

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

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

PM_{2.5}浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例 吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)

北京地区近35年大气污染扩散条件变化 郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)

北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响 韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)

北京山谷风环流特征分析及其对PM_{2.5}浓度的影响 董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)

北京市建筑施工扬尘排放特征 薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)

生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征 吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)

广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O₃与SOA的生成潜势 邹宇,邓雪娇,李菲,殷长秦(2246)

南京北郊大气臭氧周末效应特征分析 王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)

亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降 王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)

宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性 王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青耀,米持真一,吕森林(2273)

垃圾焚烧厂二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估 杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)

重庆市新型干法水泥厂汞排放特征 张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)

轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性 王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)

不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性 楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)

西江水氧同位素组成的空间变化及环境意义 许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)

基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程 韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)

三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较 姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)

滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征 王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)

香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算 罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焱,黄应平(2345)

大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价 张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)

海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成 齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)

两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用 王晨焱,姜括,谢文龙,汪磊(2373)

高地下水地区透水铺装控制径流污染的现场实验 金建荣,李田,时珍宝(2379)

稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚 张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)

超声、紫外增强H₂O₂/KI降解磺胺甲基嘧啶 魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)

不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比 姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)

铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果 郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周徽(2412)

组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析 张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)

温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响 张玲,彭党聪,常蝶(2429)

海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性 冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)

不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析 周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)

磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响 周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)

碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制 秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)

外源Ca²⁺对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响 任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)

膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析 张崇森,牛全睿,徐雨梅,王院梅,王岱,武少华(2477)

反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析 谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)

硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制 李欢,王磊,王亚楠(2496)

关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征 乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)

基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析 陈秀端,卢新卫(2513)

基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例 佟瑞鹏,杨校毅(2522)

Eh、pH和铁对水稻土砷释放的影响机制 钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)

典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系 陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)

复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果 陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)

两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果 田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)

大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性 王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)

源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响 杨宁伟,毕二平(2568)

地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响 罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)

长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N₂O排放的影响 郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)

基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径 袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)

广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价 王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)

活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响 甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏莞,周俊(2607)

工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展 王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)

《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)

垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估

杜国勇¹, 汪倩¹, 张姝琳², 张素坤³, 邓春萍¹, 张洪铭¹, 朱盟翔¹, 蒋昕¹, 朱成旺¹, 任燕玲¹

(1. 西南石油大学化学化工学院, 成都 610500; 2. 中国石油四川石化有限责任公司, 成都 611930; 3. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 通过对我国使用不同类型焚烧炉的两个城市垃圾焚烧厂进行环境空气采样及分析, 初步评估两厂区活动场所内二噁英污染水平、污染特征, 以及对污染物进行来源解析, 初步评估职业人群在不同劳动强度下的二噁英暴露风险. 结果表明: ①两生活垃圾焚烧厂厂区环境空气的二噁英毒性当量浓度(以 I-TEQ 计)范围为 0.034 ~ 2.152 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$, 大部分点位的 I-TEQ 值都超过了环境空气质量标准, 其中厂房焚烧炉后区域的毒性当量浓度较高. ②焚烧厂环境空气中二噁英类化合物主要以 OCDD 和 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD 为主, 其中焚烧炉类型为炉排炉的 A 厂工作场所内的环境空气受该厂焚烧烟气及飞灰一定的影响, 而焚烧炉类型为循环流化床的 B 厂工作场所处空气受排放烟气的影响不大. ③焚烧厂内二噁英个体呼吸暴露水平为 0.01 ~ 1.10 $\text{pg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 部分个体的呼吸暴露值超过了评价限值, 焚烧炉后为高暴露区域.

关键词: 二噁英; 城市垃圾焚烧厂; 污染; 工作厂区; 呼吸暴露

中图分类号: X51; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2280-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201611030

Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator

DU Guo-yong¹, WANG Qian¹, ZHANG Shu-lin², ZHANG Su-kun³, DENG Chun-ping¹, ZHANG Hong-ming¹, ZHU Meng-xiang¹, JIANG Xin¹, ZHU Cheng-wang¹, REN Yan-ling¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. PetroChina Sichuan Petrochemical Company Limited, Chengdu 611930, China; 3. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: To assess the pollution levels, characteristics, and the pollution sources and occupational inhalation exposure of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) in the workshops, ambient air samples in different types of incinerators of two municipal solid waste incinerators (MSWI) were collected and analyzed. The results showed that ① The I-TEQ concentration ranged from 0.034-2.152 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ in the two waste incineration plants, and the most sites' I-TEQ exceeded the ambient air quality standard. Besides, the I-TEQ concentration behind the incineration plant was higher than others. ② The dioxins in incineration plant were dominated by OCDD and 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD. For MSWI A, the flue gas and the fly ash had major effect on PCDD/Fs, while the dioxins pollution in MSWI B was only affected by the fly ash. ③ Occupational inhalation exposure of PCDD/Fs was 0.01-1.10 $\text{pg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ in incineration plant, some occupational inhalation exposure values exceeded the evaluation standard, and the areas behind the incinerators were evaluated to have a high exposure risk.

