

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

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

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)

北京城区 PM_{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)

北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)

北京市 PM_{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 王艳慧,肖瑶 (428)

杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 谢小芳,孙在,杨文俊 (436)

春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋 (442)

南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)

忻州市环境空气 PM₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)

广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)

燃煤电厂锅炉 PM_{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)

中国南海大气降水化学特征 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)

临安本底站酸雨长期观测特征分析 李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)

北京城区大气氮湿沉降特征研究 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)

烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 贾龙,徐永福 (495)

祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)

生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)

生物滴滤塔处理苯酚气体研究 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶杞宏,罗雨薇,魏在山 (520)

国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)

翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合锋 (533)

CuBr₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)

浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)

基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 贾海峰,郭羽 (555)

北京平原区第四系地下水污染风险评价 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)

不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)

太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)

亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)

潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)

凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国锋 (597)

不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)

溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)

四环素光催化降解特性与选择性研究 宋晨怡,尹大强 (619)

微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)

市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 杨赛,周启星,华涛 (633)

膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 李彬,王志伟,安莹,吴志超 (643)

臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)

厌氧生物法处理果胶废水的研究 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)

氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 赵兴兴,于水利,王哲 (663)

平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)

基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)

广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳翎 (684)

中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)

废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)

深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)

洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)

施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)

螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 尹雪,陈家军,吕策 (733)

Pseudomonas sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)

$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)

杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)

鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)

黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)

3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 王艳,马泽民,吴石金 (770)

新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)

黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫磺排放动态研究 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)

农田土壤 N₂O 产生的关键微生物过程及减排措施 朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)

《环境科学》征订启事(691) 《环境科学》征稿简则(800) 信息(489,519,591,791)

废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评估评价

周玲莉¹, 吴广龙², 薛南冬^{1*}, 杨兵¹, 李发生¹, 丁琼^{2*}, 周丹丹³, 燕云仲¹, 刘博¹, 韩宝禄¹

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 环境保护部环境保护对外合作中心, 北京 100035; 3. 台州市环境科学设计研究院, 台州 318000)

摘要: 以某废旧电容器封存点为例, 研究了废旧电容器封存点土壤中 PCBs 的污染特征以及类二噁英类 PCBs 的毒性风险, 并应用健康风险模型评估了居住用地和工业用地方式下封存点土壤 PCBs 污染对人体的致癌和非致癌风险. 结果表明: 封存点 0~30 cm、30~100 cm 及 200~250 cm 土壤中 \sum PCBs 平均浓度分别达到 6.23、19.3 和 1540 mg·kg⁻¹, 并以 3~4 氯代 PCBs 为主. 毒性当量结果表明, 封存点 \sum WHO-TEQ 最高达到 457 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 具有较高的毒性风险, 其中 PCB126 是封存点土壤中总 TEQ 的主要贡献者. 健康风险评估结果表明, 在居民用地方式下, 多种暴露途径导致的儿童及成人的累积非致癌风险 (0.927~1.760) 几乎都超过可接受非致癌风险水平, 其中儿童为最敏感受体. 工业用地方式下, 除表土以外, 工人的累积非致癌风险均超过了可接受水平. 居住和工业用地方式下土壤中 PCBs 的总致癌风险均超过了可接受风险水平 (10^{-6} ~ 10^{-5}). 不同土地利用方式下对于所有人群, 经口暴露的致癌和非致癌风险都最大.

关键词: 多氯联苯; 电容器; 污染特征; 毒性风险; 健康风险

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0704-07

Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site

ZHOU Ling-li¹, WU Guang-long², XUE Nan-dong¹, YANG Bing¹, LI Fa-sheng¹, DING Qiong², ZHOU Dan-dan³, YAN Yun-zhong¹, LIU Bo¹, HAN Bao-lu¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Foreign Economic Cooperation Office, Ministry of Environmental, Beijing 100035, China; 3. Taizhou Academy of Environmental Research and Design, Taizhou 318000, China)

Abstract: Concentration profiles of polychlorinated biphenyls (PCBs) and toxicity risks of dioxin-like PCBs were investigated in soils collected from a capacitor-burial site. Based on the USEPA model of human health risk assessment, cancer and non-cancer risks for these soils were also estimated when used for residential and industrial purposes. It was observed that the average concentrations of total PCBs (\sum PCBs, 22 congeners) in the soils were 6.23, 19.3, and 1540 mg·kg⁻¹ at different depths of 0-30 cm, 30-100 cm, and 200-250 cm, respectively. Tri-CBs and Tetra-CBs were the largest contributors to the total concentrations in the soils, making up 75.7%-94.0%. The toxic equivalent concentration (TEQs) of total PCBs was up to 457 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, and PCB 126 had the highest contribution. Health risk assessment showed that under residential land uses, children was the most sensitive receptor although cumulative non-carcinogenic risks for both children and adults (0.927-1.760) nearly exceeded the acceptable level, while under industrial land uses except for the topsoil, the total non-carcinogenic risks for workers exceeded the acceptable level. Under residential and industrial land uses, PCBs in the soils had high carcinogenic risks that were more than the acceptable level of carcinogenic risks (10^{-6} - 10^{-5}). Inhalation exposure was the major way subjected to the carcinogenic risk as well as to the non-carcinogenic risk, regardless of children, adults, and workers involved.

