

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

遗体火化二噁英类排放水平及影响因素

尹文华, 于晓巍, 韩静磊*, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤

(环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 采用现场监测方式调查了国内13台火化机烟气中PCDD/Fs排放情况, 分析火化炉型、烟气处理设施和随葬品等因素对其排放水平的影响, 提出相关污染控制措施和管理措施的建议。结果表明, 各样品的PCDD/Fs毒性当量浓度(以I-TEQ计, 下同)差异较大, 范围为 $0.027 \sim 15.8 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 $3.2 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。PCDD/Fs排放因子范围为 $45.9 \sim 22\,236 \text{ ng} \cdot \text{具}^{-1}$, 均值为 $4\,738 \text{ ng} \cdot \text{具}^{-1}$ 。平板炉PCDD/Fs排放水平总体低于捡灰炉, 达标率高于捡灰炉。火化烟气中17种PCDD/Fs异构体分布特征存在一定差异。部分火化机PCDD/Fs排放浓度仍处于较高水平, 有必要从源头上减少污染、提高污染控制技术、加强政府监管, 如将随葬品另炉火化、增设二燃室、配备布袋除尘器和活性炭喷射处理设施等。

关键词: 遗体火化; 二噁英; 排放; 影响因素; 管理建议

中图分类号: X131.1; X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3596-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.007

Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors

YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei*, FENG Gui-xian, FU Jian-ping, YANG Yan-yan, JU Yong-ming, ZHANG Su-kun

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

Abstract: To analysis the influencing factors for the emissions of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) as structure of crematory, air pollution control device (APCD) and funeral objects, etc, we collected and measured the PCDD/Fs emissions in flue gas from 13 crematories in China. Then we proposed some supervision suggestions on measures of pollution control and management. The results indicated that the emission levels of PCDD/Fs (as the toxic equivalent concentration, TEQ) was ranged in a large gap from 0.027 to $15.8 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, and the average was $3.2 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. Emissions factor of PCDD/Fs (as TEQ) from 13 crematories varied between 45.9 and $22\,236 \text{ ng} \cdot \text{body}^{-1}$, and the average was $4\,738 \text{ ng} \cdot \text{body}^{-1}$. The emissions of PCDD/Fs from flat incinerators were generally lower, whereas higher ratio up to the national discharge standard, than that of car type incinerators. Congener distribution of PCDD/Fs in flue gas from 13 crematories were different from each other. Since the emission of PCDD/Fs from some crematories remains in high level, it is necessary to control pollution from the source, improve the pollution control technology, and strengthen government supervision, by following measures: 11 cremating funeral objects separately from corpse; 22 adding one secondary chamber to one main chamber; 33 installing the bag filter system with activated carbon injection.

Key words: crematory; PCDD/Fs; emission; influence factor; supervision suggestion

截止2013年底,我国共有殡仪馆1 784个,火化机5 743台,火化遗体468.9万具,火化率48.2%。随着老年人口不断增加以及火化的推广和普及,民政部预计到2020年,全国火化遗体数量将达一千万具。在遗体火化过程中会产生大量伴有 NO_x 、CO、 SO_2 、颗粒物和重金属等污染物的烟气;而人体、棺木木头和随葬品(如衣物、油膜纸、纸钱、假花等)中含有氯元素,在燃烧过程中也会产生二噁英(PCDD/Fs)^[1,2]。PCDD/Fs具有高毒性、持久性、高亲脂性和生物累积性等特性^[3],被列为《关于持久性有机污染物(POPs)的斯德哥尔摩公约》(公约)中首批控制对象,已受到国际社会的极大关注^[4,5],遗体火化为主要PCDD/Fs排放源之一^[6,7]。2010年,我国将殡葬行业列为PCDD/Fs优先减排的六大重点行业之一。但由于污染源相对分散、并受行业特殊性和各地风俗所限,目前国内外

对殡葬行业PCDD/Fs排放研究相对较少,主要停留在排放水平调查^[8~12]及烟气处理设施的影响^[13,14]。

日本学者^[15~17]在2000年前后的近十年内通过调查共三十几家火化机烟气中PCDD/Fs排放情况,以此评估日本发布火化机PCDD/Fs排放指南后的实施效果。结果发现,该指南的实施非常有利于降低PCDD/Fs排放。2006年于粤^[18]调查了沈阳市9家火化场11台火化机的运行状况,发现火化设备中70%以上排放大气常规污染物超标,50%排气筒高度低于15 m,属于低空排放,对周边大气环境造成较重影响。中国台湾学者^[19]认为火化烟气排放的PCDD/Fs对周围环境具有显著影响。

