

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用安全性	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)	

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*

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023)

摘要: 在实验室条件下研究了1,2,4-三氯苯(1,2,4-TCB)、硝基苯和毒死蜱这3种典型有机污染物对我国两种本土淡水水生生物霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)和嗜热四膜虫(*Tetrahymena thermophila*)的急性毒性效应,并进行生物安全性评价。结果表明,随污染物浓度增加和时间的延长,3种污染物的毒性均明显增强,两种水生生物的死亡率上升,呈明显剂量-效应关系。1,2,4-TCB、硝基苯和毒死蜱对霍甫水丝蚓的96 h半致死效应浓度(96 h-LC₅₀)分别为71.88、285.76和5.50 mg·L⁻¹,对四膜虫的96 h-EC₅₀分别为15.58、140.22和14.69 mg·L⁻¹。3种典型污染物的毒性评估结果表明,1,2,4-TCB对霍甫水丝蚓表现为中等毒性,硝基苯为低等毒性,而毒死蜱则表现为高等毒性;3种污染物对嗜热四膜虫的毒性顺序依次为:1,2,4-三氯苯>毒死蜱>硝基苯。研究结果将为开展水生态风险评估,制定和完善我国水质基准提供本土数据支持。

关键词: 1,2,4-三氯苯; 硝基苯; 毒死蜱; 水生生物; 急性毒性; 安全评价

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-3074-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.047

Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms

YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, LI Mei*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Acute toxic effects of three typical organic pollutants 1,2,4-trichlorobenzene (1,2,4-TCB), nitrobenzene and chlorpyrifos were investigated using *Tetrahymena thermophila* and *Limnodrilus hoffmeisteri* as living test organisms under laboratory conditions. The results showed that with the increase of pollutants' concentration and the extension of time, toxicity of the three kinds of pollutants significantly enhanced, and the mortality of two kinds of aquatic organisms also had a rising trend, and an obvious dose-effect relationship. The 96 h-LC₅₀ values of 1,2,4-TCB, nitrobenzene and chlorpyrifos were 71.88, 285.76, and 5.50 mg·L⁻¹ for *L. hoffmeisteri* and 15.58, 140.22, and 14.69 mg·L⁻¹ for *T. thermophila*. These results showed that the toxicity among the three typical pollutants to *T. thermophila* was 1,2,4-TCB > chlorpyrifos > nitrobenzene. Findings were able to provide more information on water quality criteria and more data on their toxicity to indigenous aquatic organisms in China.

Key words: 1,2,4-trichlorobenzene; nitrobenzene; chlorpyrifos; aquatic organisms; acute toxic effects; safety assessment

近年来,随着工农业的发展,以各种形式存在的天然有机物及某些人工合成的有机污染物排放与日俱增。它们作为农药和医药的重要原料和中间体,在生产中应用广泛,并以未经适当处理的废水、垃圾废气和废渣等多种形式进入环境造成污染。1,2,4-三氯苯(1,2,4-trichlorobenzene, 1,2,4-TCB)是典型持久性有机污染物,脂溶性高且不易降解,主要用于纺织及电化学工业^[1],对眼睛有一定刺激作用,长时间、高浓度接触会引起神经衰弱、慢性肝肾毒性等,并具有潜在的“三致”作用^[2,3]。硝基苯(nitrobenzene)作为芳烃类化合物,是制造炸药、杀虫剂、燃料及药物等的重要原料,在生产和消费过程中必然有部分进入水环境中,不仅会引起水质感官性状的严重恶化,且对水生生物具有一定毒性,并进一步对人类健康造成直接或间接危害^[4]。毒死蜱

(chlorpyrifos)是硫代磷酸酯类常用杀虫剂,具有触杀、胃毒和熏蒸作用,可用于防治多种害虫,但同时也对农田环境及有益生物产生影响。毒死蜱对蚯蚓和土壤微生物的毒性较低,但对鸟类、鱼类、蛙类等均属高等毒性^[5]。研究上述污染物的生态毒性,对于制定相关安全阈值、水生生态环境的风险评估以及突发事件的处理具有重要意义。

霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)隶属于环节动物门(Annelida)、水丝蚓属(*Limnodrilus*),广泛存在于河流、湖泊,对环境适

