

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靓 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
快雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆勇鹤 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 迟建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙昊 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征

王登阁¹, 崔兆杰^{1*}, 傅晓文¹, 殷永泉¹, 许宏宇²

(1. 山东大学环境科学与工程学院, 济南 250100; 2. 济南市环境保护监测站, 济南 250014)

摘要: 2011年4月采集了东营市孤岛地区20个表层土壤样品, 采用索氏提取-弗罗里土柱净化-气相色谱-电子捕获检测器检测的方法对采集的样品进行测定, 揭示了该地区表层土壤中类二噁英类 PCBs (dioxin-like polychlorinated biphenyls, DL-PCBs) 的污染特征。结果表明, DL-PCBs 的含量范围为 $1.4 \sim 7.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $(3.5 \pm 1.7) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; DL-PCBs 的毒性当量为 $1.2 \sim 31.8 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $5.4 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过了加拿大土壤环境质量标准 ($4.0 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)。各采样点间 DL-PCBs 的同系物组成相似, 均以四氯联苯和五氯联苯为主, 两者之和超过 DL-PCBs 总量的 80%; 从孤岛城镇到郊区, DL-PCBs 的含量逐渐降低, 这与许多化工厂分布在城镇周围有关。相关性分析显示, 土壤中 DL-PCBs 的含量与土壤有机碳含量与黏粒含量显著正相关 (R^2 分别为 0.732 和 0.687, $P < 0.01$), 而与土壤砂粒含量负相关 ($R^2 = -0.438$, $P < 0.05$)。

关键词: 类二噁英类 PCBs; 孤岛地区; 土壤; 污染特征; 生态风险

中图分类号: X131; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2416-06

Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying

WANG Deng-ge¹, CUI Zhao-jie¹, FU Xiao-wen¹, YIN Yong-quan¹, XU Hong-yu²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100, China; 2. Ji'nan Environmental Protection Monitoring Station, Ji'nan 250014, China)

Abstract: To investigate pollution characteristics of dioxin-like polychlorinated biphenyls (DL-PCBs) in Gudao Region, Dongying City, twenty surface soil samples were collected in April, 2011. The DL-PCBs in soil samples were determined by Soxhlet extraction-Florisil purification-Gas Chromatography (GC)-Electron Capture Detector (ECD). The concentration of DL-PCBs in surface soils ranged from $1.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $7.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with the mean concentration of $(3.5 \pm 1.7) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The total TEQ level was between $1.2 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $31.8 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the mean TEQ was $5.4 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, which exceeded the Canadian soil environment quality guidelines ($4.0 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$). The congener profiles of DL-PCBs were similar among sites. Tetra-CB and penta-CB were the major homologues in all soil samples, together accounting for more than 80% of the total DL-PCBs. The level of DL-PCBs exhibited a decreasing trend with the increasing distance from the Gudao town to the suburb, which could be attributed to the chemical plants around the town. The correlation analysis showed that the concentration of DL-PCBs was positively correlated with the organic matter content and clay particle content (R^2 were 0.732 and 0.687, separately, $P < 0.01$), but negatively correlated with the sand particle content ($R^2 = -0.438$, $P < 0.05$).

Key words: dioxin-like polychlorinated biphenyls (DL-PCBs); Gudao Region; soil; characteristic; ecological risk

多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 是高温条件下联苯上的氢原子被氯原子取代后生成的一类有机化合物。由于其具有化学稳定性、低挥发性、不可燃及高绝缘等特性, PCBs 曾被广泛用于阻燃剂、增塑剂、润滑剂、油漆添加剂以及电容器和变压器中的热交换剂和绝缘油等^[1-4]。PCBs 具有高毒性、持久性以及生物累积性, 被列入《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》中首批需要控制的 POPs 黑名单^[5]。我国自 1966 ~ 1975 年间, 共生产 PCBs 约 1 万 t (主要为三、四、五氯联苯), 20 世纪 80 年代初, 还从其他国家进口了大量的装有 PCBs 的电力电容器^[6]。1974 年我国禁止使用和生产 PCBs, 但目前 PCBs 仍可以在许多的工业过程中以副产物的形式产生^[7]。

