

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM<sub>2.5</sub> 持续暴露的健康风险及其损害价值评估 ..... 谢元博, 陈娟, 李巍 ( 1 )

长白山 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子季节变化特征研究 ..... 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 ( 9 )

青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响 ..... 柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 ( 15 )

重庆市大气二噁英污染水平及季节变化 ..... 张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 ( 22 )

西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放 ..... 卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 ( 30 )

西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放 ..... 张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 ( 35 )

杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征 ..... 蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 ( 41 )

模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究 ..... 符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 ( 46 )

川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化 ..... 童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 ( 53 )

重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化 ..... 余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 ( 60 )

汉江上游金水河流域氮湿沉降 ..... 王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 ( 66 )

麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成 ..... 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 ( 73 )

兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究 ..... 吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 ( 79 )

中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究 ..... 马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 ( 85 )

水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO<sub>2</sub> 释放的影响 ..... 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 ( 93 )

黄海和东海海域溶解钼地球化学分布特征 ..... 吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 ( 100 )

浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价 ..... 马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 ( 108 )

POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测 ..... 张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 ( 117 )

降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义 ..... 陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师阳 ( 123 )

锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素 ..... 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede ( 131 )

子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征 ..... 赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 ( 143 )

水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响 ..... 宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 ( 150 )

黄东海表层沉积物中磷的分布特征 ..... 宋国栋, 刘素美, 张国玲 ( 157 )

河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究 ..... 张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 ( 163 )

沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制 ..... 武晓飞, 李大鹏, 汪明 ( 171 )

三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析 ..... 敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 ( 179 )

太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 ..... 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 ( 186 )

滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究 ..... 王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 ( 194 )

浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术 ..... 王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 ( 202 )

光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究 ..... 王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 ( 208 )

同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究 ..... 刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 ( 214 )

垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究 ..... 孙洪伟, 郭英, 彭永臻 ( 221 )

油田区土壤石油烃组分残留特性研究 ..... 胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 ( 227 )

水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态 ..... 谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 ( 233 )

土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响 ..... 廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 ( 240 )

水稻土团聚体 Cu<sup>2+</sup> 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化 ..... 许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 ( 248 )

Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响 ..... 刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 ( 254 )

淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌侵染 2 种湿地植物的影响 ..... 马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 ( 263 )

太湖水质与水生生物健康的关联性初探 ..... 周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 ( 271 )

3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较 ..... 姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 ( 279 )

某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究 ..... 杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 ( 286 )

异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响 ..... 胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 ( 292 )

Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价 ..... 王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 ( 299 )

基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究 ..... 郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 ( 304 )

微囊藻毒素降解菌 *Paucibacter* sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性 ..... 游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 ( 313 )

硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究 ..... 杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 ( 319 )

降解纤维素产甲烷的四菌复合系 ..... 吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 ( 327 )

中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素 ..... 谢薇, 陈书涛, 胡正华 ( 334 )

内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究 ..... 史晶晶, 耿元波 ( 341 )

南京河流夏季水-气界面 N<sub>2</sub>O 排放通量 ..... 韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 ( 348 )

杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响 ..... 肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 ( 356 )

生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究 ..... 彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 ( 365 )

不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究 ..... 卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 ( 371 )

硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用 ..... 严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 ( 380 )

县域尺度的京津冀都市圈 CO<sub>2</sub> 排放时空演变特征 ..... 汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 ( 385 )

保水剂性能及其农用安全性评价研究进展 ..... 李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 ( 394 )

《环境科学》征订启事 (65) 《环境科学》征稿简则 (220) 信息 (226, 270, 298, 364)

# 硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用

严密<sup>1,2</sup>, 祁志福<sup>2</sup>, 李晓东<sup>2\*</sup>, 胡艳军<sup>1</sup>, 陈彤<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学机械工程学院, 能源与动力工程研究所, 杭州 310014; 2. 浙江大学能源工程学系, 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 氯苯类 (CBz) 是废弃物焚烧等过程中产生二噁英的前驱物, 也被认为是实现二噁英在线检测的良好指示物, 同时五氯苯 (PeCBz) 和六氯苯 (HxCBz) 也是持久性有机污染物 (POPs)。但氯苯在废物焚烧过程中的排放和控制尚没有受到足够重视, 为此开展了模拟焚烧过程中硫酸铵和尿素对 3 种氯苯合成途径的抑制作用研究, 包括飞灰合成, 1,2-二氯代苯 (1,2-DiCBz) 转化高氯代苯等过程。结果表明, 硫酸铵和尿素对氯苯的 3 种合成途径均有抑制作用, 如 1% 尿素与废物混合焚烧对四氯苯、五氯苯和六氯苯的抑制效率分别达到了 66.8%、57.4% 和 50.4%。比较硫酸铵和尿素对 3 种过程的抑制作用, 认为尿素对氯苯具有更稳定的抑制能力。

