

# 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铋地球化学分布特征 ..... 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)

## 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

(重庆市环境监测中心, 重庆 401147)

**摘要:** 采用现场监测方式调查了西南地区 6 家干法水泥窑废气中 PCDD/Fs 排放情况。结果表明, 未协同处置废物的水泥生产企业 PCDD/Fs 排放浓度范围(以 TEQ 计)为  $0.0029 \sim 0.0062 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均  $0.0043 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 添加污泥作为原料和燃料的水泥企业的 PCDD/Fs 排放水平为  $0.028 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 。所有水泥窑的二噁英浓度都明显低于我国水泥工业大气污染物排放标准 ( $0.1 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ )。6 家水泥企业 PCDD/Fs 排放因子为  $0.0089 \sim 0.084 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ , 接近或低于 UNEP 发布的水泥行业最低排放因子 ( $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ ); 其中协同处置污泥水泥窑的最高, 约为其他 5 家平均排放因子 ( $0.011 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ ) 的 7.6 倍。另外, 两类水泥窑废气 PCDD/F 异构体分布特征存在明显差异。结果表明, 采用现代预热干法工艺的水泥企业的二噁英排放水平较低, 可进一步开发我国水泥企业协同处置废物的能力。

**关键词:** 水泥窑; 二噁英; 排放因子; 固体废物; 大气排放

中图分类号: X131.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0035-06

## 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, GUO Zhi-shun, ZHU Ming-ji, DENG Li, SUN Jing, ZHANG Qin

(Chongqing Environmental Monitoring Center, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** Six cement kilns were measured for emissions of PCDD/Fs in the Southwest Area, China. The results indicated that the emission levels of PCDD/Fs were  $0.0029\text{-}0.0062 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  (Average,  $0.0043 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ) from cement kilns which did not burn solid waste, and  $0.028 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  from co-processing sewage sludge in cement kiln. The levels of PCDD/Fs emissions from cement manufacturing in the Southwest Area were significantly below the national emissions standard ( $0.1 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Emission factors of PCDD/Fs from the six cement kilns varied between  $0.0089$  and  $0.084 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$  cement, which were near or below the lowest emission factor reported by UNEP in 2005. Moreover, the emission factor of PCDD/Fs from co-processing sewage sludge in cement kiln was 7.6 times of the average factors from the other five cement kilns. Moreover, congener distribution of PCDD/F in stack gas from the two types of cement kilns was very different. The results showed that modern dry process cement kilns with preheating have lower emissions of PCDD/Fs. This suggested that the product of co-processing solid waste in cement kilns should be largely enhanced in China in future.

**Key words:** cement kilns; dioxin; emission factor; solid waste; atmospheric emission

水泥生产属于斯德哥尔摩公约列举的二噁英(PCDD/Fs)排放量较大的第四大类潜在排放源之一<sup>[1]</sup>。欧、美等发达国家自 20 世纪 90 年代起建立的 PCDD/Fs 排放清单中也都将水泥生产行业列为重点关注排放源<sup>[1-3]</sup>。

我国是水泥生产与消费大国, 2011 年我国水泥产量达到 20.9 亿 t, 占世界水泥总产量的 50% 以上。水泥企业数量众多, 约 4 000 家<sup>[4]</sup>。从原料和燃料构成看, 水泥厂主要分为两类: 一类为不添加废物作为燃料或原料的水泥企业; 另一类是添加废物作为原料或燃料的水泥企业。从水泥行业的可持续发展来看, 尽可能地节约非再生矿物燃料和原料, 并利用废物和辅助材料来代替应是水泥行业未来发展的主要方向之一。欧洲、美国、日本等发达国家在水泥生产中添加各类废物作为原料或燃料已有 30 多年的历史, 较为普遍。如德国, 2005 年时 80% 以上

的水泥生产企业开展了废物协同处置业务。而目前, 我国水泥工业的燃料替代率几乎为零, 远低于欧美发达国家的平均水平。但近年, 在我国大力发展循环经济、节能减排等政策的引导下, 以及我国工业和生活废物大量增加的情况下, 水泥窑协同处置废物产业方兴未艾。

