

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小文(817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷(826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔(835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明(842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋(849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永(857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文(864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼(874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品(882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成(892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙(900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影(907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍(914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽(919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲(927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华(933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉(943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军(950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电催化法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可(962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴(968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军(974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥(979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹(986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广(993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广(998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广(1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔(1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利(1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强(1034)
海州湾潮滩重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威(1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波(1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅(1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶(1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光(1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲(1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水(1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉(1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西(1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强(1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花(1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆(1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍(1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强(1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶(1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛(1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰(1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强(1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川(1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明(1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲(1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明(1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙(1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响

刘敬勇, 孙水裕, 陈涛

(广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006)

摘要: 利用高温固定管式炉研究了 4 种固体添加剂 (CaO、 Al_2O_3 、粉煤灰和高岭土) 对污泥焚烧过程中 6 种重金属 (Pb、Cd、Cu、Cr、Ni、Zn) 在底渣中的迁移行为与固化残留特征的影响。结果表明, 污泥焚烧过程中 4 种固体添加剂 (CaO、 Al_2O_3 、粉煤灰和高岭土) 的加入有利于重金属固定并且残留在焚烧底渣中, 并且随着固体添加剂添加比例的增多, 重金属的残留率也逐渐增加。焚烧温度对固体添加剂吸附重金属的效果有很大影响, 其中重金属自身熔点、沸点及重金属在污泥中的赋存形态是决定其挥发性的一个重要因素。不同固体添加剂对不同重金属迁移的抑制效果有很大差异, 从控制重金属挥发角度来看, 固体添加剂高岭土和 CaO 要优于其他固体添加剂。固体添加剂活性中心与重金属化合物分子的相互作用取决于这些活性位的分布及重金属的化学性质。

关键词: 污泥; 焚烧; 重金属; 固体添加剂; 迁移

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-1166-08

Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge

LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao

(School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Experiments were carried out on laboratory-scale electrically heated tube furnace sewage sludge combustion with different adsorbents. Four solid adsorbents (calcium oxide, Alumina, fly ash and kaolin) were used to control the emission of heavy metals (Pb, Cd, Cu, Cr, Ni, Zn) during the sewage sludge incineration. The results showed that the heavy metals tended to be fixed and left over in the incineration bottom ash with the addition of calcium oxide, Alumina, fly ash and kaolin. With the increase of the solid adsorbent ratio, the residual rate of heavy metals in the bottom ash also increased. Incineration temperature had a great influence on the heavy metal adsorption effect of the solid adsorbent. The forms, melting point and boiling point of the heavy metals were found to be important factors that determined its volatility. There was huge difference in the inhibitory effect of different adsorbents on heavy metals migration. From the view of controlling heavy metal evaporation, the adsorbents kaolin and CaO were superior to the other adsorbents. The interaction between the active center of the solid adsorbent and the molecules of the heavy metal compounds depended on the distribution of these active sites and the chemical properties of the heavy metals.

Key words: sewage sludge; incineration; heavy metal; adsorbent; migration

城市污水污泥处理处置方法主要有堆肥、填埋、焚烧和深海投放等。但是,随着污水处理厂污泥产量逐年递增及人们对其环境危害性的认识,很多国家已经制定并实施了相关环境法令,严格禁止填埋处理污泥,鼓励对其进行焚烧处理^[1]。焚烧处理主要优势在于减少其体积的 80%~90%,可以有效地破坏有机微量污染物和病原体的化学结构,从而降低其毒性物质含量,而且焚烧过程产生的能量可进行回收利用。然而城市污泥焚烧过程中,重金属的挥发又易造成二次污染^[2,3],因而,在实际运行中重金属向大气中的排放也成为必需解决的关键问题^[4]。

在燃煤、垃圾或者污泥焚烧过程中添加固体添加剂来捕获重金属被广泛认为是一项有前景的技术,在金属蒸气还未结核前,使有毒重金属与活化的固体添加剂进行吸附和化学反应,从而达到捕

获或固化重金属的目的^[5-9]。国内外研究表明固体添加剂对烟气中的重金属蒸气的去除非常有效。李润东等^[10]的研究指出循环流化床石煤脱硫时加入石灰石固体添加剂对重金属 (Pb、Cu、Cr、Ni、Cd) 具有很强的俘获能力;Ho 等^[11]曾在流化床燃烧器中进行了添加剂的相关实验,指出流化床中痕量元素的吸附效率在一定的条件下可以达到 95%,而且对 Cd 和 Pb 的吸附效果石灰石要好于沙子和氧化铝;Scotto 等^[12]研究了高岭土和铝土矿对 Cd 和 Pb 的吸附机制,表明选用的两种添加剂对 Pb 的吸附效

收稿日期: 2012-05-25; 修订日期: 2012-07-14

基金项目: 广东省高校优秀青年创新人才培养项目 (LYM11059); 广东省科技计划项目 (2012B050300023); 广东省部产学研结合项目 (2011B090400161, 2011B090400144, 2012B090700005)

作者简介: 刘敬勇 (1979~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境污染控制, E-mail: www053991@126.com

果优于 Cd; Yao 等^[13]研究表明铝硅酸盐和钙基添加剂可以有效控制焚烧过程中排放的微量重金属,其中高岭土是一种经济而且实用的添加剂; Yao 等^[14]在焚烧过程添加高岭土后发现中 Pb 和 Cd 与高岭土发生了化学反应生成 $\text{PbO-Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$ 和 $\text{CdO-Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$,致使 Pb 和 Cd 向焚烧底渣中富集; Chen 等^[15]研究发现添加剂俘获重金属 (Pb、Cd、Cu 和 Cr) 能力排序为石灰石 > 水 > 高岭土 > 铝氧化物; 吴荣等^[16]等研究垃圾焚烧过程中添加 SiO_2 、 Al_2O_3 、CaO 对重金属 Pb 和 Cd 的捕获能力差异较大. 事实上,吸附过程是一个包含有吸附、凝结、扩散和化学反应的复杂过程^[17,18],并且添加剂的吸附效率与重金属元素种类、添加剂特性、喷入模式、运行温度、燃烧气氛以及空气流动速率等因素有关^[19]. 前期的研究主要集中在燃煤及垃圾焚烧过程重金属的迁移模拟及污染控制方面,而不同添加剂在污泥焚烧过程中对重金属的迁移和分布行

为的影响还缺乏深入研究.

