

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

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

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 高雪飞, 何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云, 周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究	巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊, 杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君, 王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中芘解吸的影响	全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性	焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734, 2783, 3073, 3079)	

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价

冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉*

(河南师范大学环境学院, 黄淮水环境污染防治省部共建教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 新乡 453007)

摘要: 为了解新乡市地表水中 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险, 采集新乡市 18 个地表水样并测定其中 HCHs 和 DDTs 的含量, 采用概率密度函数重叠面积法和安全阈值法评价了 HCHs 和 DDTs 的生态风险。结果表明, 新乡市地表水中 HCHs 和 DDTs 的质量浓度范围分别为 $1.28 \sim 49.2 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.42 \sim 12.3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 与世界各地的地表水中 HCHs 和 DDTs 残留质量浓度相比属于中等污染水平。异构体比值表明 HCHs 污染的主要来源是林丹的使用, 而 DDTs 的残留来源于工业品 DDTs 的使用。生态风险评价基于 DDD、 γ -HCHs 和 p,p' -DDT 的暴露浓度以及相应的毒性数据, 概率密度函数重叠面积法和安全阈值法均表明了这 3 种有机氯农药中 DDD 的风险最大, 其次是 γ -HCHs, p,p' -DDT 的生态风险最小; 安全阈值法进一步表明 DDD、 γ -HCHs 和 p,p' -DDT 超过影响 10% 水生生物的概率分别为 10.2%、5.94% 和 0.01%。

关键词: HCHs; DDTs; 新乡市地表水; 生态风险; 概率密度函数重叠面积法; 安全阈值法

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2849-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.016

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang

FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, LIU Meng-lin, SUN Jian-hui*

(Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In order to investigate the distribution characteristics and ecological risk of HCHs and DDTs in the surface water of Xinxiang, 18 surface water samples were collected from Xinxiang and the concentrations of HCHs and DDTs were determined. The ecological risk of HCHs and DDTs was evaluated using the overlapping areas of probability density function and safety threshold methods. The results showed that the levels of total HCHs ($\sum \text{HCHs}$) and total DDTs ($\sum \text{DDTs}$) in 18 samples detected by GC-ECD ranged from $1.28 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ to $49.2 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and from $0.42 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ to $12.3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. In comparison with those reported for other rivers around the world, the levels of HCHs and DDTs in surface water from Xinxiang ranked middle. The main cause for HCHs and DDTs residues in the studied area was usage of lindane and technical DDTs as revealed by the isomer ratios. The ecological risk evaluation was based on the exposure concentration and available chronic toxicity data of p,p' -DDT, γ -HCHs and DDD, and the overlapping areas of probability density function and safety threshold methods both showed that the ecological risk of these three OCPs to aquatic organism was in the order of $\text{DDD} > \gamma\text{-HCHs} > p,p'\text{-DDT}$. And the probability of exposure concentration exceeding the 10% value of the toxicity data for DDD, γ -HCHs and p,p' -DDT was 10.2%, 5.94%, 0.01%, respectively.

Key words: HCHs; DDTs; surface water from Xinxiang; ecological risk; overlapping areas of probability density function; safety threshold method

有机氯农药 (OCPs) 作为一类持久性有机污染物, 其物理化学性质相对稳定且难以降解, 并容易在环境中累积, 对生态环境的威胁和人体健康的危害一直是环境学家关注的焦点^[1~5]。六六六 (HCHs) 和滴滴涕 (DDTs) 是主要的有机氯农药, 杀虫效力强, 曾在全球范围大量使用。中国是 HCHs 和 DDTs 的生产使用大国, 在 1983 年禁止 HCHs 和 DDTs 的生产和使用以前, 共生产了 490 万 t 工业 HCHs 和 40 万 t 工业 DDTs, 分别占世界生产量的 33% 和 20%^[6]。此外, 林丹 (99% 的 γ -HCH) 一直到 1992

年才停止生产, 而 DDTs 在停止生产后, 天津一些化工厂还在生产, 主要用于出口非洲, 这些产品也可能存在非法使用^[7,8]。因此, 鉴于 HCHs 和 DDTs 在过去几十年的大量生产和使用, 使其已在农田土壤、

收稿日期: 2015-02-11; 修订日期: 2015-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41103071); 河南省基础与前沿技术研究项目 (122300410270); 河南省创新型科技人才队伍建设工程项目; 河南省科技创新人才计划项目 (134200510014)

作者简介: 冯精兰 (1979 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境化学, E-mail: fengjinglan@163.com

* 通讯联系人, E-mail: sunjhj@163.com

水体及沉积物等多种环境介质中普遍存在^[9~13].

新乡市坐落于华北平原,其自然、土壤环境条件优越,耕作条件良好,是中国粮棉主要生产区、国家优质小麦的生产基地和河南省畜牧生产的加工基地. 在 1950~1983 年期间曾大量使用 HCHs 和 DDTs 作为杀虫剂,这些农药除少量附着于农作物外,绝大部分残留在土壤或挥发至大气中,并通过地表径流、大气沉降等途径进入到水体,并可通过水体及底栖生物的摄取和生物富集放大,进入食物链,给当地居民的身体健康带来严重威胁^[14~16]. 因此,本研究以新乡市地表水水体为对象,通过对水相中 HCHs 和 DDTs 的定量分析,考察了 HCHs 和 DDTs 在该地区的空间分布特征,并探讨 HCHs 和 DDTs 的组成特征及其来源. 在此基础上,评价水体 HCHs 和 DDTs 的生

态风险.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2007 年 1 月采集新乡市主要地表水体共产主义渠、卫河、大沙河/柳青河、天然文岩渠以及文明渠的表层水样,采样点位的布设及具体的采样点数量参照新乡市地表水监测断面. 采用自制的水样采集器共采集 18 个表层水样,并利用手持式 GPS 确定各采样点的位置(图 1). 水样采集器以及贮水容器在采样前用中等浓度的 HCl 浸泡 24 h,并用去污粉水、自来水、蒸馏水和丙酮清洗干净并晾干待用. 在采集水样时,用河水冲洗采样器和容器 2 次,水样采集量 25 L 左右,采集后带回实验室及时处理和分析.