类二噁英类 PCBs (DL-PCBs) 是 209 种 PCBs 同系物中毒性最强的 12 种, 虽然 DL-PCBs 在环境中含量较低, 但由于具有高毒性, DL-PCBs 在环境中的毒性贡献相当高, 因此 DL-PCBs 引起国内外的普遍关注。但是, PCBs 相关报道主要集中在大气^[8]、水体^[9]、土壤^[10]、沉积物^[11]、鱼类^[12]和人体组织^[13]等的浓度特征和分布方面, 只有少数文献研究了 DL-PCBs 在土壤中的残留和分布特征, 而孤岛地区土壤中 DL-PCBs 的污染情况未见报道。

孤岛镇 (东经 $118^{\circ}39' \sim 119^{\circ}8'$, 北纬 $37^{\circ}47' \sim$

收稿日期: 2012-09-11; 修订日期: 2012-10-23

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项 (201109022)

作者简介: 王登阁 (1985 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境监测, E-mail: wangdengge123520@126.com

* 通讯联系人, E-mail: cuizj@sdu.edu.cn

37°84′) 位于山东省东营市的东北部, 是黄河三角洲地区新崛起的石油工业重镇, 胜利油田自 1970 年起在此进行石油勘探开发, 带动当地石油工业的迅速发展. 但在石油开发和工业生产过程中, 使用了大量含有 PCBs 的电容器和变压器, 并且该地区有几家大型的使用 PCBs 作为添加剂的油漆和电容器工厂, 可能给当地的环境带来了严重的 PCBs 污染.

土壤是环境中有机污染物的源和汇: DL-PCBs 具有较高的辛醇-水分配系数, 易被土壤中的有机物吸附, 大气和水体中的 DL-PCBs 也可以通过干湿沉降和地表径流等方式在土壤富集; 土壤中的 DL-PCBs 通过挥发、溶解等方式可以再次进入大气和水体环境中. 土壤中的污染物也可以被植物吸收, 通过食物链对人体健康造成危害.

本研究通过索氏提取-佛罗里土柱净化-气相色谱-电子捕获检测器分析, 对孤岛地区表层土壤中 12 种毒性最强的 DL-PCBs 同系物含量进行测定, 揭示了该地区 DL-PCBs 的浓度特征和分布规律.

1 材料与方法

1.1 样品采集

按照土壤样品采集技术规范, 于 2011 年 4 月在孤岛地区采集了 20 个表层 (0 ~ 20 cm) 土壤样品 (图 1). 每个样品按照对角线采样法由采样点附近采集的 5 个子样品均匀混合而成. 采集的样品在实验室中室温风干, 取出石块和植物残留体后, 一部分研磨过 60 目筛, 装于棕色样品瓶中低温保存至分析, 一部分过 10 和 100 目筛, 以供土壤基本理化性质分析.

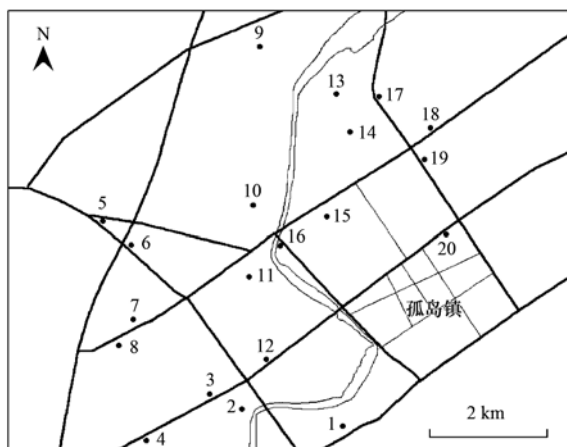


图 1 孤岛地区采样点示意

Fig. 1 Map of sampling sites in Gudao Region

1.2 仪器与试剂

仪器: 索氏提取器 (天津玻璃仪器厂); 旋转蒸

发仪 (上海亚荣生化仪器厂); GC-2014 型气相色谱仪配电子捕获检测器 (ECD)、AOi 自动微量进样器、工作站 GC solution release 2.30 (日本岛津公司); Rtx-5 毛细管色谱柱 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, 美国 restek 公司); 佛罗里土柱 (500 mg, 6 mL, 美国 Agilent 公司); 氮吹浓缩仪 (天津市恒奥科技发展有限公司).