收稿日期: 2015-03-13; 修订日期: 2015-05-26

作者简介: 尹文华(1986~),男,硕士,工程师,主要研究方向为POPs的监测与分析, E-mail: yinwenhua@scies.org

* 通讯联系人, E-mail: hanjinglei@scies.org

火化机一般分为平板炉和捡灰炉两种,平板炉指火化时燃烧坑面固定的炉型,其蓄热性能好,使用寿命长,但可能造成前后炉混灰;捡灰炉指燃烧坑面可移动的炉型,火化前后可移出坑面,便于保证整具骨灰的完整性,不会混灰,但热量损耗大,每具火化时需要重新加热升温,火化时间长,燃料耗量大.本研究选择我国华南地区 13 台火化机为研究对象,分析、归纳火化烟气中 PCDD/Fs 排放特征,并通过与文献资料对比,探讨不同因素对 PCDD/Fs 污染水平的影响,提出火化机污染物排放监管建议.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究采集 13 台火化机共 16 个烟气样品,助燃剂均为 0 号轻质柴油,所用的均为成人遗体.

样品采集过程从遗体或棺木进入燃烧室火化开始,到主燃室火化完毕结束.火化时间约 30 ~ 60 min. 考虑到方法检出限等因素,并为保证足够量的采样体积,每个样品采集 3 具遗体连续火化过程.采样时,记录死者年龄、性别、随葬品、烟气处理设施和有无棺木等基本信息.

样品采集方法依据《环境空气和废气二噁英类的测定 同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法》(HJ 77.2-2008) 进行,采用等速采样模式.采样前在吸附树脂中添加采样内标,采样点处于烟囱中部.

1.2 样品前处理

滤筒和吸附树脂用 300 mL 甲苯索氏抽提 24 h 后浓缩至 2 mL,冷凝水用其体积 20% 的二氯甲烷液萃取 3 次,浓缩后与甲苯抽提液合并,用正己烷替换溶剂并浓缩至 1 mL;加入 ^{13}C 标记的净化内标,过多段硅胶净化柱(从上到下:无水 Na_2SO_4 、40 g 40% 酸性硅胶、3 g 中性硅胶、4 g 33% 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、

无水 Na_2SO_4),过柱前用 80 mL 正己烷预淋洗,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)淋洗去除干扰物,用 100 mL 二氯甲烷洗脱 PCDD/Fs,浓缩至 50 μL 后加入 ^{13}C 标记的进样内标,待仪器分析.

1.3 仪器分析条件

采用 HRGC/HRMS (Agilent 6890N、Waters AutoSpec Premier) 联用分析仪分析,分析方法和条件如文献[20 ~ 22]所述.

1.4 质量保证与质量控制

采用 ^{13}C 同位素内标稀释定量法对样品进行定量,样品采样内标回收率为 70% ~ 110%,净化内标回收率为 55% ~ 111%. 运输空白和操作空白回收率分别介于 67.0% ~ 106.7% 和 66.1% ~ 108.6%.

2 结果与讨论

2.1 火化机烟气中二噁英排放浓度

火化机烟气 PCDD/Fs 分析结果见表 1. 从中可见,PCDD/Fs 排放浓度范围为 0.65 ~ 415.2 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,平均值为 48.7 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ [273.15 K, 101.325 kPa, $\varphi(\text{O}_2)$ 为 11% 下的折算值,下文同],毒性当量浓度范围为 0.027 ~ 15.8 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,平均值为 3.2 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 与国内和 2001 年日本调查结果接近,而低于英国的污染水平,见表 2. 值得注意的是,由于火化烟气与大量炉门空气混合排放,导致本次监测的部分企业废气中的氧含量较高,甚至高于 20%,浓度稀释效应明显,但能代表国内相当一部分老旧火化机的现状.

根据国家标准《燃油式火化机大气污染物排放限值》(GB 13801-2009),本研究中 43.8% 的样品达到一级标准(0.5 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$),62.5% 达到二级标准(1.0 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$),25.0% 超过三级标准(2.0 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 3 倍以上,其中平板炉的达标率明显高于捡灰炉.