本研究在利用气氛管式炉模拟污泥焚烧条件下,通过添加 4 种不同来源固体添加剂 (CaO 、 Al_2O_3 、高岭土、粉煤灰),分析污泥焚烧过程中重金属迁移转化行为,以期找到合适的添加剂,为减少污泥焚烧过程中重金属向大气中排放提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品的采集和制备

实验中所用的污泥取自广州开发区某污水处理厂(S1),该厂的污水处理规模为 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,其中工业废水约占 70%,采用活性污泥法进行深度处理. 采回后的污泥置于阴凉、通风处晾干,平铺于硬质白纸板上,用玻璃棒等压散,用玛瑙研钵研磨至样品全部通过 $150 \mu\text{m}$ (100 目) 尼龙筛装瓶备用. 样品的工业分析和元素分析见表 1,污泥的理化性质及重金属分析见表 2.

表 1 污泥样品的元素分析和工业分析/%

Table 1 Proximate and ultimate analysis sludge sample/%										
项目	N	C	H	O	S	Cl	M _{ad}	V _{ad}	A _{ad}	FC
S1	4.483	33.73	5.245	22.976	2.551	0.213	8.73	56.12	31.33	3.82

表 2 污泥中重金属及矿物质含量

Table 2 Contents of heavy metals and minerals in the sludge													
项目	Pb /mg·kg ⁻¹	Ni /mg·kg ⁻¹	Mn /mg·kg ⁻¹	Cr /mg·kg ⁻¹	Cu /mg·kg ⁻¹	Zn /mg·kg ⁻¹	Cd /mg·kg ⁻¹	SiO ₂ /%	CaO /%	Al ₂ O ₃ /%	MgO /%	Fe ₂ O ₃ /%	K ₂ O /%
S1	134.21	220.78	1844	191.41	5 845	987	4.99	28.41	3.71	4.14	0.250	2.186	1.359

1.2 污泥的焚烧模拟装置

实验装置(图 1)主要包括供气部分、管式炉反应器、烟气过滤、烟气吸收、温度检测及控制、系统气密性检测等,该实验装置是一种能有效模拟实际焚烧炉中重金属迁移分布的有效实验手段^[20, 21]. 焚烧室为一内径 22 mm、长 60 mm 的石英管,燃烧室采用具有 PID 自整定功能的 KSY2-2-130 快速升

温管式炉(天津中环实验电炉有限公司),程序跟踪精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$. 实验装置的主体部分管式电炉,其结构为高铝炉管外绕电热丝,炉膛管水平放置,炉温均匀,炉温可以在 $0 \sim 1\,200^\circ\text{C}$ 根据需要设定. 温度控制系统有两种方式,其中 KSY 系列控制器采用智能温控仪表,专用模块,具有控制精度高、超温保护功能. 供气系统由钢瓶组成,可以模拟不同燃烧气氛.

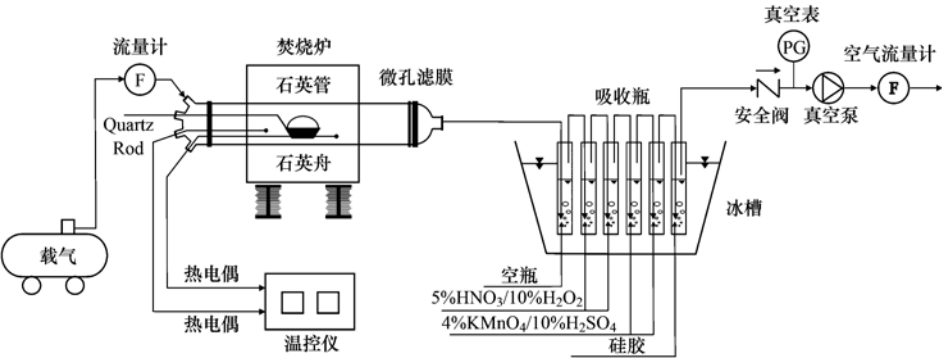


图 1 模拟污泥焚烧实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the laboratory scale simulated tube incinerator

吸气系统由多孔玻璃板吸收瓶抽气泵和流量计组成,连接管路均采用硅胶管,烟气通过玻璃纤维滤筒过滤和捕集。由于本实验中焚烧污泥的量较少,并未对吸收液中重金属进行分析,仅对焚烧后底渣进行了分析研究,而后面的吸收瓶主要用来吸收烟气并防止污染外排。

1.3 实验方法

向干污泥样品中添加 4 种固体添加剂 (CaO、 Al_2O_3 、高岭土、粉煤灰),添加剂与污泥的比例设定为 1/5、1/10、1/15、1/20、1/40,然后把添加剂与污泥混匀。实验表明添加剂通过本实验装置焚烧后质量改变小于 0.1%,为方便讨论,认定添加剂在焚烧实验过程中不发生质量改变;添加剂中的重金属含量与污泥本身中重金属相比可以忽略不计。污泥焚烧条件为:温度为 900°C ,焚烧时间为 20 min,空气过剩系数为 $\lambda = 1.2$ 。焚烧后的残渣取出磨细过 120 目尼龙筛后,按照 US EPA method 3005a 进行消解,然后利用 FAAS 进行测定。