但值得注意的是, 国外大量的研究表明, 水泥生产协同处置废物可能会增加 PCDD/Fs 的排放<sup>[2]</sup>。而目前国内关于水泥窑 PCDD/F 大气排放情况的报道还几乎没有。为了解我国水泥行业 PCDD/F 污染排放情况, 本研究于 2010~2011 年选取了西南地区

收稿日期: 2013-04-18; 修订日期: 2013-05-23

基金项目: 重庆市科技创新能力建设项目 (cstc2011pt-kyys20002); 环境保护公益性行业科研专项 (201109001-06)

作者简介: 张晓岭 (1978~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为持久性有机污染物监测及环境迁移转化, E-mail: zxltj@aliyun.com

6家水泥企业进行了二噁英排放研究。一是为我国履约建立二噁英排放清单提供基础数据；二是为我国制定水泥窑废物协同处置二噁英污染控制政策、措施提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 目标企业信息

表1 水泥企业基本信息

Table 1 Basic information of cement enterprises

企业编号	企业类别 (是否添加固废)	建设日期 (年)	水泥产量 $/t \cdot d^{-1}$	燃料	除尘设备
CK1	Y	1998	2 000	原煤和污泥	电除尘器
CK2	N	2008	4 800	煤粉	布袋除尘器
CK3	N	2003	2 400	原煤	旋风除尘
CK4	N	2004	1 200	原煤	电除尘器
CK5	N	2004	2 000	无烟煤	布袋除尘器
CK6	N	2007	3 000	原煤	电除尘器

### 1.2 样品采集及分析

废气中 PCDD/Fs 排放监测和分析方法采用国家标准“环境空气和废气 PCDD/Fs 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),同时参考欧盟 EN 1948,采样点位和采样频次参考“固定源废气监测技术规范”(HJ/T 397-2007)和“危险废物(含医疗废物)焚烧处置设施 PCDD/Fs 排放监测技术规范”(HJ/T 365-2007)。每个采样点位至少采集 3 个样品,连续采样,分别测定其排放浓度,以平均值作为报告结果(11% O<sub>2</sub> 计)。

### 1.3 质量保证/质量控制

实验室空白和全程空白都低于评价浓度的 1/10,符合方法要求。采样标和提取标回收率分别为 86.6%~121% 和 45%~110%,均符合 HJ 77.2-2008 质控要求。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PCDD/Fs 排放浓度

CK1 作为唯一添加废物的水泥生产企业,在调查当日其固体废物添加量分别为 2.1% 的干污泥和 0.59% 的湿污泥。其窑尾废气中 PCDD/Fs 排放浓度(以 TEQ 计)为 0.028  $ng \cdot m^{-3}$ ; 其他 5 家未添加固废的水泥生产企业 PCDD/Fs 排放浓度范围为 0.0029~0.0062  $ng \cdot m^{-3}$ ,平均 0.0043  $ng \cdot m^{-3}$ 。尽管添加固废水泥企业(CK1)的 PCDD/Fs 排放浓度显著高于所有未添加固废水泥企业(CK2-CK5)的 PCDD/Fs 排放浓度,约为其平均排放浓度(0.0043

经调查,我国水泥企业生产工艺主要为干法旋转窑,立窑和湿法工艺因不符合节能减排要求,近年已逐步被淘汰。因此,本次水泥行业 PCDD/Fs 排放调查对象为采用干法旋转窑工艺的水泥企业。其中,CK1 添加污泥作为原料和燃料,其它水泥厂均不添加废物作为燃料和/或原料,其燃料皆为煤碳。企业基本信息见表 1。

$ng \cdot m^{-3}$ ) 的 6.5 倍,但上述两类企业的二噁英浓度都显著低于我国水泥工业大气污染物排放标准(0.1  $ng \cdot m^{-3}$ , GB 4915-2004),以及欧盟、美国和加拿大等国标准(表 2),与国外绝大部分监测所得浓度范围相一致(表 2)。