1. 共渠东碑村; 2. 修武水文站; 3. 共渠合河; 4. 共渠李士屯; 5. 共渠下马营; 6. 石门河水洞; 7. 甫西孟秦村营; 8. 李士屯; 9. 东孟和平桥; 10. 东孟; 11. 皇甫; 12. 大沙河五瞳桥; 13. 大沙河吴安屯; 14. 文岩渠孙庄桥; 15. 文岩渠大车集; 16. 文岩渠安东庄; 17. 天然渠黄庄桥; 18. 黄庄河老谷庙

图 1 新乡市地表水水样采样点

Fig. 1 Sampling sites of surface water in Xinxiang

1.2 样品处理

过滤后的水相中加入定量的 2,4,5,6-四氯间二甲苯(TCMX)和 PCB209 作为回收率指示物,然后过 XAD-2:XAD-4(1:1)混合树脂柱(25 cm × 10 mm). 结束后,用 200 mL 蒸馏水冲洗混合树脂,并用 25 mL 的 CH_2Cl_2 洗脱 2 次,25 mL 的 CH_3OH 洗脱 2 次,然后将洗脱后的树脂用 40 mL 的 $\text{CH}_2\text{Cl}_2/\text{CH}_3\text{OH}(1:1, \text{体积比})$ 混合液超声萃取 3 次,合并萃取液与洗脱液. 洗脱液中加入大量的蒸馏水,在分

液漏斗中静置 0.5 h,收集下层有机相,再加入 25 mL CH_2Cl_2 萃取 3 次,依次静置、分液,合并有机相. 将有机相在旋转蒸发仪上($\leq 35^\circ\text{C}$)浓缩至约 10 mL,过无水硫酸钠去除水分,之后再次旋蒸浓缩至 5~10 mL,然后分 3 次加入 10~15 mL 正己烷,浓缩至近 1 mL,过层析柱净化. 层析柱先用 15 mL 正己烷润洗,然后加样,用 30 mL 正己烷/二氯甲烷(1:1,体积比)混合液冲洗层析柱,收集淋洗液,氮吹浓缩到约 100 μL ,转移至微量样品瓶并再次氮吹浓缩

到约 100 μL,加入内标物 PCNB. 加盖密封,冷冻保存,进 GC-ECD 分析.

1.3 样品分析

HCHs 和 DDTs 的定量测定采用配有电子捕获检测器(ECD)的 6890 气相色谱仪(美国 Agilent 公司),色谱柱为 HP-5 毛细管柱. 柱升温程序:初始温度为 60℃ (保持 2 min),以 6℃·min⁻¹升温至 200℃,然后以 1℃·min⁻¹升温至 210℃,最后以 10℃·min⁻¹升温至 290℃,保持 10 min. 载气是高纯氮气,柱流量为 1.0 mL·min⁻¹,不分流进样,进样量为 1.0 μL. 检测器温度为 315℃. 数据使用 Agilent 色谱工作站进行处理,HCHs 和 DDTs 的定量采用 6 点校正曲线和内标法,回收率为 85%~102%. 所得数据均经回收率校正.

1.4 生态风险评价

1.4.1 概率密度函数重叠面积法

概率密度函数重叠面积法是将暴露浓度和毒性数据的概率密度曲线置于同一坐标系,以最大环境暴露浓度和最敏感生物的毒性数据为边界,以此为边界的曲线重叠部分的面积表示污染物对水生生物的风险^[17].

1.4.2 安全阈值法

安全阈值法(margin of safety, MOS₁₀)是通过将暴露浓度和毒性数据的累积概率曲线的重叠程度进行量化,直观地估计出污染物对一定比例的物种影响概率^[18]. 其计算公式如式(1).

MOS₁₀ = $\frac{SSD_{10}}{EXD_{90}}$ (1)

式中,MOS₁₀表示安全阈值,SSD₁₀表示累积概率为 10%对应的毒性数据,EXD₉₀表示累积概率为 90%对应的暴露浓度. 若 MOS₁₀值小于 1.0,表明暴露浓度和毒性数据的重叠程度高,对水生生物具有潜在风险;若 MOS₁₀大于 1.0,则表明对水生生物的生态风险较小.