**关键词:** 硫酸铵; 尿素; 氯苯类; 抑制; 废物焚烧

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0380-05

## Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea

YAN Mi<sup>1,2</sup>, QI Zhi-fu<sup>2</sup>, LI Xiao-dong<sup>2</sup>, HU Yan-jun<sup>1</sup>, CHEN Tong<sup>2</sup>

(1. Institute of Energy and Engineering, College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Chlorobenzene (CBz) is the precursor of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins/polychlorinated dibenzofurans (PCDD/Fs) generated in the processes of waste incineration, and it is regarded as a good indicator of PCDD/Fs for realizing PCDD/Fs online monitoring, moreover, pentachlorobenzene (PeCBz) and Hexachlorobenzene (HxCBz) belong to Persistent Organic Pollutants (POPs). However, the emission control of CBz in waste incineration does not attract enough attention, so this study focused on the inhibition of the 3 CBz formation routes in waste combustion by ammonium sulfate and urea, including CB formation from fly ash, CB formation from 1,2-dichlorobenzene (1,2-DiCBz) and the combustion of model medical waste. The results showed that both ammonium sulfate and urea reduced CBz yield during these three thermal processes. For instance, the inhibition rates of tetrachlorobenzene (TeCBz), PeCBz and HxCBz were 66.8%, 57.4% and 50.4%, respectively, when 1% urea was co-combusted with medical waste. By comparing the effect of ammonium sulfate and urea on CBz formation by three routes, urea was considered as a comparatively stable inhibitor for CBz.

**Key words:** ammonium sulfate; urea; chlorobenzene; inhibition; waste incineration

《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》(POPs 公约)要求各缔约国对包括二噁英(PCDD/Fs)、六氯苯(HxCBz)在内的 12 种 POPs 停止使用和排放控制; 并且 2009 年又增加了包括六溴联苯和五氯苯(PeCBz)在内的 9 种 POPs。废物焚烧被认为是 PCDD/Fs 的重要排放源<sup>[1]</sup>。根据《中国履行〈关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约〉国家实施计划》(2007 年)的统计数据,废物焚烧 PCDD/Fs 排放量占当年二噁英总排放量的 12.1%<sup>[2]</sup>。二噁英的排放和控制受到了高度重视,我国相继出台了具体的排放标准和运行规范。含硫及含氮化合物(硫、尿素及硫酸铵等)是控制废

弃物焚烧过程 PCDD/Fs 生成的有效抑制剂,抑制控制技术具有低成本、高效益的优势,被推荐作为一级控制措施<sup>[3,4]</sup>。

氯苯类作为二噁英的前驱物和实现二噁英在线检测的关键指示物被广泛认可<sup>[5~8]</sup>。但废物焚烧过程五氯苯和六氯苯排放和控制还没有受到重视,相

收稿日期:2013-04-16; 修订日期:2013-05-13

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB201500); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA062803)

作者简介:严密(1985~),男,博士,讲师,主要研究方向为固废焚烧过程有机污染物控制和环境影响评估, E-mail: yanmi1985@zju.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: lixd@zju.edu.cn

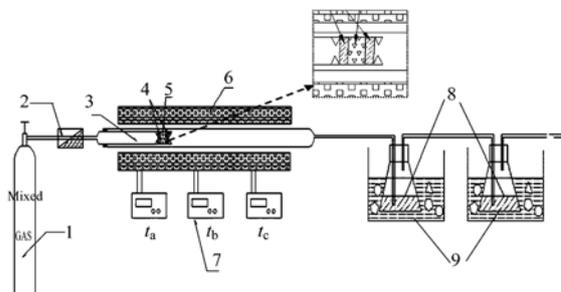
关的研究也不多. 根据统计当前全球 PeCBz 排放量约为  $121 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 并且最大的排放源之一就是废物焚烧, 平均年排放量达到了  $32 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ [9]. 所以五氯苯和六氯苯作为持久性有机污染物, 其排放和控制应该受到足够地重视, 这不仅有利于保护环境, 保障居民健康, 而且对二噁英的抑制机制、氯代苯和二噁英的关联机制的认识都有促进作用.