Key words: polychlorinated biphenyl; capacitor; distribution profiles; toxicity risk; human health risk

多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 是一种热交流介质, 由于其良好的阻燃性、热稳定性、惰性及介电特性, 曾常被用作电器设备如变压器、电容器、充液高压电缆和荧光照明显整流以及油漆和塑料中^[1]. 由于 PCBs 具有难降解性、生物毒性、生物蓄积性及远距离迁移性, 可通过食物链富集直接危害人体健康^[2, 3], 于 2001 年被列入《斯德哥尔摩

公约》首批受控名单^[4]. 我国于 20 世纪 60~70 年代累计生产了近万吨的 PCBs 用于电容器、变压器等

收稿日期: 2013-06-13; 修订日期: 2013-07-22

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项 (201109017-2); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2012AA06A304)

作者简介: 周玲莉 (1985~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为土壤风险评估, E-mail: zhoul@ craes. org. cn

* 通讯联系人, E-mail: xuend@ craes. org. cn; ding. qiong@ mepfeco. org. cn

电力设备中,这些含 PCBs 的电容器和变压器在 80 年代开始停产并废弃,大多集中存放在水泥浇筑的地下封存点或山洞里^[4]. 由于这些封存点基本都超过了其设计年限(一般为 20 a),可能会发生泄漏,污染周边土壤,成为环境中 PCBs 的重要来源. 针对此类污染场地,《斯德哥尔摩公约》要求采取无害化环境修复和管理措施,以控制和消除其潜在环境和健康风险. 据初步调查,在中国有大量此类电容器封存点(在浙江和辽宁两省发现有 80 多处)需要处理^[4]. 目前我国对封存点 PCBs 的泄漏情况和可能引起的土壤污染已经做了一些调查^[5,6],并开始对 PCBs 封存点电容器进行清理和污染土壤的修复. 本文在研究封存点 PCBs 污染特征的基础上,应用健康风险评估模型,研究封存点土壤 PCBs 污染对居住用地和工业用地方式下人体的致癌和非致癌风险,以期为废弃电容器封存点风险管理和制定污染土壤的修复方案提供支撑.

1 材料与方法

1.1 样品采集

选择的研究地点位于浙江某市一变电所内,封存电容器 100 多台,封存容器的水泥封存点顶部埋深 1 m,底部 2 m,在电容器清理之前,对封存点及周边土壤表层(0~30 cm)及深层土壤(30~100 cm 和 100~300 cm)采样 58 个,对土壤中 PCBs 残留分布进行了调查^[5]. 2011 年 11 月在封存点清理过程中沿挖掘深度再次分层采集土壤样品,表层土壤 0~30 cm,中层土壤 30~100 cm(水泥封存石棺顶层)及底层土壤 200~250 cm(水泥封存石棺底层),每层分别采集多点混合土壤样品 2 个,共 6 个土壤样品保存于棕色玻璃瓶中迅速带回实验室冷冻保存(-20℃)至分析.

1.2 样品前处理与分析

称取土壤样品 20 g(干重)左右,加入替代物 PCB209 作为回收率指示物,加入 2 g 铜片脱硫,加入 10 g 无水硫酸钠,用萃取溶剂正己烷/丙酮(1:1,体积比,200 mL)在 58℃ 下索氏萃取 24 h,提取液在旋转蒸发仪上浓缩到 4~5 mL,以正己烷转换溶剂,继续浓缩到 1~2 mL;用多级复合硅胶净化柱净化^[7],以 50 mL 正己烷淋洗,将淋洗液浓缩,正己烷定容至 1 mL 待测.

用 GC-MS(Agilent 6890GC/5975MSD)分析检测 PCBs. 仪器条件:色谱柱为 DB-5MS(30 m×0.25 mm I. D. ×0.25 μm),载气为氦气. 色谱条件:进样

口无分流模式,温度 275℃,进样量 1 μL,柱流量 1.0 mL·min⁻¹,炉温 70℃ 保留 2 min,然后以 10℃·min⁻¹升至 150℃,保留 2 min,再以 2.5℃·min⁻¹升至 275℃,保留 10 min. 质谱条件:离子化能 70 eV;离子源温度(EI 源) 230℃,四级杆温度 150℃;定性分析以全扫描方式,扫描范围 m/z 为 35~500;定量分析选择离子检测方式,检测器电压为 1 600 V.

1.3 质量控制

22 种 PCB 异构体标准品均购置 Wellington Laboratories, Guelph, Canada 公司,在样品分析过程中设置方法空白、溶剂空白、加标空白和仪器空白,基质加标,基质加标平行样和样品平行样以监测整个分析方法的本底值和分析方法的回收率. 用内标法和五点校正曲线进行定量. 回收率指示物 PCB209 回收率在 76%~115% 之间, RSD 在 1.0%~2.5% 之间,土样基质加标的平均回收率为 76%~86%.