收稿日期: 2014-12-29; 修订日期: 2015-03-23

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-003-02, 2013ZX-07101014-01); 国家自然科学基金项目(21077052); 江苏省科技支撑项目(BE2012737)

作者简介: 杨扬(1990~),女,博士研究生,主要研究方向为环境毒理学, E-mail: yangyangmm123@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: meili@nju.edu.cn

应能力较强,是淡水水生食物链的重要一环,是我国河流中重要的底栖动物和淡水生态系统的优势种,对水生生物生态系统物质循环有较大影响,已作为指示生物应用于水体污染研究,也是鱼虾的天然饵料^[6,7]。嗜热四膜虫(*Tetrahymena thermophila*)隶属于原生动物门(Protozoa)、四膜虫属(*Tetrahymena*),是一种淡水中常见的单细胞真核原生动物,不仅生长周期短,而且对很多毒物的反应比其他高等生物更敏感、直接,已成为环境和药学领域毒性研究的理想材料,并被用来进行水质监测^[8]。目前四膜虫的急性毒性研究主要针对部分纳米材料^[9,10]、重金属^[11]以及有机污染物^[12,13]。两者均为我国常见淡水生物,是水体生物监测的重要指示动物。

本研究以霍甫水丝蚓和嗜热四膜虫这两种本土水生生物种作为受试生物,通过急性毒性实验探讨上述 3 种典型有机污染物的毒性效应,补充 1,2,4-TCB、硝基苯和毒死蜱的基础毒性数据,并进行安全评价,以期制定相关安全阈值、开展水生态风险评估提供科学根据,为我国水质基准研究提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

霍甫水丝蚓(*L. hoffmeisteri*)购自济南鱼虫花鸟市场,在 15~25℃ 条件下,培养于(60×25×20)cm³的流水式鱼缸中,鱼缸底部铺 5 cm 左右底泥,加入一定量的曝气水,实验前于(25±2)℃ 条件下培养 1 周以上。挑选 2.0~3.0 cm 健康活泼幼体,放入装有曝气水的直径 90 mm、高 45 mm 结晶皿中,盖上表面皿,在 22℃、自然光照的人工气候培养箱中清肠 24 h,清肠后仍然健康的霍甫水丝蚓作为正式实验动物。

嗜热四膜虫(*T. thermophila*)由南京大学环境学院重点实验室提供。四膜虫培养基为胰蛋白胨 15 g,酵母粉 5 g,葡萄糖 1 g,超纯水 1 000 mL,自然 pH 下 121℃ 灭菌 20 min,冷却备用。实验时分装于 250 mL 锥形瓶中各 100 mL,以 4% 接种量接种,接种密度为每毫升 $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4$ 个细胞,28℃ 静置培养约 48 h 至对数生长期后用于实验。

1,2,4-TCB、硝基苯和毒死蜱均购自百灵威科技有限公司(分析纯),用二甲基亚砜(DMSO)配制成一定浓度的储备液,实验时根据需要进行稀释。稀释用水为去氯自来水(曝气 48 h)。

1.2 实验方法

1.2.1 霍甫水丝蚓急性毒性测定

将挑选洗净清肠后的霍甫水丝蚓随机放入盛有 100 mL 试液的 90 mm×45 mm 结晶皿中,每皿 20 条,同时用表面皿盖好。采用半静态实验研究 1,2,4-TCB、硝基苯和毒死蜱毒性,每 24 h 更换受试液,实验期间不喂食,持续 96 h,分别于 24、48、72 和 96 h 观察霍甫水丝蚓中毒症状和死亡情况,然后计算 LC₅₀,并将死亡个体及时取出。霍甫水丝蚓的死亡标准为:身体泛白,失去伸缩能力,用解剖针碰触无反应。