二噁英在废物焚烧炉多个过程都会生成, 并且以飞灰为主要形式排放, 进入环境[10]. 二噁英的生成途径主要包括前驱物合成和从头合成[11], 为此本研究开展了硫酸铵和尿素对飞灰合成氯苯类和二氯苯转化高氯苯过程的抑制作用实验; 同时抑制剂和废物直接混合后焚烧技术是抑制剂添加和使用最方便的方法[12], 所以本研究也开展了硫酸铵和尿素与模拟医疗废物混焚的氯苯类控制实验.

## 1 材料与方法

硫酸铵和尿素对飞灰合成氯苯类的抑制实验在水平三段炉上进行, 反应系统如图 1, 实验工况见表 1. 将管式炉的三段温度分别定义为  $t_a$ 、 $t_b$  和  $t_c$ , 可进行独立控温, 在此实验中均为  $350^\circ\text{C}$ ; 飞灰利用两层石英棉固定在内管顶端, 反应气体可穿过飞灰内部, 使充分接触; 飞灰从某医疗废物焚烧炉布袋出

口采集, 并利用甲苯 24 h 索氏提取基本除去飞灰中原有氯代苯和二噁英等大分子有机物, 并在通风橱内风干, 记为索提飞灰 (SEA), SEA 基本性质见表 2. 尾气用两个冰浴吸收瓶吸收, 内各装有 100 ~ 150 mL 的丙酮和正己烷的混合液 (体积比为 1:1).



1. 混合气体; 2. 流量计; 3. 内管; 4. 石英棉层;

5. 飞灰; 6. 三段炉; 7. 温度控制器; 8. 混合吸收液; 9. 冰浴

图 1 飞灰生成氯苯类实验台示意

Fig. 1 Experimental system of CBz formation from fly ash

表 1 尿素和硫酸铵对飞灰合成氯苯的影响实验工况

Table 1 Experimental condition of the effect of urea and ammonium sulfate on CBz formation from fly ash

| 编号   | 飞灰/g | 添加剂    | 反应气氛 <sup>1</sup>  |
|------|------|--------|--|
| CS-1 | 2    | 无      | 10% O <sub>2</sub> , $1\,000 \times 10^{-6}$ Cl <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> 其它 |
| CS-2 | 2    | 5% 尿素  | 10% O <sub>2</sub> , $1\,000 \times 10^{-6}$ Cl <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> 其它 |
| CS-3 | 2    | 5% 硫酸铵 | 10% O <sub>2</sub> , $1\,000 \times 10^{-6}$ Cl <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> 其它 |

1) 体积分数

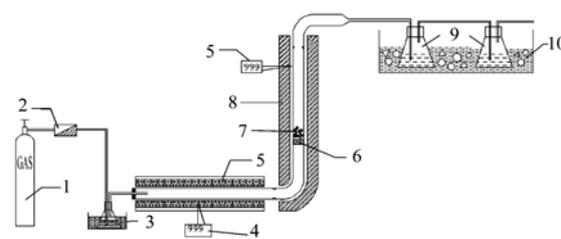
表 2 飞灰中关键金属含量和元素分析/%

Table 2 Content of main metal element in fly ash and its ultimate analysis/%

| 元素 | Na   | Mg   | K    | Ca   | Mn   | Fe   | Cu   | Zn   | Pb   | C     | H    | N    | S    | Cl   |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| 含量 | 2.89 | 0.09 | 0.38 | 0.77 | 0.02 | 0.17 | 0.18 | 1.03 | 0.02 | 11.52 | 1.75 | 0.13 | 1.05 | 15.8 |

1,2-二氯代苯 (1,2-DiCBz) 生成高氯代苯的抑制实验在如图 2 的实验台上进行. 控制水浴温度和气体流量来实现对 1,2-DiCBz 流量控制. 1,2-DiCBz 在  $25^\circ\text{C}$  时饱和蒸气压是 197 Pa, 空气流量为  $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 计算得到 30 min 的总进样量为 0.192 g; DiCBz 经过预热段后进入立式反应段, 和固定床上的催化剂/抑制剂反应生成高氯代苯. 包括二噁英和氯苯类在内的氯代有机污染物, 催化剂是其生成的关键影响因素. 研究显示氯化铜是二噁英生成最活泼催化剂, 因此本实验的催化剂由  $0.1 \text{ g CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (2.78%) +  $0.5 \text{ g NaCl}$  (13.89%) +  $3 \text{ g SiO}_2$  (83.33%) 组成, 提供金属催化剂和无机氯. 实验工况见表 3, 抑制剂使用量均为 0.1 g.

