

# 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



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<sub>2.5</sub> 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 ..... 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 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<sub>2</sub>/膨润土复合材料对 Hg<sup>2+</sup> 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<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>O 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估 ..... 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 ..... 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (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(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)

# 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

(环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

**摘要:** 采用高分辨气相色谱法/高分辨质谱法(HRGC/HRMS)对广东某地生活垃圾焚烧厂烟道气及周边环境空气和可能来源的环境空气中 17 种二噁英进行了分析. 讨论了所有样品中同系物、主要毒性贡献体的特性. 并运用主成分和聚类分析法, 探究了焚烧厂周边监测点位与焚烧厂排放烟气及可能来源的关系. 结果表明周边空气中二噁英浓度低于焚烧厂烟道气, 且不受主导风向的影响. 在调查基础上, 推断轮胎厂及露天焚烧为可能污染源. 轮胎厂二噁英浓度均低于上风向监测点, 露天焚烧空气中二噁英高于厂界外监测点. 对各同类物百分比分析可知, 烟道气和所有空气中主要同类物为 OCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDD 及 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF, 但空气中同类物还包括 OCDF; 焚烧厂周边监测点与轮胎厂空气中二噁英单体百分浓度相似, 烟气与露天焚烧中二噁英单体分布相似. 进一步研究表明所有空气样品中单体 1,2,3,7,8-PeCDD 和 2,3,4,6,7,8-HxCDF 与总毒性当量浓度的线性相关系数分别为 0.95 和 0.75, 相关性较强. 主成分分析及聚类分析表明垃圾焚烧厂对周边空气产生影响, 轮胎厂对上风向产生影响, 露天焚烧对厂界影响较小.

**关键词:** 二噁英; 生活垃圾焚烧厂; 烟道气; 轮胎厂; 露天焚烧; 环境空气

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0502-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201606178

## Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong

FU Jian-ping, HAN Jing-lei\*, YU Xiao-wei, YANG Yan-yan, YIN Wen-hua, FENG Gui-xian, ZHANG Su-kun, HUANG Jin-qiong, REN Ming-zhong

(South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

**Abstract:** This paper analyzed 17 polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) by HRGC/HRMS in the flue gas of a certain municipal solid waste incinerator (MSWI) and its surrounding air and other possible sources in Guangdong. It discussed the feature of homologs and main toxic monomers in all samples. It also investigated the relationship among surrounding area, MSWI and possible sources using principle component analysis (PCA) and cluster analysis. The results showed that the concentration of PCDD/Fs was higher in the flue gas than the ambient air, moreover non-effect suffered by prevailing wind direction. The possible sources might be tyre factory and open burning based on spot survey. The concentration of PCDD/Fs was lower in tyre factory than upwind station, but higher at open burning spot than outdrop monitoring station. The analysis of homologs showed that OCDD, 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD and 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF were the main materials in the flue gas and air, meanwhile OCDF was also found in atmosphere. There was similar feature of 17 PCDD/Fs between surrounding monitoring station and tyre factory, and the same between flue gas and open burning. The further analysis showed that the linearly dependent coefficients of 1,2,3,7,8-PeCDD and 2,3,4,6,7,8-HxCDF were 0.95 and 0.75, respectively. It showed the strong correlation of two monomers in all ambient air samples. The PCA and cluster analysis showed that MSWI influenced the surrounding air, tyre factory had an impact on upwind station, and open burning had a lower effect on outdrop monitoring station.

**Key words:** polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs); municipal solid waste incineration plant; flue gas; tyre factory; open burning; ambient air

二噁英 (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans, PCDD/Fs) 是一类具有长距离迁移性、生物毒性的持久性有机污染物. 自二噁英在城市生活垃圾焚烧烟气及飞灰中被发现后, 已受到广泛关注. 环境中二噁英主要是人类在生产或生活中无意识产生的. 目前已确定的二噁英排放源主要集中于废物焚烧、高温热源、水泥生产、冶金、炼焦过程及其他化学工业源等<sup>[1-4]</sup>. 含氯废物焚烧、庭院垃圾及露天焚烧也能释放二噁英<sup>[5-7]</sup>. 另一种可能来源——废旧轮胎做燃料利用或再生加工排放的二噁英也备受关注. Conesa 等<sup>[8]</sup>研究表明在水泥炉

窑中使用轮胎作燃料时, PCDD/Fs 的含量随轮胎投加量增加而有所增加. Aylón 等<sup>[9]</sup>研究了废旧轮胎热解过程释有少量 PCDD/Fs 释放出来, 但其毒性当量浓度相对较低.

