

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性

刘洁, 李晓东*, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 以 3 个 PCBs 污染物封存点周边土壤为对象, 详尽研究了典型电力电容器污染土壤中 209 种 PCBs 同系物含量水平、分布特性及毒性当量, 了解污染土壤中 PCBs 的污染水平和环境风险, 为 PCBs 污染土壤的场地修复提供支撑。对来自于 3 个污染场地的 12 个污染土样分析表明, Soil A 总 PCBs 含量为 $1705.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1} \pm 424.3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ($n=4$), 高于 Soil B ($233.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1} \pm 80.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $n=4$) 和 Soil C ($225.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1} \pm 90.2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $n=4$), 显示 3 种土壤均受到 PCBs 严重污染。不同氯代数的 PCBs 分子中, 三氯联苯及四氯联苯含量最高。Soil A、Soil B 及 Soil C 中 PCBs 的氯元素质量分数分别为 $43.7\% \pm 1.0\%$ 、 $45.5\% \pm 0.5\%$ 和 $44.9\% \pm 0.3\%$, 这一比例接近 Aroclor1242 以及国产 1 号 PCB 绝缘油。指示性 PCBs 与总 PCBs 含量之间存在明显相关关系, 线性拟合方程 $R^2 = 0.998$ 。应用指示性 PCBs 可有效估算总 PCBs 含量, 简化样品分析过程。类二噁英多氯联苯以 PCB77、PCB105 及 PCB118 为主, 三者之和占 dl-PCBs 的 $89.5\% \pm 4.0\%$ 。污染土样的毒性当量(以 WHO-TEQ 计)介于 $3.56 \sim 63.55 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 显示该区域具有较高的环境风险。PCB28/31、PCB33/20、PCB66/80、PCB70、PCB32 及 PCB18 等是含量最高的 PCB 单体。与国内外其他研究相比, 该封存点土壤受到了高浓度 PCBs 污染, 具有较高的环境风险。

关键词: 多氯联苯; 土壤修复; 含量水平; 分布特性; 毒性当量

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3457-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.042

Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil

LIU Jie, LI Xiao-dong*, ZHAO Zhong-hua, QI Zhi-fu, CHEN Tong, YAN Jian-hua

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The homologues levels, distribution characteristics and TEQ of 209 PCBs in soil collected around 3 storage sites of PCB-containing wastes were investigated. The PCBs contents and environmental risk were evaluated to provide a scientific basis for site remediation of PCBs contaminated soil. Totally 12 soil samples were collected from 3 PCB-contaminated sites. The analysis results showed that the PCB-concentration in Soil A was $1705.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1} \pm 424.3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ($n=4$), higher than Soil B ($233.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1} \pm 80.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $n=4$) and Soil C ($225.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1} \pm 90.2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $n=4$), indicating the soil was heavily polluted by PCBs. Trichlorobiphenyl and Tetrachlorobiphenyl dominated the homologues of PCBs. The mass fraction of chlorine in Soil A, Soil B and Soil C was $43.7\% \pm 1.0\%$, $45.5\% \pm 0.5\%$ and $44.9\% \pm 0.3\%$, respectively, which was similar as Aroclor1242 and 1#PCB insulating oil. There was an obvious linear correlation between indicator PCBs and total PCBs ($R^2 = 0.998$), so indicator PCBs can be used to estimate the level of total PCBs. PCB77, PCB105, PCB118 were predominant in doxin-like PCBs, accounting for $89.5\% \pm 4.0\%$ in total. The TEQ levels of the soil samples (in WHO-TEQ) were $3.56\sim 63.55 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, which demonstrated a high environmental risk in the area. PCB28/31, PCB33/20, PCB66/80, PCB70, PCB32 and PCB18 were the main PCBs isomers. Compared with other results, the local soil was heavily contaminated by PCBs and the surroundings were under a relatively high risk of environmental contamination.