1.4 健康风险评估方法

根据美国环境保护署(USEPA)的化学物质致癌分类标准,PCBs 被认为是“B₂-可能的致癌物”,依据美国国家科学院提出的健康风险评估“四步法”^[4],采用健康风险评估模型和模型参数,对污染土壤中 PCBs 的暴露进行人体健康风险评估. 以每层土壤的 PCBs 的最高污染浓度为污染物的暴露浓度,考虑经口摄入、皮肤接触和呼吸摄入 3 种途径,定量描述工业用地方式下工人和居住用地方式下儿童和成人在 PCBs 暴露下的非致癌风险(hazard index, HI)和致癌风险(risk, R). 封存点水位约地下 -10 m,当地居民不取用地下水作为饮用水,因此底层土壤未考虑地下水摄入途径. 不同暴露途径污染物暴露量计算模型如式(1)~(3)所示. 暴露评估参数取值参考 USEPA 土壤健康风险评估方法^[8,9]及我国场地环境评价指南^[10,11]和最新研究成果^[12,13]. 具体取值如表 1 所示.

(1) 经口摄入量:

$$CDI_{\text{经口摄入}} = \frac{c_s \times IR \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

(2) 皮肤接触量摄入量:

$$CDI_{\text{皮肤接触}} = \frac{c_s \times CF \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

(3) 呼吸摄入量:

$$CDI_{\text{呼吸摄入}} = \frac{c_s \times IR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (3)$$

式中, $CDI_{\text{经口摄入}}$ 为经口摄入量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; c_s 为

土壤中污染物暴露浓度,本研究中计算采用各个土层的 PCBs 的最大浓度; IR 为土壤摄入量,即每天接触被污染的土壤的量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; CF 为转换系数, $10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mg}^{-1}$; EF 为暴露频率, $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 为暴露期, a; BW 为暴露期内人群平均体重, kg;

$\text{CDI}_{\text{呼吸摄入}}$ 为经呼吸摄入量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; PEF 为土壤尘扩散因子; $\text{CDI}_{\text{皮肤接触}}$ 为经皮肤接触摄入量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, SA 为可能接触土壤的皮肤面积, $\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$; AF 为皮肤对土壤的吸附系数, $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$; ABS 为皮肤吸收系数。

表 1 健康风险评价人体暴露参数

Table 1 Exposure factors of human for health risk assessment

暴露参数	单位	工人(工业用地)	居住用地	
			儿童	成人
IR(土壤摄入量)	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	100	200	100
HR(空气摄入量)	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	20	20	20
SA(皮肤接触面积)	cm^2	3 300	2 800	5 700
AF(土壤-皮肤黏附因子)	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.2	0.2	0.07
EF(暴露频率)	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	250	350	350
ED(暴露期)	a	25	6	24
PEF(土壤尘产生因子)	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1.32×10^9	1.32×10^9	1.32×10^9
BW(体重)	kg	70	15	70
AT(平均作用时间,非致癌/致癌)	d	9 125/25 550	2 190/25 550	8 760/25 550

非致癌风险水平(HQ)是上述计算得到的每日单位体重摄入量(CDI)与慢性参考剂量(RfD)的比值;致癌风险(R)是 CDI 与癌症斜率因子(SF)的乘积.分别考虑 PCBs 每一暴露途径的致癌效应和非致癌效应,风险表征见式(4)和式(5).当污染物存在多种暴露途径(经口、皮肤或呼吸摄入)时,该污染物的累积非致癌风险为所有暴露途径的风险值之和。

$$\text{HI} = \sum \text{HQ}_i = \sum \left(\frac{\text{CDI}_i}{\text{RfD}_i} \right) \quad (4)$$

$$R_T = \sum R_i = \sum (\text{CDI}_i \times \text{SF}_i) \quad (5)$$

式中,HI 为多暴露途径的累积非致癌风险; HQ_i 为某一暴露途径的非致癌风险; RfD_i 为污染物某一暴露途径的慢性参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, R_T 为多暴露途径的累积致癌风险; R_i 为污染物某一暴露途径的致癌风险; SF 为致癌斜率因子,表示人体暴露于一定剂量某种污染物产生致癌效应的最大概率, $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$, PCBs 的 3 种暴露途径 RfD 取值均为 $0.000 02 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; PCBs 的直接摄入和皮肤接触 SF 均取值为 $2 (\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$,呼吸摄入的 SF 取值为 $0.002 18 (\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$ [14]。

2 结果与讨论

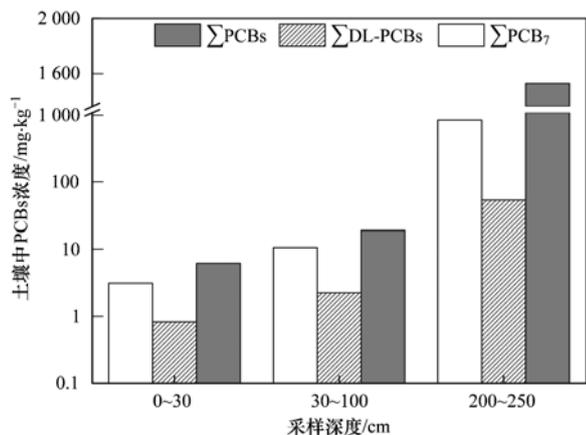
2.1 封存点土壤中 PCBs 的浓度水平

废弃电容器封存点不同深度土壤中 22 种 PCBs 的浓度(\sum PCBs)如图 1 所示.从不同土壤深度来看,封存点底层(200 ~ 250 cm)土壤中 \sum PCBs 浓