试剂: 正己烷 (分析纯, 天津市广成化学试剂有限公司)、丙酮 (分析纯, 天津泰兴试剂厂), 以上试剂均需在全玻璃系统蒸馏后使用; 无水硫酸钠 (分析纯, 450℃ 活化 4 h, 天津市科密欧化学试剂开发中心); 铜丝 (用稀硝酸去除表面氧化物后, 分别用去离子水和丙酮润洗, 上海化学试剂厂); 浓硫酸 (分析纯, 莱阳经济技术开发区精细化工厂); 高纯氮 (纯度 > 99.99%, 大兴气体厂); DL-PCBs 混标 PCB-Mix41 溶液以及回收率指示物标样 PCB209 (Dr. Ehrenstorfer 实验室).

1.3 样品分析

参照文献 [14], 称取 40 g 土壤样品, 与 10 g 无水硫酸钠混合均匀, 加入回收率指示物标样 PCB209 后 (在进行批量实验之前, 预先测试过土壤样品, 没有检测到 PCB209), 装入经抽提的滤纸筒内, 加入铜丝, 用 200 mL 正己烷和丙酮等体积混合溶剂 (1:1) 在 60℃ 条件下提取 24 h. 提取液在旋转蒸发仪上浓缩并分别经浓硫酸和佛罗里土柱净化后, 将洗脱液浓缩后用氮吹仪吹扫定容至 1 mL, 进样 1 μL 进行色谱分析.

进样口温度为 260℃, 进样方式为不分流进样. 检测器温度为 300℃, 载气为高纯氮, 柱流速为 1 mL·min⁻¹. Rtx-5 柱的升温程序为初始温度 150℃, 保持 2 min, 以 10℃·min⁻¹ 升至 200℃, 保持 2 min, 然后以 2℃·min⁻¹ 升至 290℃ 并保持 20 min. 样品通过色谱峰保留时间定性, 峰面积外标法定量.

为保证实验数据的准确性和精确性, 样品分析过程中进行了严格的质量保证和质量控制. DL-PCBs 的仪器检测限为 0.4 ~ 0.8 pg, 方法检测限为 1.5 ~ 3.9 ng·kg⁻¹; 基质加标回收率在 81.3% ~ 112.6% 之间; 样品重复样 RSD 为 1.6% ~ 12.1% (n=6); 以 PCB209 进行样品处理和分析过程的回收率控制, 回收率在 75.6% ~ 112.7% 之间, 样品最终浓度经此回收率校正. 实验过程中还进行了方法空白和加标空白测试, 结果发现空白样品中没有 DL-PCBs 检出.

按照中国土壤学会农业化学专业委员会制定的

方法^[15]测定了 20 个土壤样品的有机质含量(重铬酸钾-油预热法)、机械组成(比重计法)和含盐量(重量法)。

2 结果与讨论

2.1 孤岛地区表层土壤中 DL-PCBs 的浓度特征和生态风险评价

孤岛地区 20 个表层土壤采样点中 DL-PCBs 的测定结果(经回收率校正)如表 1 所示. 在所有样品中均检测到了 DL-PCBs 的化合物,不同采样点的 DL-PCBs 的含量水平存在较大的差异,DL-PCBs 总量($\sum_{12}$ PCBs)的含量范围为 $1.4 \sim 7.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $(3.5 \pm 1.7) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 最低含量出现在

采样点 6 处,最高含量出现在采样点 12 处. 高含量点(采样点 1、2、3、11、12、15、16、19、20)主要分布在城镇周围,离城镇较远的采样点(5~8)则表现出较低的 DL-PCBs 含量. 该地区 $\sum_{12}$ PCBs 的平均含量大多高于文献报道的我国其他地区的 DL-PCBs 的浓度^[16~18],但是其低于长江三角洲电子垃圾拆解区附近的土壤和沉积物中的含量^[19](分别为 $6.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $12.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). 孤岛地区 $\sum_{12}$ PCBs 的含量范围显著高于西班牙北部的坎塔布里亚地区和美国纽约州东南部的东河地区的沿岸水体沉积物^[20, 21]中 $\sum_{12}$ PCBs 的含量范围,并且远高于南极背景土壤中 DL-PCBs 残留^[22].