Key words: PCBs; soil remediation; concentration levels; distribution pattern; toxic equivalent quantity

多氯联苯(polychlorinated biphenyls, PCBs)是氯化联苯的统称, 共有 209 种同系物。PCBs 具有良好的耐热性和电绝缘性能, 化学性质稳定, 曾被广泛应用于电容器、变压器绝缘油和导热液体^[1]。仅 1929 ~ 1980 年间, 全世界累积 PCBs 产量达到 150 万吨^[2]。

PCBs 是一种难于降解的有机物质, 同时具有较强的生物毒性, 可对免疫系统、生殖系统、神经系统、内分泌系统等造成损害^[3]。另外, 多氯联苯的生物蓄积性和远距离迁移性导致 PCBs 在全球范围内的污染传播, 因此受到了世界各国的广泛关注。

随着 1968 年日本发生“米糠油事件”后, 世界各国陆续停止了 PCBs 的生产和使用。2001 年 5 月, PCBs 被列为《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》12 种特别有害的持久性有机污染物 (POPs) 之一, 是目前已检测到的环境污染物中最具致癌性的物质之一^[4]。

中国自 1965 ~ 1974 年间, 累计生产约 1 万 t

收稿日期: 2015-01-26; 修订日期: 2015-04-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA061304)

作者简介: 刘洁(1985~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为固体废物热处置, E-mail: liujie2090@zju.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: lixd@zju.edu.cn

PCBs, 其中约 90% 是三氯联苯, 即为 1 号 PCB, 10% 是五氯联苯, 即为 2 号 PCB. 三氯联苯主要以封闭形式用于电力电容器生产, 部分以半开放形式用于导热油、液压油、液体绝缘电缆的生产, 氯元素质量分数为 42%, 类似于 Aroclor1242; 五氯联苯主要以开放形式用于油墨、涂料、润滑油、增湿剂等的生产, 氯元素质量分数为 56%, 类似于 Aroclor1254^[5]. 有调查显示, 仅以浙江为例, 受 PCBs 污染的土壤约数万吨. 20 世纪 80 年代起, 中国开始含 PCBs 电力设备的下线及封存^[6]. 但受限于封存条件、管理水平和监测手段, 并且多数贮存点现已超过设计年限, 部分废旧电容器开始腐蚀, 封存场地周边地区已经发生 PCBs 泄漏污染周围土壤现象^[7], 并将进一步威胁周边居民身体健康和生态环境, 因此研究废弃电容器污染土壤 PCBs 的含量及分布特性具有重要意义. 国内已有部分关于电容器污染土壤中 PCBs 的报道^[8, 9], 但主要针对特定种类的 PCBs 同系物, 不利于全面了解土壤 PCBs 污染特性. 本研究分析了典型电力电容器高浓度多氯联苯污染土壤中 209 种 PCBs 同系物的含量水平, 同时提供电容器污染土壤详尽的 PCBs 同系物分布特性, 以期 PCBs 污染土壤的场地修复提供支撑.

1 材料与方法

1.1 样品采集

由全球环境基金资助、国家环境保护总局和世界银行合作开展的“中国多氯联苯管理与处置示范项目”, 将浙江定为项目示范省, 负责示范开展 PCBs 污染物封存点的定位监测以及污染物的清运、暂存、运输和处置等工作. 实验所用土壤来自于以上清运土壤的储存点. 共采集 3 种土壤, 其中土壤 Soil A 来自于浙江绍兴, Soil B 及 Soil C 来自于浙江萧山. 每种土样各采集 4 个样品.

1.2 样品处理及分析

将土壤样品(约 2.0 kg)置于干净的托盘上, 并放于阴暗通风处自然风干. 风干后, 除去土壤中的石块和植物根茎等杂物, 用玻璃研钵将其研磨后全部过 2 mm 筛. 得到的土壤样品反复按照四分法缩分, 直至留下足够分析的数量(约 100 g 左右), 经再次研磨后通过 60 目筛(0.25 mm), 并密封避光保存.

取 2 mm 筛后土壤, 测定了质地、有机质含量、含水量等理化性质及重金属含量. 3 种土样的基本理化性质见表 1, Soil A 为黏壤土, Soil B 和 Soil C 均

为沙壤土. 土壤含水量为 12.2% ~ 15.7%, 孔隙度 40.9% ~ 47.3%. 土壤中铬、镍、铜、锌、镉、汞、铅、砷、钴、砷、硒、锑等 12 种重金属元素均未超过《土壤环境质量标准(征求意见稿)》[GB 15618-2009(征求意见稿)]中土壤无机污染物环境质量第二级标准值.