度高达 $1 540 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,比中国多氯联苯废物污染控制标准(GB 13015-91)中关于产品和废渣中 PCBs 浓度($\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)高 30 倍,远高于华北某地废旧电容器存放地点土壤中 PCBs 最高浓度($59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) [15],高于英国西南部某废弃电容器厂土壤($1 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) [16],但低于某电容器封存点泄漏区土壤中 PCBs 浓度($4 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) [17],也低于某电子废弃物拆解场地土壤中 PCBs 浓度($11 160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) [12].封存点 30 ~ 100 cm 土壤中 PCBs 平均浓度为 $19.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于封存点周边土壤($8.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) [5].前期调查也表明封存点周边 30 ~ 100 cm 层面是污染物 PCBs 的主要聚集区 [5],这表明部分散落在水泥封存石棺外面的电容器已经老化损坏致使该层土壤受到 PCBs 污染.封存点表层土(0 ~ 30 cm) PCBs 浓度为 $6.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于前期调查封存点周边 0 ~ 30 cm 土壤中 PCBs 的浓度($2.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) [5],也高于浙江温岭电子拆卸点表土中最大 PCBs 浓度($5.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) [18],和荷兰土壤修复行动的最低限制标准($1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) [19],远高于上海城市土壤中 74 种 PCBs 总量($232 \sim 11 325 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均浓度 $3 057 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) [20],比中国农田土壤中 51 种 PCBs 的总量($5.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) [21]高 10^6 倍,高于松花江沉积物中检出的 90 种 PCBs 的总量($0.83 \sim 125 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) [22].因此这部分电容器 PCBs 泄漏引起的污染应重视和妥善处置。

2.2 土壤中 PCBs 的组成特征

图 2 为不同深度土壤中 PCBs 单体的污染水平,其中 7 种同分异构体 PCB28、PCB52、PCB101、



\sum PCBs 是 22 种 PCBs 的总浓度; \sum PCB₇ 是 PCB28、PCB52、PCB101、PCB118、PCB138、PCB153、PCB180 的浓度之和; \sum DL-PCBs 是 PCB77、PCB105、PCB118、PCB126、PCB156、PCB169 的浓度之和

图 1 旧电容器封存点不同深度土壤中 PCBs 污染水平

Fig. 1 PCBs concentrations in various layers of soils from a capacitor storage site

PCB118、PCB138、PCB153、PCB180 被认为是生物毒性较高的指示性 PCBs。从中可见,这 7 种 PCBs 在封存点土壤中都有检出,表土中 \sum PCB₇ 浓度为 $3.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于浙江路桥电子拆解区表土中 \sum PCB₇ 浓度 ($2.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[23],底层土壤中 \sum PCB₇ 浓度达到 $856 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是 Tang 等^[18]调查的电子废物小作坊解场地土壤中 \sum PCB₇ 的最高浓度的 2.5 倍。就检出量来看,PCB28 在 0~30 cm、30~100 cm 及 200~250 cm 土层中的检出量都是最高的,平均浓度分别达到 1.30 、 6.13 和 $626 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占 \sum PCBs 的 20.9%、31.8% 和 40.7%。由于 PCB28 是 7 种指示性 PCBs 之一,具有较高的毒性,因此不同土层土壤中潜在的生物毒性和生态风险都应当予以重视。

PCBs 在环境中以多种异构体的形式存在,尽管 209 种 PCBs 异构体的结构、理化性质相似,但各异构体毒性差异很大,其中邻位没有氯原子取代的共平面 PCBs 毒性较大,尤其以双对位和多于 2 个侧位氯取代的 PCBs 毒性最大,其中 12 种与二噁英平面结构相似的类二噁英多氯联苯 (DL-PCBs) 被认为是毒性最高的 PCBs^[6, 11]。如图 2 所示,该封存点共检出 6 种 DL-PCBs,包括 4 个无邻位 PCBs (PCB77、PCB126、PCB105、PCB169) 和 2 个单邻位 PCBs (PCB118、PCB156)。封存点土壤中 \sum DL-PCBs 在

$0.83 \sim 54.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,远高于某固体废物拆解场地土壤中 12 种 DL-PCBs 的总浓度 ($0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[6],高于东营孤岛地区表土中 12 种 DL-PCBs 的总浓度 ($0.2 \sim 31.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均浓度 $5.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[24],表明这个封存点的 DL-PCBs 污染更为严重。封存点土壤中 \sum DL-PCBs 占 \sum PCB 的 3.53%~13.3%。6 种 DL-PCBs 检出量最高的是无邻位的 PCB77,其浓度在 $0.32 \sim 23.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,占 \sum DL-PCBs 的 38.4%~43.9%,其次是单邻位的 PCB118。柴剑荣等^[25]对固体废物拆解区的 DL-PCBs 在生物体内蓄积的调查表明,DL-PCBs 容易通过各种途径进入生物系统并在高级食物链富集,因此 DL-PCBs 的高浓度污染土壤的处置需要密切关注。