2 结果与讨论

2.1 新乡市地表水中 HCHs 和 DDTs 的分布特征

新乡市地表水中 HCHs 和 DDTs 的质量浓度见表 1. 从中可知:新乡市地表水水相中 ∑OCPs 的质量浓度范围为 1.69~57.5 ng·L⁻¹,其中 ∑HCHs 的质量浓度为 1.28~49.2 ng·L⁻¹, ∑DDTs 的质量浓度范围为 0.42~12.3 ng·L⁻¹. 水相中 ∑HCHs 的质量浓度大于 ∑DDTs 的质量浓度,这与该区域沉积物中 HCHs 的质量浓度整体上低于 DDTs 相反^[1],这可能是 HCHs 的溶解度和蒸气压都比 DDTs 高,因而更易在水相中残留;而 DDTs 疏水性强,辛醇水分配系数高,更易在沉积物中富集. 5 条主要河流中 ∑OCPs 的质量浓度顺序为:文明渠>天然文岩渠>卫河>共产主义渠>大沙河/柳青河, ∑HCHs 的质量浓度与 ∑OCPs 质

表 1 新乡市地表水中 HCHs 和 DDTs 的质量浓度/ng·L⁻¹
Table 1 Concentrations of HCHs and DDTs in surface water from Xinxiang/ng·L⁻¹

采样点	α-HCHs	β-HCHs	γ-HCHs	δ-HCHs	∑HCHs	DDE	DDD	o,p'-DDT	p,p'-DDT	∑DDTs	∑OCPs
xxs-1	4.50	1.15	4.16	2.24	12.1	0.79	0.03	5.50	2.96	9.28	21.4
xxs-2	9.51	0.86	10.7	4.34	25.4	0.45	0.94	n. d.	1.11	2.50	27.9
xxs-3	8.30	1.03	3.64	n. d.	13.0	0.01	0.53	n. d.	0.38	0.92	13.9
xxs-4	7.61	n. d.	6.45	5.07	19.1	1.28	1.08	n. d.	1.16	3.52	22.6
xxs-5	4.95	0.14	4.04	n. d.	9.13	0.35	0.56	n. d.	1.02	1.93	11.1
xxs-6	0.18	n. d.	0.03	1.06	1.27	0.06	0.02	n. d.	0.34	0.42	1.69
xxs-7	2.38	0.85	2.99	n. d.	6.22	0.69	0.16	4.15	1.43	6.43	12.7
xxs-8	0.39	0.76	0.13	1.51	2.79	0.05	0.09	n. d.	0.69	0.83	3.63
xxs-9	6.05	0.23	5.24	5.48	17.0	1.31	0.96	0.02	1.96	4.25	21.2
xxs-10	11.6	1.68	7.70	6.14	27.1	0.77	2.20	n. d.	2.52	5.49	32.6
xxs-11	30.7	6.39	6.11	n. d.	43.2	3.18	4.66	0.32	4.11	12.3	55.5
xxs-12	0.97	n. d.	0.90	2.45	4.32	0.01	0.04	n. d.	1.63	1.68	6.01
xxs-13	6.07	0.31	4.66	n. d.	11.0	0.37	5.50	n. d.	3.49	9.36	20.4
xxs-14	8.84	1.07	4.37	n. d.	14.3	0.68	0.01	0.60	1.44	2.73	17.0
xxs-15	6.87	1.76	16.1	9.20	34.0	0.25	1.11	n. d.	1.16	2.52	36.5
xxs-16	11.3	1.89	14.8	5.26	33.3	0.76	0.74	0.52	7.02	9.04	42.3
xxs-17	3.52	0.14	2.68	4.10	10.4	0.01	0.58	0.27	1.05	1.91	12.3
xxs-18	13.1	2.24	16.6	17.3	49.2	1.28	3.53	0.26	3.20	8.27	57.5

1) n. d. 表示未检出或低于检出限; ∑OCPs 表示 8 种有机氯农药的总量

量浓度在各河流的整体表现趋于一致,因而各河流 $\sum$ DDTs 的污染差别不大. 此外,就各河流而言,卫河、大沙河/柳青河由上游至下游污染呈加重趋势,表明沿河有 OCPs 的输入;共产主义渠修武水文站采样点 OCPs 质量浓度较高,干流流经新乡市后总 OCPs 的质量浓度有上升趋势,至流出新乡范围时 OCPs 的质量浓度减少一半;天然文岩渠进入新乡范围时 OCPs 质量浓度较下游低,反映出下游干流上安东庄、大车集采样点较高质量浓度的 OCPs 主要来自新乡市内的污染源;文明渠的 HCHs、DDTs 质量浓度均是所研究 5 条河流中的最大值,这反映了该采样点附近区域较新乡其他地区 OCPs 污染严重.

与表 2 中所列举的世界不同水体中 OCPs 的质量浓度相比,其中新乡市地表水中 HCHs 的污染水平与巢湖、黄河和 Johannesburg City(南非)相当,低于老龙洞、西湖、沙颍河、贾鲁河和 Kucuk Menderes River(土耳其),而高于百花湖、湄洲湾、汉江、宁夏窖水、微山湖、珠江白鹅潭、长江和 Chenab River(巴基斯坦); DDTs 的污染水平同百花湖、黄河和 Chenab River(巴基斯坦)污染水平相近,低于老龙洞、淮河、西湖、巢湖、沙颍河、贾鲁河、宁夏窖水、珠江白鹅潭和 Kucuk Menderes River(土耳其),但高于湄洲湾、汉江、微山湖、长江和 Johannesburg City(南非). 综合来看,新乡市地表水体中 HCHs 和 DDTs 污染属于中等水平.