表 1 3 种 PCBs 污染土壤基本理化性质分析

Table 1 Physical and chemical properties of soil samples

项目	Soil A	Soil B	Soil C
质地	黏壤土	沙壤土	沙壤土
含水量/%	12.2	15.7	15.2
容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.65	1.34	1.29
有机物含量/%	3.02	2.46	4.66
pH	6.83	6.81	7.02
比重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.80	2.34	2.45
孔隙率/%	40.9	42.6	47.3

取 2.00 g 60 目筛后土壤, 置于索式提取器上连续提取 24 h, 溶液经溶剂交换、酸洗、水洗后, 依次经过多级硅胶柱和弗罗里土柱净化, 氮吹定容后进高分辨色质联机(HRGC/HRMS, JMS-800D)检测 PCBs 含量. 详细的预处理步骤及进机条件等参见文献[10]. 检测内容包括从一氯联苯到十氯联苯全部的 209 种多氯联苯同系物, 多氯联苯在 DB-5MS 色谱柱上的流出顺序参考文献[11].

1.3 质量保证和质量控制

在土壤样品前处理的各个阶段, 采用加入¹³C同位素内标来进行质量控制. 在样品索提、酸洗、进机前, 分别加入索提标、净化标和进机标. 所有样品的索提标的回收率在 64% ~ 128% 之间, 净化标的回收率在 78% ~ 124% 之间, 均符合 USEPA Method 1668^[12]方法的相关规定.

2 结果与讨论

2.1 电容器污染土壤中 PCBs 含量

图 1 显示 3 种污染土壤样品中 PCBs 同系物含量及分布. 废弃电力设备封存场地中确有 PCBs 的泄漏, 3 种土壤均受到 PCBs 严重污染. 其中 Soil A 中总 PCBs 含量为 $1705.0\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1} \pm 424.3\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ($n=4$), 样品中 PCBs 最高值达到 $2301\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, PCBs 含量不但超过《土壤环境质量标准(征求意见稿)》[GB 15618-2009(征求意见稿)]中规定的工业用地二级环境标准($3\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 包括 7 种 PCB 单体: PCB28、PCB52、PCB101、PCB118、PCB138、PCB153 和 PCB180), 同时也超过《含多氯联苯废物

污染控制标准》(GB 13015-91)中 PCBs 的污染控制标准 $50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[13]. 按《含多氯联苯废物污染控制标准》(GB 13015-91),多氯联苯含量大于 $500\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的有害废物及电力电容器中用作浸渍剂的多氯联苯必须采用高温焚烧技术处置. Soil B 和 Soil C 中 PCBs 含量相近,分别为 $233.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\pm 80.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ($n=4$) 及 $225.7\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\pm 90.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ($n=4$).

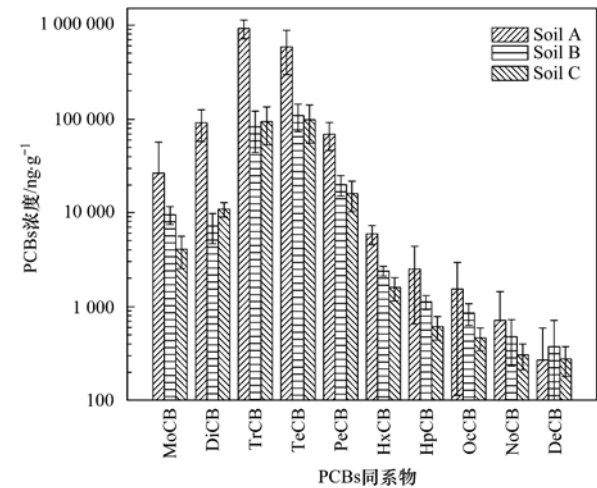


图1 3种土壤中 PCBs 含量及分布
Fig. 1 Levels of PCBs in different soil samples

Soil A 中,三氯联苯(TrCB)含量最高,四氯联苯(TeCB)和二氯联苯(DiCB)次之,三者分别占总 PCBs 含量的 $52.3\%\pm 6.2\%$ 、 $36.1\%\pm 7.3\%$ 和 $5.3\%\pm 2.3\%$; Soil B,TeCB 含量最高,TrCB 和五氯联苯(PeCB)次之; Soil C 中 TrCB 和 TeCB 含量水平相当. 3 种土壤三氯联苯和四氯联苯之和占总 PCBs 的 82% 以上, Soil A、Soil B 及 Soil C 中 PCBs 的氯元素质量分数分别为 $43.7\%\pm 1.0\%$ 、 $45.5\%\pm 0.5\%$ 和 $44.9\%\pm 0.3\%$, 这一比例接近

Aroclor1242,对比我国生产的主要 PCBs 商品,可能的污染源为 1 号 PCBs,与文献[14]的研究结果一致. 本研究土壤中 PCBs 含量明显高于国内部分废旧电容器封存点,如广东阳江某地 ($1\,508\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[8],长江三角洲某变电所 ($429\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[9],浙江台州土壤样品 ($1\,060\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[15],与四川资阳某封存点^[6] ($227\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 及泰国某封存点^[16] 土壤中 PCBs 含量 ($370\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 接近.