虽然二噁英的产生源广泛, 但不同来源对二噁

收稿日期: 2016-06-26; 修订日期: 2016-09-07

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (PM-zx703-201607-225); 环境保护公益性行业科研专项 (2011467001)

作者简介: 付建平 (1983~), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向: 环境中痕量持久性有机污染物监测与分析, E-mail: fujianping@scies.org

\* 通信作者, E-mail: hanjinglei@scies.org

英的贡献有所不同. 有研究报道指出, 2006 年江苏省城市固体废物焚烧排放的二噁英约占总排放量的 13.41%, 仅次于再生有色金属和炼钢排放<sup>[10]</sup>. Zhang 等<sup>[11]</sup> 研究指出, 所研究的 6 个不同露天焚烧源向空气中释放的二噁英达  $3.0 \sim 650 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 如此大量的二噁英释放到环境, 可能对生态系统造成一定的影响. 同时, 大气环境作为二噁英迁移转化的场所, 各种排放源释放的二噁英不仅造成周边区域空气质量下降, 还可能对其他区域产生影响. 黄文等<sup>[12]</sup> 研究表明, 距离某医疗废物焚烧厂 1.2 km 处环境空气中的二噁英毒性当量浓度 (以 TEQ 计, 下同) 为  $1.48 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$ . 余莉萍等<sup>[13]</sup> 研究也表明, 距离某电子垃圾焚烧点 9 km 处环境空气中二噁英毒性当量浓度为  $1.31 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$ . 上述研究表明, 排放源可能对一定距离空气中二噁英产生影响.

基于以上现状, 本研究选取广东某地为研究区域, 在生活垃圾焚烧厂周边环境空气采样期间, 对生活垃圾焚烧厂排放废气、轮胎加工厂环境空气及露天焚烧环境空气中二噁英也展开监测, 了解该区域可能的二噁英排放源对周边环境空气的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

研究区域为城乡结合部, 现场调研发现区域内分布着以市政生活垃圾为主的焚烧厂、废旧轮胎加工厂, 生活垃圾露天焚烧也是该区域典型的污染源. 固定源监测点位于垃圾经炉膛焚烧后出口 (前口) 和布袋除尘后的烟气排放口 (后口); 周边环境空气采样点布设在焚烧厂区 (厂区)、距离焚烧厂厂界 200 m 处 (厂界外)、焚烧厂下风向 1.2 km 处 (下风向)、上风向 0.8 km 处 (上风向)、轮胎厂轮胎露天堆放、轮胎翻新厂宿舍 2 楼、轮胎翻新车间和无固定排放的露天焚烧处. 采样点位置布置见图 1.

### 1.2 样品采集

#### 1.2.1 空气样品采集

采样方法参考 HJ 77.2-2008, 采样前在聚氨酯泡沫上添加  $^{13}\text{C}$  标记的采样内标后收集气相, 石英纤维滤膜收集颗粒相, 两相态合并为一个样品. 每个样品采集 24 h, 连续采样 3 d; 露天焚烧采样以焚烧残渣不再冒烟结束, 整个采样期间只监测到 1 处露天焚烧.

#### 1.2.2 烟气样品采集

烟气采样方法参照 HJ 77.2-2008, 采样前在树脂筒内加入  $^{13}\text{C}$  标记的采样内标, 每个样品采集 2 h,



图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

连续采集 3 个样品.

### 1.3 样品处理与仪器分析

#### 1.3.1 实验材料

甲苯、正己烷为高效液相色谱级溶剂 (美国 Heneywei 公司); 二氯甲烷为高效液相色谱级溶剂 (德国 Merck 公司); 弗罗里硅土 (美国 Fluka 公司); 硅胶 (德国 Merck 公司); 碱性氧化铝 (美国 Sigma 公司); 无水硫酸钠、浓硫酸 (广州化学试剂公司); 采样内标、提取内标及进样内标 (美国 Wellingtog 公司).

#### 1.3.2 样品前处理

空气样品用甲苯对石英纤维滤膜和聚氨基甲酸酯连续索氏抽提 24 h. 烟气样品滤筒和树脂也一并并用甲苯连续索氏抽提 24 h; 冷凝水用二氯甲烷分别萃取 3 次后与抽提液合并. 空气和烟气样品在抽提前加入  $^{13}\text{C}$  标记的提取内标.

#### 1.3.3 样品的净化

样品经多段层析柱净化. 层析柱填料从上到下为: 2 g 无水硫酸钠、40 g 酸性硅胶、3 g 中性硅胶、4 g 碱性硅胶、3 g 中性硅胶、3 g 中性氧化铝、1 g 弗洛里硅藻土、2 g 无水硫酸钠. 净化前用 80 mL 正己烷预淋洗层析柱, 上样后依次用 120 mL 正己烷、30 mL 正己烷: 二氯甲烷混合液 (95:5, 体积比) 洗脱去除干扰物; 再用 100 mL 二氯甲烷继续淋洗

脱,洗脱液旋转蒸发至 2 mL,最后用高纯氮气吹扫浓缩至 50  $\mu\text{L}$  后加入  $^{13}\text{C}$  标记的进样内标,待仪器分析.

### 1.3.4 仪器分析

采用 HP6890HRGC 和 AutoSpec Premier HRMS 联用分析仪. 色谱条件: DB-5MS (60 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ ) 色谱柱对 17 种二噁英单体进行分离. 色谱柱升温程序: 初温 140 $^{\circ}\text{C}$ , 保持 2 min 后以 8  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温至 220 $^{\circ}\text{C}$ , 再以 1.4  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温至 260 $^{\circ}\text{C}$  后以 4  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温至 310 $^{\circ}\text{C}$ , 保持 4 min. 无分流进样, 进样量 1  $\mu\text{L}$ .

质谱条件: 分辨率  $\geq 10\,000$ ; 选用 EI 源, 源温 300 $^{\circ}\text{C}$ , 采用选择离子 (SIM) 测定, 电离能为 35 eV, 离子化电流为 600  $\mu\text{A}$ .