表 1 火化烟气中 PCDD/Fs 浓度及毒性当量浓度

Table 1 Total concentrations and TEQ concentration of PCDDs/Fs from crematories

炉型	项目	序号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
捡灰炉	折算浓度/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	9.0	1.3	6.01	165.2	91.1	415.2	2.4	4.6
	I-TEQ/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	1.2	0.027	0.92	10.4	7.5	15.8	0.41	0.69
	含氧量/%	17.7	16.8	16.1	20.3	20.5	19.2	18.4	18.3
炉型	项目	序号							
		9	10	11	12	13	14	15	16
平板炉	折算浓度/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	8.2	3.3	1.4	5.8	50.2	2.6	0.65	12.3
	I-TEQ/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	0.81	0.27	0.24	0.48	10.4	0.19	0.11	1.3
	含氧量/%	15.5	18.5	11.5	17.0	19.3	20.7	19.2	15.3

表 2 各国/地区火化机烟气中 PCDD/Fs 排放数据汇总
Table 2 Summary of data concerning flue gas emissions of PCDD/Fs
from crematories in different countries and regions

国家/地区	年份	排放浓度/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$		毒性当量浓度/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$		样品数量/个	备注	文献
		范围	均值	范围	均值			
中国大陆	2006	89 ~ 350	236	1.5 ~ 5.4	3.5	3		[13]
	2009	9.2 ~ 120	33.9	1.0 ~ 8.1	4.1	6		[14]
	2012	9.86 ~ 428.6	/	0.16 ~ 6.03	/	11	$\varphi(\text{O}_2)$ 11%	[23]
	2013	52.0 ~ 333.0	112.5	0.28 ~ 5.14	2.4	10		[12]
	2012 ~ 2014	0.65 ~ 415.2	48.7	0.027 ~ 15.8	3.2	16		本研究
中国台湾	2003	3.93 ~ 5.78	4.85	0.322 ~ 2.36	1.3	2		[19]
	2006	/	/	/	3.00	3	$\varphi(\text{O}_2)$ 11%	[24]
	2011	/	/	/	0.139	1		[25]
日本	2000	2.2 ~ 290	47.7	0.009 9 ~ 6.5	0.9	10	$\varphi(\text{O}_2)$ 12%	[15]
	2001	4.9 ~ 1200	120	0.064 ~ 24	2.4	17	二噁英和二噁英类 多氯联苯, $\varphi(\text{O}_2)$	[16]
	2014	4.2 ~ 540	46.0	0.000 053 ~ 11	0.8	14	12%	[17]
英国	1996	/	/	46	/	/	$\varphi(\text{O}_2)$ 11%	[8]
德国	1993	/	/	8	/	/	/	[10]
	2002	/	/	0.24, 3.71	1.98	2	/	[11]

2.2 火化机烟气中二噁英类分布特征

本研究采用主成分分析(PCA)对所有样品中 PCDD/Fs 的异构体分布进行分析. 不同样品中的 PCDD/Fs 可以用成分 1(80.5%)和成分 2(12.7%)来解释 93.2%的变量信息. 集合 1 变量反映了 7、9、14 和 15 号样品,其 PCDD/Fs 分布特征为 2,3,7,8-TCDD 占比达到 30.0% 以上,高于单体 2,3,4,7,8-PeCDF 的占比,其中 7、14 和 15 号为无随葬品火化的烟气样品. 集合 2 变量特征为 2,3,4,7,8-PeCDF 对总毒性当量浓度的贡献具有绝对优势,约为 27.9% ~ 47.9%,符合废物焚烧的排放特征^[26~28],与国内学者研究结果^[13,14,23]相似,而日本^[15]和中国台湾^[19]以 2,3,7,8-TCDF 单体贡献最大. 集合 3 变量反映了 2 和 6 号样品,其特征为 2,3,4,6,7,8-HxCDF 占比超过 17%,PCDFs/PCDDs 比值为 5.7 和 13.3,其他所有样品的比值约为 1.5 ~ 3.1. 16 个烟气样品中 PCDD/Fs 的分布特征存在差别,其原因有待进一步分析,但总体而言,PCDD/Fs 的生成以 Denovo 从头合成反应为主^[12,14,15,19,29~31]. 图 1 显示了 2 个主成分因子的得分.