2.2 污染土壤中非二噁英类多氯联苯含量
6 种非二噁英类多氯联苯 (Non dioxin like PCBs, 包括 PCB28、PCB52、PCB101、PCB153、PCB138 和 PCB180,也被称为 WHO indicator PCBs) 的含量如表 2 所示. 污染土样的 ndl-PCBs 中, PCB28 的含量最高,其次为 PCB52 及 PCB101,三者之和占 ndl-PCBs 含量的 96% 以上. ndl-PCBs 含量与总 PCBs 含量呈明显线性关系(图 2),线性拟合方程 $R^2=0.998$. 在实际应用中,可用指示性 PCBs 含量来估算 209 种 PCBs 含量以简化分析过程.

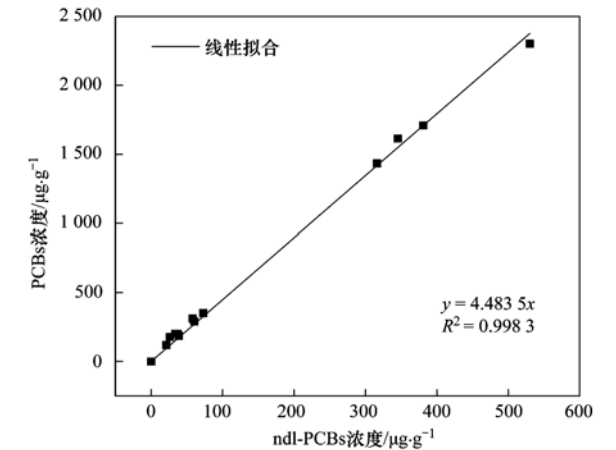


图2 ndl-PCBs 含量与总 PCBs 含量的线性关系
Fig. 2 Linear correlation between ndl-PCBs and total PCBs

表2 3种污染土壤中 ndl-PCB 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 2 Contents of ndl-PCBs in soil samples/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
PCB28	285.83	330.35	471.82	310.99	20.36	60.89	26.83	29.92	17.28	50.30	33.20	46.70
PCB52	23.58	38.91	47.09	27.19	3.29	8.31	4.40	4.52	2.34	7.11	3.78	8.40
PCB101	4.36	8.62	8.58	5.22	1.74	2.66	1.71	1.53	0.98	2.22	1.42	2.28
PCB153	0.70	1.14	0.97	0.65	0.37	0.40	0.34	0.30	0.18	0.33	0.19	0.33
PCB138	0.97	1.28	1.21	0.78	0.42	0.50	0.38	0.36	0.23	0.33	0.20	0.36
PCB180	0.98	0.49	0.42	0.31	0.23	0.31	0.25	0.27	0.14	0.21	0.12	0.16
总和	316.43	380.80	530.10	345.14	26.42	73.07	33.91	36.89	21.16	60.49	38.90	58.23

2.3 污染土壤中类二噁英多氯联苯含量
表 3 显示污染土壤样品中 12 种类二噁英多氯联苯 (dioxin-like PCBs, dl-PCBs) 的含量水平. 污染土样中 A2 的总 dl-PCBs 含量最高,达到 $44.24\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, C3 的总 dl-PCBs 含量最低,为 $4.57\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Soil A 中 dl-PCBs 含量为 $35.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\pm$

$8.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 占总 PCBs 的比例为 $1.98\% \pm 0.52\%$; Soil B 中 dl-PCBs 含量为 $9.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1} \pm 2.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 占总 PCBs 的比例为 $4.25\% \pm 0.06\%$; Soil C 中 dl-PCBs 含量为 $6.6 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1} \pm 2.2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 占总 PCBs 的比例为 $3.05\% \pm 0.25\%$ (图 3). 图 4 显示了污染土壤 dl-PCBs 同系物分布情况, 3 种土壤均以 PCB77、PCB105 及 PCB118 为主, 三者之和占 dl-PCBs 的 $89.5\% \pm 4.0\%$, 与文献[17, 18]对电容器拆解区污染土壤的研究结果一致, 表明土壤中 PCBs 的原始来源是用作电容器绝缘液的三氯联苯.