1.2.2 嗜热四膜虫急性毒性测定

取嗜热四膜虫培养液 9 mL 分装至 15 mL 比色管中,根据预实验的结果加入 1 mL 不同浓度的受试化合物,按等差或等比间距设置 7 个以上的浓度梯度,使培养体系中 1,2,4-三氯苯、硝基苯、毒死蜱的最终浓度为 5、10、15、20、25、30、35 和 40 mg·L⁻¹; 40、60、80、100、120、140 和 160 mg·L⁻¹; 0.5、1、2、4、8、16、32 和 64 mg·L⁻¹,同时设置空白组进行对照,并将最大浓度组 DMSO 设为阴性对照,所用的 DMSO 最大添加比例不超过 5%。每个浓度 3 个平行,分别于 24、48、72 和 96 h 进行细胞计数,计算 EC₅₀,实验重复 3 次。

1.3 数据处理

各实验至少设 3 个平行,取其平均值和标准差采用 SPSS 16.0 软件进行统计分析,根据概率单位图解法分别计算两种水生生物 24、48、72 和 96 h 的 EC₅₀、LC₅₀及其 95% 置信区间值。安全浓度 SC 和最大容许浓度 MPC 评价采用下列 2 种公式求得^[14]:

$$SC = 0.1 \times LC_{50} (EC_{50})$$

$$MPC = 0.01 \times LC_{50} (EC_{50})$$

2 结果与分析

2.1 1,2,4-TCB 对两种水生生物的急性毒性

1,2,4-TCB 对霍甫水丝蚓和嗜热四膜虫的急性毒性结果如表 1 所示,在实验过程中,空白对照组和助溶剂(DMSO)对照组的水丝蚓及四膜虫均未出现行为异常或者死亡。从中可知,染毒 24 h 后,1,2,4-三氯苯对四膜虫及水丝蚓的 24 h-EC₅₀/LC₅₀ 分别为 21.56 mg·L⁻¹和 71.88 mg·L⁻¹,随时间推移嗜热四膜虫的 EC₅₀先减小后增大,但增大的趋势并不显著,至 72 h 达最小值 14.13 mg·L⁻¹,霍甫水丝蚓的 EC₅₀呈现减小趋势,在 96 h 达到最小值 30.3 mg·L⁻¹,即有机污染物的毒性作用逐渐增强。由表 1 可见,1,2,4-TCB 对嗜热四膜虫的毒性作用相对较强。

表 1 1,2,4-TCB 对霍甫水丝蚓和嗜热四膜虫的急性毒性

Table 1 Acute toxicity of 1,2,4-TCB on *L. hoffmeisteri* and *T. thermophila*

水生生物	时间/h	回归方程	R^2	$EC_{50}/LC_{50}/mg \cdot L^{-1}$	95% 置信区间 $/mg \cdot L^{-1}$
霍甫水丝蚓	24	$y = 3.783x - 2.024$	0.957	71.88	65.40 ~ 79.00
	48	$y = 4.684x - 2.992$	0.980	50.83	47.11 ~ 54.84
	72	$y = 8.534x - 7.958$	0.982	32.98	31.55 ~ 34.51
	96	$y = 10.036x - 9.868$	0.950	30.3	29.13 ~ 31.51
嗜热四膜虫	24	$y = 2.940x - 1.175$	0.989	21.56	21.13 ~ 27.85
	48	$y = 1.649x + 1.569$	0.982	17.06	16.88 ~ 17.23
	72	$y = 5.011x - 0.763$	0.980	14.13	14.01 ~ 14.24
	96	$y = 4.465x - 0.325$	0.992	15.58	15.17 ~ 16.03

2.2 硝基苯对两种水生生物的急性毒性

硝基苯对霍甫水丝蚓及嗜热四膜虫的急性毒性数据见表 2。随着污染物浓度增加和时间延长,硝基苯对水丝蚓的毒性明显增强,死亡率也呈明显上升趋势,并在 96 h 达到最小值 $285.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 硝基

苯对嗜热四膜虫的毒性作用在 72 h 达到最小值 $103.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 96 h- EC_{50} 增加了 35.49%, 呈现先减小后增大的趋势, 在 72 h 达到最小值 $103.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 结果表明, 硝基苯对嗜热四膜虫的毒性作用高于霍甫水丝蚓。