2.3 二噁英类污染的影响因素分析

2.3.1 火化机类型

捡灰炉 PCDD/Fs 毒性当量浓度范围为 0.027 ~ 15.8 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,平均值为 4.6 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,其中 2 号浓度最低 0.027 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,其他均大于 0.4 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$; 平板炉 PCDD/Fs 毒性当量浓度范围为 0.11 ~ 10.4 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,平均值为 1.7 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 王玮等^[32]调查结果

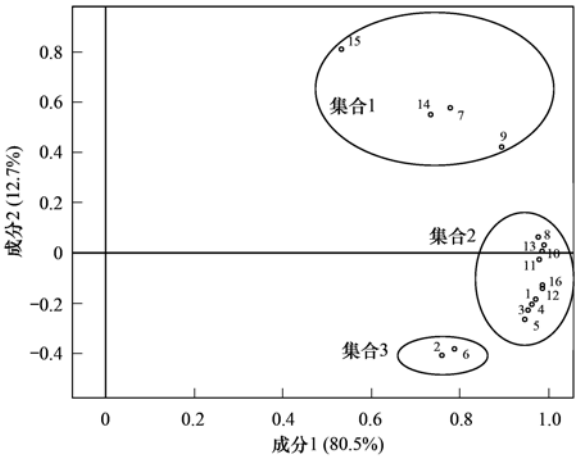


图 1 火化烟气 PCDD/Fs 的主成分因子
(PC1 和 PC2)分析载荷

Fig. 1 Principal components (PC1 and PC2) analysis
loading plot for PCDD/Fs from crematories

显示,平板炉和台车炉(捡灰炉)烟气 PCDD/Fs 毒性当量浓度为 0.3 ~ 6.4 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 1.0 ~ 8.1 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,均值分别为 3.0 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 4.0 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,将此结果和本研究成果按炉型进行对比分析,见图 2.

总体而言,平板炉 PCDD/Fs 排放情况比捡灰炉要好,这可能跟炉膛结构和火化方式有关. 平板炉在每具火化完后无需降温取灰,炉内温度变化不大;而捡灰炉在每具火化完毕后熄火降温,取灰,然后点火升温火化下一具,这种启炉和熄火阶段,炉膛燃烧温度介于 200 ~ 400℃ 之间,烟气 PCDD/Fs 容易在此过程中重新生成^[33,34]. 有研究表明^[16],主炉炉膛温

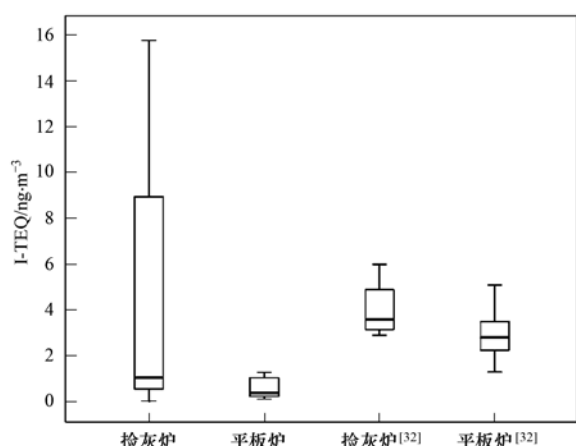


图2 两种火化炉型排放烟气PCDD/Fs毒性当量浓度范围
Fig. 2 Toxic equivalent concentration of PCDD/Fs
in flue gas from two kinds of incinerator

度越高,PCDD/Fs 排放浓度越低;当炉膛温度高于 800℃时,其浓度明显降低. 因此火化过程也遵循 3T 原则,即炉内保持较高温度,使燃烧气体的停留时间大于 2 s,并形成湍流气氛,可以实现完全燃烧,最终达到在源头上减少 PCDD/Fs 生成的目的.

2.3.2 增设二燃室

通过调查本研究 and 已有研究中火化设备,发现国内较少火化机装设或未运行二燃室^[14],而日本则普遍设有二燃室以提高焚烧效率^[17]. 本研究中,2 和 1 号为同一台炉的烟气样品,2 号在采集时比 1 号多增设并运行了二燃室(见表 3),2 号 PCDD/Fs 毒性当量浓度是 1 号的 2.3%,为唯一低于 0.1 ng·m⁻³的样品. 由此可见,在火化设备中增设二燃室并使之有效运行能有效降低 PCDD/Fs 排放浓度,符合前人的研究结论^[15,16].

