

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何品晶 (467)

黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险

姚宏¹, 卢双^{1,2}, 张旭^{1,3}, 裴晋¹, 鲁垠涛¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 广州市南沙区环保水务局, 广州 511400; 3. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

摘要: 研究了全黄河范围内 40 个国家重点控制断面岸边土壤样品中类二噁英类多氯联苯 (dioxin-like polychlorinated biphenyls, DL-PCBs) 的污染现状, 并利用毒性当量法和健康风险评价模型定量描述黄河岸边土壤中 DL-PCBs 对沿岸居民的毒性风险、致癌风险和非致癌风险。结果表明, 黄河岸边土壤中各采样断面岸边土壤中 $\sum$ DL-PCBs 的含量 (以 dw 计, 下同) 范围为: 0.37 ~ 7.17 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值为 0.38 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。毒性风险计算表明, 黄河岸边土壤中 DL-PCBs 的毒性当量范围为: 0.00 ~ 30.31 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值是 13.63 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 基本不会对沿岸居民产生毒性风险; 健康风险模型计算表明, 黄河岸边土壤中 DL-PCBs 对儿童和成人的致癌风险、非致癌风险均未超过美国 EPA 规定的限值, 基本不会产生明显的健康风险。相比而言, 黄河中游沿岸居民更易受到 DL-PCBs 危害。

关键词: 黄河; 岸边土壤; 类二噁英类多氯联苯; 风险

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0123-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704100

Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River

YAO Hong¹, LU Shuang^{1,2}, ZHANG Xu^{1,3}, PEI Jin¹, LU Yin-tao¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Water and Environment Protection Agency of Nansha District, Guangzhou 511400, China; 3. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: The concentration levels, toxic equivalency (TEQ) concentrations, and carcinogenic and non-carcinogenic risks of dioxin-like polychlorinated biphenyls in shore soil from the 40 national key monitoring sections along the entire Yellow River were comprehensively studied. The results showed that the concentrations of $\sum$ DL-PCBs in the soil were between 0.37-7.17 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (dry weight), and the mean value was 0.38 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (dry weight). The TEQ concentrations of DL-PCBs in the soil were between 0.00-30.31 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$ (dry weight), and the mean value is 13.63 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$ (dry weight), posing no significant risk to the ecological environment and human health. The carcinogenic and non-carcinogenic risks of DL-PCBs in this study did not exceed the limits set by the USEPA, and there were no obvious health risks. The residents in the middle reaches of the Yellow River were more vulnerable to DL-PCBs.

Key words: the Yellow River; shore soil; dioxin-like polychlorinated biphenyls; risks

类二噁英类多氯联苯 (dioxin-like polychlorinated biphenyls, DL-PCBs) 是毒性最强的一类 PCBs, 由于化学结构、化学性质和毒性与 2,3,7,8-TCDD 非常类似, 表现出二噁英类物质的特点, 因此被称为类二噁英类多氯联苯, 共包括 4 个非邻位 PCBs 单体: PCB77、PCB81、PCB126、PCB169 和 8 个邻位 PCBs 单体: PCB105、PCB114、PCB118、PCB123、PCB156、PCB157、PCB167、PCB189^[1]。DL-PCBs 具有高毒性、半挥发性、持久性和生物蓄积性, 在环境中长期存在, 并且在很低含量下就可以对生物体和人类造成有毒有害效应^[2], 目前国际上对于 PCBs 的毒理学研究也主要集中在 DL-PCBs 上。土壤中的 DL-PCBs 很难降解, 残留时间比在水体、大气中更长, 并且可以在土壤微生物和植物体中富集、

渗透到地下水、或者随地表径流迁移至地表水中, 严重危害粮食安全和饮水安全^[3]。目前国内对土壤中 DL-PCBs 的单独研究相对较少, 且主要集中在电子垃圾拆解地、重点工业区或是河流、海洋局部区域^[4-6], 大流域范围内的研究调研较少。

黄河流域是我国重要的水源地、粮食产地, 但是由于黄河特殊的水文水利和水土环境, 黄河土壤中的 DL-PCBs 很容易被携带进入黄河水体、沉积物、生物体中, 带来更大的危害。研究黄河流域岸边土壤中 DL-PCBs 不仅可以为沿岸污染源控制提

收稿日期: 2017-04-11; 修订日期: 2017-07-11

基金项目: 北京交通大学基础科研基金项目 (2016YJS118); 北京交通大学重点科研基金项目 (2016JBZ008)