2.2 新乡市地表水中 HCHs 和 DDTs 的组成特征和污染来源

环境中 HCHs 的主要来源是工业纯 HCHs 的生产、运输、使用和杀虫剂林丹的使用,其中工业 HCHs 中含有 60% ~ 70% 的 α -HCH、5% ~ 12% 的 β -HCH、10% ~ 12% 的 γ -HCH 和 6% ~ 10% 的

表 2 世界各地水体中 HCHs 和 DDTs 的污染水平/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Pollution levels of HCHs and DDTs in water bodies all over the world/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

采样点	$\sum$ HCHs	$\sum$ DDTs	文献
老龙洞	6.62 ~ 70.1	1.17 ~ 46.6	[19]
百花湖	3.20 ~ 14.6	1.20 ~ 7.80	[20]
淮河	0.85 ~ 12.8	3.54 ~ 33.6	[21]
西湖	6.14 ~ 121	9.66 ~ 108	[22]
湄洲湾	0.12 ~ 0.97	0.40 ~ 4.67	[23]
巢湖	1.19 ~ 64.0	1.93 ~ 53.5	[24]
沙颍河贾鲁河	34.4 ~ 68.3	34.6 ~ 120	[25]
汉江	0.37 ~ 0.99	0.64 ~ 1.52	[26]
宁夏窖水	n. d ~ 5.20	n. d ~ 73.5	[27]
微山湖	0.01 ~ 0.19	0.04 ~ 0.16	[28]
珠江白鹅潭	0.16 ~ 3.28	19.3 ~ 59.3	[29]
黄河	0.73 ~ 48.1	0.06 ~ 10.8	[9]
长江	0.71 ~ 4.54	0.28 ~ 4.85	[30]
Kucuk Menderes River(土耳其)	187 ~ 337	72.0 ~ 120	[31]
Chenab River(巴基斯坦)	0.33 ~ 11.9	1.90 ~ 20.6	[32]
Johannesburg City(南非)	0.15 ~ 36.9	0.03 ~ 0.55	[33]
新乡市地表水	1.27 ~ 49.2	0.42 ~ 12.3	本研究

δ -HCH; 林丹几乎为纯的 γ -HCH(99%)^[34]. β -HCH 在环境中比较稳定,且 α -HCH 和 γ -HCH 在环境中均会转化为 β -HCH^[35]. 此外,工业 HCHs 中, α -HCHs/ γ -HCHs 一般在 3 ~ 10 之间,而林丹的 α -HCHs/ γ -HCHs 则接近于 0,所以环境中 α -HCHs/ γ -HCHs 的值常用于 HCHs 的来源判断. 如果样品中 α -HCHs/ γ -HCHs 的值在 4 ~ 7 之间,则认为来源于新的工业 HCHs; 如果比值接近于 1,表明环境中可能有新的林丹输入; 如果比值大于 7,则说明样品中的 HCHs 来源于大气远距离的传输^[36]. 新乡市地表水中 HCHs 的组成特征见图 2. 从中可知,新乡市地表水中 HCHs 含量顺序为 α -HCHs(39%) > γ -HCHs(31%) > δ -HCHs(24%) > β -HCHs(6%), α -HCHs、 γ -HCHs 含量较高而 β -HCHs 含量较低,表明新乡市

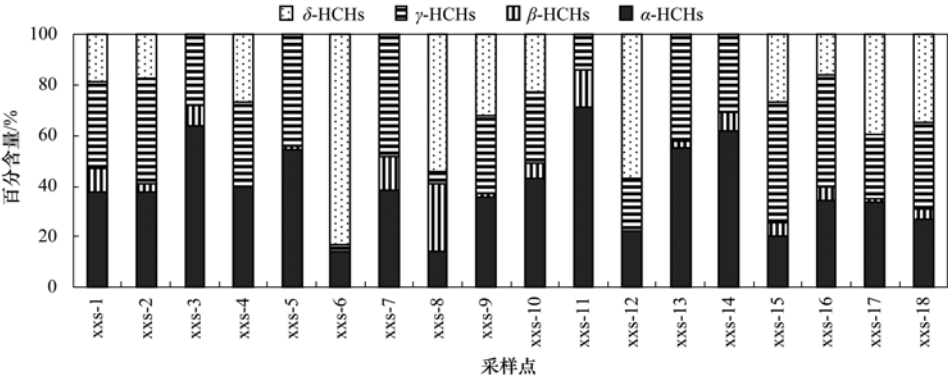


图 2 水相中 HCHs 的组成

Fig. 2 Composition of HCHs in water samples

地表水中 HCHs 主要来源于近期的污染而非历史使用的残留. 此外, 新乡市地表水中 α -HCH/ γ -HCH 比值表明: 石门河水洞及卫河皇甫采样点的 α -HCH/ γ -HCH 值分别为 5.89 和 5.03, 表明这两处采样点附近有工业品 HCHs 的污染, 其余采样点的 α -HCH/ γ -HCH 均小于 4, 且多数采样点该比值 ≈ 1 , 表明新乡市地表水中的 HCHs 主要来源于杀虫剂林丹的使用, 与其沉积物中 HCHs 的来源判断相一致^[1].

工业 DDTs 和三氯杀螨醇是环境中 DDTs 的主要来源. DDTs 及其降解产物 DDE 和 DDD 的相对比值可以用来推测 DDTs 的来源^[35]. 当 $(\text{DDE} + \text{DDD})/\text{DDTs}$ 大于 0.5, 认为 DDTs 是来自于施用农药后的长期风化残留; 而 $(\text{DDE} + \text{DDD})/\text{DDTs}$ 小于 0.5, 表明环境中存在新的 DDTs 来源. 新乡市地表水中 DDTs 的组成特征见图 3. 从中可知, 新乡市地表水中 DDTs 的组成为: p,p' -DDT (51.1%) > DDD (25.6%) > DDE (13.8%) > o,p' -DDT