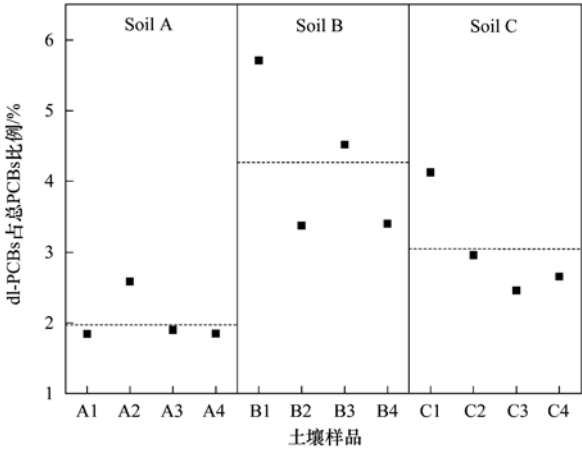


图 3 dl-PCBs 占总 PCBs 的比例及均值分布
Fig. 3 DL-PCBs Ratio and average values in soil samples

由于不同研究报道的 PCBs 化合物的种类存在差别, 且不同 PCBs 化合物的毒性也不同^[19], 因此本研究以 12 种二噁英多氯联苯的毒性当量 (TEQ) 为基准, 研究不同土壤样品的污染水平. 污染土壤 12 种 dl-PCBs 的 TEQ 值 (以 WHO-TEQ 计) 介于 $3.56 \sim 63.55 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 不仅远远高于金华土壤样品 $38.33 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[20], 也明显高于浙江省某 PCBs 封存点

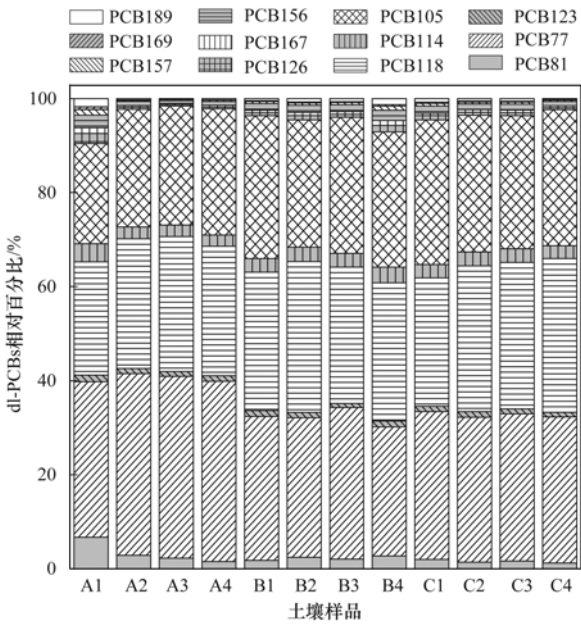


图 4 dl-PCBs 在污染土壤中的分布
Fig. 4 Composition of dl-PCBs in different soil samples

泥样 12 种 dl-PCBs 的 WHO-TEQ ($0.35 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[21]. Soil A 的 4 种样品 TEQ 均大于 $10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中 A1 高达 $63 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 显示该区域已受到 PCBs 严重污染, 具有很高的环境风险. Soil B 的 TEQ 与某废旧电容器封存点 0~30 cm 土壤的 TEQ ($9.94 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[22] 相当, Soil C 的 TEQ 值均小于 $10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 且 4 种样品的差异较小. 在 12 个土壤样品中, PCB126 对总 TEQ 的贡献率均大于 80%, 最高可达到 89%, 尽管其含量相对较少, 但由于其具有最大的毒性当量因子 (0.1), 其在土壤、大气和水体中的迁移转化不可忽略. 此外, PCB77 对总 TEQ 值的贡献率从 1.4%~10.2% 不等, PCB169 占总 TEQ 的比例介于 2.7%~8.1%, 其余 9 种组分所占比例之和均不超过 6.5%.