Key words: PCDD/Fs; MSWI; pollution; workshops; inhalation exposure

二噁英是多氯二苯并二噁英和多氯二苯并呋喃(PCDD/Fs)的统称, PCDD/Fs 具有极强的毒性, 其中 2,3,7,8-TCDD 毒性最大, 是人们无意识合成的毒性最强的化合物之一^[1], 对人体健康危害极大, 具有极强的致癌性、致畸性和致突变性等^[2,3].

在垃圾焚烧过程中, 由于高温、有机物的不完全燃烧、金属物质的催化等作用, 为二噁英类物质生成提供了最佳环境条件, 因此垃圾焚烧成为二噁英类污染物排放的主要来源之一^[4]. 根据美国国家科学院推荐的评估方法, 比利时、西班牙、中国台湾等国家和地区^[5-7]先后对城市垃圾焚烧厂排放烟气进行人体健康风险评估发现, 人们对二噁英的

暴露风险主要来自食物的消化吸收、呼吸空气或颗粒物、皮肤接触污染. 而对于在垃圾焚烧行业环境内工作的人群, 呼吸是人体暴露的主要途径, 虽然接触时间不长, 但单位时间内暴露剂量相对较大^[8], 造成较高的健康风险. 我国人体暴露与风险评价的相关研究与工作相对于其他国家起步较晚, 尚处于探索阶段, 大多是对污水处理厂、采矿区、核工业等重大污染场地进行重金属和无机物的健康风险评

收稿日期: 2016-11-04; 修订日期: 2016-12-23

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2016ZX05040-003)

作者简介: 杜国勇(1964~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为油气田环境保护, E-mail: guoyongdu@126.com

价^[9],对于垃圾焚烧厂区相关研究甚少。

有研究表明,焚烧炉类型、环境介质及所处地区等是影响二噁英浓度水平及分布特征的重要因素^[10~14]。我国垃圾焚烧厂焚烧炉类型主要为炉排炉和流化床^[15],因此本文以国内两大类型垃圾焚烧厂(A厂焚烧炉类型为炉排炉,B厂焚烧炉类型为循环流化床)为研究对象,通过采集厂区活动场所环境空气样品,分析样品中的二噁英类物质污染水平及其分布特征,评估职业工人二噁英呼吸暴露风险情况,以期为我国职业场所的二噁英污染水平及健康危害等相关研究提供基础数据,并为改善相关工人工作环境、建立作业环境监控等方面提供科学依据。

1 材料与与方法

1.1 仪器与试剂

1.1.1 实验仪器

高分辨率气相色谱-高分辨率质谱联用仪(HRGC-HRMS, Agilent 6890, Waters AutoSpec Primer);旋转蒸发仪(R-215型,瑞士Buchi公司);MGS氮吹仪(MG-2200型,日本Eyela公司);真空干燥器(Vacucenter VC50型,瑞士SalvisLAB公司);大流量环境空气采样器(Tecora, TCR, 意大利)。其中,HRGC-HRMS选用型号为DB-5MS(60 m × 0.25 mm × 0.25 μm)的硅熔毛细管柱,进样口温度为280℃,进样量为1 μL,不分流,升温程序为140℃,保持2 min再以8.0℃·min⁻¹的速率上升至220℃,然后以1.4℃·min⁻¹的速率升高到310℃,保持5 min;高分辨率质谱仪的分辨率高于10 000, EI离子源,离子源温度为300℃,加速电压为7 900 V,电子能量为35 eV。

1.1.2 实验试剂

PCDD/Fs 标样:Cambridge Isotope Laboratory;中性硅胶:高纯度,德国Merk公司;弗罗里硅酸镁:德国Riedel_de Haën公司;甲醇、丙酮、二氯甲烷、甲苯和正己烷:农残级,美国Honeywell公司;玻璃纤维滤膜(Glass Fiber Filter, GFF, 20.3 cm × 25.4 cm):瑞典Munktell公司。

1.2 样品采集

研究所选焚烧厂基本概况见表1,采样点分布见图1。采样点(A1~A4、B1~B4)分别于两厂厂区内宿舍区、办公区、中控室及主厂房焚烧炉后;在采样季节该区域主导风向为东南风;将该区域内无明显二噁英贡献源的地点设为背景对照区,共两个