关于水泥窑协同处置废物是否会增加大气二噁英排放还存在争议。Kuhlmann 等<sup>[5]</sup>在德国开展的一项研究表明:与燃煤时相比,在水泥窑中引入废轮胎和各种不同氯含量溶剂等废物后,造成了二噁英排放量的显著增加。具体就是,燃烧溶剂时,PCDD/Fs 从 0.002~0.006  $ng \cdot m^{-3}$  增加到 0.05  $ng \cdot m^{-3}$ ,燃烧废轮胎时则增加到 0.08  $ng \cdot m^{-3}$ 。Stobiecki 等<sup>[6]</sup>在波兰也进行了相关研究,在 3 d 时间内向水泥窑中加入 12 种过期杀虫剂的混合物。燃煤时,PCDD/Fs 的排放水平为 0.009  $ng \cdot m^{-3}$ ,在分别添加了 11.5%、29.4% 和 30.5% 上述含有 12 种杀虫剂的混合物后,PCDD/Fs 排放量分别为 0.015、0.053 和 0.068  $ng \cdot m^{-3}$ 。该结果表明杀虫剂混合物的添加使烟气中二噁英的排放浓度显著增加,且与废物添加量呈正比关系。上述研究表明,添加废物会使水泥企业废气中二噁英毒性当量排放浓度显著增加,但只要废物种类和废物添加量比例合适、生产过程和尾气处理设施(APCD)温度控制效果好,仍能够满足大部分国家所规定的 0.1  $ng \cdot m^{-3}$  的排放标准。

但也有研究认为,代用燃料的使用对 PCDD/Fs 的排放水平没有影响。2001 年,德国对 37 个水泥厂进行了 PCDD/Fs 大气排放调查,这些水泥企业大部

分都采用配备预热器和预煅烧器的干法水泥窑工艺<sup>[7]</sup>, PCDD/Fs 排放浓度都低于  $0.065 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其中有 7 次未检测出 PCDD/Fs. 文献[8]总结了 1999~2002 年间德国水泥窑的全部 PCDD/Fs 排放情况发现, 尽管采用废物燃料代替矿物燃料的百分比从 1999 年的 23% 上升到 2002 年的近 35%, 但 PCDD/Fs 排放水平并没有显著差异, 因此该研究认为, 在德国, 代用燃料的使用对水泥厂 PCDD/Fs 的排放水平没有影响.

Karstensen<sup>[9]</sup>综合评价了 2 000 多个水泥厂 PCDD/Fs 排放数据认为, 一般使用预热/预煅烧系统的现代干法水泥企业的 PCDD/Fs 排放水平低于

使用湿法或旧的干法长窑水泥企业的 PCDD/Fs 排放水平; 在大多数应用现代化生产工艺的水泥企业中添加废物, 只要日常管理和生产条件控制良好, PCDD/Fs 的大气排放水平能够满足  $0.1 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  限排标准. 因此, Karstensen<sup>[9]</sup>认为在水泥生产行业中, 正确负责地使用或添加有机危险废物来代替部分燃料或原料并不是影响 PCDD/Fs 排放量增加的首要因素, 影响 PCDD/Fs 排放量增加的主要参数好像是原料中有机物/前体的可利用性及废气污染控制装置的工作温度. 他建议在湿法和干法长水泥窑中应尽量避免添加有机物含量较高的废物, 并且使尾气快速冷却.