抑制剂和模拟医疗废物 (表 4, 5) 混烧实验也在三段水平炉上进行, 但不使用石英棉, 直接将混合物



1. 混合反应气体; 2. 质量流量计; 3. 曝气池 (1,2-DiCBz);

4. 温控仪; 5. 水平预热段; 6. 固定床; 7. 抑制剂; 8. 立式炉;

9. 混合吸收液; 10. 冰浴

图 2 低氯代苯合成高氯代苯实验台示意

Fig. 2 Experimental system of the formation of highly chlorinated CBz from low chlorinated CBz

置于石英舟内并将石英舟处于  $t_a$  段. 温度分别为  $t_a = 800^\circ\text{C}$ ,  $t_b = 800^\circ\text{C}$ ,  $t_c = 500^\circ\text{C}$ , 反应时间为 30 min. 每个工况医疗废物使用量为 2 g, 各抑制剂的添加量均为 1% (质量分数), 过量空气系数设为 1.4 (600

表 3 尿素和硫酸铵抑制 1,2-DiCBz 催化合成高氯代苯的实验工况

Table 3 Experimental condition of the effect of ammonium sulfate and urea on CBz formation from 1,2-DiCBz

| 编号   | 1,2-DiCBz/g | 催化剂 <sup>1)</sup> /g | 添加剂       | 曝气池温度/℃ | 水平段温度/℃ | 立式段温度/℃ | 空气流量/L·min <sup>-1</sup> |
|------|-------------|----------------------|-----------|---------|---------|---------|--------------------------|
| CR-1 | 0.192       | 3.6                  | 无         | 25      | 105     | 350     | 0.5                      |
| CR-2 | 0.192       | 3.6                  | 0.1 g 硫酸铵 | 25      | 105     | 350     | 0.5                      |
| CR-3 | 0.192       | 3.6                  | 0.1 g 尿素  | 25      | 105     | 350     | 0.5                      |

1) 催化剂由 0.1 g CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O + 0.5 g NaCl + 3 g SiO<sub>2</sub> 组成

表 4 模拟医疗垃圾的组成/%

Table 4 Composition of model medical waste/%

| 种类 | 医用手套 | 输液器 | 纱布口罩 | 注射器 | 竹签 | 一次性口罩 | 脱脂棉 | CuO | NaCl | 石英砂 |
|----|------|-----|------|-----|----|-------|-----|-----|------|-----|
| 比例 | 19   | 15  | 15   | 10  | 9  | 7     | 7   | 1.5 | 1.5  | 15  |

表 5 模拟医疗垃圾工业分析和元素分析/%

Table 5 Proximate analysis and ultimate analysis of model medical waste/%

| 参数 | M <sub>ad</sub> | A <sub>ad</sub> | V <sub>ad</sub> | FC <sub>ad</sub> | C <sub>ad</sub> | H <sub>ad</sub> | O <sub>ad</sub> | N <sub>ad</sub> | S <sub>ad</sub> |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 比例 | 2.29            | 20.99           | 70.72           | 6.0              | 47.89           | 5.91            | 16.64           | 0.15            | 0.21            |

mL·min<sup>-1</sup>).

根据以前实验分析得到,当反应温度 > 300℃ 时,氯苯类主要以气相存在 (>90%)<sup>[13]</sup>,所以本研究只检测了气相氯代苯(吸收液).氯苯类样品的预处理方法根据《水质氯苯的测定——气相色谱法》(HJ/T 74—2001)和《水质六六六、滴滴涕的测定——气相色谱法》(GB 7492-1987)标准为基础建立,主要包括酸洗、过无水硫酸钠去水、旋蒸浓缩、过酸碱硅胶柱、氮吹定容等,具体可见文献 [13, 14]. 利用气相色谱法检测 (GC-ECD, Agilent 6890N),升温程序是:80℃ 保持 4 min,再以 5℃·min<sup>-1</sup>的升温速度升至 106℃ 后,以 8℃·min<sup>-1</sup> 升至 250℃,保温 4 min.