作者简介: 姚宏 (1975 ~), 女, 博士生导师, 主要研究方向为大流域持久性有机污染物, E-mail: yaohongts @ 163.com

供依据,对保障沿岸居民的生命健康也具有重大意义. 2007 年刘静等^[5]对现代黄河三角洲表层土壤样品中 DL-PCBs 的来源、风险进行研究,但目前对于全黄河范围内岸边土壤中 DL-PCBs 的研究还没有,相关数据十分缺乏,还无法对黄河土壤 DL-PCBs 污染现状和风险进行综合评价. 本研究首次对全黄河范围内 40 个国家重点控制断面处的岸边土壤样品进行采集,分析其中 DL-PCBs 的残留特征和潜在风险,旨在为合理规划、保护、利用黄河土地资源提供依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究在 2015 年 5 月 15 ~ 22 日,对全黄河范围内 39 个国家点控制断面处岸边土壤样品进行采集. 各采样断面具体信息如表 1 所示. 上游从玛曲至包头水文站共设置 17 个采样断面 U1 ~ U17,中游从万家寨库区至武陟共设置 17 个采样断面 M1 ~ M17,下游从高村至黄河入海口利津共设置 5 个采样断面 L1 ~ L5.

表 1 采样断面信息
Table 1 List of sampling sections

序号	水文站名	水系	经度(N°)	纬度(E°)	土壤性质	利用类型
U1	黄河沿	黄河	34. 89	98. 17	砂质壤土	草地
U2	玛曲	黄河	33. 97	102. 08	粉砂质壤土	草地
U3	贵德	黄河	36. 03	101. 40	粉砂质壤土	农田
U4	循化	黄河	35. 83	102. 50	粉砂质壤土	农田
U5	小川	黄河	35. 93	103. 33	砂质壤土	农田
U6	兰州	黄河	36. 07	103. 82	砂质壤土	建设用地
U7	安宁渡	黄河	36. 78	104. 60	砂质壤土	农田
U8	亨堂	大通河	36. 52	102. 83	粉砂质壤土	农田
U9	新城桥	黄河	36. 17	103. 48	粉砂质黏壤土	林地
U10	下河沿	黄河	37. 45	105. 05	黏壤土	农田
U11	青铜峡	黄河	37. 90	106. 00	砂质壤土	工业工地
U12	临河	黄河	38. 28	106. 28	粉砂质黏壤土	农田
U13	石嘴山	黄河	39. 25	106. 78	砂质壤土	农田
U14	巴彦高勒	黄河	40. 32	107. 03	砂质壤土	草地
U15	三湖河口	黄河	40. 62	108. 77	黏壤土	草地
U16	包头水文站	黄河	40. 52	109. 90	砂质壤土	建设用地
U17	头道拐	黄河	40. 27	111. 07	粉砂质壤土	农田
M1	万家寨库区	黄河	39. 57	110. 42	砂质壤土	建设用地
M2	河曲	黄河	39. 35	111. 15	砂质壤土	林地
M3	府谷	黄河	39. 03	111. 08	砂质壤土	农田
M4	吴堡	黄河	37. 45	110. 72	粉砂质壤土	农田
M5	龙门	黄河	35. 67	110. 58	粉砂质黏壤土	农田
M6	潼关	黄河	34. 62	110. 30	砂质壤土	农田
M7	三门峡公路桥	黄河	34. 80	111. 17	砂质壤土	建设用地
M8	三门峡	黄河	34. 82	111. 35	砂质壤土	农田
M9	西师	黄河	35. 40	110. 53	粉砂质壤土	农田
M10	华县	渭河	34. 63	110. 18	砂质壤土	林地
M11	南村	黄河	34. 76	113. 65	砂质壤土	农田
M12	沙沃	黄河	34. 76	113. 65	黏壤土	工业用地
M13	小浪底	黄河	34. 98	112. 21	粉砂质壤土	工业用地
M14	花园口	黄河	34. 91	113. 70	砂质壤土	建设用地
M15	夹河滩	黄河	34. 89	114. 74	粉砂质黏壤土	工业用地
M16	黑石关	洛河	34. 16	113. 49	粉砂质壤土	建设用地
M17	武陟	沁河	34. 94	113. 24	黏壤土	农田
L1	高村	黄河	35. 38	115. 08	粉砂质壤土	林地
L2	孙口	黄河	35. 93	115. 90	粉砂质壤土	林地
L3	艾山	黄河	36. 25	116. 30	粉砂质壤土	农田
L4	涑口	黄河	36. 73	116. 98	粉砂质壤土	农田
L5	利津	黄河	37. 52	118. 30	砂质壤土	农田