表 2 硝基苯对霍甫水丝蚓及嗜热四膜虫的急性毒性

Table 2 Acute toxicity of nitrobenzene on *T. thermophila* and *L. hoffmeisteri*

水生生物	时间/h	回归方程	R^2	$EC_{50}/LC_{50}/mg \cdot L^{-1}$	95% 置信区间 $/mg \cdot L^{-1}$
霍甫水丝蚓	24	$y = 7.471x - 14.149$	0.961	365.59	349.50 ~ 382.43
	48	$y = 7.531x - 14.005$	0.968	333.43	318.86 ~ 348.66
	72	$y = 8.450x - 16.074$	0.990	311.89	299.92 ~ 324.34
	96	$y = 8.015x - 14.686$	0.947	285.76	274.16 ~ 297.85
嗜热四膜虫	24	$y = 2.940x - 1.1746$	0.964	125.87	125.47 ~ 126.07
	48	$y = 1.649x + 1.5693$	0.983	120.18	119.45 ~ 120.67
	72	$y = 1.549x + 1.8779$	0.987	103.49	103.22 ~ 103.69
	96	$y = 3.209x - 1.8883$	0.991	140.22	103.99 ~ 140.47

2.3 毒死蜱对两种水生生物的急性毒性

表 3 显示了毒死蜱对霍甫水丝蚓及嗜热四膜虫的急性毒性数据,随着污染物毒性作用时间的延长,硝基苯对霍甫水丝蚓的毒性明显增强,并在 96 h- LC_{50} 达到最小值 $5.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 毒死蜱对嗜热四膜虫的毒性作用呈现减小后增大的趋势,在 48 ~ 96 h 产生了一定的波动,并在 96 h- EC_{50} 达到最小值 $14.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 结果表明, 毒死蜱对霍甫水丝蚓的毒性作用高于嗜热四膜虫。

2.4 3 种污染物对两种水生生物的毒性分级

根据文献[15]中对鱼类毒性分级标准,3 种污染物对霍甫水丝蚓有不同的毒性作用,其中 1,2,4-TCB 对霍甫水丝蚓表现为中等毒性,硝基苯对其表现为低等毒性,而毒死蜱则表现为高等毒性,且 3 种污染物对霍甫水丝蚓毒性大小依次为:毒死蜱 > 1,2,4-TCB > 硝基苯; 3 种污染物对嗜热四膜虫的毒性顺序依次为:1,2,4-TCB > 毒死蜱 > 硝基苯。

表 3 毒死蜱对霍甫水丝蚓及嗜热四膜虫的急性毒性

Table 3 Acute toxicity of chlopyrifos on *T. thermophila* and *L. hoffmeisteri*

水生生物	时间/h	回归方程	R^2	$EC_{50}/LC_{50}/mg \cdot L^{-1}$	95% 置信区间 $/mg \cdot L^{-1}$
霍甫水丝蚓	24	$y = 4.158x + 0.970$	0.970	9.31	8.55 ~ 10.15
	48	$y = 3.445x - 1.830$	0.964	8.32	7.54 ~ 9.17
	72	$y = 3.663x - 2.010$	0.984	6.55	5.97 ~ 7.18
	96	$y = 4.239x + 1.863$	0.975	5.50	5.08 ~ 5.95
嗜热四膜虫	24	$y = 0.806x + 3.686$	0.982	42.68	42.17 ~ 43.00
	48	$y = 0.785x + 4.0464$	0.993	16.37	15.98 ~ 16.66
	72	$y = 0.556x + 4.2756$	0.984	20.13	19.82 ~ 20.49
	96	$y = 0.615x + 4.2819$	0.973	14.69	14.32 ~ 14.89

3 讨论

3.1 3 种有机污染物的毒性比较

3.1.1 1,2,4-TCB 对水生生物急性毒性比较

研究表明长时间、高浓度暴露下,1,2,4-TCB 会引起动物肝、肾毒性,也可能损害甲状腺^[16],并具有潜在的“三致”作用^[17-19]。目前 1,2,4-TCB 对我国水生生物毒性效应研究较少,陈粉丽等^[20]研究了 1,2,4-TCB 对斑马鱼(*Danio rerio*)胚胎的急性毒性效应,显示胚胎发育终止的 24 h-EC₅₀为 21.31 mg·L⁻¹; Zhang 等^[21]研究结果表明,28℃时 1,2,4-TCB 对四膜虫的 48 h-IC₅₀为 21.0 mg·L⁻¹。本研究中嗜热四膜虫对 1,2,4-TCB 的毒性响应值 48 h-EC₅₀为 17.06 mg·L⁻¹,与之前研究结果相符。霍甫水丝蚓对 1,2,4-TCB 的 48 h-LC₅₀为 50.83 mg·L⁻¹,相较于四膜虫耐受性较强。