采样点(C1、C2)。

样品采样方法参见HJ 77.2-2008《环境空气和废气二噁英的测定同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法》^[16]。采样前,GFF在450℃马弗炉里焙烧4 h,以去除杂质;聚氨酯甲酸酯(polyurethane fibers, PUF)用85℃去离子水洗净、甲醇脱水,并用二氯甲烷索氏抽提16 h,用真空干燥器干燥待用。采样过程中用TCR收集样品,用GFF收集细颗粒物(PM_{2.5})样品,用PUF收集气相样品,各个点位的采样工作同时进行,每个点连续采集4 d,流速为250 L·min⁻¹。采样后,滤膜和PUF置于冷冻室待测。

表1 垃圾焚烧厂基本情况

Table 1 Waste incineration plant specifications

名称	处理规模/t·d ⁻¹	焚烧炉类型	烟气处理类型 ¹⁾
A	1 050	炉排炉	SDS + ACI + BF
B	2 000	循环流化床	SDS + ACI + BF

1)“SDS”表示半干式中和反应塔;“ACI”表示活性炭喷射;“BF”表示布袋除尘器

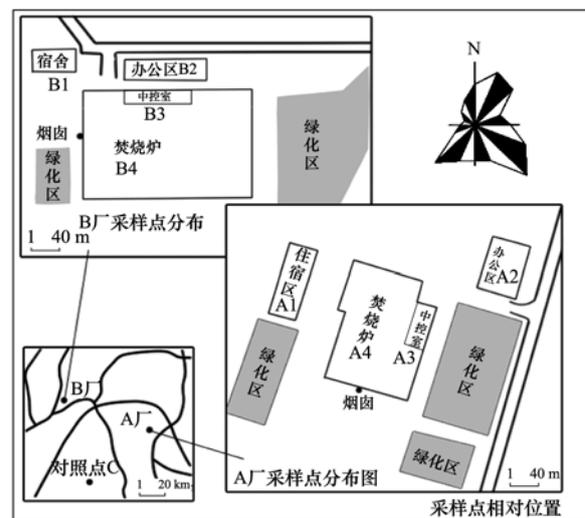


图1 垃圾焚烧厂区域采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites in waste incineration plant

1.3 前处理

样品中PCDD/Fs采用索氏抽提法提取。系统经二氯甲烷预抽提4 h后,以正己烷与二氯甲烷体积比为1:1的混合溶剂抽提24 h,加入¹³C标记的提取内标,提取液经旋转蒸发浓缩至1~2 mL后通过专利方法净化^[17]。将洗脱液浓缩并转移至进样瓶,-20℃保存。

1.4 质量控制

质量控制包括采样空白、实验室空白和空白加标实验,空白检出结果均低于方法检出限。实际样品中PCDD/Fs的浓度已扣除空白值。分析过程中,

采样标回收率为 70% ~ 100%, 满足 HJ 77.2-2008 的要求. 采样和分析仪器使用前均要进行校正. 数据处理过程中, 样品检出限为 0.005 ~ 0.069 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于样品检出限的目标污染物浓度均视作 0 参与计算, 以算术平均值代表采样点浓度.

2 结果与讨论

2.1 焚烧厂二噁英含量水平对比

为研究两垃圾焚烧厂二噁英类物质污染水平, 分别对 A、B 两厂进行采样分析, 其二噁英污染空间分布见图 2. 背景对照区 C 的二噁英浓度分别为 3.97 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 13.34 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均浓度为 8.65

$\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于广州市背景区二噁英浓度值 (28.50 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$)^[18], 此背景对照区的二噁英浓度水平不高.

A 厂内环境空气中二噁英浓度范围为 1.01 ~ 167.03 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均为 62.06 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$, 约为背景对照区的 7 倍; B 厂内环境空气的二噁英浓度范围为 2.55 ~ 118.11 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均为 47.62 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$, 是背景对照区的 5 倍左右; A 厂二噁英平均浓度及最大浓度均比 B 厂高. 说明两厂工艺炉型不同, 对二噁英的去除效率不同. 两厂的二噁英浓度水平均高于杭州某城市垃圾焚烧厂中二噁英浓度 (31.90 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$)^[7] 及广东某垃圾焚烧厂中二噁英最高浓度 (33.4 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$)^[19], 处于较高水平.