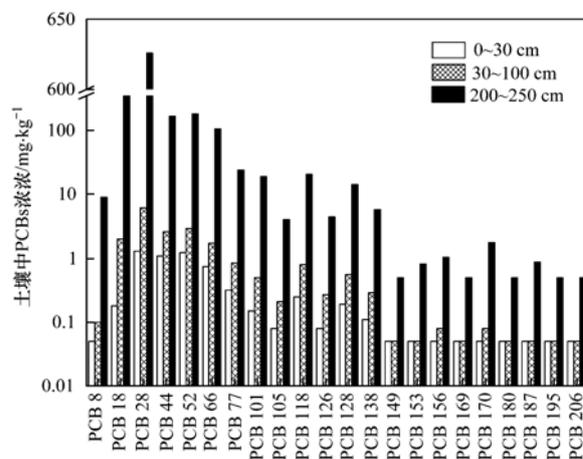


图 2 废旧电容器封存点不同深度土壤中 PCBs 单体浓度
Fig. 2 PCBs congener concentrations in various layers of soils in a capacitor storage site

封存点土壤中不同氯代 PCBs 含量百分比如图 3 所示。封存点土壤中 PCBs 以 3-氯 PCBs (PCB18 和 PCB28) 和 4-氯 PCBs (PCB44、PCB52、PCB66 和 PCB77) 为主,这 6 种 PCBs 检出率均为 100%。在 0~30 cm、30~100 cm、200~250 cm 土壤层中 3-氯 PCBs 和 4-氯 PCBs 浓度占 PCBs 总量的 75.7%、81.1% 和 94.0%。5-氯 PCBs (PCB105、PCB118 和 PCB126) 和 6-氯 PCBs (PCB138、PCB149 和 PCB153) 的检出率也较高 (16.7%~83.3%),但浓度较低,其他高氯联苯 (7~9 氯) 同系物的检出率低或者未检出,这与 Shen 等^[26]调查的电容器拆解场地土壤中 PCBs 的主要组成比较类似。降巧龙等^[27]对国内电容器中 PCBs 的研究也发现:我国变压器油主要是低氯取代的 3-氯和 4-氯 PCBs 为主,7-氯及 7-氯以上等高氯代联苯含量极微。因此可以推断

该封存点土壤 PCBs 污染来自于旧电容器中 PCBs 的泄漏。

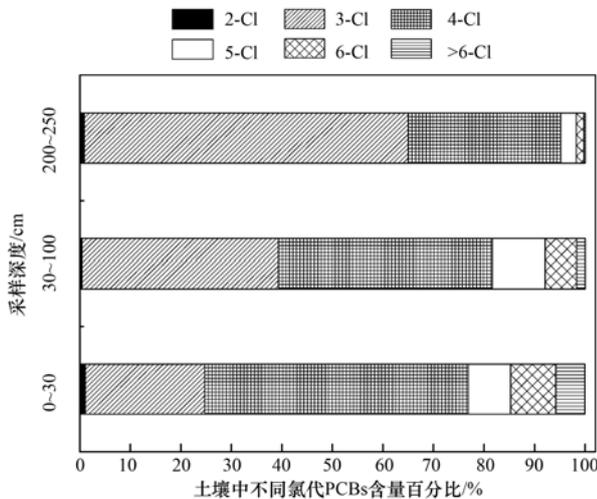


图3 废旧电容器封存点不同深度土壤中氯代 PCBs 比例
Fig. 3 Compositions of PCBs homologues in various layers of soils in a capacitor storage site

2.3 封存点土壤中 PCBs 的毒性风险

PCBs 环境毒性风险不仅与其总浓度有关系,而且还取决于毒性最大的几种异构体。根据世界卫生组织 (WHO) 规定的毒性当量因子 (TEFs, 其中: PCB77 = 0.000 1, PCB105 = PCB118 = PCB156 = 0.000 03, PCB169 = 0.03, PCB126 = 0.10)^[28] 计算检出的 6 种 DL-PCB 毒性当量浓度 (TEQ), 计算公式如下:

$$\sum \text{WHO-TEQ} = \sum c_i \times \text{TEF}_i$$

式中, c_i 是第 i 个 DL-PCB 的质量浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; TEQ 是毒性当量, $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

TEQ 计算结果如图 4 所示。该封存点的 0~30 cm 及 30~100 cm 土壤中 6 种 DL-PCBs 的 $\sum \text{WHO-TEQ}$ 达到 $9.94 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $28.5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远高于上海城市土壤中 6 种 PCBs 的 $\sum \text{WHO-TEQ}$ ($2.71 \sim 24.9 \text{ pg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[20], 高于亚洲国家垃圾堆放点 12 种 DL-PCBs 的 $\sum \text{WHO-TEQ}$ ($4.9 \sim 26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[22], 高于莱茵河三角洲平原 12 种 DL-PCBs 的 $\sum \text{WHO-TEQ}$ ($0.02 \sim 0.09 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[29], 也高于浙江省某 PCBs 废物封存点泥样 12 种 DL-PCBs 的 $\sum \text{WHO-TEQ}$ ($0.35 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[30]。封存点 200~250 cm 底层土壤中 6 种 DL-PCBs 的 $\sum \text{WHO-TEQ}$ 为 $450 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高出上述区域 PCBs 的 TEQ 值 4~5 个数量级, 封存点周边土壤 0~300

cm 层面中 6 种 DL-PCBs 的 $\sum \text{WHO-TEQ}$ 为 $4.37 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 Wen 等^[23] 调查的浙江电子拆解场地的 12 种 DL-PCBs 的 $\sum \text{WHO-TEQ}$ 的 10 倍, 表明封存点及周边土壤都具有相当高的生物毒性风险。