### 1.4 质量保证与质量控制

采用  $^{13}\text{C}$  同位素内标稀释定量法对环境空气和烟气中二噁英进行定量. 背景干扰以扣除实验空白为准. 结果表明, 空白实验回收率介于 63.4% ~ 118%, OCDD 和 OCDF 是主要干扰物; 样品回收率范围: 60% ~ 121.3%. 环境空气检测限范围: 0.009 ~ 0.217  $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 烟道气检测限范围: 0.002 ~ 0.022  $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 2 结果与分析

### 2.1 烟道气中二噁英浓度

从表 1 看出, 焚烧厂前口烟道气中 17 种二噁英平均质量浓度为  $3.23 \times 10^4 \text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均毒性当量浓度为  $1.83 \times 10^3 \text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 经布袋除尘后烟道气中二噁英浓度为 854  $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均毒性当量浓度为 52.3  $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 相对于前口, 后口二噁英毒性当量浓度去除率达到 97% 以上. 从结果可以看出, 后口烟道气排放二噁英毒性当量浓度低于我国《生活垃圾焚烧污染控制标准》0.1  $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$  标准, 且介于 Chen 等<sup>[14]</sup> 对中国 4 座不同类型垃圾焚烧厂二噁英排放结果. 调查发现, 该生活垃圾焚烧厂采用了活性炭吸附和布袋除尘双重装置对二噁英进行控制, 这说明这些措施对烟气中的二噁英起到了很好的去除作用.

进一步分析发现, 垃圾焚烧厂前口烟道气中 PCDFs 与 PCDDs 比值为 1.02, 而后口烟道气 PCDFs 与 PCDDs 比值为 0.700. 有研究表明, 若 PCDFs/PCDDs  $> 1$ , “从头合成” (De novo) 反应占优势, 若 PCDFs/PCDDs  $< 1$ , 前驱物反应占主导地位<sup>[15]</sup>. 据此可以判断, 前口烟气二噁英以“从头合成”为主,

后口烟气二噁英以前驱物反应生成为主.

### 2.2 周边环境空气中二噁英浓度

从表 1 可以看出, 焚烧厂周边环境空气中二噁英平均质量浓度介于 22.8 ~ 50.7  $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均毒性当量浓度介于 0.352 ~ 0.953  $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ . 质量浓度结果显示, 厂界外最大, 上风向次之, 下风向较小, 厂区最小, 这说明焚烧厂所排放二噁英不受主导风向影响, 焚烧厂周边可能存在其他的污染源. 从毒性当量浓度监测结果看, 厂区二噁英浓度较低, 上、下风向以及厂界二噁英浓度较高, 且超过日本环境空气质量标准 0.6  $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 总体高于刘劲松等<sup>[16]</sup> 对国内某垃圾焚烧厂周边环境空气中二噁英的监测结果. 这说明除厂区外, 其余 3 个监测点位可能受其他源影响. 从表 1 还可以看出, 焚烧厂周边环境空气中 PCDFs 与 PCDDs 比值均小于 1, 这说明, 周边环境空气中二噁英可能受焚烧厂影响. 从上述分析可知, 焚烧厂周边环境空气除可能受到排放烟气影响, 还可能受其他的污染源影响. 因此, 结合前期实地调查, 初步推断轮胎厂和露天焚烧为可能影响源.

### 2.3 轮胎厂环境空气中二噁英浓度

对轮胎厂的调查发现, 轮胎厂空气中二噁英平均质量浓度介于 11.6 ~ 21.2  $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均毒性当量浓度介于 0.267 ~ 0.464  $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 未超过日本空气质量标准. 轮胎厂主要对轮胎进行堆放、拆解、打磨和翻新. 目前, 还未见轮胎厂环境空气中二噁英的研究报道. 但通过与 Li 等<sup>[17]</sup> 对电子垃圾拆解行业周边空气二噁英 (0.909 ~ 48.9  $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 结果比较, 轮胎厂三处监测点二噁英均处于较低水平. 从表 1 可以看出, 轮胎翻新厂浓度高于露天堆放和宿舍二楼监测点, 且轮胎厂区所有监测点 PCDFs 与 PCDDs 比值小于 1. 本研究发现, 轮胎厂与较近的上风向点相比, 空气中二噁英浓度是轮胎厂的 2 ~ 3 倍. 这说明轮胎厂对上风向的污染贡献率较低, 轮胎厂是否对周边环境空气产生影响需进一步分析.

### 2.4 露天焚烧环境空气中二噁英浓度

露天焚烧空气中二噁英质量浓度为 40.9  $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 毒性当量浓度为 0.834  $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 超出日本环境空气质量标准. 这与 Wevers 等<sup>[18]</sup> 研究生活垃圾露天焚烧排放二噁英结果 (0.683  $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 差别较大. 从表 1 可以看出, 该结果高于离露天焚烧最近的厂界外监测点. 这只能初步说明, 露天焚烧可能是环境空气中二噁英的贡献源. 通过进一步对比发现, 露天焚烧与厂区监测点环境空气中 PCDFs 和 PCDDs 比值较接近, 这说明露天焚烧与焚烧厂区环