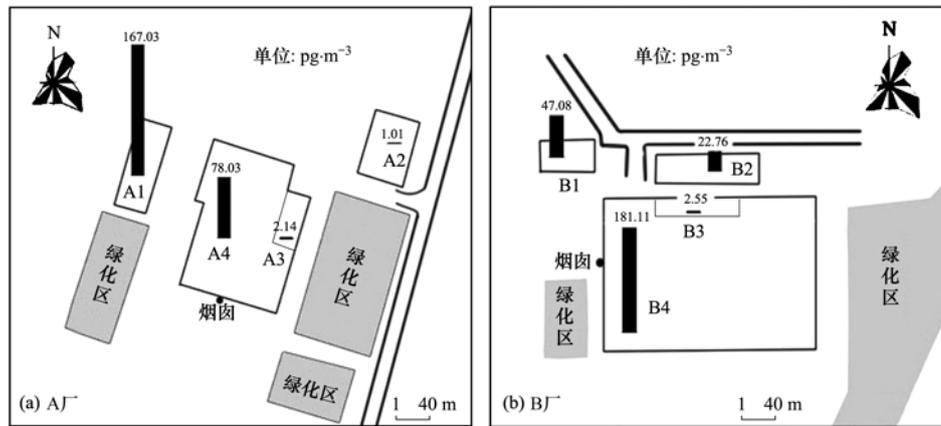


图 2 焚烧厂中二噁英浓度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of PCDD/Fs concentration in waste incineration plant

焚烧厂环境空气中毒性当量 (以 I-TEQ 计) 浓度如图 3 所示. 整体来看, 厂区内多数点位的 I-TEQ 值均超过 0.6 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ (环境空气质量标准). A 厂平均 I-TEQ 值为 0.604 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$, B 厂平均 I-TEQ 值为 0.837 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$. 对比可知, 两厂工作场所内的二噁英平均毒性浓度水平远超过如瑞典 (0.004 ~ 0.055 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$)^[20]、德国 (0.043 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$)^[21] 和葡萄牙马德拉 (0.034 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$)^[22] 等低排放量焚烧厂的周边环境空气中 PCDD/Fs 的毒性含量水平, 本研究中的两个垃圾焚烧厂厂内 I-TEQ 值位于较高的毒性水平.

2.2 污染来源解析及同系物分布特征

为考察采样点区域二噁英分布特征, 对样品进行主成分 (principal component analysis, PCA) 分析, 其中以 17 种 2,3,7,8-取代位二噁英的同类物质量浓度所占比例为变量, 用 SPSS 进行 PCA 分析得到的 4 个主成分可解释总变量的 88.56%. 同时, 为了对采样点环境空气中二噁英来源进行更准确的分析, 引入烹饪烟尘^[23] (D1 ~ D3)、客车及公交车^[24]

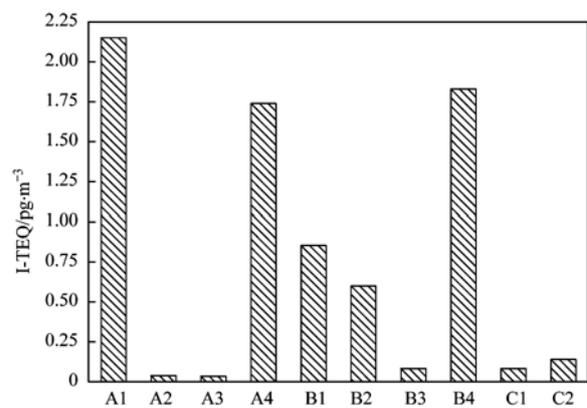


图 3 样品中二噁英 I-TEQ 值

Fig. 3 I-TEQ values of dioxin in samples

(D4 ~ D5) 和私家车^[25] (E1 ~ E6) 排放尾气中的二噁英数据代表研究区域其他主要潜在排放源进行 PCA 分析.

表 2 为各变量在 4 个主成分上的载荷分布. 主成分 1 中 PCDFs 载荷均较高; 主成分 2 中, 1,2,3,7,8,9- HxCDD、1,2,3,4,7,8- HxCDD 和 1,2,3,6,7,8-HxCDD 载荷较高; 主成分 3 中载荷较

高的污染物为低氯代的 PCDDs; 主成分 4 中 2,3,4,6,7,8-HxCDF 和 OCDF 载荷较高。

结合采样点的主成分得分分布(图 4、5)与二噁英类化合物的同系物分布特征(图 6)可知,在主成分 1、2 的分布上,焚烧厂的采样点和其它潜在污染源的主成分得分均较集中,基本按照污染来源划分;主成分 3、4 上的得分分布较交叉,说明采样点的污染来源多样。同时,所有采样点二噁英类物质分布都较相似,均以 OCDD 和 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD 为主,且两厂工作场所内的同系物浓度均随氯代数的增加而增加,与 Shih 等^[26]对这方面的研究结果一致。

在垃圾焚烧炉类型为炉排炉的情况下,其排放烟气与焚烧炉飞灰中二噁英污染物均以 OCDD 为主,同时在二噁英同系物中,PCDDs 同系物含量随着氯代数的增加而增加,PCDFs 的同系物浓度基本相同^[27,28]。这与本研究中 A 厂 PCDD/Fs 指纹特征基本一致,说明 A 厂的环境空气受到了该厂焚烧烟气及飞灰的影响。