表 3 火化机工况参数

Table 3 Operational parameters of crematories

炉型	序号	主炉温度/℃	烟囱高度/m	烟气温度/℃	烟气处理设施	随葬品
捡灰炉	1	750	5.5	102	水幕除尘(a) ¹⁾	衣物
	2	750/二燃室温度 850	5.5	61.5		无
	3	850	12	130	急冷+旋风除尘+布袋除尘(d)	衣物
	4	750~800	12	96.8	水幕除尘(a)	
	5	400~500	10	120	水幕除尘+脱硫塔(b)	
	6	600	3	78	两道水幕除尘处理(b)	衣物
	7	750	3	80	水幕除尘+布袋除尘+活性炭(c)	无
	8	780	5	120	急冷+水幕除尘+旋风除尘(d)	少量衣物
平板炉	9	985	5	137	水幕除尘+旋风除尘(b)	
	10	850	5.5	113	水幕除尘(a)	衣物
	11	850	7	42	脱硫塔+布袋除尘+活性炭(c)	
	12	800~850	10	80		
	13	700~800	15	72	水幕除尘+布袋除尘(b)	油纸、衣物
	14		15	70		无
	15		15	66	水幕除尘+布袋除尘+活性炭(c)	无
	16	850~1000	11	45	水幕除尘+旋风除尘+布袋除尘(b)	纸钱

1) 按烟气处理设施类型分类

2.3.3 烟气处理设施

高温燃烧过程 PCDD/Fs 的控制主要通过减少源头污染和提高烟气处理设施的去除效率来实现. 陈彤等^[35]发现在水幕除尘的基础上加以改进而成的湿法除尘器对烟气 PCDD/Fs 的去除效率能达到 85% 以上. 国内研究表明,布袋除尘器加活性炭组合能较好地去除火化烟气中 PCDD/Fs^[12,13]. 布袋除尘器对日本火化机烟气中 PCDD/Fs 去除效率为 58%~70%^[17].

13 台火化机所配备的烟气处理设施按表 3 所示分类,即水幕除尘(a)、水幕除尘为主(b)、布袋除尘和活性炭为主(c)、含有烟气急冷设施(d),

PCDD/Fs 毒性当量浓度从高到低排序依次为 a>b>d>c,如图 3. 结果表明,布袋除尘器和活性炭能有效去除火化烟气中 PCDD/Fs,与国内研究结果相似^[10].

2.3.4 随葬品

在遗体火化过程中大量随葬品的引入不利于主炉保持平稳的燃烧工况. 日本典型火化流程中燃烧的主体是火化棺木和遗体,而不包括上述随葬品^[15]. 考虑到环境污染,国内少量管理先进的殡仪馆开始倾向于将遗体 and 随葬品分开火化,有研究者也建议将随葬品另炉处理^[14].

由于各地习俗所限,并考虑家属意愿,仅采集到

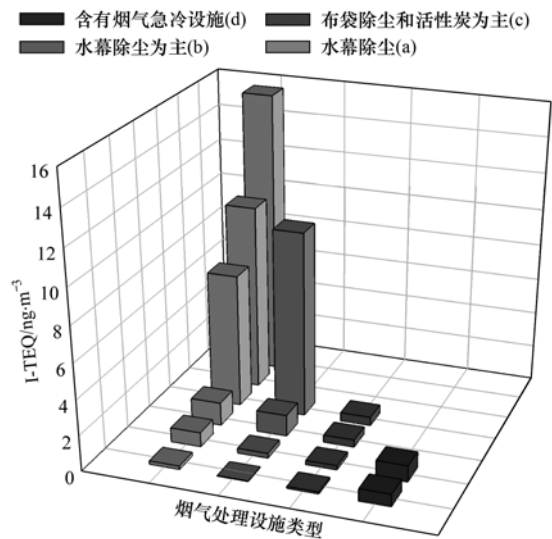


图3 烟气处理设施类型与PCDD/Fs毒性当量浓度关系

Fig. 3 Relationship of air pollution control device and the toxic equivalent concentration of PCDD/Fs in flue gas