(9.55%). p,p' -DDT 为新乡市地表水中 DDTs 的主要存在形式. 新乡市地表水中 50% 点位 $(\text{DDE} + \text{DDD})/\text{DDTs}$ 小于 0.5, 表明该区域仍然存在工业品 DDTs 的使用^[37]. 此外, 工业品 DDTs 中 p,p' -DDT (80% ~ 85%) 含量远大于 o,p' -DDT (15% ~ 20%), 而三氯杀螨醇中含有 11.4% o,p' -DDT 和 1.7% p,p' -DDT, o,p' -DDT 含量远大于 p,p' -DDT^[38]. 因此, o,p' -DDT/ p,p' -DDT 可用来反映环境中是否存在着三氯杀螨醇的 DDTs 污染源. 工业品 DDTs 中 o,p' -DDT/ p,p' -DDT 比值在 0.2 ~ 0.3 之间, 而三氯杀螨醇中 o,p' -DDT/ p,p' -DDT 比值在 1.3 ~ 9.3 之间或者更高^[38]. 新乡市地表水中除 2 个采样点的 o,p' -DDT/ p,p' -DDT 比值大于 1.3 外, 其余 16 个采样点的 o,p' -DDT/ p,p' -DDT 比值均小于 1.3, 且 15 个点位的 o,p' -DDT/ p,p' -DDT 比值低于 0.3, 表明该区域 DDTs 的残留主要来源于工业品 DDTs 的使用^[37].

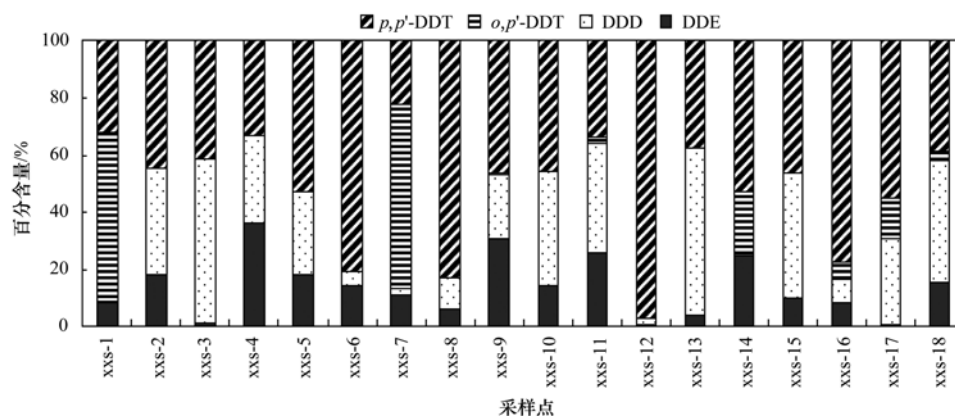


图3 水相中 DDTs 的组成

Fig. 3 Composition of DDTs in water samples

3 新乡市地表水中 OCPs 的生态风险评价

HCHs 和 DDTs 均为持久性有机污染物, 其对水生生物的生态风险主要考虑长期慢性暴露^[39]. HCHs 和 DDTs 对水生生物的慢性毒性数据 (NOECs) 主要来源于美国国家环保署 (US-EPA) 毒性数据库和文献^[40]. 如果没有可用的慢性毒性数据, 则使用急/慢性比值 ($\text{ACR} = 100$) 将急性毒性数据 (LC_{50} 或 EC_{50}) 转为慢性毒性数据^[41]. 选取新乡市地表水中代表性水生生物, 并考虑其营养级水平, 选择鱼类、甲壳类、两栖类、非甲壳类无脊椎动物、植物、藻类. 其中, 植物 (软水草)、藻类 (绿藻、硅藻) 为生产者, 而主要以藻类为食的甲壳类水生动物 (水蚤、丰年虫、水鼠妇、腮足虫) 为一级消费者,

而属于甲壳类水生动物的虾类主要食用水蚤, 属于二级消费者; 非甲壳类无脊椎动物 (线虫、蠕虫、涡虫) 为一级消费者; 两栖类动物 (蛙) 主要以食用非甲壳类无脊椎动物和甲壳类水生生物为主, 为二级消费者; 对于鱼类 (鲤鱼、鳊鱼、泥鳅、鲶鱼、鲫鱼), 鲶鱼 (食用水蚤、藻类)、鲫鱼 (食用植物、非甲壳类无脊椎动物)、泥鳅 (食用浮游生物、水生昆虫、甲壳动物以及藻类), 既是一级消费者又是二级消费者; 而鲤鱼为底栖杂食类动物、鳊鱼为杂食性动物, 既是二级消费者又是三级消费者. 但由于缺乏足够的有效毒性数据, 本研究仅对 γ -HCHs、DDD 和 p,p' -DDT 这 3 种有机氯农药的生态风险进行评价.

3.1 概率密度函数重叠面积法评价

采用 S-W 检验, 在 5% 显著性水平下, 对新乡

市地表水中 γ -HCHs、DDD 和 p,p' -DDT 的暴露浓度及其毒性数据的自然对数转换值分别进行正态检验,结果表明均符合正态分布 ($P >$

0.05). 表 3 列出了 γ -HCHs、DDD 和 p,p' -DDT 暴露浓度及其毒性数据的正态分布参数(平均值和标准差).