表 2 样品 PCA 结果

Table 2 PCA results of samples

污染物	主成分			
	1	2	3	4
2,3,7,8-TCDF	0.074	-0.194	0.173	-0.227
1,2,3,7,8-PeCDF	0.091	-0.110	0.143	-0.066
2,3,4,7,8-PeCDF	0.091	-0.163	0.124	0.051
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.092	0.075	-0.045	-0.269
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.101	0.069	-0.021	0.038
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.088	0.086	-0.063	0.340
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.089	0.132	-0.135	-0.205
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.099	0.086	-0.020	0.109
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.100	0.112	-0.005	-0.087
OCDF	0.072	0.168	-0.210	0.268
2,3,7,8-TCDD	0.051	-0.190	0.237	0.181
1,2,3,7,8-PeCDD	0.029	-0.032	0.369	0.203
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.021	0.199	0.222	-0.442
1,2,3,6,7,8-HxCDD	-0.074	0.173	0.256	-0.042
1,2,3,7,8,9-HxCDD	-0.017	0.266	0.277	0.175
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	-0.097	0.113	0.146	0.088
OCDD	-0.100	-0.091	-0.145	-0.086

在流化床焚烧炉类型的处理厂中,烟气产生的二噁英由 PCDFs 占主导,飞灰中的主要贡献物为 OCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 及 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD^[29]。此外,循环流化床焚烧炉的烟气排放性能好但飞灰产生量大且不易控制^[30],对于离污染源近的厂区环境空气,PM_{2.5}不易扩散,PM_{2.5}附着的低氯代 PCDDs 同系物对该处的环境空气起主导作用^[31]。这与本研究中 B 厂二噁英分布特征大致相

似,故推测 B 厂的空气可能主要受到焚烧炉飞灰排放的影响。

对照区 C1、C2 环境空气中的二噁英指纹特征和两厂厂区内的二噁英指纹特征相似。除焚烧源外,机动车排放产生的二噁英类化合物里也主要含有大量的 OCDD^[24],因此 C1 和 C2 是否受到当地焚烧厂的影响有待深入研究。

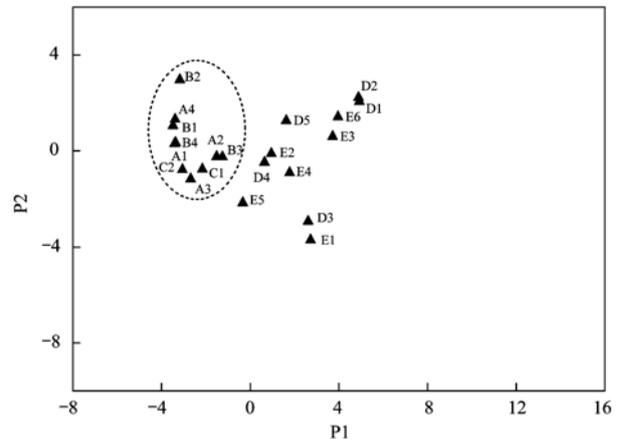


图 4 主成分 1/2 得分

Fig. 4 Component scores of P1/P2

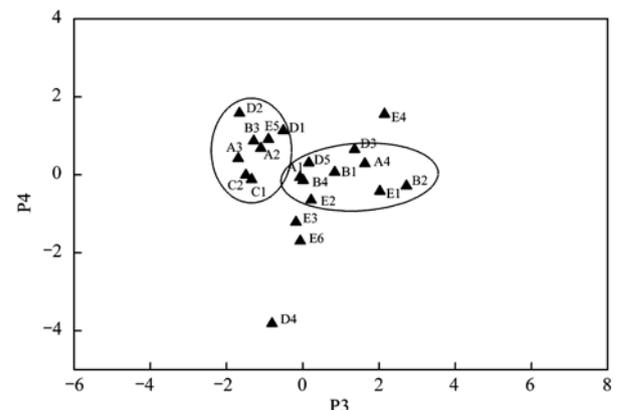


图 5 主成分 3/4 得分

Fig. 5 Component scores of P3/P4

3 厂区工人二噁英呼吸暴露风险评估

二噁英类化合物可以通过呼吸道、消化道和皮肤吸收。本研究只考虑人体经呼吸途径摄入的二噁英类化合物含量,采用 Nouwen 等^[5]的研究评估公式来计算个体二噁英类化合物外暴露量,计算公式见式(1)。

$$\text{Inh} = V_r C_{\text{air}} f_r t / \text{BW} \quad (1)$$

式中,Inh 指呼吸暴露剂量 [$\text{pg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; V_r 指不同劳动强度下的肺通气量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$),不同劳动强度的肺通气量参考 liu 等^[32]的报道结果; C_{air} 指环境空气中二噁英的平均 I-TEQ 值 ($\text{pg} \cdot \text{m}^{-3}$); f_r 指肺泡