## 2 结果与分析

### 2.1 抑制剂对飞灰合成氯苯类的抑制

硫酸铵和尿素对索提飞灰(SEA)合成氯苯类的抑制作用实验结果如图 3 所示.从图 3(a)可以清楚得到,各氯代苯的生成量均出现了明显的降低,如四氯代苯(TeCBz)在硫酸铵和尿素加入后从 1103.2 ng·g<sup>-1</sup> 分别减少到 397.3 ng·g<sup>-1</sup> 和 362.16 ng·g<sup>-1</sup>,六氯代苯(HxCBz)则从 437.08 ng·g<sup>-1</sup> 降低到 152.24 ng·g<sup>-1</sup> 和 313.51 ng·g<sup>-1</sup>.氯苯类总量也从 2353.64 ng·g<sup>-1</sup> 降低到 813.63 ng·g<sup>-1</sup> 和 1019.16 ng·g<sup>-1</sup>,即硫酸铵和尿素对飞灰合成氯苯类总量的抑制率分别是 65.4% 和 56.7%.由图 3(b)分析硫酸铵和尿素对氯苯类各同系物的作用,发现硫酸铵对 SEA 合成氯代苯的各同系物抑制作用比较相近,抑制率在 64% ~ 68% 范围内,而尿素对各氯代苯的抑制率随着氯代数增加而降低,分别是 67.2%、57.8% 和 28.3%.Ruokojärvi 等<sup>[15]</sup>研究了尿素对飞灰合成

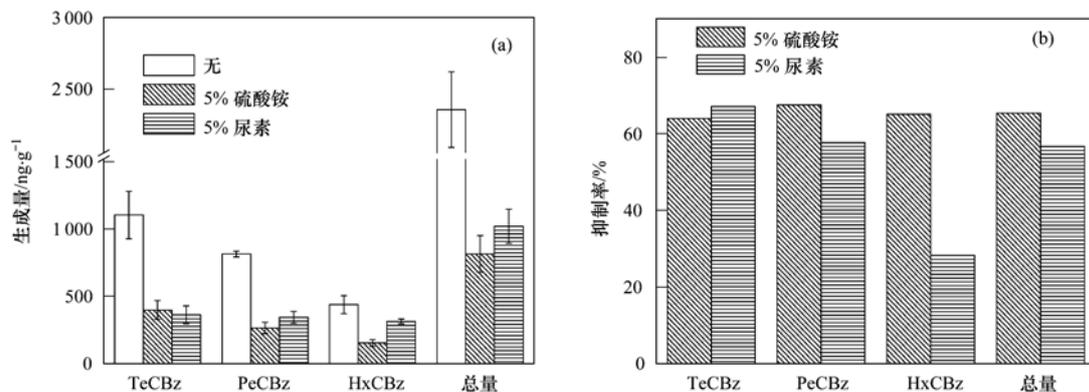


图 3 硫酸铵和尿素对索提飞灰(SEA)生成氯苯类的抑制作用

Fig. 3 Inhibition of CBz formation from Soxhlet extraction fly ash by ammonium sulfate and urea

PCDD/Fs 的抑制能力,实验结果显示 1% 的尿素可以使 PCDD/Fs 的生成量降低了 61.4%,并且对各同系物的抑制效率呈现出随着氯代系数的增加抑制率增加,这和尿素对氯苯类的作用存在差异。

## 2.2 对低氯代苯合成高氯代苯的抑制

硫酸铵和尿素对 DiCBz 转化为高氯代苯的抑制实验结果如图 4。从图 4(a),抑制剂对 1,2-DiCBz 转化为高氯代苯的抑制作用效果显著。各氯代苯均出现大幅下降,如硫酸铵加入系统后,TeCBz,五氯代苯(PeCBz)和 HxCBz 分别从 45.8、39.37 和 16.27 ng 降低到 6.92、8.14 和 16.27 ng,降低率分别到了 84.9%、79.33% 和 80.9%。在硫酸铵和尿素加入后,