从 6 种 DL-PCB 的毒性当量浓度占 $\sum \text{WHO-TEQ}$ 总量的百分比来看 (图 5), 毒性最强的 PCB126 的检出量不是最高的, 但是对 TEQ 的贡献最大, 占 $\sum \text{WHO-TEQ}$ 的 90% 以上, 是主要贡献因子, 这与俞苏霞等^[6] 和 Wang 等^[31] 的调查结果一致。其次是 PCB169 约占 $\sum \text{WHO-TEQ}$ 的 1.1%~5.4%。

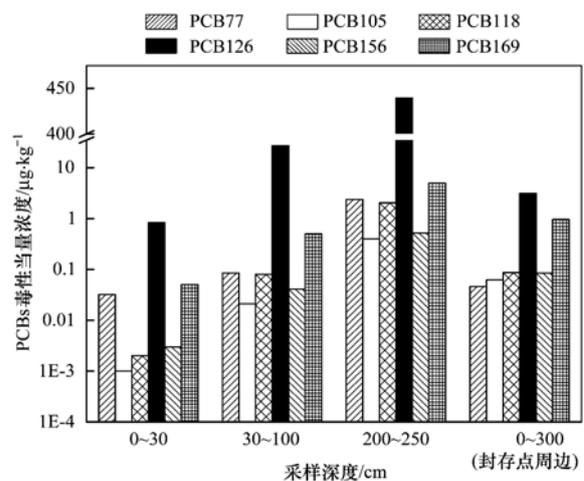


图4 土壤中 PCBs 的毒性当量浓度
Fig. 4 Toxic equivalency of PCBs in soils

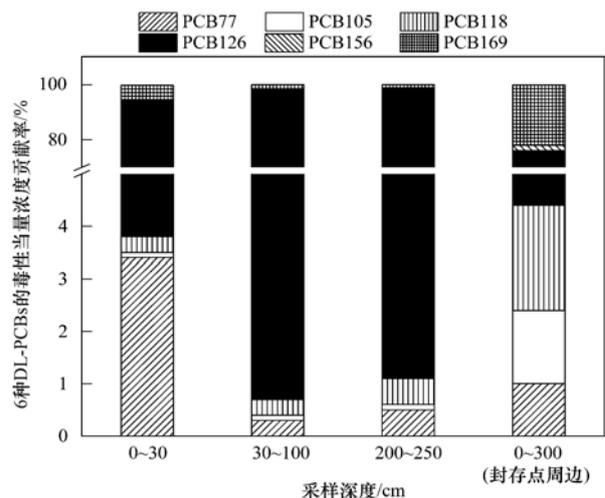


图5 土壤中 6 种 DL-PCBs 的毒性当量浓度贡献率
Fig. 5 Contributions of 6 DL-PCBs in soils to TEQs concentrations

2.4 土壤中 PCBs 的健康风险

依据健康风险评价模型和评价参数, 对旧电容器储存点的土壤中 PCBs 可能存在的非致癌风险和致癌风险进行评价, 计算结果见表 2。

表 2 废旧电容器储存点土壤中 PCBs 的非致癌风险和致癌风险

Table 2 Non-carcinogenic and carcinogenic risks for PCBs in soils from a capacitor storage site

土层深度/cm	非致癌风险			致癌风险				
	工人 (工业用地)	居住用地		工人 (工业用地)	居住用地			
		儿童	成人		儿童	成人		
表层土(0~30)	HQ _{经口}	0.473	6.18	0.662	$R_{经口}$	6.75×10^{-6}	2.12×10^{-5}	9.08×10^{-6}
	HQ _{皮肤}	0.312	1.73	0.264	$R_{皮肤}$	4.46×10^{-6}	5.93×10^{-6}	3.62×10^{-6}
	HQ _{呼吸}	7.17×10^{-5}	5.02×10^{-5}	1.00×10^{-4}	$R_{呼吸}$	1.11×10^{-12}	1.88×10^{-13}	1.50×10^{-12}
	HI _{表层土}	0.785	7.91	0.927	$R_{T表层土}$	1.12×10^{-5}	2.71×10^{-5}	1.27×10^{-5}
中层土(30~100)	HQ _{经口}	1.31	17.0	1.82	$R_{经口}$	1.86×10^{-5}	5.83×10^{-5}	2.50×10^{-5}
	HQ _{皮肤}	0.859	4.76	0.727	$R_{皮肤}$	1.23×10^{-5}	1.63×10^{-5}	9.97×10^{-6}
	HQ _{呼吸}	1.97×10^{-4}	1.38×10^{-4}	2.76×10^{-4}	$R_{呼吸}$	3.07×10^{-12}	5.16×10^{-13}	4.13×10^{-12}
	HI _{中层土}	2.16	21.8	2.55	$R_{T中层土}$	3.09×10^{-5}	7.47×10^{-5}	3.50×10^{-5}
底层土(200~250)	HQ _{经口}	105	1375	147	$R_{经口}$	1.50×10^{-3}	4.71×10^{-3}	2.02×10^{-3}
	HQ _{皮肤}	69.5	385	58.8	$R_{皮肤}$	9.92×10^{-4}	1.32×10^{-3}	8.06×10^{-4}
	HQ _{呼吸}	1.59×10^{-2}	1.12×10^{-2}	2.23×10^{-2}	$R_{呼吸}$	2.48×10^{-10}	4.17×10^{-11}	3.34×10^{-10}
	HI _{底层土}	175	1760	206	$R_{T底层土}$	2.50×10^{-3}	6.03×10^{-3}	2.83×10^{-3}