表 3 p,p' -DDT、 γ -HCHs 和 DDD 暴露浓度和毒性数据对数变换值的分布参数

Table 3 Distribution parameters and results of normal distribution test for logtransformed exposure

统计值	暴露浓度的自然对数			毒性数据的自然对数		
	p,p' -DDT	γ -HCHs	DDD	p,p' -DDT	γ -HCHs	DDD
平均值	-6.48	-5.71	-7.81	1.27	1.75	-1.09
标准差	0.79	1.63	1.92	3.32	3.09	2.70

根据表 3 列出的算术平均值和标准差,构建出相应参数的概率密度曲线. 将 3 种 OCPs 的暴露浓度曲线和毒性数据曲线置于同一坐标系下,2 个曲线重叠部分的面积即表述了生物受到风险的概率. 新乡市地表水中 γ -HCHs、DDD 和 p,p' -DDT 的生态风险如图 4 所示. 应用 Matlab 分别计算曲线重叠部分的面积, γ -HCHs、DDD 和 p,p' -DDT 的重叠面积分别为 0.11、0.14 和 0.05. 由重叠面积大小可知,DDD 对新乡市地表水体中水生生物的不利影响最

大,其次是 γ -HCHs, p,p' -DDT 的生态风险最小.

3.2 安全阈值法评价

运用 Origin 8.5 软件,将暴露浓度和相应的毒性数据的累积概率曲线置于同一坐标轴,经过 Probability 和 log 的坐标转化之后见图 5. 从中可知,DDD、 γ -HCHs 和 p,p' -DDT 累积概率为 90% 对应的暴露浓度分别为 0.007、0.05 和 0.005 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; DDD、 γ -HCHs、 p,p' -DDT 累积概率为 10% 对应的毒性数据分为 0.007、0.09、0.04 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 通过计算得到 DDD、 γ -HCHs、 p,p' -DDT 的 MOS_{10} 分别为 0.98、1.81、7.95,表明风险最大的为 DDD,最小的为 p,p' -DDT.

虽然 MOS_{10} 可以表征每种 OCPs 对水生生物的生态风险,但是这种方法只提供了一个确定值,而没有确切的概率意义. 通过暴露浓度超过影响一定比例的水生生物的概率则可以提供更好的风险表征手段. 结果表明,DDD 超过影响 10% 的水生生物的概率为 10.2%,表明暴露浓度和毒性数据累积概率曲线具有明显的重叠,对水生生物有一定的生态风险;而 γ -HCHs 和 p,p' -DDT 超过影响 10% 的水生生物的概率分别为 5.94% 和 0.01%,生态风险较低.

3.3 不确定性分析

风险评价过程中存在着不确定性^[42],在对新乡市地表水中有氯农药的生态风险评价过程中,不确定性主要来自于暴露浓度、毒性数据和风险表征这 3 个方面. 暴露浓度的不确定性主要存在于样品采集及分析测量时的误差. 由于新乡市地表水大小各异,采样点时空分布具有一定的局限性,例如每条河流采样点的分布及采样时间的不统一,导致了暴露浓度分析中存在不确定性;而对于分析测量时的误差,本研究则通过加标回收进行控制. 毒性数据的不确定性主要在于数据和统计方法的选择,因为有机氯农药在环境中长时间以低浓度的暴露对生态造成影响,而慢

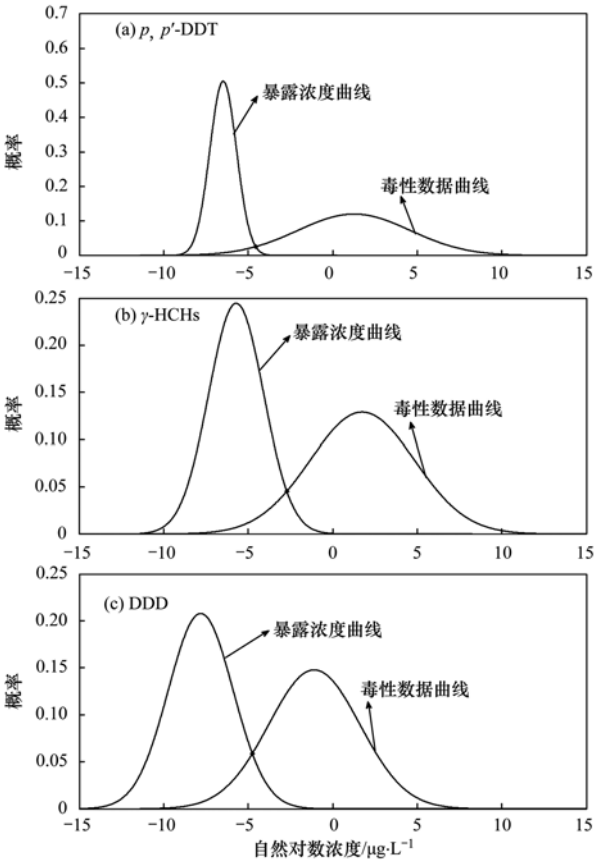
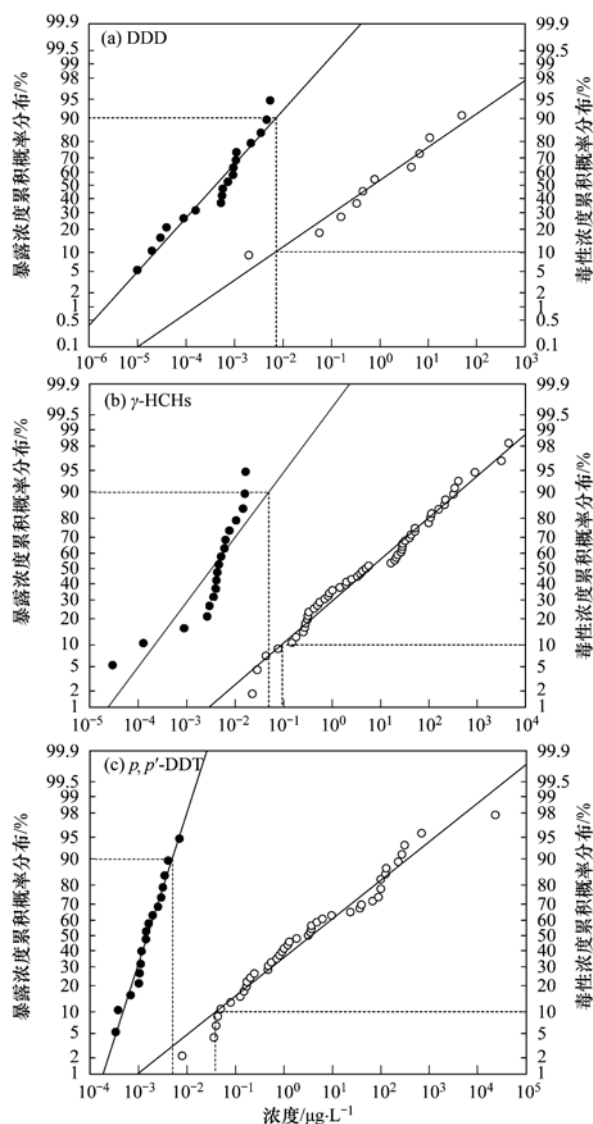