在污泥焚烧过程中,控制不同参数,探索污泥中重金属在焚烧过程中的迁移特性。为更好解释实验现象,特引入重金属残留率(FIX)定义如下:

$$\text{FIX} = \frac{C_2 \times m_2}{C_1 \times m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中,FIX 为重金属在底渣中的残留率,% ; C_1 为污

泥中重金属的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; m_1 为污泥质量,g; C_2 为污泥与添加剂焚烧后的残渣中重金属含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; m_2 为污泥与添加剂焚烧后的残渣质量,g。

2 结果与分析

2.1 不同比例固体添加剂对重金属分布的影响

由图 2(a)可以看出,加入不同比例 CaO 后,底渣中重金属的残留率均有所提高。当 CaO 添加比例为 1/10 时,Pb 的残留率从 57.30% 提高到 89.55%,Cd 的残留率从 74.80% 提高到 82.77%,Cu 的残留率从 76.25% 提高到 88.11%,Cr 的残留率从 73.36% 提高到 96.69%,总体来看,CaO 的加入对 Pb 和 Cd 影响较大,对于 Cu、Ni、Cr、Zn 影响相对较小,并且添加剂 CaO 加入对重金属挥发抑制作用顺序依次为 $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cd}$ 。

在添加 CaO 后,重金属在底渣中的残留率都达到了 80% 以上,其中 Pb、Zn 在底渣中的富集与 CaO 的加入量呈正相关,Ni 在 CaO 添加比例为 1/20 时,残留率达到最大值,Cd 和 Cu 固定率在 CaO 添加量比例为 1/15 时达到最大值;Zn 的残留率在 10% 左右 CaO 添加量变化不大。另外当 CaO 添加量比例高于 1/15 后,加大 CaO 添加量对重金属的固定率影响并不大。结合本实验,添加 5% 左右的 CaO 可以较好地把重金属固定在焚烧底渣中。