表 2 国内外水泥生产行业二噁英排放水平及排放标准比较

Table 2 Comparison of dioxin emission levels and emission standards in the global cement industry

国别	企业编号	企业类别 (是否添加固废, Y/N)	排放浓度 / $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	水泥厂数量	调查时间 (年)	文献
中国	CK1	Y	0.028			
	CK2	N	0.004 1			
	CK3	N	0.002 9		2010	本研究
	CK4	N	0.004 2			
	CK5	N	0.006 2			
	CK6	N	0.004 2			
平均值(无固废添加企业 CK2-CK5)		N	0.004 3			
澳大利亚		Y/N	0.001 ~0.07		1991 ~2001	[10]
加拿大		Y	0.005 4 ~0.057	8	1999	[11]
丹麦		Y	0.035	7	2001	[12]
欧盟		Y/N	0.001 ~0.16 0.017	110		[13]
德国		Y	0.02	50	1989 ~1996	[14]
德国		Y	<0.065	37	2001	[7]
日本		Y	<0.094	54	2000	[15]
日本		Y	<0.126	53	2001	
日本		Y	<0.096	57	2002	
波兰		N	0.009	1	2003	[16]
		废物比例 11.5%	0.015	1		
		废物比例 29.4%	0.053	1		
英国		废物比例 30.5%	0.068	1		
			0.012 ~0.423	5	1999	[16]
		Y	0.005 0	1	1998	[17]
美国		N	0.008 4	1		
		Y	0.074	1		
			各国排放标准/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$			
中国			0.1			[18]
欧盟			0.11			[19]
美国			0.29			[20]
加拿大			0.08			[21]

## 2.2 PCDD/Fs 排放因子

本研究及国内外水泥企业 PCDD/F 排放因子见表 3. 从中可见, 所有 5 家未添加固废水泥生产企业的 PCDD/Fs 排放因子 ( $0.008 9 \sim 0.014 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ ) 均显著低于 UNEP 发布的第 4 级排放因子  $0.05$

$\mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ ; 也低于英国、美国和德国等国外的相关研究结果, 与澳大利亚的调查结果 ( $0.004 3 \sim 0.25 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ ) 较一致. 但值得注意的是, 以上国外的研究结果中包括湿法窑的数据, 这可能是造成其结果偏高的原因之一.

表 3 国内外水泥企业 PCDD/F 排放因子比较

Table 3 Comparison of dioxin emission factor in the global cement industry

企业名称/国别	企业编号	企业类别 (是否添加固体废物, Y/N)	排放因子 / $\mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$	水泥厂 数量	调查时间	文献
中国	CK1	Y	0.084		2010	本研究
	CK2	N	0.01			
	CK3	N	0.008 9			
	CK4	N	0.01			
	CK5	N	0.014			
	CK6	N	0.012			
平均值(无固废添加企业 CK2-CK5)		N	0.011			
澳大利亚		N	0.004 3 ~ 0.25		1991 ~ 2001	[10]
澳大利亚		Y	0.008 7 ~ 0.28			
英国		N	0.025 ~ 1.04		HMIP	[1]
英国	Y	0.025 ~ 1.08				
美国		N	0.27		1996	[2]
美国	Y	20.9				
美国		Y	0.07 ~ 5.4 (平均 2.0)	3	2000	
德国		N	0.12 ~ 0.59			[10]
欧盟		Y/N	0.001 ~ 5	230		[13]
挪威		Y	0.04 ~ 0.40	50		[9]
西班牙		Y	0.014	37	2001	[22]
Holcim(企业)		Y	0.104	71	2001	[9]
Holcim(企业)		Y	0.73	82	2002	
Holcim(企业)		Y	0.058	91	2003	
UNEP		排放因子分级				[1]
		Class1 立窑	5			
		Class2 旧湿法窑, ESP 温度 > 300°C	5			
		Class3 旋转窑, ESP/FF 温度 200 ~ 300°C	0.6			
		Class4 湿法窑 ESP/FF 温度 < 200°C				
		带预热系统干法窑 ESP/FF < 200°C	0.05			

添加污泥企业(CK1)的 PCDD/F 排放因子为  $0.084 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ , 稍高于 UNEP(2005) 年发布的水泥行业 4 级标准  $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ , 远低于其 3 级标准  $0.6 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ . 与国外相关国家和企业的调查数据相比, CK1 的 PCDD/F 排放因子属于中等偏低水平.