3.1.2 硝基苯对水生生物急性毒性比较

2005 年松花江水污染事件发生后,硝基苯成为环境工作者的研究热点。周群芳等^[22]研究发现硝基苯对日本青鳉(*Oryzias latipes*)和稀有鮎鲫(*Gobiocypris rarus*)的 48 h-LC₅₀分别为 141.4 mg·L⁻¹和 133.0 mg·L⁻¹,较本研究硝基苯对嗜热四膜虫的毒性效应(48 h-EC₅₀为 120.18 mg·L⁻¹)的结果相似;刘伟男等^[23]报道了硝基苯对霍甫水丝蚓的 48 h-LC₅₀为 116.61 mg·L⁻¹,与本研究 48 h-LC₅₀值(333.43 mg·L⁻¹)相差较大,可能与实验条件及受试生物个体差异有关。

3.1.3 毒死蜱对水生生物急性毒性比较

毒死蜱由于在环境中易降解,半衰期短^[24],因此取代了高毒难降解的农药,得到广泛的应用。本研究中毒死蜱对嗜热四膜虫和霍甫水丝蚓的 96 h-LC₅₀分别为 14.69 mg·L⁻¹和 5.50 mg·L⁻¹,高于草鱼(*C. idellus*) 0.05 mg·L⁻¹^[25],大鳞副泥鳅(*Paramisgurnus dabryanus*) 193.20 μg·L⁻¹^[26],斑马鱼(*D. rerio*) 0.52 mg·L⁻¹^[27],鲤鱼(Carp)苗 0.58 mg·L⁻¹^[28]和锦鲤(*Brocade carp*) 1.40 mg·L⁻¹^[25],说明嗜热四膜虫及霍甫水丝蚓对毒死蜱的耐受能力相对较强。

3.2 两种水生生物毒性比较

随污染物浓度增加和时间延长,霍甫水丝蚓的毒性效应明显增强,呈剂量-效应关系,与氨氮^[7]及重金属、氯酚的毒性作用相似,重金属 Hg²⁺、Cr⁶⁺和 Pb²⁺对霍甫水丝蚓的 96 h-LC₅₀分别为 0.16、

4.25 和 76.24 mg·L⁻¹,3 种氯酚类物质 2,4-DCP、2,4,6-TCP 和 PCP 对霍甫水丝蚓的 96 h-LC₅₀分别为 20.73、7.86 和 2.42,其中重金属中 Hg²⁺对霍甫水丝蚓表现为极高毒性,Cr⁶⁺、2,4,6-TCP、毒死蜱和 PCP 对其表现为高等毒性,而 Pb²⁺、2,4-DCP 和 1,2,4-TCB 对霍甫水丝蚓表现为中等毒性,硝基苯对霍甫水丝蚓表现为低等毒性。9 种污染物对霍甫水丝蚓毒性大小依次为: Hg²⁺ > PCP > Cr⁶⁺ > 毒死蜱 > 2,4,6-TCP > 2,4-DCP > 1,2,4-TCB > Pb²⁺ > 硝基苯^[6],霍甫水丝蚓具有重要的指示作用。

嗜热四膜虫随污染物浓度增加和时间延长 EC₅₀先减小后增大,基本至 72 h 达到最小值,毒死蜱至 96 h 达到最小值,即 3 种有机污染物的毒性作用逐渐增强后减小,与李雅洁等^[8]对氯酚的毒性研究结果相同,可能是由于随着时间的推移,嗜热四膜虫对污染物逐渐产生了耐受性,毒性作用削弱。然而,仅对 96 h 以内的毒性作用进行了研究,其毒性作用机制仍需进一步研究。

3.3 基于 3 种有机污染物急性数据的水质安全评价

目前我国对相关化学品的生物毒性安全性评价研究比较薄弱,还没有制定统一的评价标准,无法确保我国水生态系统的安全。建立我国水环境安全评价体系对于保护我国生物多样性、水生态系统稳定和人体健康具有重要意义。本实验根据 3 种有机污染物对霍甫水丝蚓及嗜热四膜虫两种水生生物的急性毒性数据,推导上述 3 种有机化合物对两种生物的安全浓度和最大容许浓度。