图 4 p,p' -DDT、 γ -HCHs 和 DDD 的暴露浓度和毒性数据的概率密度曲线

Fig. 4 Probability density curves for the exposure concentrations and toxicity data of p,p' -DDT, γ -HCHs and DDD



实心圆点代表暴露浓度,空心圆点代表毒性数据

图5 p,p' -DDT、 γ -HCHs 和 DDD 的暴露浓度和毒性数据概率密度曲线

Fig. 5 Probability density curves of exposure concentration and toxicity data for p,p' -DDT, γ -HCHs and DDD

性数据更接近真实性,所以在选取时通常选用慢性数据,但是由于慢性数据的缺乏,本研究的慢性数据通过急性数据转化得到,因此在一定的程度上对风险评价造成了相应的不确定性. 风险表征方法自身的缺陷会导致风险评价的不确定性. 重叠面积法比较直观,而且其面积数值能准确地反映风险大小,但是其概率意义并不确切;安全阈值法既可以通过 MOS_{10} 来表征暴露浓度和毒性数据累积概率的重叠程度,又能直观地估计超过 10% 水生生物的概率,该法的结果与重叠面积法相比较更具有概率意义. 通过对比二者得出的结果,可以有效地降低在新乡市地表水体中有机氯农药风险评价的不确定性.

4 结论

(1) 新乡市地表水体中 HCHs 的质量浓度为 $1.28 \sim 49.2 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, DDTs 的质量浓度范围为 $0.42 \sim 12.3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 5 条河流的 OCPs 污染依次为文明渠 > 天然文岩渠 > 卫河 > 共产主义渠 > 大沙河/柳青河. 与世界各地地表水中 OCPs 污染相比,新乡市地表水中的 OCPs 污染居中.

(2) 新乡市地表水体中 DDTs 的残留主要来源于工业 DDTs 的使用,而 HCHs 污染的主要来源是林丹的使用.

(3) 概率密度函数重叠面积法表明 DDD、 γ -HCHs、 p,p' -DDT 对新乡市地表水体的生态风险分别为 0.14、0.11、0.05; 安全阈值法则表明 DDD、 γ -HCHs、 p,p' -DDT 超过影响 10% 的水生生物的概率分别为 10.2%、5.94%、0.01%. 两种方法均表明风险最大的为 DDD,最小的为 p,p' -DDT.

参考文献:

- [1] 冯精兰,刘书卉,孙剑辉,等. 新乡市地表水沉积物中 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6): 1219-1225.
- [2] 丁中原,毛潇萱,马子龙,等. 河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1258-1263.
- [3] Zhou P P, Zhao Y F, Li J G, et al. Dietary exposure to persistent organochlorine pesticides in 2007 Chinese total diet study [J]. Environment International, 2012, 42: 152-159.
- [4] 唐访良,张明,徐建芬,等. 千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1735-1741.
- [5] 谢婷,张淑娟,杨瑞强,等. 青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2680-2690.
- [6] 阳文锐,王如松,李锋. 废弃工业场地有机氯农药分布及生态风险评价[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5454-5460.
- [7] Gong Z M, Xu F L, Dawson R, et al. Residues of hexachlorocyclohexane isomers and their distribution characteristics in soils in the Tianjin area, China [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2004, 46(4): 432-437.
- [8] Hou H, Zhao L, Zhang J, et al. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in soils surrounding the Tanggu Chemical Industrial District of Tianjin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(5): 3366-3380.
- [9] 孙剑辉,柴艳,张干,等. 黄河中下游水体中有机氯农药含量与分布[J]. 人民黄河, 2009, 31(1): 43-45.
- [10] 张泽洲,邢新丽,顾延生,等. 舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 266-273.
- [11] 黄焕芳,祁士华,瞿程凯,等. 福建鹭峰山脉土壤有机氯农