由于采样条件限制,本研究仅在采样车停靠一侧采集岸边土壤样品。使用丙酮冲洗过不锈钢铲,在所确定的采样侧岸边 10 m 的范围内,挖取表层土壤(5~20 cm)样品 3~5 个,去除其中杂质,混合均匀,装在丙酮清洗过的 250 mL 铝盒中,贴上标签,尽

快带回实验室,放在 -20°C 的冰箱保存。各采样断面位置如图 1 所示。

1.2 样品预处理

土壤样品经冷冻干燥后,研磨,过 100 目不锈钢筛。准确称取 10 g 过筛后土样、10 g 无水硫酸钠、

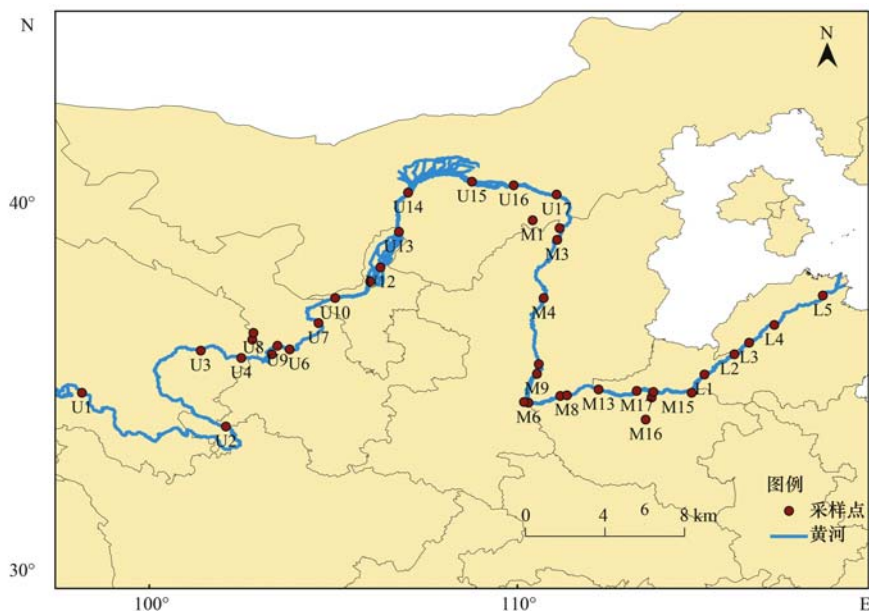


图 1 采样断面位置示意

Fig. 1 Map of sampling sections

0.2 g 铜粉,依次放入预先用有机溶剂处理过的萃取纸袋中。将纸袋放入索氏提取器中,加入 100 μL 的混合代标(含 20 ng C^{13} -PCB105, 50 ng C^{13} -PCB155)和 150 mL 丙酮/正己烷(1:1, 体积比)混合溶剂,放在 70°C 恒温水浴锅中萃取 24 h。萃取液加入 4 mL 异辛烷后,旋转蒸发浓缩至 1~2 mL。浓缩液经净化柱净化(净化柱自下而上依次填充 2 cm 无水硫酸钠、10 g 硅胶、2 cm 无水硫酸钠),并用 120 mL 正己烷/二氯甲烷(1:1, 体积比)混合液淋洗净化柱。淋洗液再次经过旋转蒸发浓缩至 1~2 mL,最后用高纯(99.999%)氮气吹扫至 0.9 mL,加入 100 μL 内标(PCB30 和 PCB204 各 35 ng)定容至 1 mL,转移到棕色色谱瓶中,准备 GC-MS 上机分析。

1.3 分析条件

采用 Agilent6890-5975 型气质联用仪(GC-MS), DB-5M 毛细管色谱(60 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm)。色谱柱升温程序为:柱温 70°C 保持 1 min,然后以 $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度升温至 160°C ,再以 $2^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度升温至 280°C ,保持 10 min。不分流进样 2.0 μL ,进样口温度为 250°C ,传输线温度为 280°C 。将实际样品中各色谱的保留时间与标样中各标准物质色谱峰的保留时间比较进行定性,采用

内标曲线法进行定量。

1.4 质量控制与质量保证

本实验同一批处理 11 个土壤样品,做 1 个空白样,以确定样品预处理过程中是否受到试剂、仪器以及人为因素的干扰。实验过程中还采用添加代标物 ^{13}C -PCB105、 ^{13}C -PCB155 和内标物 PCB30、PCB204 的方法来检验实验操作的可靠性和修正进样误差。结果表明:所有空白样品中目标 PCBs 同系物的含量均很低,说明土壤样品在预处理过程中没有受到污染。代标 ^{13}C -PCB105、 ^{13}C -PCB155 的回收率的范围分别为 74.60%~105.55% 和 86.64%~127.26%,满足美国 EPA 对代标回收率在 70%~130% 的要求,所以没有对实验数据进行回收率校正。