根据霍甫水丝蚓及嗜热四膜虫半致死浓度 96 h-LC₅₀及 96 h-EC₅₀可以分别得到 3 种有机污染物对应的 SC 和 MPC 见表 4。从中可知,对受试生物嗜热四膜虫而言,1,2,4-TCB、硝基苯和毒死蜱的安全浓度和最大允许浓度分别为 1.56、14.02、1.47 mg·L⁻¹和 0.16、1.40、0.15 mg·L⁻¹,而霍甫水丝蚓 1,2,4-TCB、硝基苯和毒死蜱的安全浓度和最大允许浓度分别为 3.03、28.58、0.55 mg·L⁻¹和 0.30、2.86、0.06 mg·L⁻¹。不同受试生物物种对同一种有机物的安全浓度及最大允许浓度不同,为保护水生生物生态安全及水体用途,选择较为敏感的物种进行推导。将两种水生生物的预测安全浓度进行比较后,1,2,4-TCB、硝基苯和毒死蜱的最终安全浓度为 1.56、14.02 和 0.55 mg·L⁻¹,最大允许浓度为 0.16、1.40 和 0.06 mg·L⁻¹。

通过与中国地表水水环境质量标准比较发现,

1,2,4-TCB、硝基苯和毒死蜱的最大允许浓度大于其对应的中国地表水环境质量标准及美国基准值和标准值。虽然本研究预测的部分污染物最大允许浓度大于规定的标准限值,但上述污染物在实际水体

中水质标准的制定还需要更多水生生物毒理学基础实验数据。同时,污染物水质标准的制定还要考虑各种其他因素的影响,如水体用途、水质特征及经济、社会因素等。

表 4 3 种典型有机污染物安全性评价/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Safety assessment of three typical pollutants/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

污染物	嗜热四膜虫		霍甫水丝蚓		美国基准		中国地表水环境质量标准
	SC	MPC	SC	MPC	CMC	CCC	
1,2,4-TCB	1.56	0.16	3.03	0.30			0.020
硝基苯	14.02	1.40	28.58	2.86	3.15	0.88	0.017
毒死蜱	1.47	0.15	0.55	0.06			0.030

4 结 论

(1)随 3 种污染物浓度增加和时间延长,其对霍甫水丝蚓和嗜热四膜虫的毒性效应明显增强,呈剂量-效应关系。

(2)3 种典型污染物对霍甫水丝蚓的毒性评估结果显示,1,2,4-TCB 为中等毒性,硝基苯为低等毒性,毒死蜱为高等毒性。

(3)3 种污染物对嗜热四膜虫的毒性顺序依次为:1,2,4-三氯苯 > 毒死蜱 > 硝基苯。

参考文献:

[1] Wu S J, Zhang H X, Hu Y, *et al.* Effects of 1, 2, 4-trichlorobenzene on the enzyme activities and ultrastructure of earthworm *Eisenia fetida* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **76**(2): 175-181.

[2] Robinson K S, Kavlock R J, Chemoff N, *et al.* Multigeneration study of 1, 2, 4-trichlorobenzene in rats [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 1981, **8**(3): 489-500.

[3] 杜青平,刘伍香,袁保红,等. 1, 2, 4-三氯苯对斑马鱼生殖和胚胎发育毒性效应[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(4): 736-741.

[4] 李俊生,徐靖,罗建武,等. 硝基苯环境效应的研究综述[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(1): 368-373.

[5] 季静,肖斌,李杨,等. 两种不同剂型毒死蜱对四种环境生物毒性评价[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(9): 1681-1686.

[6] 姜东生,李梅,崔益斌. 重金属和氯酚对霍甫水丝蚓的急性毒性及水环境安全评价[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(6): 1572-1578.

[7] 刘炎,姜东升,李雅洁,等. 不同温度和 pH 下氨氮对河蚬和霍甫水丝蚓的急性毒性[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(9): 1067-1073.

[8] 李雅洁,崔益斌,蒋丽娟,等. 3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2755-2761.