表 1 孤岛地区表层土壤中 DL-PCBs 同系物的含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Concentrations of DL-PCBs congeners in surface soil samples of Gudao Region/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

采样点	PCB81	PCB77	PCB118	PCB123	PCB114	PCB105	PCB126	PCB167	PCB156	PCB157	PCB169	PCB189	$\sum_{12}$ PCBs
1	2.3	2.7	1.2	7.9×10^{-2}	2.2×10^{-1}	1.2×10^{-2}	nd ¹⁾	2.4×10^{-1}	1.0×10^{-2}	2.8×10^{-2}	6.8×10^{-3}	2.0×10^{-2}	6.9
2	1.2	1.0	1.6	4.2×10^{-2}	1.5×10^{-1}	1.2×10^{-2}	1.6×10^{-2}	1.6×10^{-1}	nd	2.1×10^{-2}	7.0×10^{-3}	8.5×10^{-3}	4.2
3	1.8	1.4	1.2	5.5×10^{-2}	6.0×10^{-1}	1.4×10^{-2}	2.4×10^{-2}	1.5×10^{-1}	1.6×10^{-2}	2.5×10^{-2}	6.6×10^{-3}	7.2×10^{-2}	5.4
4	9.4×10^{-2}	2.7×10^{-2}	1.4	3.4×10^{-2}	5.5×10^{-2}	1.7×10^{-2}	1.6×10^{-2}	1.4×10^{-1}	nd	7.8×10^{-3}	nd	1.1×10^{-2}	1.8
5	7.0×10^{-2}	2.5×10^{-2}	1.6	1.2×10^{-1}	1.7×10^{-1}	1.8×10^{-2}	1.9×10^{-2}	1.3×10^{-1}	2.9×10^{-2}	2.6×10^{-2}	1.8×10^{-2}	3.5×10^{-3}	2.2
6	1.5×10^{-1}	3.8×10^{-2}	9.5×10^{-1}	3.4×10^{-2}	6.1×10^{-2}	1.8×10^{-2}	1.2×10^{-2}	7.8×10^{-2}	5.3×10^{-2}	6.1×10^{-3}	nd	nd	1.4
7	2.2×10^{-1}	3.4×10^{-2}	1.2	4.8×10^{-2}	9.8×10^{-2}	1.2×10^{-2}	1.7×10^{-2}	9.0×10^{-2}	3.9×10^{-3}	6.6×10^{-3}	nd	1.6×10^{-2}	1.8
8	4.1×10^{-1}	4.5×10^{-2}	1.4	4.2×10^{-2}	1.1×10^{-1}	1.4×10^{-2}	9.2×10^{-2}	2.1×10^{-1}	nd	4.8×10^{-2}	nd	2.9×10^{-3}	2.4
9	2.2×10^{-1}	2.1×10^{-1}	1.7	3.1×10^{-2}	1.8×10^{-1}	7.0×10^{-3}	4.7×10^{-2}	5.1×10^{-2}	6.0×10^{-2}	nd	3.1×10^{-3}	2.0×10^{-2}	2.5
10	4.6×10^{-1}	2.6×10^{-1}	1.0	1.7×10^{-2}	1.1×10^{-1}	6.4×10^{-2}	6.8×10^{-2}	2.6×10^{-1}	1.6×10^{-2}	4.7×10^{-2}	nd	3.7×10^{-2}	2.4
11	2.6	7.1×10^{-1}	1.5	8.2×10^{-2}	1.8×10^{-1}	1.2×10^{-2}	2.5×10^{-2}	1.3×10^{-1}	2.0×10^{-2}	1.6×10^{-2}	nd	5.4×10^{-3}	5.3
12	4.3	7.6×10^{-1}	1.8	6.6×10^{-2}	2.1×10^{-1}	8.8×10^{-2}	2.9×10^{-2}	1.4×10^{-1}	5.1×10^{-3}	2.2×10^{-2}	1.7×10^{-2}	1.1×10^{-2}	7.4
13	7.2×10^{-1}	5.2×10^{-1}	1.1	2.4×10^{-2}	2.5×10^{-1}	2.1×10^{-2}	2.6×10^{-2}	9.3×10^{-2}	9.8×10^{-3}	1.6×10^{-2}	2.2×10^{-2}	3.7×10^{-3}	2.8
14	8.8×10^{-2}	2.4×10^{-2}	1.7	1.2×10^{-1}	1.2×10^{-1}	3.1×10^{-2}	1.8×10^{-2}	3.2×10^{-1}	3.2×10^{-2}	2.6×10^{-2}	nd	nd	2.3
15	5.1×10^{-1}	6.2×10^{-2}	1.9	1.0×10^{-1}	1.1×10^{-1}	2.1×10^{-2}	5.2×10^{-2}	1.7×10^{-1}	2.2×10^{-2}	2.6×10^{-2}	nd	2.4×10^{-2}	3.0
16	1.1	1.4×10^{-1}	1.3	3.4×10^{-2}	1.7×10^{-1}	1.7×10^{-2}	4.2×10^{-2}	1.5×10^{-1}	1.9×10^{-2}	3.7×10^{-2}	3.0×10^{-3}	2.8×10^{-2}	3.0
17	1.5	1.6×10^{-1}	1.3	1.8×10^{-2}	9.0×10^{-1}	1.6×10^{-2}	3.7×10^{-2}	1.6×10^{-1}	2.7×10^{-2}	2.9×10^{-2}	1.0×10^{-2}	nd	4.1
18	1.5×10^{-1}	4.0×10^{-2}	1.4	2.9×10^{-2}	8.8×10^{-2}	2.7×10^{-2}	7.3×10^{-2}	2.3×10^{-1}	7.3×10^{-3}	4.1×10^{-2}	2.0×10^{-2}	2.7×10^{-2}	2.1
19	2.2	4.5×10^{-2}	1.3	3.5×10^{-2}	1.7×10^{-1}	nd	3.1×10^{-1}	1.4×10^{-1}	6.6×10^{-2}	1.2×10^{-2}	nd	6.9×10^{-3}	4.3
20	1.8	3.2×10^{-2}	1.6	6.6×10^{-2}	9.4×10^{-2}	4.8×10^{-2}	3.5×10^{-2}	1.5×10^{-1}	2.0×10^{-2}	2.7×10^{-2}	4.1×10^{-2}	nd	4.0