表 3 3 种污染土壤中 dl-PCBs 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 3 Contents of dl-PCBs in soil samples/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
PCB81	1.77	1.25	0.99	0.39	0.18	0.29	0.19	0.18	0.10	0.12	0.07	0.10
PCB77	8.74	17.12	16.90	9.75	3.11	3.52	2.93	1.88	1.53	2.64	1.43	2.57
PCB123	0.37	0.49	0.47	0.30	0.13	0.13	0.08	0.08	0.06	0.10	0.05	0.08
PCB118	6.36	12.19	12.57	7.00	3.00	3.80	2.64	2.01	1.33	2.65	1.43	2.71
PCB114	1.02	1.13	1.06	0.61	0.29	0.37	0.27	0.22	0.14	0.25	0.13	0.23
PCB105	5.64	11.06	11.08	6.83	3.09	3.21	2.64	1.97	1.50	2.49	1.29	2.40
PCB126	0.57	0.21	0.13	0.09	0.07	0.11	0.05	0.09	0.04	0.06	0.03	0.03
PCB167	0.32	0.16	0.11	0.10	0.05	0.08	0.06	0.07	0.02	0.05	0.03	0.03
PCB156	0.71	0.37	0.29	0.21	0.14	0.18	0.13	0.15	0.08	0.10	0.06	0.08
PCB157	0.30	0.13	0.09	0.07	0.05	0.06	0.05	0.06	0.03	0.04	0.02	0.03
PCB169	0.17	0.04	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00
PCB189	0.45	0.11	0.06	0.07	0.04	0.08	0.06	0.09	0.04	0.04	0.03	0.02
总和	26.41	44.24	43.76	25.44	10.18	11.85	9.10	6.83	4.87	8.55	4.57	8.27
TEQ/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	63.55	25.13	16.55	11.42	7.91	12.06	6.17	10.16	4.99	6.45	3.56	3.98

2.4 电容器污染土壤 PCBs 分布特性

图 5 显示土壤样品中不同氯代数的多氯联苯同系物的分布情况。因各样品中六氯及更高氯代数的 PCBs 占比均小于 3%，故仅对五氯及以下的 PCBs 进行分析。

3 种土壤样品一氯联苯分布相似，PCB3 比例超过 55%，其次为 PCB2 和 PCB1；二氯联苯的分布有所不同，Soil A 含量最高同系物为 PCB15 及 PCB5/8，Soil B 含量最高的 3 种 PCB 同系物依次为