境空气二噁英分布比较一致。

表 2 列举了部分国内外生活垃圾焚烧厂烟道气及周边空气中可能的二噁英的含量水平。通过对比

发现,本研究焚烧厂烟道气排放浓度较低,周边环境空气中二噁英浓度处于中低水平。同时本研究露天焚烧所排放二噁英与有关研究结果相近。

表 1 烟道气及各环境空气中二噁英含量分布<sup>1)</sup>

Table 1 Concentration of PCDD/Fs in flue gas and environmental air

项目	前口 (n=3)	后口 (n=3)	周边环境空气				轮胎厂环境空气			露天焚烧 (n=1)
			厂区 (n=3)	厂界外 (n=3)	下风向 (n=3)	上风向 (n=3)	露天堆放 (n=3)	宿舍二楼 (n=3)	翻新车间 (n=3)	
温度/°C	205	157	31.3	30.6	29.7	28.7	30.7	32.8	34.3	30.4
含氧量/%	8.83	9.12	/	/	/	/	/	/	/	/
采样体积	1.45	2.17	392	402	435	417	424	418	398	136
大气压/kPa	/	/	100	99.7	99.9	99.9	101.2	101.4	101.5	100.1
$\sum$ PCDD/Fs/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$3.23 \times 10^4$	854	22.8	50.7	26.9	41.0	13.6	11.6	21.2	40.9
毒性当量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$1.83 \times 10^3$	52.3	0.352	0.639	0.646	0.953	0.393	0.267	0.464	0.834
PCDFs/PCDDs	1.02	0.700	0.227	0.167	0.588	0.211	0.574	0.450	0.465	0.216

1) “n”代表实际样品数量; “/”代表未测定该参数值

表 2 部分国家或地区生活垃圾焚烧厂排放烟气以及周边环境空气中二噁英研究情况<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison of PCDD/Fs in flue gas and environmental air among some countries or districts

地区或国家	排放源类型			环境空气		
	烟道气	质量浓度 / $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	毒性当量浓度 / $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	介质类型	质量浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	毒性当量浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
中国台湾 <sup>[1]</sup>	MSWI	/	/	上风向	1.75	0.0865
				下风向	1.48	0.0747
				最大落地浓度(n=5)	1.69~8.48	0.0882~0.630
中国台湾 <sup>[19]</sup>	MSWI	/	/	焚烧厂-1 空气(n=28)	0.558~3.54	0.038~0.136
				焚烧厂-2 空气(n=28)	0.465~5.07	0.028~0.221
韩国 <sup>[20]</sup>	MSWI	2 103.72	36.5	焚烧厂周边(n=10)	13.38~75.16	0.23~1.16
中国北京 <sup>[21]</sup>	MSWI	/	/	焚烧厂周边(n=5)	8.3~115	0.11~1.9
中国台湾 <sup>[22]</sup>	MSWI	2.35	0.0995	上风向	0.704	0.0351
				下风向	0.483~1.11	0.0241~0.0465
中国哈尔滨 <sup>[23]</sup>	MSWI	0.92	0.049	焚烧厂周边	0.873~1.12	0.0512~0.0613
中国台湾 <sup>[24]</sup>	露天焚烧	/	/	区域 L(n=5)	2.28~32.4	0.105~0.493
				区域 Y(n=6)	2.94~7.89	0.164~0.723

1) “MSWI”表示生活垃圾焚烧厂; “/”表示没有数据; “n”代表实际样品数量

### 3 烟气与空气中二噁英同系物分析

#### 3.1 烟气与空气中二噁英指纹特征

烟道气与所有环境空气中二噁英同类物分布特征见图 2。从图 2(a)可见,烟道气中二噁英以 OCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDD 及 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 为主,质量分数分别为  $34.8\% \pm 8.3\%$ 、 $17.2\% \pm 0.9\%$  和  $12.1\% \pm 1.4\%$ 。这与 Zhong 等<sup>[25]</sup>对某垃圾焚烧厂烟道气中二噁英调查结论基本一致。同样,烟道气中 PCDFs 除 1,2,3,7,8,9-HxCDF、1,2,3,4,7,8,9-HpCDF 和 OCDF 外,包括所有 PCDDs 单体在内,同系物浓度都随着氯原子数增加而增大。上述分析说明高氯代二噁英比低氯代二噁英在烟道气中稳定。图 2(c)中生活垃圾露天焚

烧二噁英排放特征与图 2(a)烟道气二噁英排放特征十分相似。进一步实地调查发现,该垃圾焚烧厂周边绝大部分生活垃圾都被集中焚烧处理,少部分垃圾被随意进行露天焚烧。这说明,对于同类型的生活垃圾来说,露天焚烧与集中焚烧所排放的二噁英都以这 4 种单体为主。

同样从图 2(b)可见,焚烧厂周边环境空气中二噁英分布主要以 OCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 以及 OCDF 为主,该分布特征与现有研究<sup>[26~28]</sup>对某垃圾焚烧发电厂周边环境空气中二噁英研究结论基本一致。其中 OCDD 质量分数范围为  $(44.0 \pm 5.1)\% \sim (68.8 \pm 15.4)\%$ 。有研究报道指出,在空气中,OCDD 占总浓度的 30%~60%。结合图 2(b)可知,OCDD 在厂区监测点的质

量浓度较其他几个点位低,但质量分数值最大;厂界外 OCDD 质量浓度最大,但质量分数值较低. 其余 3 种主要单体质量浓度和质量分数分布相似. 除几种主要单体外,其余单体百分比随氯原子数增加变化不大,这与烟气和露天焚烧分布特征不一致. 说明还存在其他对环境空气的源.