1)nd 为未检出

12 种 DL-PCBs 同系物中,低氯代的 PCB77、PCB81 和 PCB118 含量较高,平均值分别为 0.4、1.1 和 $1.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; PCB118 的含量在该地区大部分表层土壤中含量最高,这与 PCB118 在工业产品中含量最高有关. 在工业产品 Aroclor 1221 和 Aroclor 1242 中,PCB77、PCB81 和 PCB118 含量占很大的部分,因此,Aroclor 1221 和 Aroclor 1242 可能与该地区 DL-PCBs 的来源有关. 高氯代的 PCB156、PCB157、PCB169、PCB189 含量较低,平均值均低于 $25 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$,部分采样点未检测到某些高氯代的 DL-PCBs 同系物,表明研究区各样点 PCBs

的同系物含量差异较大. 各采样点间 DL-PCBs 同系物组成相似(图 2),均以四氯联苯和五氯联苯为主,两者之和占 $\sum_{12}$ PCBs 的 80% 以上,而六氯联苯和七氯联苯占的比例很低. 中国的背景土壤也表现出此种现象,但与国外背景土壤中 PCBs 的组成不同,主要是因为中国的工业产品主要是由低氯联苯组成的,而国外的工业产品主要由氯代较高的 PCBs 组成^[23].