1.5 健康风险评价

(1) 毒性当量法

为了评价 DL-PCBs 对人类健康的毒性,一般采用毒性当量法。在计算 DL-PCBs 的毒性当量时,通常将 2,3,7,8-TCDD 作为基准物质,把各类二噁英类 PCBs 同系物的含量与其相应的 2,3,7,8-TCDD 的毒性当量因子相乘后即可得出各毒性当量值 TEQ_i ,然后将所有的毒性当量 TEQ_i 相加后得到总

的毒性当量 TEQ. 具体计算公式如下:

$$TEQ = \sum TEQ_i = \sum C_i \times TEF_i \quad (1)$$

式中, C_i 是某类二噁英类 PCBs 的含量, $pg \cdot g^{-1}$; TEF_i 是某类二噁英类 PCBs 对应的毒性当量因子.

毒性当量因子 (toxic equivalent factors, TEF) 就是把某种化合物的毒性当量与 2,3,7,8-TCDD 或 BaP 的毒性当量相比得到的值. 世界卫生组织 (WHO)2005 年重新修订了几种常见类二噁英类 PCBs 的毒性当量因子 TEF 值^[7],如表 2 所示.

(2) 健康风险评价模型

表 2 类二噁英类 PCBs 毒性当量因子

Table 2 Toxicity equivalency factors (TEFs) for dioxin-like PCBs		
项目	DL-PCBs	WTO2005 TEFs
非邻位	PCB77	0.0001
	PCB81	0.0003
	PCB126	0.1
	PCB169	0.03
邻位	PCB105	0.000 03
	PCB114	0.000 03
	PCB118	0.000 03
	PCB123	0.000 03
	PCB156	0.000 03
	PCB157	0.000 03
	PCB167	0.000 03
	PCB189	0.000 03

表 3 健康风险评价人体暴露参数

Table 3 Exposure factors for humans for health risk assessment			
暴露参数	单位	土壤	
		儿童	成人
IR 摄入量	$mg \cdot d^{-1}$	200	100
EF 暴露频率	$d \cdot a^{-1}$	350	350
ED 暴露时间	a	6	24
BW 体重	kg	15	60
C_s 污染物含量	$mg \cdot kg^{-1}$	实测	实测
AT 平均时间	d	2 190/25 550	8 760/25 550
CF 转换因子	$kg \cdot mg^{-1}$	10^{-6}	10^{-6}
SA 皮肤接触表面积	cm^2	2 800	5 700
AF 皮肤吸附系数	$mg \cdot (cm^2 \cdot d)^{-1}$	0.2	0.07
ABS 皮肤吸收系数	无量纲	取 0.1	取 0.1
PEF 尘粒扩散因子	$m^3 \cdot kg^{-1}$	1.32×10^9	1.32×10^9
IR 呼吸速率	$L \cdot min^{-1}$	20	20

根据上述所计算的暴露剂量和 PCBs 致癌性, 将 PCBs 风险分为致癌风险 (R) 和非致癌风险 (HI), 其计算公式分别为:

$$R = \sum CDI_i \times SF_i \quad (5)$$

$$HI = \sum \frac{CDI_i}{RfD_i} \quad (6)$$

式中, SF_i 是某一暴露途径下的致癌斜率因子, $(kg \cdot d) \cdot mg^{-1}$, 经口和经皮肤接触摄入途径下斜率

目前国际上使用最广泛最普遍的污染物健康风险评价方法是 1983 年美国国家科学院公布的健康风险评价模型, 主要通过危害鉴别、暴露评价、剂量-反应分析和风险表征四步, 对污染物的人体致癌风险和非致癌风险进行定量评价^[7]. 对于致癌风险, 当致癌风险指数在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 时, 可以接受. 对于非致癌风险, 当风险指数超过 1 时, 认为污染物会对人体健康产生危害; 当其远小于 1 时, 认为污染物不会对人体产生明显的健康危害^[8, 9].

本研究中土壤主要考虑经口摄入、呼吸摄入和皮肤接触这 3 种暴露途径下人体的 PCBs 暴露剂量, 具体计算公式如下.

土壤中 PCBs 经口摄入量:

$$CDI_{\text{经口}} = \frac{C_s \times IR \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

土壤中 PCBs 经皮肤接触暴露量剂量:

$$CDI_{\text{皮肤}} = \frac{C_s \times CF \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

土壤 PCBs 经呼吸摄入量:

$$CDI_{\text{呼吸}} = \frac{C_s \times (1/PEF) \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (4)$$

上述所有公式中所涉及的暴露参数含义及取值如表 3 所示.