轮胎厂二噁英同类物分布见图 2(d),从中可见,

OCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 以及 OCDF 为轮胎厂空气中主要单体. 这与焚烧厂周边环境空气这几种主要单体的分布模式一致. 同样,除主要单体外,其余单体质量分数随氯原子数增加变化不大. 这与焚烧厂周边环境空气中二噁英分布具有相似分布特征. 但同样不能说明轮胎厂对周边环境空气中造成一定影响,仍需进一步分析.

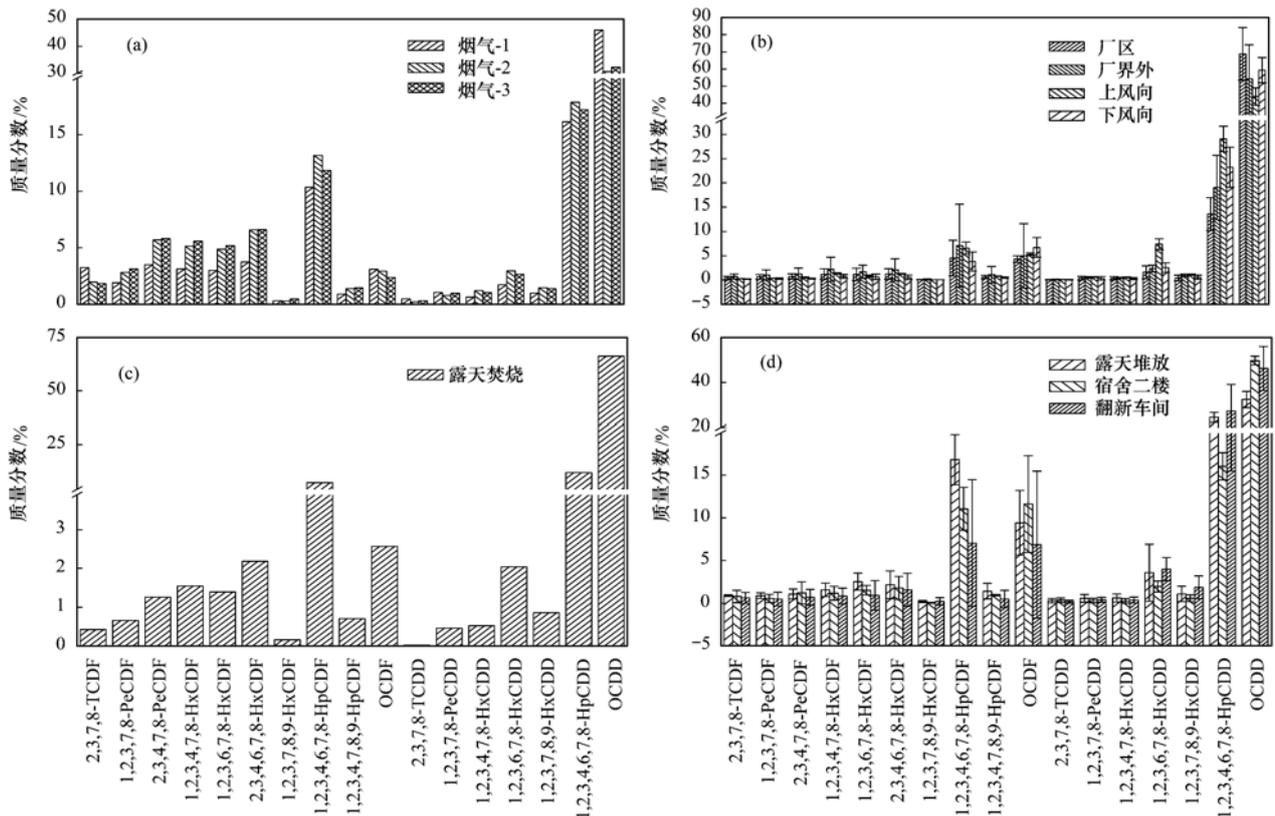


图 2 烟道气与空气中二噁英同系物指纹分布

Fig. 2 Profiles of PCDD/Fs in flue gas and environmental air

### 3.2 空气中主要毒性贡献体相关性

根据本研究空气中 17 种二噁英同系物浓度与对应的国际毒性当量因子 (international toxicity equivalence factor, I-TEF) 乘积所得到的毒性当量浓度结果可知,所有空气样品中 PCDFs 的主要毒性贡献体是 2,3,4,7,8-PeCDF 和 2,3,4,6,7,8-HxCDF, 毒性贡献率范围分别为:  $(10.3 \pm 1.5)\%$  ~  $(30.8 \pm 1.1)\%$  和  $(4.5 \pm 2.0)\%$  ~  $(9.5 \pm 1.3)\%$ . 该两种主要单体与总毒性当量浓度相关性分析如图 3(a) 所示,2,3,4,7,8-PeCDF 和 2,3,4,6,7,8-HxCDF 的线性相关系数分别为 0.28 和 0.75. 同样,所有空气中 PCDDs 主要贡献体是 1,2,3,7,8-PeCDD 和 1,2,3,6,7,8-HxCDD, 毒性贡献率范围分别为:  $(7.0 \pm 5.2)\%$  ~  $(13.4 \pm 6.0)\%$  和  $(8.5 \pm 2.7)\%$  ~  $(31.7 \pm 2.9)\%$ . 这两种单体与总毒性当量浓度相

关性分析如图 3(b) 所示,线性相关系数分别为 0.95 和 0.37. 以上分析可知,1,2,3,7,8-PeCDD 和 2,3,4,6,7,8-HxCDF 在本研究区域空气中与总毒性当量浓度具有较强的相关性.