### 2.3 PCDD/Fs 异构体分布特征

本研究中, 添加废物水泥窑(CK1)和未添加废物水泥窑废气中 PCDD/Fs 异构体分布特征分别见图 1 和图 2. 从中可见, 两类水泥窑废气中 PCDD/F 异构体表现出了不同的分布特征. 在添加废物的水

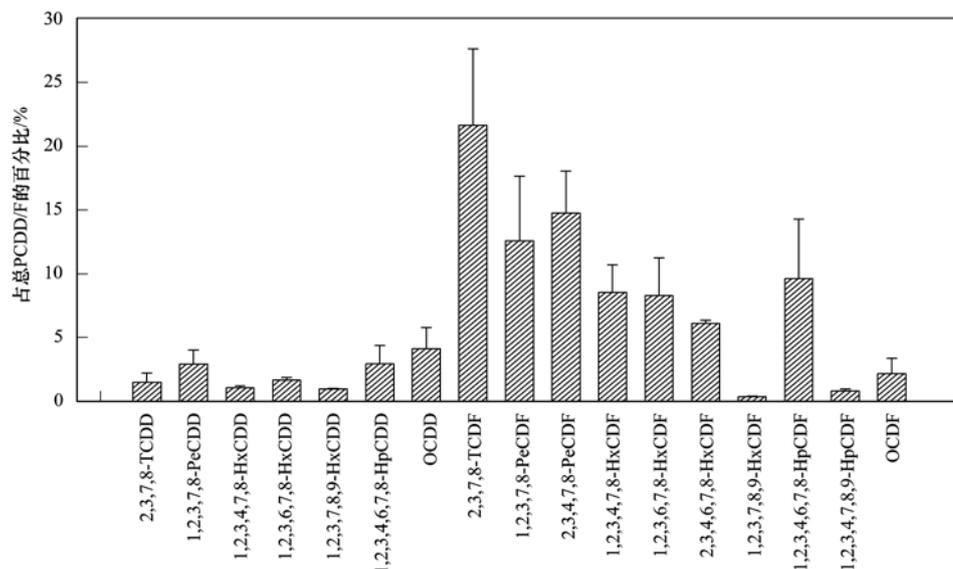


图 1 添加固体废物水泥窑废气中 PCDD/F 异构体特征

Fig. 1 Congener distribution of PCDD/F in stack gas from the cement kiln burning solid waste

泥窑中, PCDD/F 含量最丰富的 4 种异构体分别为 2,3,7,8-TeCDF、2,3,4,7,8-PeCDF、1,2,3,7,8-PeCDF 和 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF, 占总 PCDD/F 的百分比分别为 21.64%、14.75%、12.58% 和 9.63%; PCDD 中含量最丰富的异构体为 OCDD, 百分比为 4.12%。在未添加固废水泥窑废气中, 4 种含量最丰富的异构体则分别为 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF、2,3,7,8-TeCDF、OCDD 和 1,2,3,6,7,8-HxCDF, 其含量百分比分别 14.41%、13.72%、11.53% 和 9.20%。目前, 关于水泥窑中 PCDD/Fs

异构体分布特征的报告不多, 无从比较。

PCDFs 和 PCDDs 的比值 ( $R_{PCDF/PCDD}$ ) 常被用来评价二噁英生成机制<sup>[23~26]</sup>。本研究中添加污泥和未添加废物两类水泥窑废气中  $R_{PCDF/PCDD}$  分别为 5.59 和 3.49, 都远大于 1。这说明两类水泥窑 PCDD/Fs 的生成途径可能都是以从头合成为主, 这与其它研究结果相一致<sup>[9]</sup>。Karstensen<sup>[9]</sup> 研究认为, 尽管关于水泥窑中 PCDD/Fs 的详细生成机制尚不清楚, 但现有研究结果表明, 水泥窑预热区及预热后区域的从头合成是 PCDD/Fs 最主要的生成途径。