因子取 2, 经呼吸摄入途径下取 0.002 18; RfD_i 是某一暴露途径下 PCBs 的非致癌参考剂量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$, 3 种暴露途径下均取 0.000 02.

2 结果与分析

2.1 黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯残留特征
黄河岸边土壤中 DL-PCBs 同系物组成如表 4 所示.

表 4 黄河岸边土壤中 DL-PCBs 同系物统计数据
Table 4 Description statistics of individual DL-PCBs congeners

PCBs 同系物	PCBs 同族体	范围(以 dw 计) /ng·g ⁻¹	均值(以 dw 计) /ng·g ⁻¹	中值(以 dw 计) /ng·g ⁻¹	检出率 /%
PCB81	4	nd ~ 5.71	0.15	0.00	5.13
PCB77	4	nd ~ 1.45	0.04	0.00	5.13
PCB118	5	nd ~ 0.07	< 0.01	0.00	10.26
PCB114	5	nd ~ 0.02	< 0.01	0.00	2.56
PCB126	5	nd ~ 0.29	0.12	0.11	66.67
PCB167	6	nd ~ 0.02	< 0.01	0.00	2.56
PCB156	6	nd ~ 0.04	< 0.01	0.00	5.13
PCB169	6	nd ~ 0.57	0.07	0.04	58.97
$\sum$ DL-PCBs		0.37 ~ 7.17	0.38		

由表 4 可知黄河岸边土壤样品中共检测出 8 种 DL-PCBs 同系物, 它们分别是 PCB77、PCB81、PCB118、PCB114、PCB126、PCB167、PCB156 和 PCB169. 各采样断面岸边土壤中 $\sum$ DL-PCBs 的含量范围(以 dw 计,下同)为:0.37 ~ 7.17 ng·g⁻¹,均值为 0.38 ng·g⁻¹. 其中 PCB126、PCB169 的检出率和残留量比较高,PCB126 的检出率为 66.67%,含量范围为:nd(未检出) ~ 0.29 ng·g⁻¹; PCB169 的检出率为 58.97%,含量范围为:nd ~ 0.57 ng·g⁻¹; 其余 DL-PCBs 同系物检出率和残留量很低. 黄河中游河段岸边土壤中 DL-PCBs 含量最高(均值为 0.65 ng·g⁻¹),黄河上游(均值为 0.60 ng·g⁻¹)其次,黄河下游(均值为 0.14 ng·g⁻¹)最低. 黄河中上游流域内城镇化起步较早,城市密集,历史使用和生产的 PCBs 较多;近年来,以兰州包头、呼和浩特、太原、郑州、洛阳为中心的重工业基地迅速发展,现代工业过程中产生的 PCBs 副产品也比较多,因此此段土壤中富集的 DL-PCBs 量相应增加. 黄河下游沿岸经常遭受洪水威胁,经济发展落后,沿岸主要是农村、农田,环境污染相对较轻. 此外黄河下游河道宽阔,水流缓慢,泥沙淤积严重,岸边土壤更新变化较快,该段岸边土壤比较“新鲜”,DL-PCBs 历史累积量很低. 因此黄河下游岸边土壤中 DL-PCBs 含量较低.

与国内其他研究相比,虽然各研究的采样时间不同,但从 PCBs 残留含量范围来看:黄河岸边土壤中 DL-PCBs 含量范围和黄河三角洲土壤(0.10 ~ 2.15 ng·g⁻¹)^[5]相当,高于滴水湖周围土壤(0.44 ~ 1.27 ng·g⁻¹)^[10]、辽河湿地土壤(0.36 ~ 1.36 ng·g⁻¹)^[11]、潮河下游岸边土壤(< 0.01 ~ 0.04 ng·g⁻¹)^[12]、珠江三角洲湿地土壤(< 0.01 ~ 0.85 ng·g⁻¹)^[13]、哈尔滨土壤(nd ~ 0.57 ng·g⁻¹)^[14]和上海市区土壤(< 0.01 ~ 0.55 ng·g⁻¹)^[15],但明显低于电子垃圾拆解地、典型电力电容器污染土壤

(5.6 ~ 41 ng·g⁻¹)^[16~19]. 整体而言,黄河岸边土壤中 DL-PCBs 属于较低含量水平.