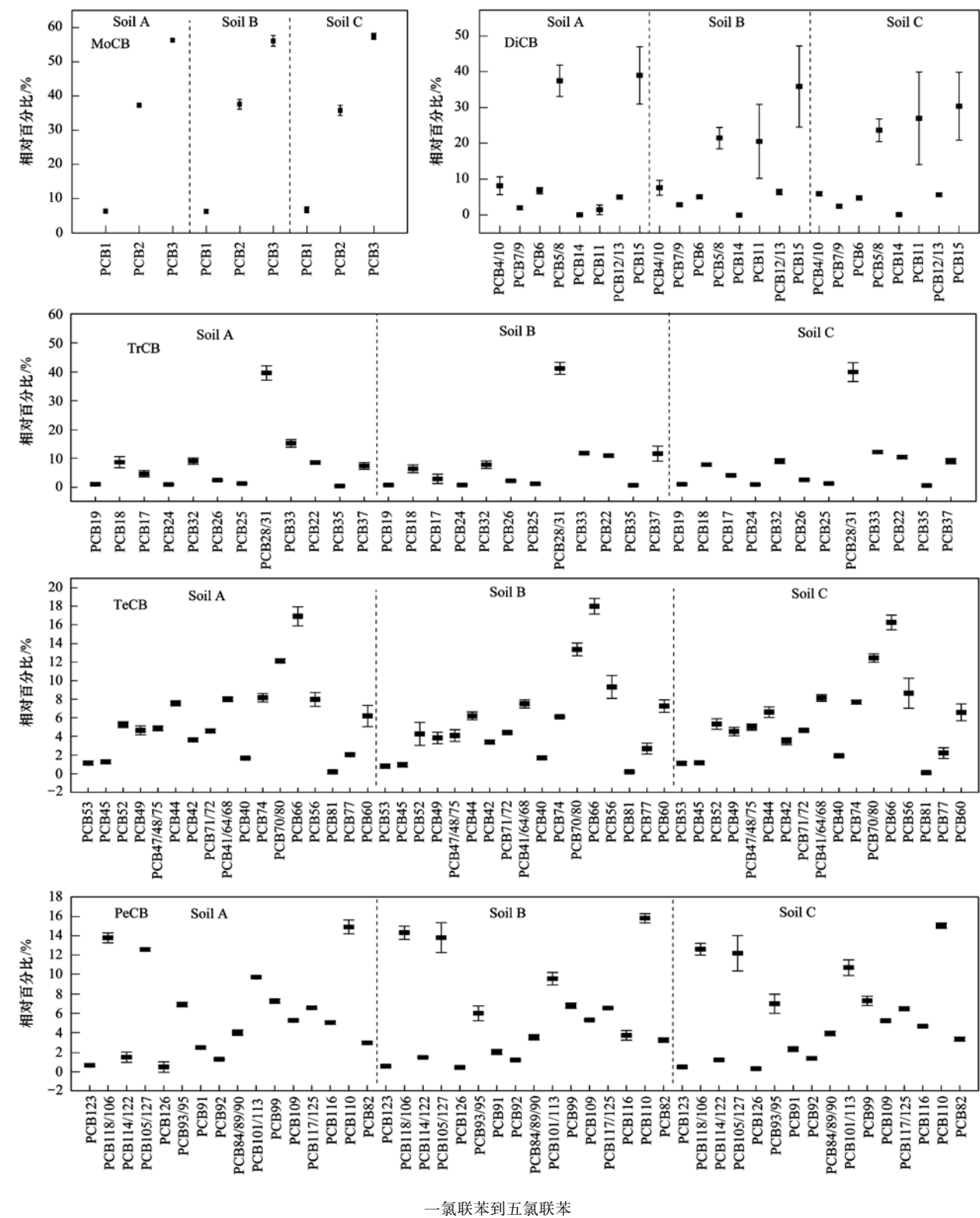


图 5 污染土壤 PCBs 分布特性

Fig. 5 Distribution pattern of PCBs in different soil samples (MoCB to PeCB)

PCB15、PCB5/8 及 PCB11, Soil C 含量最高的 3 种 PCB 同系物依次为 PCB15、PCB11 及 PCB5/8. Hu 等^[23]的研究结果表明环境中较高含量的 PCB11 不是直接来自于商业的 Aroclor 产品,有可能是 PCB77 和 PCB118 的中间代谢产物^[24]或不同的环境降解过程,因此 Soil B 及 Soil C 中多氯联苯的环境降解时间可能长于 Soil A. 三氯联苯均以 PCB28/31 为主,其占三氯联苯比例约为 40%. 四氯联苯含量最高的两种 PCB 同系物依次为 PCB66、PCB70/80. 五氯联苯分布亦无明显差别,含量最高的 3 种同系物依次为 PCB110、PCB118/106 和 PCB105/127.

从 PCBs 的单体分布看,3 种土壤中 PCB28/31 所占比例最高,占总 PCBs 的 14.8%~19.9%,略高于天津表层土壤中 PCB28/31 比例(11.3%)^[25]. 其他 PCBs 单体,如 PCB33/20、PCB66/80、PCB70、PCB32 及 PCB18 也占有较高比例,与文献^[6,8]报道的废弃电容器封存点中主要的 PCBs 单体分布一致,与国产 1 号电容器废油中 PCBs 单体以 PCB18、PCB33、PCB31/28 为主的分布特性略有不同^[26],可能是周围不同的环境因子作用的结果.

3 结论

(1)采集的 3 种土壤均受到了严重的 PCBs 污染,亟待治理. Soil A 中总 PCBs 含量为 $1705.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1} \pm 424.3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ($n=4$),高于 Soil B ($233.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1} \pm 80.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $n=4$) 和 Soil C ($225.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1} \pm 90.2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $n=4$),PCBs 含量最高值可达 $2301 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 污染土壤中 PCBs 以三氯联苯及四氯联苯为主,两者之和占总 PCBs 的 82% 以上. 指示性 PCBs 含量与总 PCBs 呈明显的线性关系,实际应用中可有效估算总 PCBs 含量.

(2)污染土壤 12 种类二噁英多氯联苯以 PCB77、PCB105 及 PCB118 为主,三者之和占 dl-PCBs 的 $89.5\% \pm 4.0\%$. 毒性当量值(以 WHO-TEQ 计)介于 $3.56 \sim 63.55 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,显示相应封存点已受到 PCBs 严重污染,具有较高的环境风险. PCB126 对总毒性当量的贡献率均大于 80%,其在土壤、大气和水体中的迁移转化过程对人类及环境健康的影响不可忽略.