### 4 烟气与空气中二噁英源解析

运用主成分分析法分析焚烧厂烟道气、周边环境空气、轮胎厂空气以及露天焚烧空气中二噁英毒性当量浓度之间的内在联系,可以进一步判断不同产生源之间的相关性. 从图 4 可见,本研究各介质中 17 种二噁英单体由主成分 1 (77%) 和主成分 2 (17%) 解释了相互之间的变化规律. 可以看出,除上风向、厂界监测点位的空气中二噁英受焚烧厂烟道气影响较小外,厂区和下风向监测点位均受到焚烧厂排放烟气的影

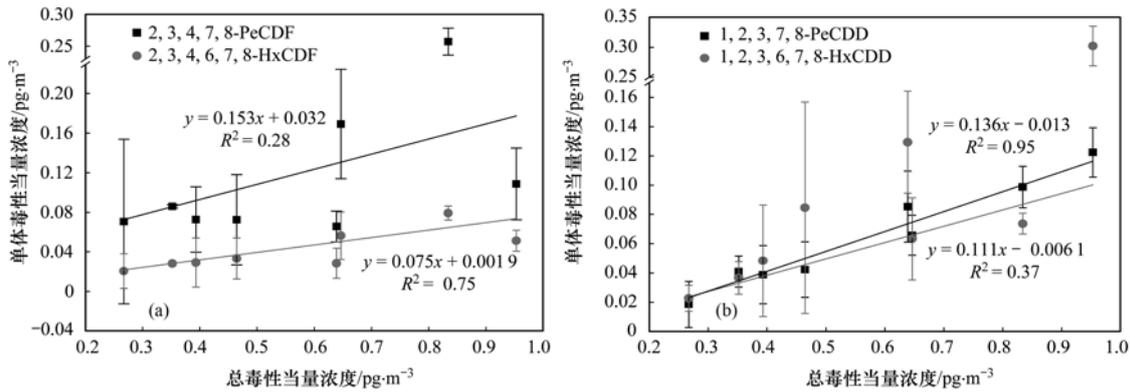


图3 环境空气中主要毒性贡献体与总毒性相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between main homologs and total toxic concentration in air

从主成分1分析,轮胎翻新车间、露天堆放和轮胎厂宿舍二楼与距离较近的上风向监测点位二噁英分布变化较小,这说明轮胎厂与上风向监测点位可能存在相互影响. 同样,露天焚烧对厂区空气监测点也产生一定影响,这与前面分析结果一致.

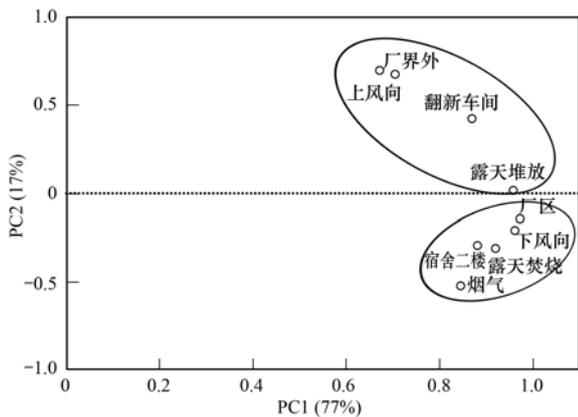


图4 烟道气与空气中二噁英主成分分析

Fig. 4 PCA analysis of PCDD/Fs between flue gas and environmental air

进一步对焚烧厂排放烟气与周边环境空气中17种二噁英单体毒性当量浓度的聚类分析(图5)可见,所有介质中二噁英的分布特征主要分为两类:第一类是焚烧厂后口排放烟气与厂区、下风向、露天焚烧和宿舍二楼环境空气分布一致;第二类是露天堆放、翻新车间、厂界外及上风向分布一致,这与主成分分析结果一致.

通过上述主成分与聚类综合分析可知,垃圾焚烧厂对厂区、下风向及露天焚烧环境空气中二噁英产生一定影响,而对上风向、厂界外及轮胎厂影响较小. 露天焚烧对厂界外监测点影响较小,而对厂区监测点产生一定影响. 轮胎厂对距离较近的上风向监测点影响较大.