- 药分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2691-2697.
- [12] Baek S Y, Choi S D, Chang Y S. Three-year atmospheric monitoring of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in polar regions and the South Pacific [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(10): 4475-4482.
- [13] Zhang D, Wang Y H, Yu K F, *et al.* Occurrence, distribution and Sources of organochlorine pesticides (OCPs) in surface sediments from the Lijiang River, a Typical Karst River of Southwestern China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2014, **93**(5): 580-585.
- [14] 马子龙, 毛潇萱, 丁中原, 等. 新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1120-1128.
- [15] Jaward F M, Barber J L, Booij K, *et al.* Evidence for dynamic air-water coupling and cycling of persistent organic pollutants over the Open Atlantic Ocean [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(9): 2617-2625.
- [16] Yu H Y, Guo Y, Zeng E Y. Dietary intake of persistent organic pollutants and potential health risks via consumption of global aquatic products [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, **29**(10): 2135-2142.
- [17] 王喜龙, 徐福留, 李本纲, 等. 天津污灌区苯并(a)芘、荧蒹和非生态毒性的风险表征[J]. 城市环境与城市生态, 2002, **15**(4): 10-12.
- [18] 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 等. 太湖梅梁湾、贡湖湾和胥口湾水体 PAHs 的生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(12): 2804-2813.
- [19] 师阳, 孙玉川, 徐昕, 等. 重庆老龙洞地下河不同部位水体、表层沉积物有机氯农药含量及组成研究[J]. 中国岩溶, 2014, **33**(2): 238-247.
- [20] 沈烨冰, 张勇, 李存雄, 等. 贵州百花湖水体中有机氯农药的残留及健康风险评价研究[J]. 生态与农村环境学报, 2013, **29**(3): 311-315.
- [21] Feng J L, Zhai M X, Liu Q, *et al.* Residues of organochlorine pesticides (OCPs) in upper reach of the Huaihe River, East China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, **74**(8): 2252-2259.
- [22] 杨洪达, 王祥云, 邓勋飞, 等. 杭州西湖表层水体中有机氯农药的时空分布特征[J]. 浙江农业学报, 2013, **25**(1): 124-129.
- [23] 胡晴晖. 湄洲湾水体中持久性有机污染物的污染特征与风险评估[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(10): 2536-2544.
- [24] 张明, 花日茂, 李学德, 等. 巢湖表层水体中有机氯农药的分布及其组成[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(1): 209-214.
- [25] 赵艳萍, 王宁, 任静华, 等. 西华段沙颍河和贾鲁河表层水体中有机氯农药研究[J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(26): 12868-12872.
- [26] 张小辉, 贾海燕, 祁士华, 等. 汉江水体和鱼体内有机氯农药残留水平及积累特征分析[J]. 安全与环境工程, 2014, **21**(2): 40-45.
- [27] 李丰宝, 李玲, 田雨, 等. 宁夏夏水有机氯农药残留现状与健康风险评价[J]. 中国公共卫生, 2014, **30**(6): 761-763.
- [28] 葛冬梅, 韩宝平, 郑曦. 微山水体中有机氯农药的分布及风险评价[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(22): 11987-11989, 12024.
- [29] 杨清书, 雷亚平, 欧素英, 等. 珠江虎门河口水体有机氯农药的垂向分布及二次污染初步研究[J]. 地理科学, 2008, **28**(6): 820-825.
- [30] Tang Z W, Huang Q F, Yang Y F, *et al.* Organochlorine pesticides in the lower reaches of Yangtze River: Occurrence, ecological risk and temporal trends [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, **87**: 89-97.
- [31] Turgut C. The contamination with organochlorine pesticides and heavy metals in surface water in Küçük Menderes River in Turkey, 2000-2002 [J]. Environment International, 2003, **29**(1): 29-32.
- [32] Mahmood A, Malik R N, Li J, *et al.* Levels, distribution pattern and ecological risk assessment of organochlorines pesticides (OCPs) in water and sediments from two tributaries of the Chenab River, Pakistan [J]. Ecotoxicology, 2014, **23**(9): 1713-1721.
- [33] Amdany R, Chimuka L, Cukrowska E, *et al.* Assessment of bioavailable fraction of POPs in surface water bodies in Johannesburg City, South Africa, using passive samplers: an initial assessment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(9): 5639-5653.
- [34] Shi Y, Meng F, Guo F, *et al.* Residues of organic chlorinated pesticides in agricultural soils of Beijing, China [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2005, **49**(1): 37-44.
- [35] Wang T Y, Lu Y L, Shi Y J, *et al.* Spatial distribution of organochlorine pesticide residues in soils surrounding Guanting Reservoir, People's Republic of China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2005, **74**(4): 623-630.
- [36] Tao S, Li B G, He X C, *et al.* Spatial and temporal variations and possible sources of dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) and its metabolites in rivers in Tianjin, China [J]. Chemosphere, 2007, **68**(1): 10-16.
- [37] Li Y F, Yang Z Z, Kong X D, *et al.* Occurrence and characterization of selected organochlorine contaminants in outdoor dust collected from Xinxiang, a fast developing city in North China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(5): 3085-3094.
- [38] Qiu X H, Zhu T, Yao B, *et al.* Contribution of dicofol to the current DDT pollution in China [J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(12): 4385-4390.
- [39] 周玳, 张文华, 王连生. 毒物风险评价外推方法[J]. 环境科学进展, 1995, **3**(2): 42-48.
- [40] Verschuere K. Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals [M]. New York: Van Nostrand-Reinhold, 2001, 650-653.
- [41] Heger W, Jung S J, Martin S, *et al.* Acute and prolonged toxicity to aquatic organisms of new and existing chemicals and pesticides; 1. Variability of the acute to prolonged ratio. 2. Relation to $\log P_{ow}$ and Water Solubility [J]. Chemosphere, 1995, **31**(2): 2707-2726.
- [42] 马禄义, 许学工, 徐丽芬. 中国综合生态风险评价的不确定性分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, **47**(5): 893-900.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 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