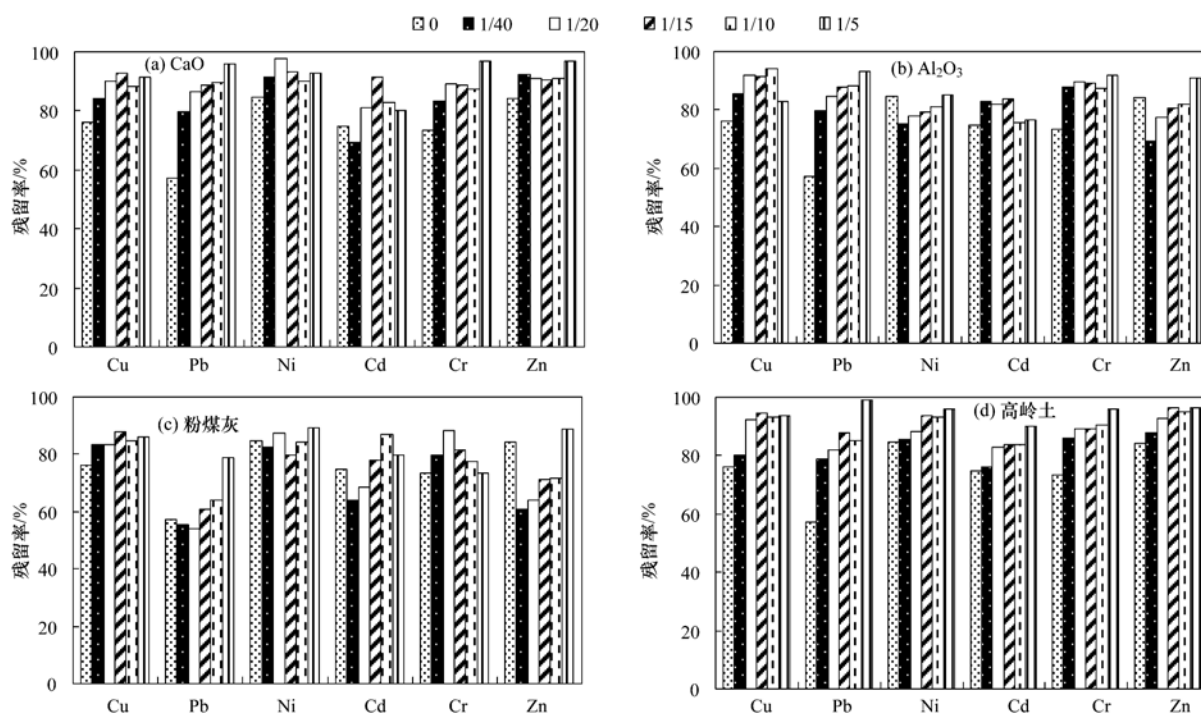


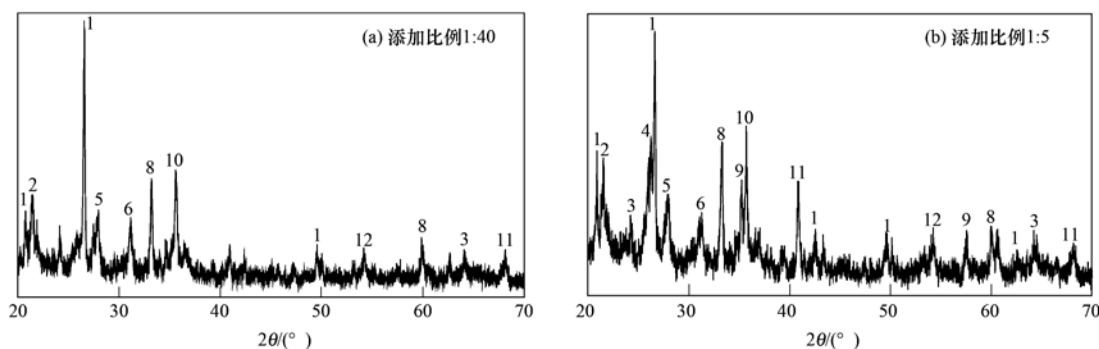
图 2 污泥添加不同比例固体添加剂焚烧后底渣中重金属的残留率

Fig. 2 Residual rate of heavy metals in the bottom ash after adding different proportions of the adsorbents during incineration of sludge

由图 2(b) 可以看出, 加入不同比例 Al_2O_3 后, 底渣中重金属的残留率均有所变化。当 Al_2O_3 添加比例为 1/10 时, Pb 的残留率变化最为明显, 从 57.30% 提高到 88.12%, 其他重金属残留率变化规律不明显, 其中 Ni 和 Zn 与不添加 Al_2O_3 相比较残留率还有所下降, 这可能与 Al_2O_3 和重金属发生反应需要较高的活化能有关。 Al_2O_3 的添加对重金属固定率的提高效果远不如 CaO , 但对元素 Pb 具有较高的固定效果。

由图 2(c) 可以看出, 加入不同比例粉煤灰后,

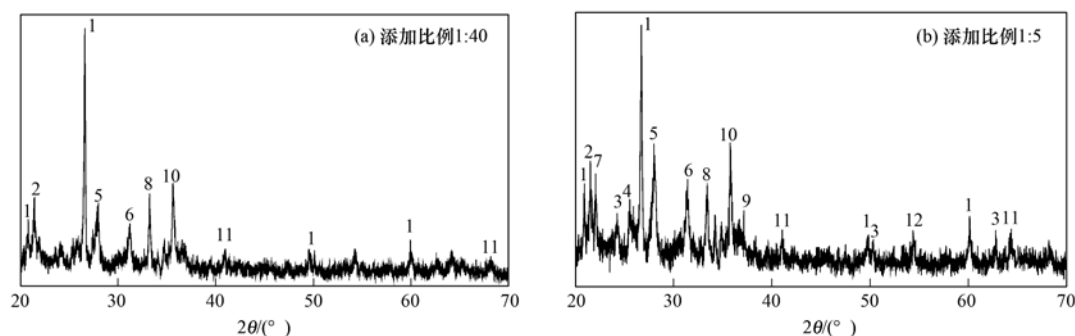
底渣中重金属的残留率均有所变化。当粉煤灰添加比例为 1/10 时, Cu、Pb、Cd、Zn 的残留率都有所增加, 而 Ni 和 Cr 变化并没有规律, 其中 Ni 的残留率在添加比例为 1/15 时最低, Cr 的残留率在 1/5 时最低。对添加粉煤灰比例分别是 1:40 及 1:5 两种焚烧底渣进行了 XRD 分析(图 3), 从中可以看出, 底渣主要以 Si-Al-Fe 氧化物组成, 包括 NaAlSiO_4 、 CaSO_4 、 $\text{K}_8\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{15}$ 等, 并且粉煤灰添加比例越高, 导致其成分越复杂, 有利于重金属的固化与残留。



1. SiO_2 ; 2. P_2O_5 ; 3. NaAlSiO_4 ; 4. CaSO_4 ; 5. $\text{K}_8\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{15}$; 6. $\text{K}_6\text{Fe}_2\text{O}_5$; 7. MgFeAlO_4 ; 8. Al_2O_3 ;
9. Ca_2O_3 ; 10. $\text{K}_6\text{Fe}_2\text{O}_5$; 11. $\text{Mn}_{1.3}\text{Fe}_{1.7}\text{O}_3$; 12. Fe_2O_3

图 3 添加不同比例粉煤灰条件下污泥焚烧后底渣的 XRD 图

Fig. 3 XRD of the sludge slag incinerated with different fly ash addition



1. SiO_2 ; 2. P_2O_5 ; 3. NaAlSiO_4 ; 4. CaSO_4 ; 5. $\text{K}_8\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{15}$; 6. $\text{K}_6\text{Fe}_2\text{O}_5$; 8. Al_2O_3 ; 7. MgFeAlO_4 ;
9. Ca_2O_3 ; 10. $\text{K}_6\text{Fe}_2\text{O}_5$; 11. $\text{Mn}_{1.3}\text{Fe}_{1.7}\text{O}_3$; 12. Fe_2O_3

图 4 添加不同比例高岭土条件下污泥焚烧后底渣的 XRD 图

Fig. 4 XRD of the sludge slag incinerated with different kaolin addition

由图 2(d) 可以看出, 加入不同比例高岭土后, 底渣中重金属的残留率均有所提高。当高岭土添加比例为 1/10 时, Cu、Pb、Ni、Cd、Cr、Zn 从未添加高岭土的残留率 76.25%、57.30%、84.61%、74.80%、73.36%、84.22% 提高到 93.36%、85.09%、93.11%、83.57%、90.39%、95.15%。从抑制挥发效果来看, 其顺序依次为 $\text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ni} \approx \text{Cd}$ 。对添加高岭土比例分别是 1:40 及 1:5