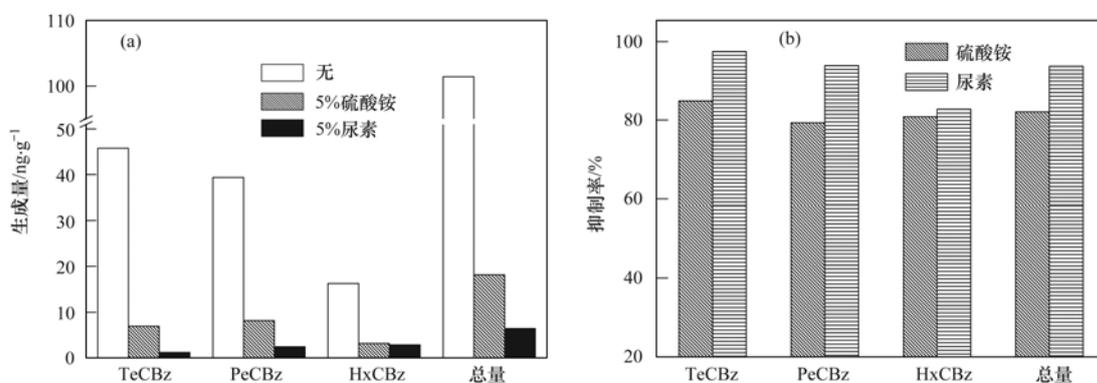


图 4 添加剂对 1,2-DiCBz 合成高氯代苯的抑制作用

Fig. 4 Inhibition of additive on the formation of highly chlorinated CBz from 1,2-DiCBz

## 2.3 对模拟废物焚烧合成氯苯类的抑制

废物焚烧二噁英控制抑制剂的使用方法主要包括和废物混合后联合焚烧、直接以粉末喷入尾部烟道或者溶解于急冷水这 3 种。抑制剂和废物混烧具有操作简便、不需要对现有焚烧炉系统改造的优势。硫酸、尿素和模拟医疗废物混烧实验结果如图 5 所示。从中可知,模拟医疗废物焚烧烟气中 HxCBz 浓度最高,这和实际烟气特点基本相符<sup>[17]</sup>,而飞灰

CBz 的生成总量从 101.44 ng 分别降低到 18.17 ng 和 6.36 ng,降低率分别达到了 82.1% 和 93.7%,即尿素具有略好的抑制能力。同时分析硫酸铵和尿素对各氯代苯的抑制效率,同样得到硫酸铵对各氯代苯的抑制效率相仿,抑制率在 80%~84% 之间;而尿素对各氯代苯的抑制率变化较大,和对飞灰合成氯苯类的抑制特性相似,随着氯代苯氯代系数的提高,尿素的抑制率降低,在 82.8%~97.5% 范围。Liu 等<sup>[16]</sup>利用 CaO 进行了二噁英前驱物合成抑制研究,表明 CaO 对氯酚合成 PCDD/Fs 具有显著的效果,抑制率可达 90%。虽然前驱物合成 PCDD/Fs 影响因素研究报道众多,但对前驱物合成的抑制研究非常少。

合成氯苯类实验中一般以低氯代的 TeCBz 生成量更大。从图 5(a)可见,硫酸铵和尿素对氯苯类的排放均有抑制作用,但抑制效率不同。硫酸铵和尿素加入模拟废物后,CBz 的生成总量从 35.6  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  分别降低到了 30.75  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  和 15.73  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,抑制效率分别为 13.6% 和 55.8%,在此尿素表现出了更好的抑制效率。Pandelova 等<sup>[18]</sup>研究硫酸铵和废物混烧对 PCDD/Fs 的影响,发现 3% 的硫酸铵和废物混