据 Frame^[24]报道,DL-PCBs 在 PCBs 的工业品(Aroclor1211、1231、1242、1248、1254、1260)中所占的比例范围为 0.8%~23.41%,因此按照 DL-

PCBs 所占的比例范围和孤岛地区的 $\sum_{12}$ PCBs 污染平均值估算, 该地区 PCBs 总量范围为 $14.8 \sim 432 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 该含量范围显著高于青岛沿岸沉积物中 PCBs 的浓度^[25] ($1.5 \sim 36.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和韩国马山市沿岸的沉积物中 PCBs 的含量^[26] ($1.2 \sim 41.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 但低于我国含多氯联苯废物污染控制标准^[27] ($50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 以及加拿大农业用土壤 ($500 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和居住地土壤 ($1\,300 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 中多氯联苯的控制标准^[28].

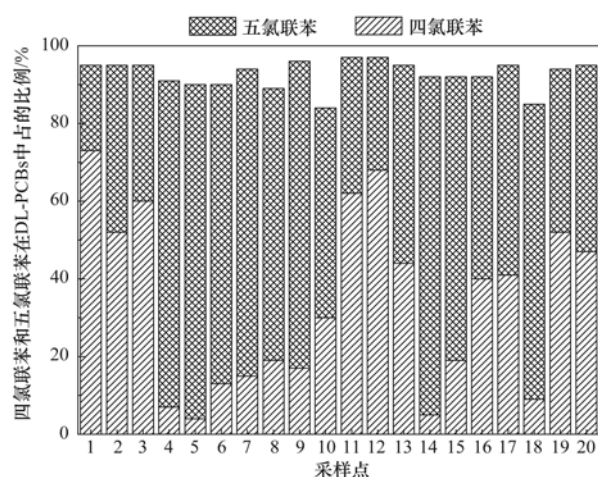


图2 四氯联苯和五氯联苯在 $\sum_{12}$ PCBs 中占的比例

Fig. 2 Contributions of tetra-CB and penta-CB to the $\sum_{12}$ PCBs

毒性当量 (toxic equivalency, TEQ) 可用以表征 DL-PCBs 的各同系物与 2,3,7,8-四氯二苯并对二噁英相比较的类似二噁英的相对毒性活度, 因此可以用于评价 DL-PCBs 对暴露人群造成的影响. TEQ 的计算公式如下:

$$\text{TEQ} = \sum \text{TEF} \cdot c_i$$

式中, TEF (toxic equivalency factors) 是 DL-PCBs 的毒性当量因子^[29], c_i 为 12 种 DL-PCBs 同系物单体对应的含量.

计算结果表明, 孤岛地区 DL-PCBs 的毒性当量在 $1.2 \sim 31.8 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $5.4 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其中, 由于 PCB126 的 TEF 较大, 导致 PCB126 是 12 种 DL-PCBs 单体中主要的 TEQ 贡献者, 占到了 TEQ 的 80% 以上. 参照加拿大土壤环境质量标准, 该地区毒性当量的平均值超过了该标准中规定的毒性当量的限值 ($4.0 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$), 表明该地区的局部已经受到了严重的 DL-PCBs 污染, 可能对当地的生态环境和居民的身体健康造成了威胁.

2.2 孤岛地区土壤中 DL-PCBs 的分布规律

从孤岛镇到郊区, $\sum_{12}$ PCBs 呈现逐渐降低的趋势, 这与许多化工厂 (包括石油加工厂) 分布在城镇的周围、在生产过程中向大气、水体和土壤中排放以副产物产生的 DL-PCBs 有关. 此外, 在孤岛镇有几家大型的生产油漆和高压变压器的工厂, 由于 PCBs 可以作为油漆添加剂和变压器中的液压油, 这些工厂在生产过程中会通过不同途径向环境中排放 DL-PCBs, 然后通过大气的干、湿沉降和地表径流等方式, 在表层土壤中沉积.

农田土壤中 DL-PCBs 的含量相对城镇周围的土壤而言一般相对较低, 但是采样点 1 和 3 处比采样点 5~8 中 DL-PCBs 的含量高. 原因除了在采样点 1 和 3 周围有石油化工厂和在农田管理过程中施用含有 DL-PCBs 的农用化学品 (添加剂、代谢产物或杂质) 以外, 这两处采样点的灌溉用水流经孤岛镇, 水道旁边的石油化工厂等企业的污水没有处理达标就随意排放, 导致这两处采样点的 $\sum_{12}$ PCBs 含量显著高于其他采样点的农田土壤.