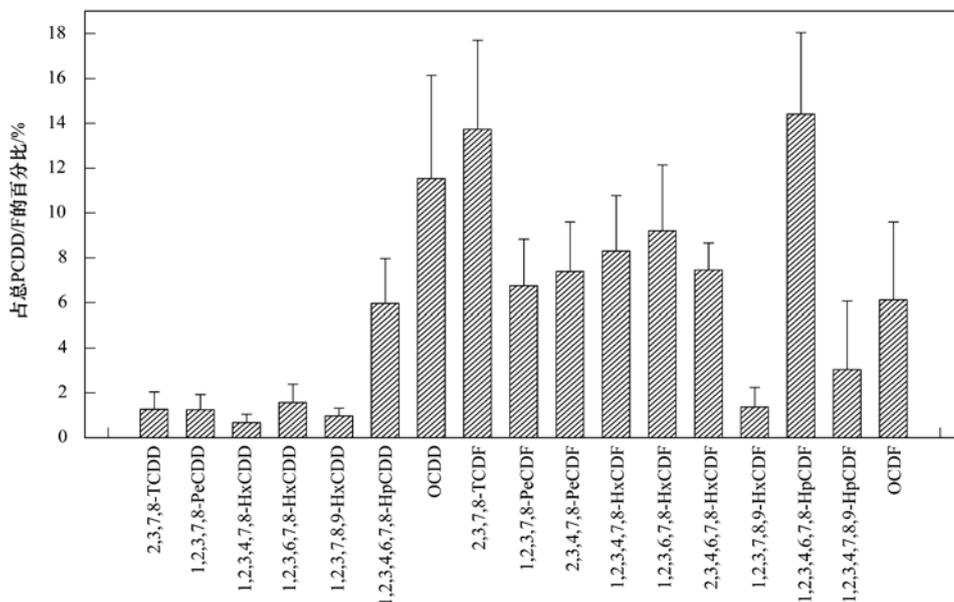


图2 无废物添加水泥窑废气中 PCDD/F 异构体分布特征

Fig. 2 Congener distribution of PCDD/Fs in stack gas from cement kilns

### 3 结论

此次被调查水泥企业的 PCDD/Fs 排放水平都低于我国和目前国外最严格的限排标准; 与国外相关研究结果相比, 也属于较低水平。这表明, 本调查企业所采用的现代预热干法水泥工艺符合 PCDD/Fs 控制最佳可行技术 (BAT)。本研究及大量国外研究结果表明, 预热干法水泥窑可用于污泥等固体废物的协同处理。但值得注意的是, 添加污泥的 CK1 企业 PCDD/Fs 毒性当量排放浓度和排放因子都明显高于其它未添加固废水泥窑的 PCDD/Fs 排放水平。这就要求其日常管理和工况运行条件较其它未添加固废水泥生产企业应更加严格, 污泥添加比例也应严格控制, 并应定期监控其 PCDD/Fs 的排放情况。国家需针对水泥生产废物协同处置设施制定最佳可行性技术规范, 行业准入制度, 日常监管制度、污染物排放和监测技术等标准规范, 进一步强化监管。

### 参考文献:

- [1] UNEP Chemicals. Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases [R]. Geneva: UNEP Chemicals, 2005.
- [2] U. S. EPA. An Inventory of Sources and Environmental Releases of Dioxin-Like Compounds in the U. S. for the Years 1987, 1995, and 2000 (Final Report) [R]. Washington, DC, U. S. Environmental Protection Agency, November 2006. EPA/600/P-03/002F, <http://cfpub.epa.gov/ncea/CFM/recordisplay.cfm?deid=159286>.
- [3] Quass U, Fermann M, Bröker G. The European Dioxin Emission Inventory Stage II, Volume 3, Assessment of Dioxin Emissions until 2005 [R]. Germany: European Commission, 2000.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [5] Kuhlmann K, Schnider M, Sollenbohrer F. PCDD/PCDF-emissions from German cement clinker kilns [R]. Organohalogen Compound. 1996, 27, 78.
- [6] Stobiecki S, Fuszara E, Baron L, et al. Disposal of Obsolete Pesticides as an alternative fuel in cement kiln [A]. In: Seventh