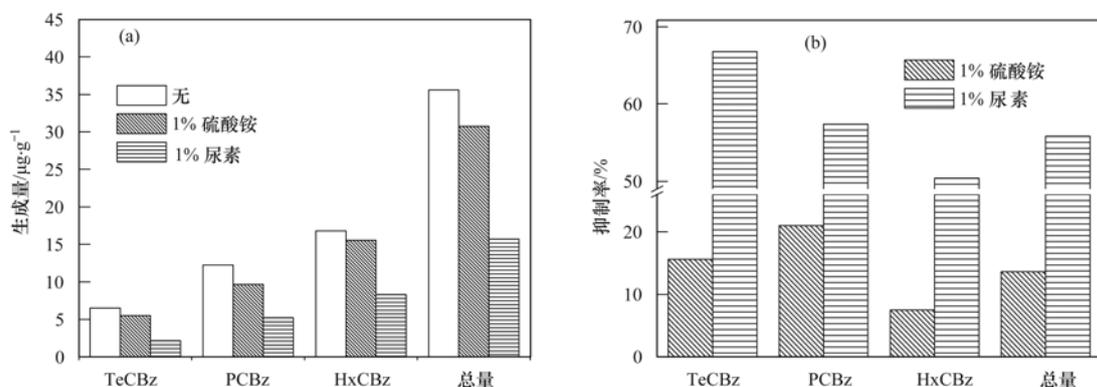


图 5 添加剂对模拟医废焚烧产生氯苯类的抑制作用

Fig. 5 Inhibition of additive on CBz formation during medial waste incineration

烧可以降低 90% 的 PCDD/Fs 生成量. Ruokojärvi 等<sup>[19,20]</sup>实验发现 1% 的尿素和 RDF 混烧对 PCDD/Fs 的抑制率达到了 90%, 根据对多种抑制的研究认为尿素是比较合适的废物焚烧预混使用的 PCDD/Fs 抑制剂. 同时尿素对各氯代苯的抑制率, 发现规律和上面两种生成过程一致, 即尿素对高氯代苯的抑制能力更低.

### 3 结论

(1) 5% 硫酸铵和尿素对飞灰合成氯苯类的总量抑制率分别是 65.4% 和 56.7%.

(2) 硫酸铵和尿素对 1,2-DiCBz 转化为高氯代苯的总量抑制率分别是 82.1% 和 93.7%.

(3) 1% 硫酸铵和尿素对模拟医疗废物焚烧合成氯苯类的总量抑制率分别是 13.6% 和 55.8%.

(4) 比较 3 种途径硫酸铵和尿素的抑制能力, 认为尿素具有更稳定的抑制效果, 并且发现尿素对各氯代苯的抑制能力呈现出随着氯取代数的增加而降低.

#### 参考文献:

- [ 1 ] United Nations Environment Programme (UNEP). DIOXIN and FURAN INVENTORIES: National and Regional Emissions of PCDD/PCDF [EB/OL]. [http://www.chem.unep.ch/pops/pcdd\\_activities/inventories/difurpt.pdf](http://www.chem.unep.ch/pops/pcdd_activities/inventories/difurpt.pdf), 1999.
- [ 2 ] 郑明辉, 孙阳昭, 刘文彬. 中国二噁英类持久性有机污染物排放清单研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [ 3 ] Ruokojärvi P, Asikainen A, Ruuskanen J, *et al.* Urea as a PCDD/F inhibitor in municipal waste incineration [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2001, **51**(3): 422-431.
- [ 4 ] Addink R, Paulus R H W L, Olie K. Prevention of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins/dibenzofurans formation on municipal waste incinerator fly ash using nitrogen and sulfur compounds [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(7): 2350-2354.
- [ 5 ] McKay G. Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2002, **86**(3): 343-368.
- [ 6 ] Lavric E D, Konnov A A, Ruyck J D. Surrogate compounds for dioxins in incineration. A review [J]. *Waste Management*, 2005, **25**(7): 755-765.
- [ 7 ] 杜永光, 张海军, 陈吉平, 等. 氧化铜催化五氯苯生成二噁英的研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2774-2779.
- [ 8 ] 高洪才, 倪余文, 张海军, 等. 不同垃圾焚烧设备中二噁英的排放特征和 I-TEQ 指示物的研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1545-1550.
- [ 9 ] Bailey R E, Van Wijk D, Thomas P C. Sources and prevalence of pentachlorobenzene in the environment [J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(5): 555-564.
- [ 10 ] 张海军, 倪余文, 张雪萍, 等. 城市生活垃圾焚烧系统中二噁英的生成与质量平衡 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1133-1127.
- [ 11 ] Stanmore B R. The formation of dioxins in combustion systems [J]. *Combustion and Flame*, 2004, **136**(3): 398-427.
- [ 12 ] Pandelova M E, Lenoir D, Kettrup A, *et al.* Primary measures for reduction of PCDD/F in co-combustion of lignite coal and waste: Effect of various inhibitors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(9): 3345-3350.
- [ 13 ] Yan M, Li X D, Chen T, *et al.* Effect of temperature and oxygen on the formation of chlorobenzene as the indicator of PCDD/Fs [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(10): 1637-1642.
- [ 14 ] 胡泉. 土壤中氯苯类迁移行为的模拟研究 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 1999.
- [ 15 ] Ruokojärvi P, Aatamila M, Tuppurainen K, *et al.* Effect of urea on fly ash PCDD/F concentrations in different particle sizes [J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(4-7): 757-762.
- [ 16 ] Liu W B, Zheng M H, Zhang B, *et al.* Inhibition of PCDD/Fs formation from dioxin precursors by calcium oxide [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(6): 785-790.
- [ 17 ] 严密, 李晓东, 陈彤, 等. 垃圾焚烧炉烟气中二噁英指示物研究 [J]. *燃烧科学与技术*, 2010, **16**(3): 257-261.
- [ 18 ] Pandelova M, Lenoir D, Schramm K W. Inhibition of PCDD/F and PCB formation in co-combustion [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **149**(3): 615-618.
- [ 19 ] Ruokojärvi P, Tuppurainen K, Mueller C, *et al.* PCDD/F reduction in incinerator flue gas by adding urea to RDF feedstock [J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(2): 199-205.
- [ 20 ] Ruokojärvi P H, Asikainen A H, Tuppurainen K A, *et al.* Chemical inhibition of PCDD/F formation in incineration processes [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **325**(1-3): 83-94.