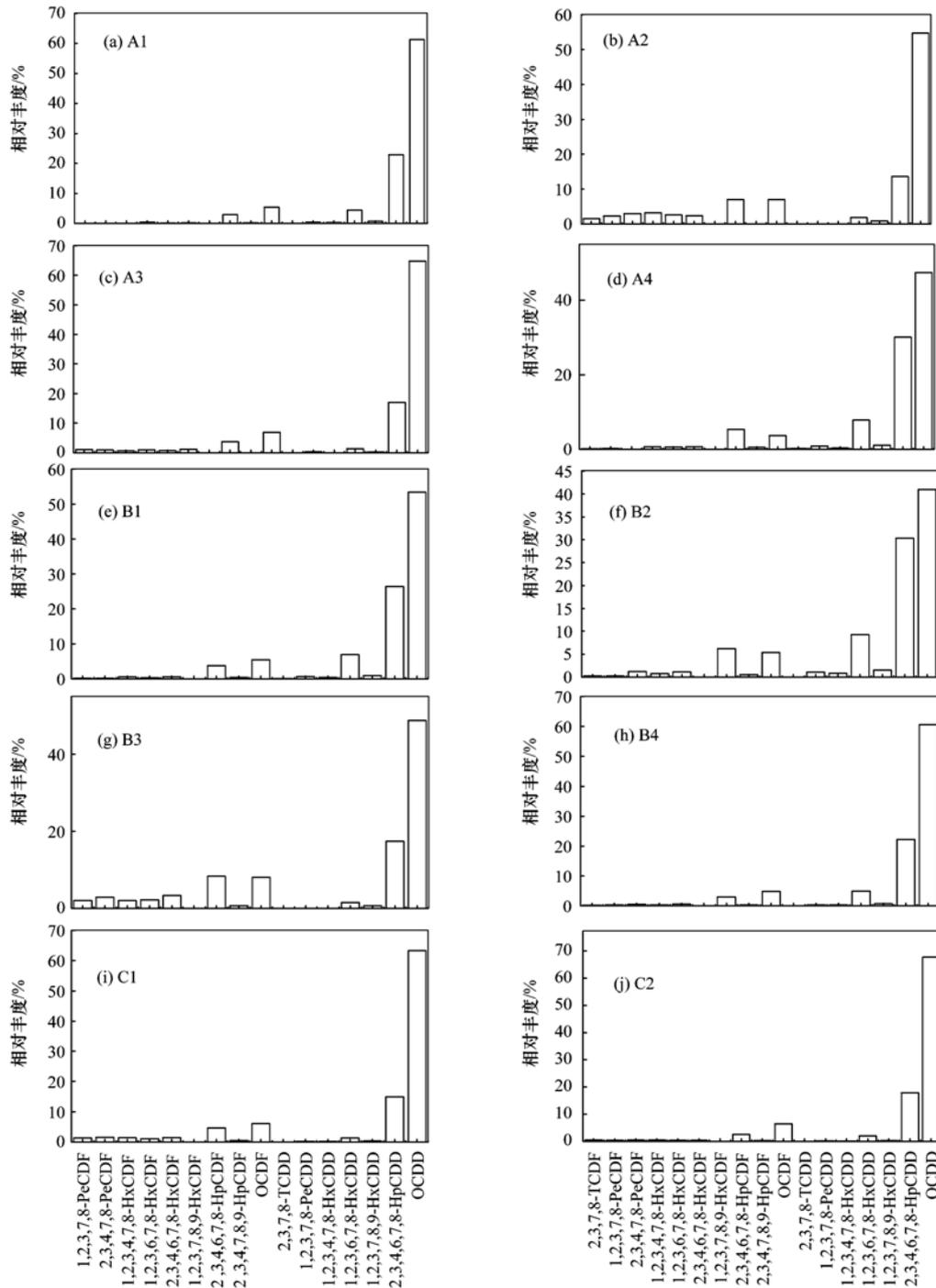


图 6 采样点二噁英同系物浓度分布特征

Fig. 6 Congener distribution of PCDD/Fs in sampling sites

阻留率, 0.75; t 指工人平均工作时间, $10 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$; BW 指体重, 其中男性: 70 kg, 女性: 60 kg.

根据以上公式计算出的结果如表 3 所示. 可以得出在低污染的空间如 A2、A3 和 B3 内, 男性和女性的个体二噁英呼吸暴露水平相当且很低. 其他区域里的二噁英呼吸暴露水平在相同条件下随着劳动强度的变大而增大, 且女性的暴露水平普遍高于男性的暴露水平.