根据 USEPA 定义,当污染物的累积非致癌风险 HI < 1 时,认为非致癌风险较小或可以忽略,HI > 1 时认为存在非致癌风险,会对暴露人群造成明显的非致癌健康危害^[6]. 在居民用地方式下,儿童及成人的累积非致癌风险在 0.927 ~ 1760 之间,接近或超过非致癌风险可接受水平. 工业用地方式下,工人的累积非致癌风险在 0.785 ~ 175 之间,除表土以外,其他区域的累积非致癌风险都超过了可接受水平,表明该区域如果置换为工业用地或居住用地都会存在严重的非致癌健康危害. 从暴露途径来看,累积非致癌风险主要由经口摄入 PCBs 产生,其次是皮肤接触,呼吸摄入途径产生非致癌风险很小,只占到 $1.0 \times 10^{-4}\%$ ~ $9.0 \times 10^{-5}\%$. 对于不同暴露人群来说,居住用地方式下儿童为最敏感受体,底层土壤中 PCBs 儿童经口摄入量(CDI_{经口摄入})是慢性参考剂量(RfD)的1000倍以上,这主要是因为儿童较容易吞食土壤,体重较轻,平均作用时间较短导致非致癌风险高.

致癌风险通常以一定数量人口出现癌症患者的个体数表示,USEPA 规定居住用地方式下可接受致癌风险水平为 10^{-6} ,工业用地方式下为 10^{-5} ^[12],若致癌风险超过这个限值,则认为是致癌风险是不可接受的. 如表 2 所示,居住和工业用地方式下土壤中 PCBs 的总致癌风险都已经超过了 10^{-5} ,底层土壤的总致癌风险水平已经达到 2.5×10^{-3} ~ 6.0×10^{-3} ,高出癌症风险阈值 1 ~ 3 个数量级,且主要由经口摄入暴露途径引起. 居住用地方式下,儿童经口暴露的致癌风险最高达到 4.47×10^{-3} ,表明 PCBs 在土壤中的总致癌风险已经远超出可接受范围,会对人体构成较大的健康风险,应对污染土壤进行修复.

3 结论

(1) 废旧电容器封存点土壤中 PCBs 浓度在 $6.23 \sim 1540 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,远高于国家多氯联苯废物污染控制标准值($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),同时土壤中 PCBs 以 3 ~ 4 氯为主,与国内电容器中 PCBs 的同系物特征类似. 这些结果表明封存点电容器已经发生 PCBs 泄漏,散落在封存点外的旧电容器泄漏也导致了封存点周边土壤 PCBs 污染.

(2) 封存点土壤中 PCBs 具有较高的毒性风险. 封存点 \sum WHO-TEQ 最高达到 $457 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中 PCB126 是封存点土壤中总 TEQ 的主要贡献因子.

(3) 在居民用地方式下,儿童及成人的累积非致癌风险在 0.927 ~ 1760 之间,接近或超过可接受非致癌风险水平,其中儿童为最敏感受体. 工业用地方式下,除表土以外,工人的累积非致癌风险超过了可接受水平. 居住和工业用地方式下土壤中 PCBs 的总致癌风险均超过了可接受致癌水平(10^{-6} ~ 10^{-5}).

参考文献:

- [1] Liu X T, Zhang Q, Zhang G X, et al. Application of microwave irradiation in the removal of polychlorinated biphenyls from soil contaminated by capacitor oil [J]. Chemosphere, 2008, 72 (11): 1655-1658.
- [2] Bergkvist C, Akesson A, Glynn A, et al. Validation of questionnaire-based long-term dietary exposure to polychlorinated biphenyls using biomarkers [J]. Molecular Nutrition Food Research, 2012, 56(11): 1748-1754.
- [3] Hopf N B, Ruder A M, Waters M A. Historical reconstruction of polychlorinated biphenyl (PCB) exposures for workers in a capacitor manufacturing plant [J]. Environmental Science and