[9] Mortimer M, Kasemets K, Kahru A. Toxicity of ZnO and CuO nanoparticles to ciliated protozoa *Tetrahymena thermophila* [J]. *Toxicology*, 2010, **269**(2-3): 182-189.

[10] Zou X Y, Xu B, Yu C P, *et al.* Combined toxicity of ferroferric

oxide nanoparticles and arsenic to the ciliated protozoa *Tetrahymena Pyriformis* [J]. *Aquatic Toxicology*, 2013, **134-135**: 66-73.

[11] 张鹏幸,许静,卢剑功,等. 含荧光素酶四膜虫 B2086-LUC 全细胞生物传感器的构建及其对重金属离子的响应[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(6): 1075-1080.

[12] Li X, Zhang T, Min X, *et al.* Toxicity of aromatic compounds to *Tetrahymena* estimated by microcalorimetry and QSAR [J]. *Aquatic Toxicology*, 2010, **98**(4): 322-327.

[13] 白琦锋,高礼,袁涛. 低剂量三氯生和三氯卡班对嗜热四膜虫的毒性研究[J]. *环境化学*, 2012, **31**(5): 720-725.

[14] Nadella S R, Fitzpatrick J L, Franklin N, *et al.* Toxicity of dissolved Cu, Zn, Ni and Cd to developing embryos of the blue mussel (*Mytilus trossulus*) and the protective effect of dissolved organic carbon [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2009, **149**(3): 340-348.

[15] HJ/T 154-2004. 新化学物质危害评估导则[S].

[16] Dong W H, Zhang Y, Lin X Y, *et al.* Adsorption studies of 1, 2, 4-Trichlorobenzene onto shallow aquifer media at the Luhuang landfill site in Kaifeng, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(10): 4353-4362.

[17] Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles J L. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(6): 2282-2287.

[18] Zhang T, Li X, Lu Y, *et al.* Joint toxicity of heavy metals and chlorobenzenes to *pyriformis Tetrahymena* [J]. *Chemosphere*, 2014, **104**: 177-183.

[19] 杜青平,贾晓珊. 1, 2, 4-三氯苯对大蒜根尖分生细胞有丝分裂的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(6): 962-967.

[20] 陈粉丽,张松林,陈红梅,等. 氯代苯类化合物对斑马鱼胚胎的单一急性毒性[J]. *环境与职业医学*, 2010, **27**(8): 472-475.

[21] Zhang T, Li X, Min X M, *et al.* Acute toxicity of chlorobenzenes in *Tetrahymena*: estimated by microcalorimetry and mechanism. [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2012, **33**(3): 377-385.

[22] 周群芳,傅建捷,孟海珍,等. 水体硝基苯对日本青鳉和稀

- 有鮡鲫的亚急性毒理学效应 [J]. 中国科学, 2007, **37**(2): 197-206.
- [23] 刘祎男, 范学铭, 阚晓微, 等. 苯、苯酚、硝基苯对水丝蚓的急性毒性及超氧化物歧化酶活性的影响 [J]. 水生生物学报, 2008, **32**(3): 420-423.
- [24] Mo C P, Zhao L G, Xie H F. Biodegradation of Chlorpyrifos by Manganese Peroxidase [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(12): 65-70.
- [25] 李典宝, 张玮, 王丽卿, 等. 锯齿新米虾对 Cu^{2+} 和毒死蜱毒性响应研究[J]. 生态毒理学报, 2014, **9**(4): 785-792.
- [26] De Silva P M C S, Pathiratne A, van Gestel C A M. Toxicity of chlorpyrifos, carbofuran, mancozeb and their formulations to the tropical earthworm *Perionyx excavatus* [J]. Applied Soil Ecology, 2010, **44**(1): 56-60.
- [27] 余向阳, 赵于丁, 王冬兰, 等. 毒死蜱和三唑磷对斑马鱼头部 AChE 活性影响及在鱼体内的富集 [J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(6): 2452-2455.
- [28] 刘信勇, 朱琳, 黄碧捷, 等. 多壁碳纳米管对斑马鱼体组织内酶活性的影响 [J]. 环境科学研究, 2009, **22**(7): 838-842.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

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