2.2 毒性当量法

利用公式(1)计算黄河各断面岸边土壤中 DL-PCBs 的毒性当量 TEQ,经计算得:黄河各采样点岸边土壤中 TEQ 的含量(以 dw 计,下同)范围是:0.00 ~ 30.31 pg·g⁻¹,均值是 13.63 pg·g⁻¹,其中也是 PCB169 的贡献率最大,占总 TEQ 的 80%以上. 黄河岸边土壤中 TEQ 含量水平高于大连地区(0.01 ~ 4.89 pg·g⁻¹)^[20]、北京地区(< 0.01 ~ 1.78 pg·g⁻¹)^[21]、辽河湿地土壤(0.06 ~ 2.55 pg·g⁻¹)^[11]和上海地区(2.71 ~ 24.9 pg·g⁻¹)^[15]土壤中 TEQ 含量水平;但低于美国锡达拉皮兹 0 ~ 71 pg·g⁻¹)^[22]、印度曼尼普尔(37.17 ~ 160.5 pg·g⁻¹)^[23]和我国电子垃圾拆解地(1.4 ~ 94.8 pg·g⁻¹)^[18, 24],远远低于我国废旧电力容器封存点(75.43 ~ 24 027.83 pg·g⁻¹)^[24]土壤中 TEQ 含量水平,整体而言属于中等偏下含量水平. 我国目前尚未有持久性有机物风险评价相关标准,但是根据新西兰(1.5 × 10³ pg·g⁻¹),德国(1.0 × 10³ pg·g⁻¹)和美国的居住地土壤中类二类 TEQ 控制标(1.0 × 10³ pg·g⁻¹)^[25],黄河表层土壤中 TEQ 远远低于这些国家的控制标准,毒性风险较小.

黄河岸边土壤中 TEQ 沿程分布如图 2 所示. 从中可以看出:从黄河内蒙古段开始,各采样断面岸边土壤中 TEQ 值明显比较前面河段高,给沿岸居民健康和生态环境所带来的风险较前段相比也更大,与土壤中 DL-PCBs 分布不一致,TEQ 分布表现为:黄河下游(20.14 pg·g⁻¹) > 黄河中游(15.86 pg·g⁻¹) > 黄河上游(9.50 pg·g⁻¹),说明各断面土壤中 DL-PCBs 同系物残留情况存在较大差异.

2.3 健康风险模型

根据健康风险评价模型中的公式,暴露剂量和致癌、非致癌风险计算结果如表 5 所示.

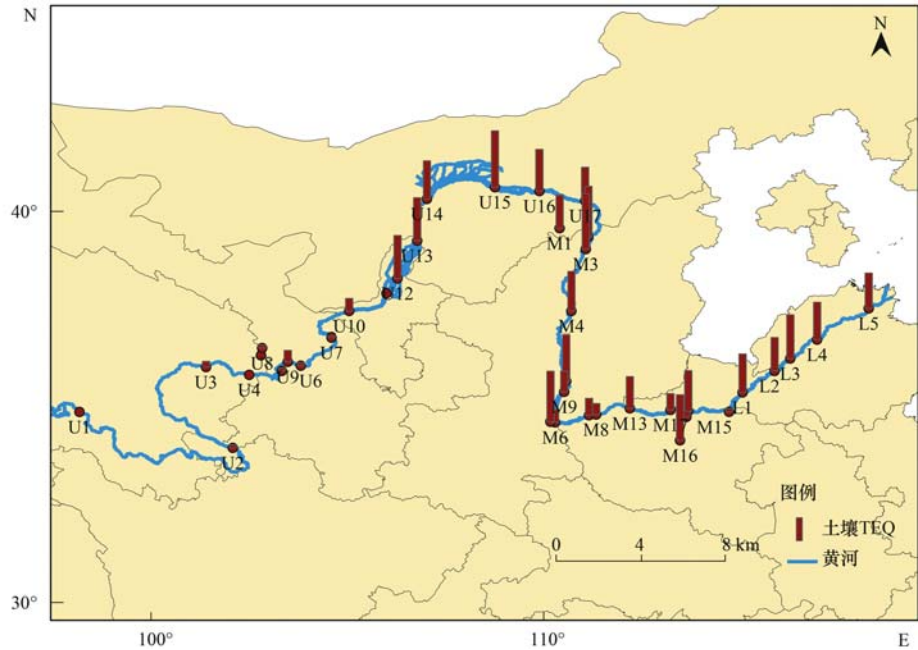


图2 黄河岸边土壤中TEQ沿程分布

Fig. 2 Distributions of TEQ in the shore soil along the Yellow River

表5 本研究暴露剂量和致癌、非致癌计算结果

Table 5 Exposure doses, carcinogenic and non-carcinogenic risks of DL-PCBs in this study