两种焚烧底渣进行了 XRD 分析(图 4), 从中可以看出, 底渣主要以 Si-Al-Fe 氧化物组成, 包括 NaAlSiO_4 、 CaSO_4 、 $\text{K}_8\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{15}$ 等, 并且高岭土添加比例越高, 导致其成分越复杂, 其中 Pb 和 Cd 可能与高岭土生成了 $\text{PbAl}_2\text{SiO}_8$ 、 $\text{CdAl}_2\text{SiO}_8$ 或 CdAl_2O_4 , 有利于抑制它们的挥发^[22,23]。

2.2 不同种类固体添加剂对重金属分布的影响

本研究使用的固体添加剂有 CaO 、 Al_2O_3 、粉煤

灰和高岭土,其中高岭土的化学式是 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,具有从周围介质中吸附各种离子及杂质的性能,在加热至接近其熔点(一般超过 $1\,000^\circ\text{C}$)时,物质自发地充填粒间隙而致密化^[18, 24];粉煤灰的化学组成类似于黏土的化学组成,组要包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 和未燃尽炭。

图 5 对比了添加剂为 1/10 情况下 4 种添加剂对重金属的吸附效果,从中可以看出不同添加剂对不同重金属的迁移的抑制效果有很大差异(表 3)。从控制重金属挥发角度来看,添加剂高岭土和 CaO 要优于其他添加剂,并且可以根据污泥中不同重金属含量来选择合适的添加剂。添加剂为 1/10 情况下,对添加固体添加剂焚烧后的底渣都进行了危险废物浸出毒性鉴别(GB 5085. 3-2007),6 种重金属浓度都未超过危险废物鉴别标准。

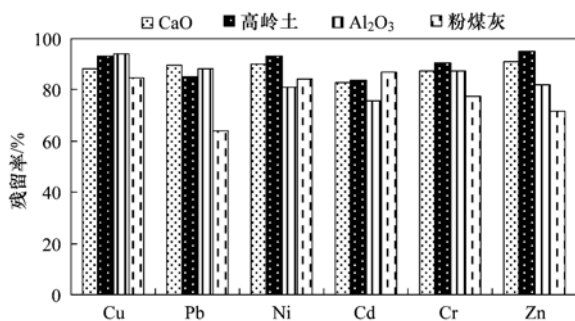


图 5 污泥添加不同类别添加剂焚烧后底渣中重金属的残留率

Fig. 5 Residual rate of heavy metals in the bottom ash after adding different adsorbents during incineration of sludge

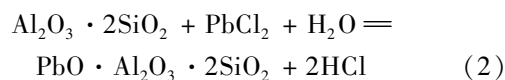
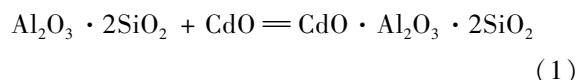
表 3 不同添加剂对重金属迁移的抑制效果

Table 3 Inhibitory effect of different adsorbents on the migration of heavy metals

重金属种类	抑制效果顺序
Cu	$\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{高岭土} > \text{CaO} > \text{粉煤灰}$
Pb	$\text{CaO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{高岭土} > \text{粉煤灰}$
Ni	$\text{高岭土} > \text{CaO} > \text{粉煤灰} > \text{Al}_2\text{O}_3$
Cd	$\text{粉煤灰} > \text{高岭土} > \text{CaO} > \text{Al}_2\text{O}_3$
Cr	$\text{高岭土} > \text{CaO} > \text{粉煤灰} > \text{Al}_2\text{O}_3$
Zn	$\text{高岭土} > \text{CaO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{粉煤灰}$

添加剂对重金属的吸附包括物理吸附和化学吸附。物理吸附主要以重金属蒸气在孔内凝结为主,尽管污泥焚烧中痕量元素的浓度达不到饱和,但由于孔内扩散、开尔文效应和灰焦颗粒和固体添加剂高比表面性,使得挥发出来的痕量元素可以在高于露点的温度下凝结,即发生毛细管凝聚。化学吸附是添加剂表面和内部小孔表面存在的活性位(如 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 TiO_2),这些活性位在高温下可以

与重金属化合物反应生成稳定的晶体和玻璃体。如本次实验中加入的高岭土可能与 Cd 和 Pb 发生了如下反应^[25, 26]:



反应产物中 Cd 和 Pb 都比较稳定存在,因此固体添加剂能在一定程度上抑制重金属的挥发。本次实验发现高岭土对重金属 Cu 、 Ni 、 Cr 、 Zn 、 Cd 挥发抑制效果好于 CaO ,而 Pb 则相反。结果的原因可能有 2 个:①由于 CaO 的吸附机制有物理吸附和化学吸附,高温反应条件抑制了物理吸附效果;② CaO 会与污泥灰中的酸性氧化物,如 Al_2O_3 、 SiO_2 等生成更为稳定的盐,减少了 CaO 与重金属的接触机会。其实固体添加剂活性中心与重金属化合物分子的相互作用取决于重金属的化学性质,另外这些活性位的分布也是不均匀的,所以各重金属化合物对活性位的竞争具有选择性^[18]。向污泥中添加固体添加剂,会引起炉底渣性质的改变,不同添加剂对痕量元素具有不同的抑制效果;另外,对不同的重金属,各添加剂所表现出的吸附能力也不同,这主要与添加剂组分、添加剂粒径、粒径分布、表面积的大小、及活性位的多少等因素有关系^[24]。

2.3 不同温度条件下固体添加剂对重金属分布的影响

当添加剂与污泥的混合比例是 1/15,焚烧时间为 20 min,焚烧温度分别为 500 、 900 、 $1\,100^\circ\text{C}$ 条件下,添加 CaO 及高岭土对重金属残留率的影响见图 6。