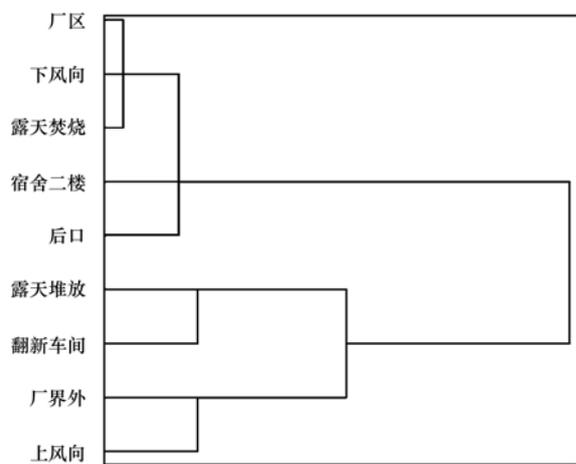


图5 烟道气与空气中二噁英聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of PCDD/Fs between flue gas and environmental air

### 5 结论

(1)垃圾焚烧厂烟道气二噁英毒性当量浓度为  $52.3 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,高于焚烧厂周边环境空气二噁英毒性当量浓度  $0.352 \sim 0.953 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;焚烧厂周边环境空气二噁英不受主导风向影响,可能存在其他的污染源. 对可能的污染源调查发现,轮胎厂空气中二噁英毒性当量浓度为  $0.267 \sim 0.464 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,低于上风向监测点,其污染贡献还需进一步分析. 露天焚烧空气中二噁英毒性当量浓度为  $0.834 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,高于厂界外监测点,是可能的污染源.

(2)所有样品中二噁英同系物分析发现,烟气以 OCDD、1,2,3,4,6,7,8- HpCDD 及 1,2,3,4,6,7,8- HpCDF 为主,所有空气样品中同类物以 OCDD、1,2,3,4,6,7,8- HpCDD、1,2,3,4,6,7,8- HpCDF 和 OCDF 为主,且焚烧厂周边监测点位与轮胎厂空气中二噁英同系物分布情况相似,垃圾焚烧烟道气与露天焚烧空气中二噁英同系物分布相似.

(3) 所有空气样品中主要贡献单体为 2,3,4,7,8- PeCDF、2,3,4,6,7,8- HxCDF、1,2,3,7,8-PeCDD 和 1,2,3,6,7,8- HxCDD, 对应的线性相关系数分别为 0.28、0.75、0.95 和 0.37. 这说明所有空气样品中 1,2,3,7,8- PeCDD 和 2,3,4,6,7,8-HxCDF 具有更强的线性相关性.

(4) 主成分分析和聚类分析表明垃圾焚烧厂可能对周边环境空气产生一定影响, 轮胎厂对上风向影响较大, 露天焚烧对较近的厂界外监测点影响较小.

#### 参考文献:

- [1] Wang J B, Wang M S, Wu E M Y, *et al.* Approaches adopted to assess environmental impacts of PCDD/F emissions from a municipal solid waste incinerator [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **152**(3): 968-975.
- [2] 李佳玲, 张正洁. 再生铝生产过程中二噁英成因及全过程污染控制技术[J]. *环境保护科学*, 2013, **39**(2): 42-46.  
Li J L, Zhang Z J. Causes of dioxin generation during secondary aluminum production process and the whole process pollution control technology[J]. *Environmental Protection Science*, 2013, **39**(2): 42-46.
- [3] 孙鹏程, 李晓璐, 成钢, 等. 焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2515-2519.  
Sun P C, Li X L, Cheng G, *et al.* Preliminary investigation on emission of PCDD/Fs and DL-PCBs through flue gas from coke plants in China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2515-2519.
- [4] Chen T, Guo Y, Li X D, *et al.* Emissions behavior and distribution of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and furans (PCDD/Fs) from cement kilns in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(6): 4245-4253.
- [5] 杨忠灿. 垃圾焚烧过程中氯源对 HCl 和二噁英排放特性影响的初步研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003. 48-51.  
Yang Z C. Study on effects of chlorine sources on emission of HCl and PCDD/Fs during municipal solid wastes incineration [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. 48-51.
- [6] Shih Y H, Kasaon S J, Tseng C H, *et al.* Health risks and economic costs of exposure to PCDD/Fs from open burning; a case study in Nairobi, Kenya [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2016, **9**(2): 201-211.
- [7] Bastian L W, Yano J Y, Hirai Y H, *et al.* Behavior of PCDD/Fs during open burning of municipal solid waste in open dumping sites [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2013, **15**(2): 229-241.
- [8] Conesa J A, Gálvez A, Mateos F, *et al.* Organic and inorganic pollutants from cement kiln stack feeding alternative fuels [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **158**(2-3): 585-592.
- [9] Aylón E, Murillo R, Fernández-Colino A, *et al.* Emissions from the combustion of gas-phase products at tyre pyrolysis [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006, **79**(1-2): 210-214.
- [10] 查建宁. 江苏省二噁英排放源的现状分析及其思考[J]. *污染防治技术*, 2009, **22**(5): 58-59, 93.
- Zha J N. Analysis and several suggestions of dioxin emissions sources in Jiangsu Province [J]. *Pollution Control Technology*, 2009, **22**(5): 58-59, 93.
- [11] Zhang T T, Fiedler H, Yu G, *et al.* Emissions of unintentional persistent organic pollutants from open burning of municipal solid waste from developing countries [J]. *Chemosphere*, 2011, **84**(7): 994-1001.
- [12] 黄文, 张素坤, 杜国勇, 等. 医疗废物焚烧炉周边环境介质中二噁英的浓度、同系物分布与来源分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3238-3243.  
Huang W, Zhang S K, Du G Y, *et al.* Concentration, profile distribution and source identification of PCDD/Fs in environmental medium around a HSWI [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3238-3243.
- [13] 余莉萍, 李会茹, 孟祥周, 等. 电子垃圾焚烧排放的二噁英对周围大气环境的影响[J]. *环境污染与防治*, 2008, **30**(2): 8-11, 28.  
Yu L P, Li H R, Meng X Z, *et al.* Effect of PCDD/Fs from electric waste combustion on the ambient atmospheric environment [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, **30**(2): 8-11, 28.
- [14] Chen T, Gu Y L, Yan J H, *et al.* Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in flue gas emissions from municipal solid waste incinerators in China [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2008, **9**(9): 1296-1303.
- [15] 张刚. 城市固体废物焚烧过程二噁英与重金属排放特征及控制技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013. 11.  
Zhang G. Study on PCDD/F and heavy metal emission characteristic and control technology during municipal solid waste incineration [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. 11.
- [16] 刘劲松, 刘维屏, 巩宏平, 等. 城市生活垃圾焚烧炉周边环境空气及土壤中二噁英来源研究[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(10): 1950-1956.  
Liu J S, Liu W P, Gong H P, *et al.* Source identification for PCDD/Fs in ambient air and soil in the vicinity of a municipal solid waste incinerator [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(10): 1950-1956.
- [17] Li H R, Yu L P, Sheng G Y, *et al.* Severe PCDD/F and PBDD/F pollution in air around an electronic waste dismantling area in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(16): 5641-5646.
- [18] Wevers M, De Fré R, Desmedt M. Effect of backyard burning on dioxin deposition and air concentrations [J]. *Chemosphere*, 2004, **54**(9): 1351-1356.
- [19] Wu Y L, Lin L F, Hsieh L T, *et al.* Atmospheric dry deposition of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in the vicinity of municipal solid waste incinerators [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **162**(1): 521-529.
- [20] Oh J E, Choi S D, Lee S L, *et al.* Influence of a municipal solid waste incinerator on ambient air and soil PCDD/Fs levels [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(4): 579-587.
- [21] 齐丽, 任玥, 李楠, 等. 垃圾焚烧厂周边大气二噁英含量及变化特征——以北京某城市生活垃圾焚烧发电厂为例[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(4): 1000-1008.  
Qi L, Ren Y, Li N, *et al.* Concentrations, spatial and seasonal variations of PCDD/Fs in ambient air around a municipal solid