目标群体	经土壤暴露剂量/ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$		致癌风险/ a^{-1}		非致癌风险/ a^{-1}	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
儿童	$1.03\text{E-}09 \sim 1.17\text{E-}07$	$1.07\text{E-}08$	$2.07\text{E-}09 \sim 2.39\text{E-}07$	$2.15\text{E-}08$	$1.04\text{E-}04 \sim 1.20\text{E-}02$	$1.07\text{E-}03$
成人	$7.08\text{E-}10 \sim 9.02\text{E-}07$	$8.09\text{E-}09$	$1.56\text{E-}09 \sim 1.80\text{E-}07$	$1.62\text{E-}08$	$3.90\text{E-}05 \sim 4.51\text{E-}03$	$4.04\text{E-}04$

如表5所示,暴露剂量计算结果表明,各采样断面岸边土壤中DL-PCBs对儿童的暴露剂量在 $1.03\times10^{-9}\sim1.17\times10^{-7}\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 之间,均值为 $1.07\times10^{-8}\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$;对成人的暴露剂 $7.08\times10^{-10}\sim9.02\times10^{-7}\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 之间,均值为 $8.09\times10^{-9}\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$.在该研究中PCBs经土壤对儿童的暴露剂量比对成人的暴露剂量大,儿童对PCBs更为敏感.

致癌风险计算表明:黄河各断面岸边土壤中DL-PCBs对儿童的致癌风险在 $2.07\times10^{-9}\sim2.39\times10^{-7}\text{a}^{-1}$ 之间,均值为 $2.15\times10^{-8}\text{a}^{-1}$,对成人的总致癌风险在 $1.56\times10^{-9}\sim1.80\times10^{-7}\text{a}^{-1}$ 之间,均值为 $1.62\times10^{-8}\text{a}^{-1}$,对儿童和成人的致癌风险均未超出过美国EPA推荐的不可忽略风险水平值 $1.0\times10^{-6}\text{a}^{-1}$,即黄河岸边土壤中DL-PCBs不会对沿岸居民产生明显的致癌风险.不同河段致癌性风险比较分析表明:黄河中游段PCBs对人体产生明显致癌风险(均值 $3.58\times10^{-7}\text{a}^{-1}$)的可能性远远大于黄河上游($4.73\times10^{-9}\text{a}^{-1}$)和下游段($1.28\times10^{-9}\text{a}^{-1}$),黄河中游,尤其是河段段,是黄河流域人口密

度最大,城市、工业区最密集的地区,该段产生的废水、废渣、废气也最多.各种因素综合作用造成该段土壤中DL-PCBs含量最高,致癌风险最大.

非致癌风险计算表明:黄河各断面岸边土壤中DL-PCBs对儿童的非致癌风险为 $1.04\times10^{-4}\sim1.20\times10^{-2}\text{a}^{-1}$,均值为 $1.07\times10^{-3}\text{a}^{-1}$;对成人的非致癌风险为 $3.90\times10^{-5}\sim4.51\times10^{-3}\text{a}^{-1}$,均值为 $4.04\times10^{-4}\text{a}^{-1}$,对儿童、成人的非致癌风险值均远远低于美国EPA规定的非致癌风险限值1,说明黄河PCBs不会对沿岸居民产生明显的非致癌风险.黄河岸边土壤中DL-PCBs非致癌风险也表现为:黄河中游($5.01\times10^{-3}\text{a}^{-1}$)>黄河上游($6.34\times10^{-4}\text{a}^{-1}$)>黄河下游($1.26\times10^{-4}\text{a}^{-1}$).

3 结论

(1)黄河岸边土壤中共有8种DL-PCBs检测出, $\sum$ DL-PCBs的含量范围为: $0.37\sim7.17\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为 $0.38\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,与其他研究相比,属于较低含量水平.

(2)毒性当量法计算分析表明:黄河岸边土壤

中 DL-PCBs 毒性当量值比较低,带来的毒性风险较小。

(3)黄河岸边土壤中 DL-PCBs 致癌和非致癌风险结果表明:黄河所有断面土壤中 DL-PCBs 致癌风险和非致癌风险均未超过美国 EPA 规定的限值,不会对沿岸居民产生明显的致癌和非致癌风险,但是并不表明没有风险,仍有必要加强对黄河流域 PCBs 的监测与控制。

(4)相比而言,黄河中游段岸边土壤中 DL-PCBs 带来毒性风险、致癌风险和非致癌风险的可能性更大,更需要引起重视。

参考文献:

- [1] 张志. 中国大气和土壤中多氯联苯空间分布特征及规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [2] 薛南东, 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.
- [3] Cui S, Fu Q, Ma W L, *et al.* A preliminary compilation and evaluation of a comprehensive emission inventory for polychlorinated biphenyls in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **533**: 247-255.
- [4] 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价[J]. *环境科学*, 2014, **35** (2): 704-710.
Zhou L L, Wu G L, Xue N D, *et al.* Pollution patterns and health risk assessment for polychlorinated biphenyls in soils from a capacitor storage site[J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (2): 704-710.
- [5] 刘静, 崔兆杰, 范国兰, 等. 现代黄河三角洲土壤中多氯联苯来源解析研究[J]. *环境科学*, 2007, **28** (12): 2771-2776.
Liu J, Cui Z J, Fan G L, *et al.* Source apportionment of dioxin-like polychlorinated biphenyls in soil of the modern yellow river delta[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2007, **28** (12): 2771-2776.
- [6] 迭庆杞. 典型地区环境中二恶英类 POPs 的时空分布特征及其环境行为研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2014.
- [7] Wittsipe J, Fürst P, Wilhelm M. The 2005 World Health Organization re-evaluation of TEFs for dioxins and dioxin-like compounds—What are the consequences for German human background levels? [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2007, **210** (3-4): 335-339.
- [8] 杜世勇, 崔兆杰. 多环境介质中持久性有机污染物的特征及环境行为[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [9] Man Y B, Lopez B N, Wang H S, *et al.* Cancer risk assessment of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in former agricultural soils of Hong Kong[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **195**: 92-99.
- [10] 王薛平, 黄星, 毕春娟, 等. 滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37** (6): 2121-2130.
Wang X P, Huang X, Bi C J, *et al.* Spatial distribution characteristics and risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments and soils from the Dishui Lake and its river system[J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (6): 2121-2130.
- [11] Lang Y H, Li G L, Wang W, *et al.* Ecological risk and health risk assessment of Dioxin-like PCBs in Liaohu estuarine wetland soils, China[J]. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2014, **34** (4): 425-438.
- [12] Yu Y, Li Y X, Shen Z Y, *et al.* Occurrence and possible sources of organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) along the Chao River, China [J]. *Chemosphere*, 2014, **114**: 136-143.
- [13] 马召辉, 金军, 元学奎, 等. 太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布[J]. *环境科学*, 2013, **34** (3): 1136-1141.
Ma Z H, Jin J, Qi X K, *et al.* Vertical distribution of PBDEs and DL-PCBs in sediments of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (3): 1136-1141.
- [14] Ma W L, Li Y F, Sun D Z, *et al.* Polycyclic Aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in topsoils of Harbin, China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, **57** (4): 670-678.
- [15] 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.
- [16] Song M K, Luo C L, Li F B, *et al.* Anaerobic degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polychlorinated biphenyls ethers (PBDEs), and microbial community dynamics of electronic waste-contaminated soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 426-433.
- [17] Shang H T, Wang P, Wang T, *et al.* Bioaccumulation of PCDD/Fs, PCBs and PBDEs by earthworms in field soils of an E-waste dismantling area in China [J]. *Environment International*, 2013, **54**: 50-58.
- [18] 邵科, 尹文华, 朱国华, 等. 电子垃圾拆解地周边土壤中二噁英和二噁英类多氯联苯的浓度水平[J]. *环境科学*, 2013, **34** (11): 4434-4439.
Shao K, Yin W H, Zhu G H, *et al.* Levels of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs in soils near E-waste dismantling sites [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (11): 4434-4439.
- [19] 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.
- [20] Wang D G, Yang M, Jia H L, *et al.* Levels, distributions and profiles of polychlorinated biphenyls in surface soils of Dalian, China [J]. *Chemosphere*, 2008, **73** (1): 38-42.
- [21] Wu S, Xia X H, Yang L Y, *et al.* Distribution, source and risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in urban soils of Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2010, **82** (5): 732-738.
- [22] Martinez A, Erdman N R, Rodenburg Z L, *et al.* Spatial distribution of chlordanes and PCB congeners in soil in Cedar Rapids, Iowa, USA [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 222-228.
- [23] Devi N L, Yadav I C, Qi S H, *et al.* Distribution and risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the remote air and soil of Manipur, India [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **72** (10): 3955-3967.
- [24] 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.
Wu S P, Yin H L, Liu B L, *et al.* Characteristics of PCBs in a capacitor storage site and an industrial brownfield [J]. *Environmental Science*, 2011, **32** (11): 3277-3283.
- [25] 王楠楠. 辽河口湿地土壤 PAHs 及 PCBs 的健康风险与生态风险研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNB-F-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)