- International HCH and Pesticides Forum[C], Kiev, 2003.
- [ 7 ] VDZ. Environmental Data of the German Cement Industry 2001 [R]. Düsseldorf, Germany: VDZ, 2002.
- [ 8 ] VDZ. Environmental Data of the German Cement Industry 2002 [R]. Düsseldorf, Germany: VDZ, 2003.
- [ 9 ] Karstensen K H. Formation, release and control of dioxins in cement kilns[J]. Chemosphere, 2008, **70**(4): 543-560.
- [10] Environment Australia. Sources of PCDD/PCDF and Furans in Australia-Air emissions-Revised edition [R]. Australia: Environment Australia, Chemicals and environment branch, GPO Box 787, Canberra ACT 2601, 2002.
- [11] Environment Canada. Level of Quantification Determination: PCDD/PCDF and Hexachlorobenzene [R]. Analysis and Air Quality Division, Environmental Technology Centre, November, 1999.
- [12] Danish Environmental Protection Agency. Substance flow analysis for dioxins in Denmark [R]. Environmental Project No. 570. Copenhagen, Denmark: Danish Environmental Protection, 2000.
- [13] Van Loo W. European PCDD/PCDF data from the cement industry[R]. CEMBUREAU-The European Cement Association, 2004, 55, rue d'Arlon-B- 1040 Brussels. < <http://www.cembureau.be> >.
- [14] Schreiber R, Evers J J, Winders W H. PCDD/PCDF emissions and cement kiln operations[A]. In: Proceedings of the Waste Combustion in Boilers and Industrial Furnaces Conference[C]. Pittsburgh, PA: AWMA, 1995.
- [15] Karstensen K H. Formation and Release of POPs in the Cement Industry[R]. Norway: SINTEF, 2006.
- [16] Alcock R E, Gemmill R, Jones K C. Improvements to the UK PCDD/F and PCB atmospheric emission inventory following an emissions measurement programme[J]. Chemosphere, 1999, **38**(4): 759-770.
- [17] Federal Register. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants-US EPA-Final Rule[S]. Part II, 40 CFR Part 60, September 30, 1999. 52827-53077.
- [18] GB 4915-2004, 水泥工业大气污染物排放标准[S].
- [19] Bollmacher H. EN 1948-reference for monitoring legal Dioxin limit values and reference for long term measurements[J]. Analytical Sciences, 2001, **17**(ICAS2001): i551-i554.
- [20] Federal Register. National Emissions Standards for Hazardous Air Pollutants-US EPA-Final Rule[S]. Part II, 40 CFR Parts 63, 266, and 270, February 14, 2002. 6968.
- [21] Canadian Council of Ministers of the Environment. Canada-Wide Standards for Dioxins and Furans[C]. Winnipeg: CCME Council of Ministers, 2001.
- [22] Fabrellas B, Ruiz M L, Abad E, *et al.* First evaluation of PCDD/PCDFs releases to the atmosphere from the manufacture of cement in Spain [J]. Organohalogen Compounds, 2002, **56**: 139.
- [23] Lin L F, Lee W J, Li H W, *et al.* Characterization and inventory of PCDD/F emissions from coal-fired power plants and other sources in Taiwan [J]. Chemosphere, 2007, **68**(9): 1642-1649.
- [24] Ni Y W, Zhang H J, Fan S, *et al.* Emissions of PCDD/Fs from municipal solid waste incinerators in China [J]. Chemosphere, 2009, **75**(9): 1153-1158.
- [25] 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.
- [26] Li H W, Lee W J, Huang K L, *et al.* Effect of raw materials on emissions of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans from the stack flue gases of secondary aluminum smelters [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **147**(3): 776-784.

## 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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行