- waste incinerator-a case study in Beijing [ J ]. China Environmental Science, 2016, **36**(4): 1000-1008.
- [22] Wang Y H, Rao G W, Chen M L, *et al.* Investigation on dioxin level of flue gas, ambient air, vegetation and soil nearby large-scale MSWI in Taiwan[J]. Advanced Materials Research, 2013, **781-784**: 2508-2516.
- [23] Meng B, Ma W L, Liu L Y, *et al.* PCDD/Fs in soil and air and their possible sources in the vicinity of municipal solid waste incinerators in northeastern China[[J]]. Atmospheric Pollution Research, 2016, **7**(2): 355-262.
- [24] Shih S I, Lee W J, Lin L F, *et al.* Significance of biomass open burning on the levels of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in the ambient air [ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **153**(1-2): 276-284.
- [25] Zhong J J, Zhang G, Hai J, *et al.* Polychlorinated Dibenz-*p*-dioxins and dibenzofurans from a grate-type municipal solid waste incinerator in China[J]. Advanced Materials Research, 2014, **878**: 616-621.
- [26] Zhang M W, Zhang S K, Zhang Z Q, *et al.* Influence of a municipal solid waste incinerator on ambient air PCDD/F levels: a comparison of running and non-running periods[J]. Science of the Total Environment, 2014, **491-492**: 34-41.
- [27] Gao L R, Zhang Q, Liu L D, *et al.* Spatial and seasonal distributions of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans and polychlorinated biphenyls around a municipal solid waste incinerator, determined using polyurethane foam passive air samplers[J]. Chemosphere, 2014, **114**: 317-326.
- [28] Mi H H, Wang W J, Lin S L, *et al.* Long-term monitoring and modeling of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans from municipal solid waste incinerators and surrounding area in northern Taiwan [ J ]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(18): 10751-10764.

## CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing .....	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> ( 423 )
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> 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, <i>et al.</i> ( 429 )
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Shengsi Region .....	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> ( 438 )
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM <sub>2.5</sub> from Mt. Taishan .....	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 453 )
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region .....	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> ( 461 )
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing .....	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> ( 469 )
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014 .....	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> ( 476 )
Variation Analysis of Daily PM <sub>2.5</sub> Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou .....	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> ( 485 )
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing .....	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> ( 495 )
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong .....	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 563 )
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO .....	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> ( 572 )
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> ( 580 )
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants .....	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 600 )
Experimental Research of Hg <sup>2+</sup> Removal by TiO <sub>2</sub> /Bentonite Composite .....	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> ( 608 )
Impact of Ammonia and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> on Bromate and Disinfection By-products Control .....	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> ( 616 )
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks .....	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> ( 622 )
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite .....	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> ( 629 )
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation .....	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 647 )
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources .....	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> ( 654 )
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System .....	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 672 )
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge .....	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> ( 679 )
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i> .....	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 711 )
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes .....	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 728 )
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure .....	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> ( 735 )
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment .....	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 752 )
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils .....	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 792 )
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics .....	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> ( 802 )
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain .....	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 815 )
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat .....	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> ( 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, <i>et al.</i> ( 832 )
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob 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



9 770250 330172