- Pollution Research, 2013, <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-013-1590-4>.
- [4] 薛南冬, 李发生. 持久性有机污染物 (POPs) 污染场地风险控制与环境修复 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. 35-70.
- [5] 郑群雄, 徐小强, 马军, 等. 废旧电容器封存点土壤中多氯联苯的残留特征 [J]. 岩矿测试, 2011, **30**(6): 699-704.
- [6] 俞苏霞, 蒋世熙, 鞠莉, 等. 某固体废物拆解基地环境中类二噁英多氯联苯污染水平分析 [J]. 环境与健康杂志, 2007, **24**(5): 304-307.
- [7] 江萍, 赵平, 万洪富, 等. 某珠江三角洲典型地区表层农田土壤中多氯联苯残留状况 [J]. 土壤, 2011, **43**(6): 948-953.
- [8] US EPA. Risk assessment guidance for superfund, vol. I; Human health evaluation manual [R]. Washington: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [9] US EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. Washington: Office of Emergency and Remedial Response, 2002.
- [10] 环境保护部. 污染场地风险评估技术导则 (征求意见稿) [EB/OL]. <http://www.sepa.gov.cn/info/bgw/bbgh/200910/W020091009550671751947.pdf>, 2009-10-09.
- [11] 姜林, 王岩. 场地环境评价指南 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [12] 杨彦, 于云江, 李定龙, 等. 电子废弃物拆解场多氯联苯含量及健康风险评估 [J]. 中国环境科学, 2012, **32**(4): 727-735.
- [13] Rovira J, Mari M, Nadal M, *et al.* Environmental monitoring of metals, PCDD/Fs and PCBs as a complementary tool of biological surveillance to assess human health risks [J]. Chemosphere, 2010, **80**(10): 1183-1189.
- [14] 邓绍坡, 骆永明, 宋静, 等. 电子废弃物拆解地 PM₁₀ 中多氯联苯, 镉和铜含量调查及人体健康风险评估 [J]. 环境科学研究, 2010, **23**(6): 733-740.
- [15] 郑晓燕, 张玲金, 谢文明, 等. 废旧电容器存放点多氯联苯的污染特征 [J]. 环境化学, 2007, **26**(2): 249-254.
- [16] Norris G, Al-Dhahir Z, Birnstingl J, *et al.* A case study of the management and remediation of soil contaminated with polychlorinated biphenyls [J]. Engineering Geology, 1999, **53**(2): 177-185.
- [17] China SEPA. Building the capacity of the Peoples Republic of China to implement the Stockholm convention on POPs and develop a national implementation plan [R]. GEF Project Brief (GF/CPR/02/010), 2003.
- [18] Tang X J, Shen C F, Shi D Z, *et al.* Heavy metal and persistent organic compound contamination in soil from Wenling: an emerging e-waste recycling city in Taizhou area, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **173**(1-3): 653-660.
- [19] Vrom. Intervention values and target values: soil quality standards. Netherlands ministry of housing, spatial planning and environment [R]. Netherlands: Department of Soil Protection, 1994.
- [20] Jiang Y F, Wang X T, Zhu K, *et al.* Polychlorinated biphenyls contamination in urban soil of Shanghai: level, compositional profiles and source identification [J]. Chemosphere, 2011, **83**(6): 767-773.
- [21] Ren N, Que M, Li Y F, *et al.* Polychlorinated biphenyls in Chinese surface soils [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**(11): 3871-3876.
- [22] 聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 等. 松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布来源及风险评估 [J]. 环境科学, 2013, **33**(10): 3434-3442.
- [23] Wen S, Yang F, Li J G, *et al.* Polychlorinated dibenzo-p-dioxin and dibenzofurans (PCDD/Fs), polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), and polychlorinated biphenyls (PCBs) monitored by tree bark in an E-waste recycling area [J]. Chemosphere, 2009, **74**(7): 981-987.
- [24] 王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 等. 东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征 [J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2416-2421.
- [25] 柴剑荣, 俞苏霞, 徐承敏, 等. 固体废物拆解区农作物及家禽类二噁英多氯联苯污染水平研究 [J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(6): 539-541.
- [26] Shen C F, Chen Y X, Huang S B, *et al.* Dioxin-like compounds in agricultural soils near E-waste recycling sites from Taizhou Area, China: chemical and bioanalytical characterization [J]. Environment International. 2009, **35**(1): 50-55.
- [27] 降巧龙, 周海燕, 徐殿斗, 等. 国产变压器油中多氯联苯及其异构体分布特征 [J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 608-612.
- [28] Van den Berg M, Birnbaum L S, Denison M, *et al.* The 2005 World Health Organization Reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for Dioxins and Dioxin-like compounds [J]. Toxicological Sciences, 2006, **93**(2): 223-241.
- [29] Nguyen H, Tu B M, Watanabe M, *et al.* Open dumping site in Asian developing countries: a potential source of polychlorinated dibenz-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(8): 1493-1502.
- [30] 何闪英, 陈昆柏. 浙江省某 PCBs 废物储存点对其邻近滩涂生态系统的毒性风险 [J]. 生态学报, 2011, **31**(7): 4841-4850.
- [31] Wang Q, Shi Y H, Hu J X, *et al.* Determination of dioxin-like polychlorinated biphenyls in soil and moss from Fildes Peninsula, Antarctica [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, **57**(9): 992-996.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of Pleurotus Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《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2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 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