燃煤电厂的汞排放与电厂的锅炉类型、煤的消耗量、发电负荷、污控设备及除尘效率等因素有关.

参考文献:

[1] 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.

[2] Jiang G B, Shi J B, Feng X B. Mercury pollution in China: an overview of the past and current sources of the toxic metal[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(12): 3672-3678.

[3] 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.

[4] 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.

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

[6] 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.

[7] 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.

[8] Tang N, Pan S W. Study on mercury emission and migration from large-scale pulverized coal fired boilers[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, **41**(4): 484-490.

[9] 王圣, 王慧敏, 朱法华, 等. 基于实测的燃煤电厂汞排放特性分析与研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 33-37.
Wang S, Wang H M, Zhu F H, *et al*. Mercury emission characteristics from coal-fired power plants based on actual measurement[J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 33-37.

[10] Wu Y L, Rahmaningrum D G, Lai Y C, *et al*. Mercury emissions from a coal-fired power plant and their impact on the nearby environment[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2012, **12**(4): 643-650.

[11] Ambrose J L, Gratz L E, Jaffe D A, *et al*. Mercury emission ratios from coal-Fired power plants in the southeastern United States during Nomadss [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(17): 10389-10397.

[12] 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.

[13] Tian H Z, Liu K Y, Zhou J R, *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.

[14] 惠霖霖, 张磊, 王祖光, 等. 中国燃煤电厂汞的物质流向与汞排放研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(8): 2241-2250.
Hui L L, Zhang L, Wang Z G, *et al*. The mercury mass flow and emissions of coal-fired power plants in China [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(8): 2241-2250.

[15] US EPA method 7473: Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry[S].

[16] 蒋靖坤, 郝吉明, 吴烨, 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.

[17] 王起超, 马如龙. 煤及其灰渣中的汞[J]. 中国环境科学, 1997, **17**(1): 76-79.
Wang Q C, Ma R L. The mercury in coal and its cinder[J]. China Environmental Science, 1997, **17**(1): 76-79.

[18] 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.

[19] Zhang L, Zhuo Y Q, Chen L, *et al*. Mercury emissions from six coal-fired power plants in China [J]. Fuel Processing Technology, 2008, **89**(11): 1033-1040.

[20] Demir I, Hughes R E, DeMaris P J. Formation and use of coal combustion residues from three types of power plants burning Illinois coals[J]. Fuel, 2001, **80**(11): 1659-1673.

[21] Rubel A, Andrews R, Gonzalez R, *et al*. Adsorption of Hg and NO_x on coal by-products[J]. Fuel, 2005, **84**(7-8): 911-916.

[22] He P, Zhang X B, Peng X L, *et al*. Effect of fly ash composition on the retention of mercury in coal-combustion flue gas[J]. Fuel Processing Technology, 2016, **142**: 6-12.

[23] Srivastava R K, Hutson N, Martin B, *et al*. Control of mercury emissions from coal-fired electric utility boilers [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(5): 1385-1393.

[24] 陈敏敏, 唐桂刚, 景立新, 等. 基于监测数据的我国燃煤电厂汞排放分析[J]. 环境工程, 2015, **33**(10): 61-65.
Chen M M, Tang G G, Jing L X, *et al*. Analysis of mercury emission for coal-fired power plants based on monitoring measurement[J]. Environmental Engineering, 2015, **33**(10): 61-65.

[25] 樊保国, 刘军娥, 乔晓磊, 等. 电厂煤粉锅炉汞排放特性研究[J]. 环境污染与防治, 2014, **36**(7): 61-63, 73.
Fan B G, Liu J E, Qiao X L, *et al*. Mercury emission characteristics of the power plant pulverized coal fired boiler[J]. Environmental Pollution & Control, 2014, **36**(7): 61-63, 73.

[26] 于丽新, 李超, 韩钟国, 等. 基于实测的燃煤电厂汞排放特性分析与研究[J]. 环境工程, 2015, **33**(8): 136-139.
Yu L X, Li C, Han Z G, *et al*. Mercury emission characteristics from coal-fired power plants based on field tests [J]. Environmental Engineering, 2015, **33**(8): 136-139.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 2

Feb. 15, 2017

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing ····· YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, *et al.* (423)

Pollution Characteristics of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China ····· CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, *et al.* (429)

Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric $PM_{2.5}$ in Shengsi Region ····· CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, *et al.* (438)

Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in $PM_{2.5}$ from Mt. Taishan ····· MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, *et al.* (445)

Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing ····· ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, *et al.* (453)

Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region ····· YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, *et al.* (461)

Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing ····· ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, *et al.* (469)

Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014 ····· ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, *et al.* (476)

Variation Analysis of Daily $PM_{2.5}$ Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou ····· GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, *et al.* (485)

Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing ····· ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, *et al.* (495)

Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong ····· FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, *et al.* (502)

Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations ····· GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, *et al.* (510)

Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century ····· WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, *et al.* (517)

Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge ····· LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, *et al.* (527)

Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors ····· ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, *et al.* (535)

Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer ····· QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, *et al.* (547)

Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone ····· LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, *et al.* (555)

Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(Ⅲ)-oxalate Complex in Lake Water ····· JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, *et al.* (563)

Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO ····· WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, *et al.* (572)

Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland ····· WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, *et al.* (580)

Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants ····· YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, *et al.* (589)

Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir ····· HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, *et al.* (600)

Experimental Research of Hg^{2+} Removal by TiO_2/Bentonite Composite ····· TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, *et al.* (608)

Impact of Ammonia and H_2O_2 on Bromate and Disinfection By-products Control ····· WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, *et al.* (616)

Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks ····· WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua (622)

Adsorptive Remediation of Cr(Ⅵ) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite ····· ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, *et al.* (629)

Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation ····· HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, *et al.* (640)

Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes ····· GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, *et al.* (647)

Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources ····· GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, *et al.* (654)

Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System ····· WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, *et al.* (665)

Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance ····· SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, *et al.* (672)

Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge ····· DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, *et al.* (679)

Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using *Mucor circinelloides* ····· GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, *et al.* (688)

Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge ····· WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, *et al.* (697)

Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City ····· WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, *et al.* (703)

Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China ····· CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, *et al.* (711)

Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes ····· YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, *et al.* (721)

Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil ····· YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, *et al.* (728)

Effects of *Rhodopseudomonas palustris* PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure ····· LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, *et al.* (735)

Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment ····· DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, *et al.* (743)

Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas ····· HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, *et al.* (752)

Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils ····· LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, *et al.* (760)

Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances ····· ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, *et al.* (769)

Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity ····· NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, *et al.* (783)

Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain ····· CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, *et al.* (792)

Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics ····· YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, *et al.* (802)

Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain ····· TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, *et al.* (809)

Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat ····· SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, *et al.* (815)

Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat ····· CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, *et al.* (825)

Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure ····· LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, *et al.* (832)

Sorption of *p*-Nitrophenol by Biochars of Corncob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures ····· MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei (837)

《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）

2017 年 2 月 15 日　第 38 卷　第 2 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 38　No. 2　Feb. 15, 2017

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	北京宝昌彩色印刷有限公司	**Printed**	by Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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：140.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行

ISSN 0250-3301