一组有、无随葬品且其他条件不变时同一台平板炉烟气样品,即13和14号,结果发现后者PCDD/Fs毒性当量浓度是前者的1.8%。

2.3.5 综合因素

1号和2号,6号和7号,13号和15号,均同属于一台炉的不同烟气样品,但工况各有区别。7和15号均未将随葬品与遗体一同火化,且采集样品时分别比6和13号增加部分烟气处理设施(见表3);相对于1号而言,2号增设二燃室且无随葬品一同火化。结果显示,2号、7号、15号的PCDD/Fs毒性当量浓度分别为1号、6号、13号的2.3%、2.6%和1.1%,如图4所示。因此,实施以下措施或多措施组合,如增设二燃室、布袋除尘器+活性炭吸附组合处理设施、将随葬品另炉火化等,均可在一定程度上去除火化烟气中PCDD/Fs。

2.4 我国火化机烟气中二噁英排放因子

全国火化机数量较多,分布广阔,且受各地风俗限制,难以全面调查所有火化机烟气中二噁英的排放状况。在此情况下,本研究引入排放因子,以估算全国火化机烟气中PCDD/Fs的排放总量。

排放因子($\mu\text{g}\cdot\text{具}^{-1}$) = PCDD/Fs毒性当量浓度($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$) $\times$ 标干烟气量($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) $\times$ 火化时间(h) / 火化总具数(具)

因此本研究确定捡灰炉、平板炉烟气PCDD/Fs排放因子分别为45.9~22236 $\text{ng}\cdot\text{具}^{-1}$ 和184~17087 $\text{ng}\cdot\text{具}^{-1}$,平均值分别为6635 $\text{ng}\cdot\text{具}^{-1}$ 和2841 $\text{ng}\cdot\text{具}^{-1}$ 。

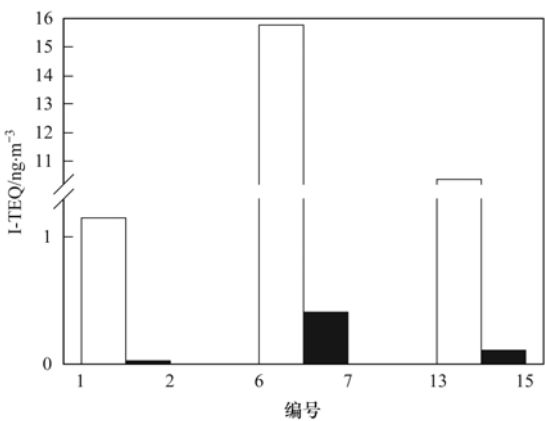


图4 部分样品的PCDD/Fs毒性当量浓度对比

Fig. 4 Contrast the toxic equivalent concentration of PCDD/Fs in six samples

估算2013年全国捡灰炉和平板炉年排放总量分别为0.22~104.3 $\text{g}\cdot\text{a}^{-1}$ 和0.86~80.1 $\text{g}\cdot\text{a}^{-1}$,平均值分别为31.1 $\text{g}\cdot\text{a}^{-1}$ 和13.3 $\text{g}\cdot\text{a}^{-1}$,火化机年排放总量平均值为22.2 $\text{g}\cdot\text{a}^{-1}$ 。王玮等^[13]于2004年和2007年估算得全国火化遗体产生PCDD/Fs毒性当量总量分别为11.2~46.9 $\text{g}\cdot\text{a}^{-1}$ 和16.5~59.4 $\text{g}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[36]。尽管2009年出台了国家行业标准,但全国火化机PCDD/Fs排放总量没有呈现明显降低的趋势。原因可能有,遗体火化率和火化数量不断增加;国内火化技术发展不均衡;烟气处理设施覆盖面小或者技术上不足以达到有效的去除效率;监管不到位等。

日本在2000年开始实施《大气污染防治法(The Air Pollution Control Act)》和《废物处置和公众清洁法(The Wastes Disposal and Public Cleansing Act)》,自此污染企业做出改进,如控制良好的完全燃烧状态和安装先进的烟气污染控制设备,火化PCDD/Fs排放因子是10年前的1/3~1/20,其平均值为1400 $\text{ng}\cdot\text{具}^{-1}$ ^[17]。说明政府加强监管和企业增加可行的烟气污染控制设备对降低火化机PCDD/Fs的排放非常有必要。