由图 6(a)可以看出,在未加添加剂条件下,污泥在不同温度焚烧过程中,重金属都有一定的挥发,其中 Pb 和 Cd 在 $1\,100^\circ\text{C}$ 条件下挥发超过 50%。由图 6(b)可以看出,加入固体添加剂 CaO 后,在 500°C 左右时重金属在底灰中的固定率均较低,6 种元素的固化率顺序为 $\text{Cr} > \text{Cd} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Pb}$;当焚烧温度升高到 900°C 时,重金属固定率明显提高,6 种元素的残留率均在 90% 左右,而它们的挥发性依次为 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni}$;当焚烧温度为 $1\,100^\circ\text{C}$ 时 Pb 和 Cd 的固定率有所降低,而其他重金属固定率变化较小,可见,在一定焚烧温度下添加适量的 CaO 可以把重金属固定在底渣中。

由图 6(c)可以看出,温度的提高可以促进高岭土对重金属固定作用(Cd 除外),其中 Ni 和 Cr 的残

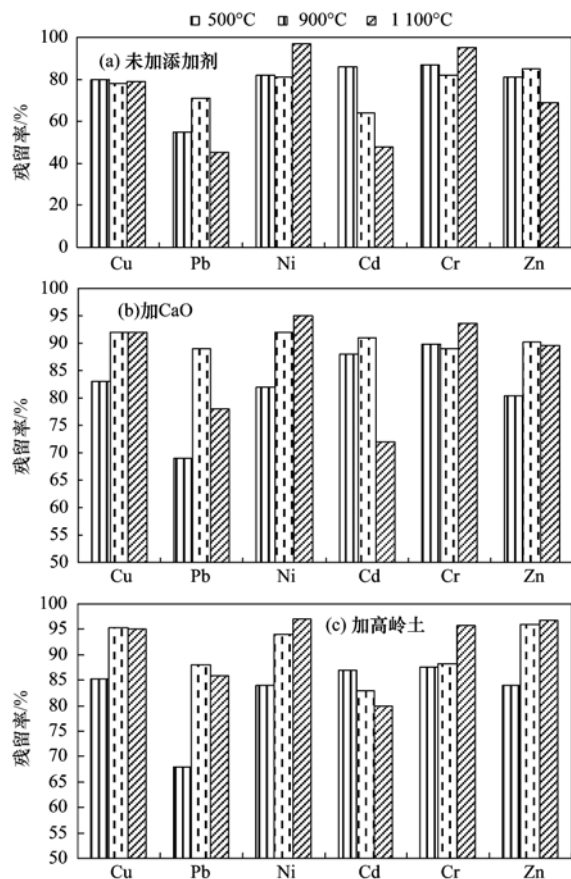


图6 焚烧温度对污泥焚烧过程中重金属残留率的影响

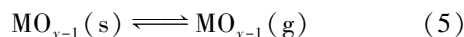
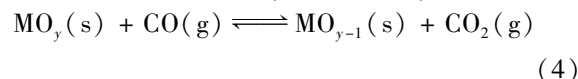
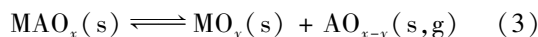
Fig. 6 Effect of the temperature on the residue rate of heavy metals in the residues

留率最高达到了95%。与未加添加剂[图6(a)]条件对照可以看出,当加入高岭土后,在900℃条件下,6种重金属Cu、Pb、Ni、Cd、Cr、Zn的残留率分别提高约17%、16%、13%、19%、4%和10%,并且高岭土在较高温条件下对重金属的固定效果更好。

大部分重金属的气化是在污泥燃烧阶段开始的,而重金属自身熔点、沸点低的微量元素更容易

气化。对于重金属Cd、Pb、Cr来讲如果按照气化的难易程度排序,则为Cd > Pb > Cr,如图6(a)可以看出,污泥焚烧温度在1000℃时,这3个重金属残留率顺序依次为Pb(48.43%) < Cd(54.16%) < Cr(74.08%),说明由于元素自身性质的影响,挥发性的差别还是较大的。

另外重金属在污泥中的赋存形式也是决定其挥发性的一个重要的因素。污泥中的重金属主要以氧化物、氢氧化物、硅酸盐、不可溶盐或有机络合物的形式存在,其次为硫化物,很少以自由离子的形式存^[27]。以Cd、Pb、Cr为例进行说明,这3个元素分别代表了不同挥发程度的重金属。如果污泥中Cd和Cr主要以硫酸盐存在,在加热过程中硫酸盐首先会发生分解生成氧化物,然后被还原生成易挥发的次氧化物。Cd、Cr的气化机制^[28]为:



式中,A代表污泥中的主量和次量元素,如C、N、S、Si、Al等, MO_{y-1} 是微量元素次氧化物或单质态形式,它们比氧化物形态 MO_y 更容易气化。氧化物一般都是污泥中的一些其它金属化合物如硫酸盐、碳酸盐、硝酸盐等在高温下分解得到的,如式(3)和式(4)是污泥中难熔性的氧化物释放的主要机制。污泥矿物质内的组分处在还原性气氛中,以难熔氧化物形态存在的微量元素被还原成较容易挥发的次氧化物或者单质态,然后发生如式(5)所示的气化过程。对于具有多种形态的微量元素其气化快慢也不一样,在污泥燃烧的第二个阶段或者更早会发生微量元素氯化物和硫化物的快速气化,接着氧化物才开始气化。所以,Pb和Cd的挥发性就要大于Cr的挥发性。