A 厂内二噁英个体呼吸暴露水平为 $0.01 \sim 1.10 \text{ pg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 平均 $0.34 \text{ pg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. B 厂的二噁英个体呼吸暴露量为 $0.02 \sim 0.94 \text{ pg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 平均值为 $0.29 \text{ pg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 略低于 A 厂的个体呼吸暴露量. A、B 两厂的平均呼吸暴露水平和韩国某大城市地区人群的呼吸暴露水平 [$0.11 \text{ pg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] [33] 大致相当, 但远远高于比利时 [$0.006 \text{ pg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] [5]、西班牙 [0.046

$\text{pg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]^[6]等国焚烧厂周边的暴露水平。

表3 二噁英呼吸暴露量/ $\text{pg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$

Table 3 Dose of dioxin inhalation exposure/ $\text{pg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$

区域	肺通气量/ $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$					
	33.4	43.9	72.4	29.5	45.3	68.4
	男性(70 kg)劳动强度			女性(60 kg)劳动强度		
	轻	中	重	轻	中	重
A1	0.46	0.61	1.00	0.48	0.73	1.10
A2	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
A3	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
A4	0.37	0.49	0.81	0.38	0.59	0.89
B1	0.18	0.24	0.40	0.19	0.29	0.44
B2	0.13	0.17	0.28	0.13	0.20	0.31
B3	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.04
B4	0.39	0.52	0.85	0.40	0.62	0.94

4 结论

(1)两厂区内多数点位 I-TEQ 值均超过 $0.6 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ (环境空气质量标准)。焚烧厂 A、B 环境空气中二噁英 I-TEQ 均值分别为 $0.604 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.837 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$, 两厂厂内 I-TEQ 值均处于较高毒性水平。

(2)焚烧厂区域内的所有采样点的二噁英类物质分布都较相似,均以 OCDD 和 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD 为主。

(3)A、B 厂内二噁英个体平均呼吸暴露量分别为 $0.34 \text{ pg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.29 \text{ pg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 远高于其他焚烧厂周边的暴露水平,且女性的暴露水平普遍高于男性的暴露水平。

致谢:本研究在采样过程中得到了环境保护部华南环境科学研究所痕量有机污染物课题组的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Huwe J K. Dioxins in food: a modern agricultural perspective [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, **50**(7): 1739-1750.
- [2] Schecter A, Birnbaum L, Ryan J J, et al. Dioxins: an overview [J]. Environmental Research, 2006, **101**(3): 419-428.
- [3] Listed N. Polychlorinated dibenzo-para-dioxins [J]. Iarc Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 1997, **69**(1): 307-316.
- [4] 朱广钦. 生活垃圾焚烧行业二噁英的产生与控制方法[J]. 现代农业科技, 2015, (10): 216-217.
Zhu G Q. Formation and control methods for PCDD/Fs in the industry of domestic waste incineration[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015, (10): 216-217.
- [5] Nouwen J, Cornelis C, De Fré R, et al. Health risk assessment of dioxin emissions from municipal waste incinerators: the Neerlandquarter (Wilrijk, Belgium) [J]. Chemosphere, 2001, **43**(4-7): 909-923.
- [6] Domingo J L, Agramunt M C, Nadal M, et al. Health risk

assessment of PCDD/PCDF exposure for the population living in the vicinity of a municipal waste incinerator [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2002, **43**(4): 461-465.

- [7] Lee S, Choi S D, Jin G Z, et al. Assessment of PCDD/F risk after implementation of emission reduction at a MSWI [J]. Chemosphere, 2007, **68**(5): 856-863.
- [8] 孟紫强. 现代环境毒理学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015. 175-187.
Meng Z Q. Modern environmental toxicology [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015. 175-187.
- [9] 金立新, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 四川德阳地区农田生态系统重金属健康风险评价[J]. 地学前缘, 2008, **15**(5): 47-56.
Jin L X, Hou Q Y, Yang Z F, et al. Environmental health risk assessment of heavy metals in argo-ecosystems of Deyang district, Sichuan Province [J]. Earth Science Frontiers, 2008, **15**(5): 47-56.
- [10] Xu M X, Yan J H, Lu S Y, et al. Concentrations, profiles, and sources of atmospheric PCDD/Fs near a municipal solid waste incinerator in eastern China [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(4): 1023-1029.
- [11] 杜国勇, 苏原, 任明忠, 等. 气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 2857-2863.
Du G Y, Su Y, Ren M Z, et al. Effect of meteorological factors on characteristics of PCDD/F pollution in Guangzhou [J]. Environmental Science, 2014, **35**(8): 2857-2863.
- [12] 李敏, 王超, 倪明江, 等. 医疗废物焚烧厂二噁英排放对周边土壤的影响(2007-2014年)[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(10): 3804-3809.
Li M, Wang C, Ni M J, et al. Hazardous impact of PCDD/Fs emissions from the MWI on soil during 2007-2014 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(10): 3804-3809.
- [13] 刘永林, 孙启民, 钟明洋, 等. 重庆市主城区 PM_{2.5} 时空分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1219-1229.
Liu Y L, Sun Q M, Zhong M Y, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of PM_{2.5} in Chongqing urban areas [J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1219-1229.
- [14] 林海涛, 李琦路, 张干, 等. 中国 8 个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 10-15.
Lin H T, Li Q L, Zhang G, et al. Atmospheric polybrominated diphenyl ethers in eight cities of China: pollution characteristics and human exposure [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 10-15.
- [15] 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.
- [16] HJ 77.2-2008 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[S].
- [17] 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.
- [18] 苏青, 任明忠, 张素坤, 等. 广州市不同功能区大气二噁英含量和分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(11): 2704-2711.
Su Q, Ren M Z, Zhang S K, et al. The distribution