孤岛城镇周围采样点 1、2、3、11、12 处四氯联苯占的比例基本都超过了 $\sum_{12}$ PCBs 的 50%, 主要原因是在采样点 12 附近, 有几个以石油加工为主的化工厂, 在生产过程中向环境中排放 DL-PCBs, 四氯联苯相对于高氯联苯容易挥发, 可以通过大气扩散等方式富集到附近的表层土壤中. 在采样点 4、5、6、7、8、9、14、18 处, 五氯联苯的含量超过了 $\sum_{12}$ PCBs 的 70%, 因为在这几个采样点附近分布着许多油井, 在石油开采过程中, 使用了大量的变压器和电容器, 废弃的变压器和电容器被随意丢弃, 而变压器油中五氯联苯的含量最高^[30].

为了考察土壤理化性质对 DL-PCBs 分布的影响, 运用 SPSS 软件分析了 20 个采样点的表层土壤中 $\sum_{12}$ PCBs 与相应的土壤理化性质 (有机质含量、土壤粒径组成、含盐量) 的相关性, 结果如下: DL-PCBs 的含量与有机质含量和土壤黏粒含量呈显著的正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.732 和 0.687; 与砂粒含量呈负相关 ($P < 0.05$), 相关系数为 -0.438; 与含盐量没有相关性. 这可能与有机质中的某些物质如腐殖酸和富里酸等可以加大土壤中 DL-PCBs 这类憎水性有机物的溶解有关, 而 Karickhoff 等^[31] 指出黏粒中可能含有较高含量的有机质, 从而导致黏粒含量与 DL-PCBs 含量表现出显著的正相关性. 理论上, 由于“盐析效应”, 土壤中的

含盐量越高,DL-PCBs 的含量越低,但是孤岛地区受黄河来水和回灌海水的交互影响,土壤成因比较复杂,导致该地区的盐分分布不规则,从而表现出含盐量与 DL-PCBs 之间不相关的结果。

3 结论

(1) DL-PCBs 的含量范围为 $1.4 \sim 7.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均浓度为 $3.5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;与其他地区相比,孤岛地区 DL-PCBs 的含量处于较高的水平。

(2) DL-PCBs 以四氯联苯和五氯联苯为主,PCB118 在 12 种同系物中占有的比例最高。

(3) 从孤岛镇到郊区,DL-PCBs 的含量逐渐降低,并且 DL-PCBs 的含量与土壤有机质含量和黏粒含量呈显著正相关,与砂粒含量负相关,与含盐量不相关。

(4) 参照加拿大土壤环境质量标准,孤岛地区 DL-PCBs 的毒性当量超过了该标准的限值 ($4.0 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$),表明该地区局部已经受到了严重的 DL-PCBs 污染。