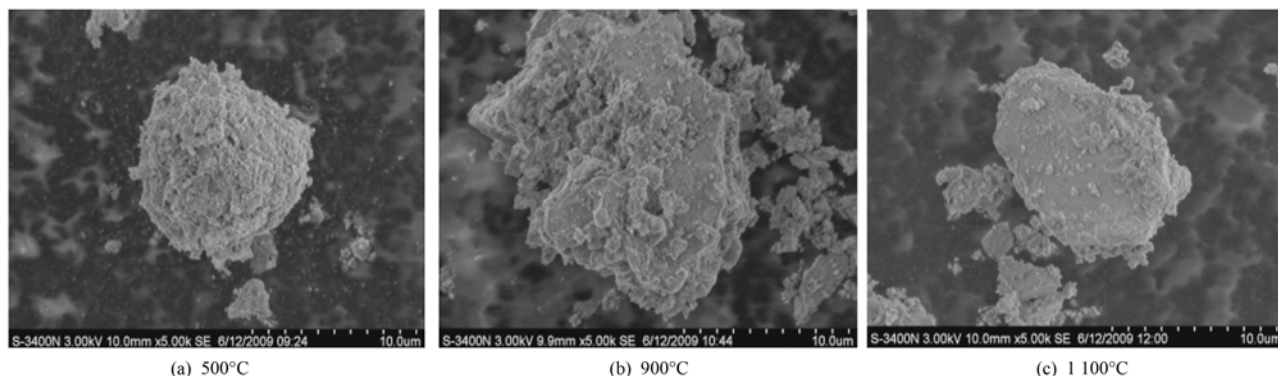


图7 不同温度条件下污泥加入高岭土焚烧后底渣的SEM图

Fig. 7 SEM of the sludge slag incinerated at different temperature with kaolin addition

图7表示不同温度条件下污泥加入高岭土焚烧后底渣的SEM图,从中可以看出,添加高岭土后高温有利于的污泥的焚烧渣颗粒表面致密化.这可能由于高岭土在掺烧过程中,发生一系列物理化学变化包括脱水作用、分解作用、生成莫来石,易熔杂质熔化生成玻璃相充填于质点间的空隙等,这些性质对重金属的固定具有一定的作用.

3 结论

(1) 污泥焚烧过程中四种固体添加剂 CaO 、 Al_2O_3 、粉煤灰和高岭土的加入有利于重金属残留而固定在焚烧底渣中,并且随着固体添加剂添加比例的增多,重金属的残留率也逐渐增加.

(2) 焚烧温度对固体添加剂吸附重金属的效果有很大影响,其中重金属自身熔点、沸点及重金属在污泥中的赋存形态是决定其挥发性的一个重要的因素.

(3) 不同添加剂对不同重金属的迁移的抑制效果有很大差异,从控制重金属挥发角度来看,添加剂高岭土和 CaO 要优于其他添加剂.

(4) 固体添加剂活性中心与重金属化合物分子的相互作用取决于重金属的化学性质,而这些活性位的分布也是不均匀的,因此各重金属化合物对活性位的竞争具有选择性,导致不同添加剂对重金属迁移的抑制效果有很大差异.

参考文献:

- [1] Assamoi B, Lawryshyn Y. The environmental comparison of landfilling vs. incineration of MSW accounting for waste diversion [J]. *Waste Management*, 2012, **32**(5): 1019-1030.
- [2] 刘敬勇, 孙水裕, 罗光前. 造纸污泥焚烧中 $\text{Zn}/\text{Cu}/\text{Ni}/\text{Mn}$ 的热力学平衡分布[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, **20**(2): 200-209.
- [3] 刘敬勇, 孙水裕. 城市污泥焚烧过程中重金属形态与分布的热力学平衡分析[J]. *中国有色金属学报*, 2010, **20**(8): 355-365.
- [4] Ginsberg T, Liebig D, Modigell M, *et al.* Multizonal thermochemical modelling of heavy metal transfer in incineration plants[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2012, **90**(1): 38-44.
- [5] Wey M Y, Yan M H, Chen J C. Treatment of hazardous sorbents generated from the adsorption of heavy metals during incineration [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, **73**(1): 19-37.
- [6] Kuo J K, Lin C L, Wey M Y. Effect of particle agglomeration on heavy metals adsorption by Al- and Ca-based sorbents during fluidized bed incineration [J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, **92**(10): 2089-2098.
- [7] Chen J C, Wey M Y. The effect of operating conditions on the capture of metals with limestone during incineration [J]. *Environment International*, 1996, **22**(6): 743-752.
- [8] Williams P T, Evans J. Interaction of cadmium and flyash sorbents in an experimental waste incineration furnace-flue gas system[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2001, **79**(6): 357-364.
- [9] 刘敬勇, 孙水裕. 污泥焚烧中铅的形态转化及脱除的热力学平衡研究[J]. *高等学校化学学报* 2010, **31**(8): 1605-1613.
- [10] 李润东, 刘连芳, 李爱民. 添加剂对污泥流化床焚烧过程重金属迁移特性影响[J]. *热力发电*, 2004, (10): 9-13.
- [11] Ho T C, Lee H T, Chu H W, *et al.* Metal capture by sorbents during fluidized-bed combustion [J]. *Fuel Processing Technology*, 1994, **39**(1-3): 373-388.
- [12] Scotto M V, Uberoi M, Peterson T W, *et al.* Metal capture by sorbents in combustion processes [J]. *Fuel Processing Technology*, 1994, **39**(1-3): 357-372.
- [13] Yao H, Mkilaha I S N, Naruse I. Screening of sorbents and capture of lead and cadmium compounds during sewage sludge incineration[J]. *Fuel*, 2004, **83**(7-8): 1001-1007.
- [14] Yao H, Naruse I. Combustion characteristics of dried sewage sludge and control of trace-metal emission[J]. *Energy & Fuels*, 2005, **19**(6): 2298-2303.
- [15] Chen J C, Wey M Y, Lin Y C. The adsorption of heavy metals by different sorbents under various incineration conditions[J]. *Chemosphere*, 1998, **37**(13): 2617-2625.
- [16] 吴荣, 李清海, 蒙爱红, 等. 垃圾焚烧中吸附剂对 Cd、Pb 迁移分布的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(7): 2174-2179.
- [17] Biswas P, Wu C Y. Control of toxic metal emissions from combustors using sorbents: a review[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1998, **48**(1): 113-127.
- [18] 程俊峰, 韩军, 刘迎晖, 等. 分级燃烧中固体吸附剂对痕量金属排放的影响[J]. *环境科学*, 2001, **22**(6): 34-38.
- [19] Chen J C, Wey M Y, Liu Z S. Adsorption mechanism of heavy metals on sorbents during incineration [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2001, **127**(1): 63-69.
- [20] Chen T, Yan B. Fixation and partitioning of heavy metals in slag after incineration of sewage sludge [J]. *Waste Management*, 2012, **32**(5): 957-964.
- [21] Jorg W, Stucki S. Similarity laws for the tubular furnace as a model of a fixed-bed waste incinerator[J]. *Chemical Engineering and Technology*, 1999, **22**(1): 209-222.
- [22] Scotto M V, Uberoi M, Peterson T W, *et al.* Metal capture by sorbents in combustion processes [J]. *Fuel Processing Technology*, 1994, **39**(1-3): 357-372.
- [23] Yao H. Study on fundamental emission characteristics of trace metal compounds and their control in combustion processes[D]. Japan: Toyohashi University of Technology, 2002.
- [24] 韩军, 徐明厚, 曾汉才, 等. 分级燃烧对固体吸附剂吸附痕量金属的影响[J]. *热能动力工程*, 2004, **19**(1): 52-57.
- [25] Uberoi M, Shadman F. High-temperature removal of cadmium compounds using solid sorbents[J]. *Environment Science and*