- characteristics of PCDD/Fs in the atmosphere at different areas of Guangzhou city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32** (11): 2704-2711.
- [19] 苏珊珊. 二噁英环境多介质分布、焚烧释放及减量控制研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. 35-40.
- Su S S. Study of distribution in the environmental multimedia, burning release and reduction control of dioxins [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. 35-40.
- [20] Tysklind M, Faengmark I, Marklund S, *et al.* Atmospheric transport and transformation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(10): 2190-2197.
- [21] Holoubek I, Kočan A, Petrik J, *et al.* Project tocoen the fate of selected organic compounds in the environment part VII. PCBs, PCDDs and PCDFs in ambient air in Czechoslovakia-1990 [J]. *Chemosphere*, 1991, **23**(8-10): 1345-1348.
- [22] Coutinho M, Pereira M, Borrego C. Monitoring of ambient air PCDD/F levels in Portugal [J]. *Chemosphere*, 2007, **67** (9): 1715-1721.
- [23] 孙俊玲. 北京市大气环境中二噁英和多氯联苯的污染特征和气-粒分配行为研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2009. 91-95.
- Sun J L. Atmospheric pollution profiles, gas-particle partitioning of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzo-furans (PCDD/F_s) and polychlorinated biphenyls (PCB_s) in Beijing [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009. 91-95.
- [24] 余莉萍. 广州大气中二噁英的浓度分布和几种典型二噁英排放源的初步研究 [D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007. 87-89.
- Yu L P. Preliminary study on levels of PCDD/Fs in atmosphere of Guangzhou and typical emission sources of PCDD/Fs, China [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2007. 87-89.
- [25] 邓芸芸. 广州市机动车来源多环芳烃与二噁英的污染特征研究 [D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007. 71-85.
- Deng Y Y. Traffic-source polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated dibenzo-p-dioxin (PCDD) and polychlorinated dibenzofuran (PCDF) in Guangzhou [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2007. 71-85.
- [26] Shih S I, Wang Y F, Chang J E, *et al.* Comparisons of levels of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans in the surrounding environment and workplace of two municipal solid waste incinerators [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **137**(3): 1817-1830.
- [27] 陈彤. 城市生活垃圾焚烧过程中二噁英的形成机理及控制技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006. 132-148.
- Chen T. Mechanism and experimental study on PCDD/Fs formation and control during municipal solid wastes incineration [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. 132-148.
- [28] 李艳静, 张素坤, 冯桂贤, 等. 两种典型生活垃圾焚烧炉烟气中二噁相态分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(10): 1632-1636.
- Li Y J, Zhang S K, Feng G X, *et al.* Multiphase distribution characteristics of PCDDs/PCDFs from two typical municipal waste incinerators [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(10): 1632-1636.
- [29] 金宜英, 田洪海, 聂永丰, 等. 3个城市生活垃圾焚烧炉飞灰中二噁英类分析 [J]. *环境科学*, 2003, **24**(3): 21-25.
- Jin Y Y, Tian H H, Nie Y F, *et al.* Dioxins contents in fly ash of MSW incinerator in three city [J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(3): 21-25.
- [30] 别如山, 王国庆. 采用循环流化床技术焚烧城市生活垃圾 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, **4**(11): 79-82.
- Bie R S, Wang G Q. Application of CFB combustion technology to incineration of municipal solid waste [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, **4**(11): 79-82.
- [31] 徐梦侠. 城市生活垃圾焚烧厂二噁英排放的环境影响研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009. 93-109.
- Xu M X. Environmental impact study on PCDD/F emissions from the municipal solid waste incineration plant [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. 93-109.
- [32] Liu S F, Qi T S, Zhang D, *et al.* Research about the relationships among labor load, heart rate, oxygen consumption and pulmonary ventilation volume of vegetable growers [J]. *China Occupational Medicine*, 1990, **17**(119): 207-209.
- [33] Park J S, Kim J G. Regional measurements of PCDD/PCDF concentrations in Korean atmosphere and comparison with gas-particle partitioning models [J]. *Chemosphere*, 2002, **49**(7): 755-764.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-ni, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-ru, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cao, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)