3 管理建议

近些年根据国家民政部门的工作部署,各地殡仪馆逐渐开展了等级认定工作,其中火化烟气污染物是否达标排放是等级认定的主要内容之一。因此根据本研究的实际案例和实验结果,提出以下运行及管理建议,为我国制定火化行业最佳可行性技术规范提供技术支撑。

(1)新馆建设时,应安装先进的火化机和智能

控制系统;增设二燃室,安装以活性炭喷射和布袋除尘为主的烟气处理设施;在烟道上开设内径 8mm 的采样孔和规范的采样平台。

(2)旧馆改造时,提高火化温度;在空间允许的情况下,烟气处理增设活性炭喷射+布袋除尘组合;空间不允许的情况下,将 2~3 条炉的尾气集中到一套烟气处理设施中处理,但须保证单炉运行时的气密性。

(3)加强烟气处理设施和管道维护,保证其气密性;有条件时,尽量将所有随葬品进行另炉火化;前一具火化完成并取出骨灰时,把炉膛进风口密封,保留其余热,后送入另一遗体进行火化;加强落实标准 GB 13801-2009;相关部门应将殡仪馆 PCDD/Fs 排放纳入监管范围;PCDD/Fs 监测要求可参照我国生活垃圾焚烧污染控制标准。

4 结论

(1)16 个样品中有 43.8% 达到国家排放限制中的一级标准,25.0% 超过三级标准的 3 倍以上。其中捡灰炉和平板炉达到一级标准的样品率分别为 25.0% 和 62.5%。这可能跟炉膛结构和火化方式有关。

(2)样品中 PCDD/Fs 异构体分布特征存在差异,以 2,3,7,8-TCDD, 2,3,4,7,8-PeCDF 和 2,3,4,6,7,8-HxCDF 单体毒性当量浓度占比最高。PCDFs/PCDDs 比值均大于 1,但变化范围较大(1.5~13.3),其原因有待进一步分析。

(3)通过对比分析发现,将随葬品另炉火化、增设二燃室、配备布袋除尘器和活性炭处理设施,能有效去除火化烟气中 PCDD/Fs。

(4)捡灰炉 PCDD/Fs 排放因子为平板炉的 2.3 倍。估算 2013 年全国火化遗体所产生的 PCDD/Fs 总量为 $0.22 \sim 104.3 \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$,范围跨度较大,将开展更多调查研究以掌握更详细的排放现状。

参考文献:

- [1] Lavric E D, Konnov A A, Ruyck J D. Dioxin levels in wood combustion—a review[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2004, **26**(2): 115-145.
- [2] Mari M, Domingo J L. Toxic emissions from crematories: a review[J]. *Environment International*, 2010, **36**(1): 131-137.
- [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.
- [4] 余刚,杨小玲,黄俊. 中国二噁英类持久性有机污染物减排控制战略研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,2008.
- [5] 蔡震霄,黄俊,张清,等. 二噁英类减排的国际动向和我国的战略构想[J]. *环境化学*, 2006, **25**(3): 277-282.
- [6] Chang S S, Lee W J, Wang L C, *et al.* Influence of the Southeast Asian biomass burnings on the atmospheric persistent organic pollutants observed at near sources and receptor site[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **78**(3): 184-194.
- [7] Wang L, Lu Y L, He G Z, *et al.* Factors influencing polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin and polychlorinated dibenzofuran (PCDD/F) emissions and control in major industrial sectors: Case evidence from Shandong Province, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(7): 1513-1522.
- [8] Edwards P. Review of emissions from crematoria in UK[J]. *Resurgam*, 2001, **44**: 81-128.
- [9] Eduljee G H, Dyke P. An updated inventory of potential PCDD and PCDF emission sources in the UK[J]. *Science of the Total Environment*, 1996, **177**(1-3): 303-321.
- [10] Hutzinger O, Fiedler H. From source to exposure: some open questions[J]. *Chemosphere*, 1993, **27**(1-3): 121-129.
- [11] Luthardt P, Mayer J, Fuchs J. Total TEQ emissions (PCDD/F and PCB) from industrial sources[J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(9-10): 1303-1308.
- [12] 熊程程,王玮,李大涛,等. 火化烟气中二噁英类排放特征及其对周边环境的影响研究[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(9): 192-197.
- [13] 王玮,肖成龙,李大涛,等. 中国火葬场二噁英类污染物排放及减排技术研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(8): 1246-1251.
- [14] 任玥,田洪梅,李楠,等. 燃油式火化机排放烟气中二噁英类污染水平和排放特征[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(11): 1245-1250.
- [15] Takeda N, Takaoka M, Fujiwara T, *et al.* PCDDs/DFs emissions from crematories in Japan[J]. *Chemosphere*, 2000, **40**(6): 575-586.
- [16] Takeda N, Takaoka M, Fujiwara T, *et al.* Measures to prevent emissions of PCDDs/DFs and co-planar PCBs from crematories in Japan[J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(4-7): 763-771.
- [17] Takeda N, Takaoka M, Oshita K, *et al.* PCDD/DF and co-planar PCB emissions from crematories in Japan [J]. *Chemosphere*, 2014, **98**: 91-98.
- [18] 于粤. 沈阳殡葬行业烟气环境污染物排放现状[J]. *中国环境监测*, 2006, **22**(4): 84-86.
- [19] Wang L C, Lee W J, Lee W S, *et al.* Characterizing the emissions of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans from crematories and their impacts to the surrounding environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(1): 62-67.
- [20] 张漫雯,张素坤,李艳静,等. 检测沉积物中多氯代二苯并对二噁英和多氯代二苯并呋喃(PCDD/Fs)的前处理方法优化[J]. *环境化学*, 2011, **30**(3): 723-724.
- [21] 青宪,苏原,苏青,等. 广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 464-469.
- [22] 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.
- [23] 邢啸林, 熊程程, 尹荔塋, 等. 遗体火化二噁英类排放特征与控制对策研究[A]. 见: 中国环境科学学会学术年会论文集[C], 2012.
- [24] Kao J H, Chen K S, Chang-Chien G P, *et al.* Emissions of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans from various stationary sources[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2006, **6**(2): 170-179.
- [25] Chiu J C, Shen Y H, Li H W, *et al.* Emissions of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans from an electric arc furnace, secondary aluminum smelter, crematory and joss paper incinerators[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2011, **11**(1): 13-20.
- [26] Zhang G, Hai J, Cheng J. Characterization and mass balance of dioxin from a large-scale municipal solid waste incinerator in China[J]. *Waste Management*, 2012, **32**(6): 1156-1162.
- [27] Conesa J A, Rey L, Egea S, *et al.* Pollutant formation and emissions from cement kiln stack using a solid recovered fuel from municipal solid waste[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(13): 5878-5884.
- [28] Altarawneh M, Dlugogorski B Z, Kennedy E M, *et al.* Mechanisms for formation, chlorination, dechlorination and destruction of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, **35**(3): 245-274.
- [29] Weber R, Hagenmaier H. PCDD/PCDF formation in fluidized bed incineration [J]. *Chemosphere*, 1999, **38**(11): 2643-2654.
- [30] 李晓东, 邱坤赞, 徐旭, 等. 城市生活垃圾流化床焚烧时 PCDD/Fs 排放特性的研究[J]. *工程热物理学报*, 2001, **22**(4): 526-528.
- [31] 陈彤, 李晓东, 严建华, 等. 垃圾焚烧炉飞灰中二噁英的分布特性[J]. *燃料化学学报*, 2004, **32**(1): 59-64.
- [32] 王玮, 肖成龙, 李大涛, 等. 火葬场二噁英现状测试与控制对策研究[A]. 见: 持久性有机污染物论坛暨第六届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集[C], 哈尔滨: 2011.
- [33] Stanmore B R. The formation of dioxins in combustion systems [J]. *Combustion and Flame*, 2004, **136**(3): 398-427.
- [34] 付建英, 陈彤, 吴海龙, 等. SO₂ 抑制二噁英从头合成的实验及其过程模拟[J]. *化工学报*, 2014, **65**(9): 3687-3693.
- [35] 陈彤, 李晓东, 陆胜勇, 等. 湿法除尘对垃圾焚烧炉中二恶英排放特性影响的试验研究[J]. *电站系统工程*, 2002, **18**(6): 45-47.
- [36] 王玮, 李伯森, 肖成龙, 等. 火化烟气中二噁英减排与控制研究进展[A]. 见: 持久性有机污染物论坛暨第三届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集[C], 北京: 2008.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行