- Technology, 1991, **25**(7): 1285-1289.
- [26] Uberol M, Shadman F. Sorbents for removal of lead compounds from hot flue gases [J]. AIChE Journal, 1990, **36**(2): 307-309.
- [27] Werther J, Ogada T. Sewage sludge combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, **25**(1): 55-116.
- [28] 徐明厚, 郑楚光, 冯荣, 等. 煤燃烧过程中痕量元素排放的研究现状 [J]. 中国电机工程学报, 2001, **21**(10): 33-38.

第二届挥发性有机污染物 (VOCs) 检测分析、减排控制、 环境政策研究专辑征稿通知

挥发性有机物污染对生态、环境、健康产生了重要的影响,从国家层面上 VOCs 已经被列为重点控制的污染物,对挥发性有机污染物的减排与控制有着迫切的需求,有关挥发性有机污染的研究已经引起政府、地方、企业和科研人员密切的关注。

为了支持国家挥发性有机污染减排与控制,更好地促进与提高有关我国挥发性有机污染的科学研究,《环境科学》2011 年出版“挥发性有机污染物 (VOCs) 检测分析、减排控制、环境政策研究”专辑(中国科学院生态环境研究中心郝郑平研究员为专辑的特邀主编)。专辑出版后,引起了极大地反响和关注。

这一年多以来,我国挥发性有机污染的科学研究取得了一定进步与发展,不断有作者和相关部门希望能继续此专辑的编辑。为了继续支持我国未来 VOCs 减排和控制,进一步促进我国挥发性有机污染 VOCs 研究的发展和深入,《环境科学》计划 2013 年出版第二届挥发性有机污染物 (VOCs) 检测分析、减排控制、环境政策研究专辑(非增刊),邀请中国科学院生态环境研究中心郝郑平研究员为本专辑特邀主编,并开展挥发性有机污染 VOCs 研究优秀论文评选。现诚挚邀请国内外挥发性有机污染 VOCs 研究领域的专家、学者、技术人员踊跃投稿。

征文范围

- 1) 挥发性有机污染 (VOCs) 的监测与分析
- 2) 挥发性有机污染 (VOCs) 的排放与特征
- 3) 挥发性有机污染 (VOCs) 的控制与过程
- 4) 挥发性有机污染 (VOCs) 的控制技术与设备
- 5) 挥发性有机污染 (VOCs) 的反应与转化
- 6) 挥发性有机污染 (VOCs) 的减排模式与政策
- 7) 挥发性有机污染 (VOCs) 的其它研究内容

征文要求

- 1) 稿件参考《环境科学》已发表论文格式,文章以 Word 文档为附件发送至:hjcx@rcees.ac.cn,电子邮件主题为“VOCs 专辑 + 文章题目”。《环境科学》已发表文章范文可在网站 www.hjcx.ac.cn 首页点击下载。
- 2) 稿件参考文献后须注明通讯联系人和第一作者详细邮政地址,邮编,电话,手机,电子信箱等。
- 3) 只接受中文投稿文章;综述类文章,导师应为第一作者,不接受第一作者为学生的综述类投稿。
- 4) 特别说明:本专辑不是增刊,而是在《环境科学》2013 年下半年正刊上刊出。

重要日期

论文投稿截止日期:2013 年 7 月 1 日

联系方式

联系人:李老师

地址:北京市海淀区双清路 18 号生态中心《环境科学》编辑部

邮编:100085

电话:010-62941102

传真:010-62849343

E-mail:hjcx@rcees.ac.cn

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuang-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人