致谢:本研究在采样过程中,得到了东营市环境保护局河口分局的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 陈满荣,俞立中,许世远,等. 长江口 PCBs 污染及水环境 PCBs 研究趋势[J]. 环境科学与技术, 2004, **27**(5): 24-25.
- [2] 郑海龙,陈杰,邓文靖. 土壤环境中的多氯联苯(PCBs)及其修复技术[J]. 土壤, 2004, **36**(1): 16-20.
- [3] Liu H X, Zhou Q F, Wang Y W, *et al.* E-waste recycling induced polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzo-furans pollution in the ambient environment [J]. Environment International, 2008, **34**(1): 67-72.
- [4] 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.
- [5] 蒋煜峰,王学彤,吴明红,等. 上海农村及郊区土壤中 PCBs 污染特征及来源研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(5): 899-903.
- [6] 毕新慧,徐晓白. 多氯联苯的环境行为[J]. 化学进展, 2000, **12**(2): 152-159.
- [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] Kim D G, Choi K I, Lee D H, *et al.* Gas-particle partitioning and behavior of dioxin-like PCBs in the urban atmosphere of Gyeonggi-do, South Korea[J]. Atmospheric Research, 2011, **101**(1-2): 386-395.
- [9] Howell N L, Suarez M P, Rifai H S, *et al.* Concentrations of polychlorinated biphenyls (PCBs) in water, sediment, and aquatic biota in the Houston Ship Channel, Texas [J]. Chemosphere, 2008, **70**(4): 593-606.
- [10] Wang P, Zhang Q H, Wang Y W, *et al.* Altitude dependence of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in surface soil from Tibetan Plateau, China[J]. Chemosphere, 2009, **76**(11): 1498-1504.
- [11] Kim K S, Lee S C, Kim K H, *et al.* Survey on organochlorine pesticides, PCDD/Fs, dioxin-like PCBs and HCB in sediments from the Han river, Korea[J]. Chemosphere, 2009, **75**(5): 580-587.
- [12] Bocio A, Domingo J L, Falco G, *et al.* Concentrations of PCDD/PCDFs and PCBs in fish and seafood from the Catalan (Spain) market: estimated human intake[J]. Environment International, 2007, **33**(2): 170-175.
- [13] Zhao G F, Xu Y, Li W, *et al.* PCBs and OCPs in human milk and selected foods from Luqiao and Pingqiao in Zhejiang, China [J]. Science of the Total Environment, 2007, **378**(3): 281-292.
- [14] 刘静,崔兆杰,许宏宇,等. 类二噁英多氯联苯的双柱气相色谱分析方法研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, **38**(4): 116-122.
- [15] 魏复盛. 水和废水监测分析方法指南(中册)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 112-145.
- [16] 孙炯辉. 厦门九龙江河口及西港表层沉积物中 PCDD/Fs、DL-PCBs 的含量分布、组成及来源[D]. 厦门: 厦门大学, 2008. 24-30.
- [17] 孙友敏,王贤,于娜,等. 济南市道路尘中类二噁英类多氯联苯残留情况[J]. 环境保护科学, 2012, **38**(2): 1-4.
- [18] 马召辉,金军,王英,等. GC-NCI-MS 法测定底泥中类二噁英多氯联苯[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(10): 123-126.
- [19] Liu J S, Liu W P. Distribution of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans (PCDDs/Fs) and dioxin-like polychlorinated biphenyls (dioxin-like PCBs) in the soil in a typical area of eastern China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **163**(2-3): 959-966.
- [20] Gómez-Lavín S, Gorri D, Irabien A. Assessment of PCDD/Fs and PCBs in Sediments from the Spanish Northern Atlantic Coast [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2011, **221**(1-4): 287-299.
- [21] Ren M, Peng P A, Chen D Y, *et al.* Patterns and sources of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs in surface sediments from the East River, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **170**(1): 473-478.
- [22] Borghini F, Grimalt J O, Sanchez-Hernandez J C, *et al.* Organochlorine pollutants in soils and mosses from Victoria Land (Antarctica)[J]. Chemosphere, 2005, **58**(3): 271-278.
- [23] 张志,齐虹,刘丽艳,等. 中国生产的多氯联苯(PCBs)组分特征[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2009, **26**(6): 809-815.
- [24] 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.
- [25] 王江涛, 谭丽菊, 张文浩, 等. 青岛近海沉积物中多环芳烃, 多氯联苯和有机氯农药的含量和分布特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(11): 2713-2722.
- [26] Hong S H, Yim U H, Shim W J, *et al.* Horizontal and vertical distribution of PCBs and chlorinated pesticides in sediments from Masan Bay, Korea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, **46**(2): 244-253.
- [27] GB 13015-91, 含多氯联苯废物污染控制标准[S].
- [28] Canadian Council of Ministers of the Environment, 2007. Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health, Winnipeg[S].
- [29] Bhavsar S P, Reiner E J, Hayton A, *et al.* Converting Toxic Equivalents (TEQ) of dioxins and dioxin-like compounds in fish from one Toxic Equivalency Factor (TEF) scheme to another [J]. Environment International, 2008, **34**(7): 915-921.
- [30] 李灵军, 吴季茂, 陈宇东, 等. 变压器油中多氯联苯的测定[J]. 环境科学, 1993, **14**(3): 69-72.
- [31] Karickhoff S W, Brown D S, Scott T A, *et al.* Sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments [J]. Water Research, 1979, **13**(3): 241-248.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototaxical Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

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

国内外公开发行人