## CONTENTS

|  |  |
|--|--|
| An Assessment of PM <sub>2.5</sub> Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days ..... | XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei ( 1 )                               |
| Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> at Changbai Mountain .....   | ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> ( 9 )        |
| Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility .....  | KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> ( 15 )          |
| Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation .....   | ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> ( 22 )          |
| Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China .....   | LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> ( 30 )         |
| Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China .....   | ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> ( 35 )           |
| Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou .....  | JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> ( 41 )       |
| Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources .....                                     | FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> ( 46 )          |
| Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China .....   | TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> ( 53 )  |
| Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010 .....  | YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> ( 60 )     |
| Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River .....  | WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> ( 66 )        |
| Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke .....   | LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> ( 73 )                 |
| Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou .....   | WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> ( 79 )            |
| Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone .....  | MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> ( 85 )      |
| Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO <sub>2</sub> Release in Arable Soil .....   | KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> ( 93 )               |
| Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea .....   | WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> ( 100 )          |
| Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China .....               | MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> ( 108 )           |
| Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler .....   | ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> ( 117 )    |
| Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater .....                                      | CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> ( 123 ) |
| Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls .....  | TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> ( 131 )        |
| Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin .....   | ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> ( 143 )     |
| Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics .....                                | SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jun-shui, <i>et al.</i> ( 150 )          |
| Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea .....  | SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling ( 157 )                  |
| Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution <sup>31</sup> P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments .....               | ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> ( 163 )  |
| Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance .....  | WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming ( 171 )                         |
| Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges .....                           | AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> ( 179 )              |
| Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu .....       | MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> ( 186 )    |
| Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake .....   | WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> ( 194 )             |
| Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra .....                                 | WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> ( 202 )   |
| Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process .....   | WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> ( 208 )    |
| Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge .....                                     | LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> ( 214 )         |
| Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate .....  | SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen ( 221 )                     |
| Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields .....  | HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> ( 227 )             |
| Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment .....                             | TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> ( 233 )         |
| Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China .....   | LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> ( 240 )           |
| Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil .....  | XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> ( 248 )          |
| Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution .....  | LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> ( 254 )  |
| Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants .....   | MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang ( 263 )                |
| Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake .....                                       | ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> ( 271 )  |
| Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria .....   | JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> ( 279 ) |
| Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria .....  | DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> ( 286 )              |
| Influence of the Coexistence of Zn <sup>2+</sup> on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i> .....                              | HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> ( 292 )   |
| Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results .....  | WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> ( 299 )              |
| Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model .....   | HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> ( 304 )               |
| Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH .....   | YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> ( 313 )     |
| Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate .....  | YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> ( 319 )        |
| Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains .....   | WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> ( 327 )       |
| Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China .....  | XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua ( 334 )                        |
| Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China .....                 | SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo ( 341 )                                |
| Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer .....   | HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> ( 348 )        |
| Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water .....   | XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> ( 356 )       |
| Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant .....   | PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> ( 365 )   |
| Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N <sub>2</sub> O Catalytic Decomposition .....   | LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping ( 371 )                  |
| Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea .....  | YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> ( 380 )             |
| County Scale Characteristics of CO <sub>2</sub> Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region .....                       | WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> ( 385 )             |
| Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application .....  | LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> ( 394 )         |

# 《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)

2014年1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 15, 2014

|         |  |                  |    |   |
|---------|--|------------------|----|---|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院  | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE)<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717  | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com   | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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