(3)从 PCBs 的单体分布看,3 种土壤中 PCB28/31 所占比例最高,占总 PCBs 的 14.8%~19.9%. 不同地点污染土壤 PCBs 同系物分布略有差异,可能原因在于不同的 PCBs 污染物类型及不同的环境降解程度.

致谢:感谢 2014 全国生态修复研究生论坛指导与资助.

参考文献:

- [1] Couté N, Richardson J T. Catalytic steam reforming of chlorocarbons: polychlorinated biphenyls (PCBs) [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2000, **26**(4): 265-273.
- [2] Breivik K, Sweetman A, Pacyna J M, *et al.* Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners—a mass balance approach. 1. Global production and consumption [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **290**(1-3): 181-198.
- [3] Heinzow B, Mohr S, Ostendorp G, *et al.* PCB and dioxin-like PCB in indoor air of public buildings contaminated with different PCB sources—deriving toxicity equivalent concentrations from standard PCB congeners [J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(9): 1746-1753.
- [4] 彭伟, 谯华, 方振东, 等. 多氯联苯污染土壤修复技术研究进展[J]. *化学与生物工程*, 2014, **31**(6): 9-14.
- [5] Ren N Q, Que M X, Li Y F, *et al.* Polychlorinated biphenyls in Chinese surface soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(11): 3871-3876.
- [6] 吴水平, 印红玲, 刘碧莲, 等. 废弃电容器封存点及旧工业场地多氯联苯的污染特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3277-3283.
- [7] Xing Y, Lu Y L, Dawson R W, *et al.* A spatial temporal assessment of pollution from PCBs in China [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(6): 731-739.
- [8] 陈来国, 蔡信德, 黄玉妹, 等. 废弃电容器封存点多氯联苯的含量和分布特征[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(9): 833-837.
- [9] 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.
- [10] Chen T, Li X D, Yan J H, *et al.* Polychlorinated biphenyls emission from a medical waste incinerator in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **172**(2-3): 1339-1343.
- [11] Frame G M. A collaborative study of 209 PCB congeners and 6 Aroclors on 20 different HRGC columns 1. Retention and coelution database [J]. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 1997, **357**(6): 701-713.
- [12] USEPA Method 1668B, Chlorinated Biphenyl Congeners in Water, Soil, Sediment, Biosolids, and Tissue by HRGC/HRMS [S].
- [13] GB 13015-91, 含多氯联苯废物污染控制标准[S].
- [14] Huang J, Matsumura T, Yu G, *et al.* Determination of PCBs, PCDDs and PCDFs in insulating oil samples from stored Chinese electrical capacitors by HRGC/HRMS [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(2): 239-246.
- [15] 邓绍坡, 骆永明, 宋静, 等. 典型地区多介质环境中多氯联苯、镉致癌风险评估[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(4): 731-742.
- [16] Watanabe S, Laovakul W, Boonyathumanondh R, *et al.* Concentrations and composition of PCB congeners in the air around stored used capacitors containing PCB insulator oil in a

- suburb of Bangkok, Thailand [J]. Environmental Pollution, 1996, **92**(3): 289-297.
- [17] Zhao X R, Zheng M H, Zhang B, *et al.* Evidence for the transfer of polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo-p-dioxins, and polychlorinated dibenzofurans from soil into biota [J]. Science of the Total Environment, 2006, **368**(2-3): 744-752.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 韩见龙, 沈海涛, 于村, 等. 浙江省部分地区土壤中二噁英和多氯联苯的污染水平初探[J]. 中国卫生检验杂志, 2009, **19**(5): 1124-1127.
- [22] 周玲莉, 吴广龙, 薛南冬, 等. 废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评估[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 704-710.
- [23] Hu D F, Martinez A, Hornbuckle KC. Discovery of non-aroclor PCB (3, 3'-dichlorobiphenyl) in Chicago air [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(21): 7873-7877.
- [24] Zanolli G, Perez-Jiménez J R, Young L Y, *et al.* Microbial reductive dechlorination of weathered and exogenous co-planar polychlorinated biphenyls (PCBs) in an anaerobic sediment of Venice Lagoon [J]. Biodegradation, 2006, **17**(2): 19-27.
- [25] 李志勇, 刘金巍, 孔少飞, 等. 天津市区表层土壤中多氯联苯的污染特征[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(6): 685-690.
- [26] 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.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行