

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例	李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例	
吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例	项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例	王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甬醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖晋翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)	

中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究

王晓南, 闫振广, 余若祯, 王婉华, 陈丽红, 刘征涛*

(中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室, 北京 100012)

摘要: 我国已经系统地采用物种敏感度分布 (species sensitivity distribution, SSD) 法开展水生生物基准研究工作. 由于水体污染物种类繁多, 因此在建立我国水生生物基准的过程中面临着本土生物毒性数据缺乏的问题. 本研究通过物种敏感性比较, 以美国为例对采用非本土生物毒性数据来推导我国水生生物基准的可行性进行了分析. 首先, 以 US EPA 推荐的 58 种污染物的水生生物基准为基础, 筛选出中美两国共有的且生物毒性数据满足“3 门 8 科”要求的 10 种污染物: As(Ⅲ)、Cr(VI)、Hg、Cu、Pb、Zn、硝基苯、对硫磷、毒死蜱、三丁基锡; 然后, 采用双样本 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验法和重要点位 (hazardous concentration for 5% of the species and 50% of the species, HC₅ 和 HC₅₀) 差异分析法对 10 种污染物的中美物种敏感性差异进行研究. 结果表明: 通过双样本 K-S 检验得出中美物种对 Cu、毒死蜱、三丁基锡的敏感性分布存在显著性差异 ($P < 0.05$); 通过重要点位值进行差异比较得出中美两国 Cr(VI)、毒死蜱的 HC₅ 值差异超过一个数量级, 毒死蜱的 HC₅₀ 值差异超过一个数量级, 表明有些污染物 [如: Cr(VI)、毒死蜱等] 的中美物种敏感性差异较大, 在这种情况下直接采用美国的生物毒性数据或基准值来保护我国的水生生物, 可能会存在“欠保护”或“过保护”的风险.

关键词: 水生生物基准; 中国; 美国; 本土物种; 敏感性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3216-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.050

Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA

WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, WANG Wan-hua, CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao*

(State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effects and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Recently, China has commenced water quality criteria (WQC) research using the species sensitivity distribution (SSD) method. However, it is difficult to obtain sufficient toxicity data on native species for thousands of contaminants. In this study, the feasibility of deriving aquatic life criteria using toxicity data from non-native species was analyzed (taking the USA as an example). Firstly, 10 pollutants [As(Ⅲ), Cr(VI), Hg, Cu, Pb, Zn, nitrobenzene, parathion, chlorpyrifos, tributyltin] with plenty of toxicity data (at least 3 Phyla and 8 Families) both in China and the USA were selected based on the recommended aquatic life criteria of 58 pollutants by the US EPA. Secondly, the two-sample Kolmogorov-Smirnov (K-S) test and comparison method of important points of HC₅ and HC₅₀ (hazardous concentrations for 5% of the species and 50% of the species) were used to determine the difference of species sensitivity between China and the USA. The result of two-sample K-S test showed that the difference of species sensitivity to Cu, chlorpyrifos and tributyltin between the two countries was significant ($P < 0.05$). Additionally, there were significant differences for HC₅ values [Cr(VI), chlorpyrifos] between the two countries, as well as the HC₅₀ (chlorpyrifos). As a result, there were significant differences for the species sensitivity to some pollutants [Cr(VI), chlorpyrifos, etc.] between China and the USA. Therefore, in this situation, “over-protection” or “non-protection” may happen when using the criteria values or the toxicity data of American species directly to protect the Chinese native species.

Key words: aquatic life criteria; China; USA; native species; sensitivity

目前我国正在系统地开展水质基准研究工作, 水质基准依据保护对象的不同可分为水生生物基准、人体健康基准、沉积物基准、生态学基准等. 其中, 作为水质基准重要组份之一的水生生物基准, 以保护水生态受体、维护生态平衡为目的, 是制定相关水质标准的科学依据, 也是进行生态风险评估的重要依据. 近年, 我国水生生物基准研究工作取得了一定的成果, 如: 对国外水生生物基准技术方法在国内的应用方面进行了研究^[1~8]; 采用美国、欧洲等国家和地区水生生物基准技术方法, 推导了重金属

污染物^[9~11]、有机污染物^[12~16]、水体营养物质^[17~19]等一些污染物的水生生物基准值.

美国^[20]、澳大利亚^[21]等国家在推导本国水生生物基准时, 推荐使用本土物种的毒性数据, Davies 等^[22]对使用非本土物种毒性数据推导出的基准值

收稿日期: 2015-12-31; 修订日期: 2016-03-30

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07501-003); 环境基准与风险评估国家重点实验室自由探索基金项目 (SKLECRA20140FP06)

作者简介: 王晓南 (1986~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为生态毒理学与环境基准, E-mail: wangxn@craes.org.cn

* 通讯联系人, E-mail: liuzt@craes.org.cn

能否保护本土水生生物提出了质疑.因此,各国在推导本国水生生物基准时,基本均面临本土物种毒性数据缺乏的问题.即使在水生生物基准发展较早的美国,至今也才推荐了 58 种污染物[化学的(如: Hg、毒死蜱等)、物理的(如:色度等)、生物的(如:细菌等)]的水生生物基准值.在我国,由于水生生物基准研究工作起步较晚,各项相关研究尚不完善,并且我国也存在本土生物毒性数据普遍较缺乏的问题.因此,如何解决本土生物毒性数据缺乏的问题,成为我国水生生物基准研究中急需解决的重要问题.

在建立我国水生生物基准时,对能否直接采用国外水生生物基准值,或采用非本土生物毒性数据来推导我国水生生物基准值存在不同的看法.本研究以中国与美国为例,分别搜集我国与美国的生物毒性数据,通过对中美间的水生生物基准推导所采用物种的敏感性差异进行分析,初步探讨直接采用国外水生生物基准值或采用非本土生物毒性数据来保护我国水生生物的可行性.

1 材料与方法

1.1 生物毒性数据的搜集与筛选原则

水生生物毒性数据的主要来源包括:中国知网 CNKI、ECOTOX (<http://cfpub.epa.gov/ecotox/>) 等数据库以及公开发表的文献.

数据搜集完成后,参照文献[20],对搜集的生物毒性数据进行初步筛选.毒性数据的初步筛选原则包括:测试信息不完全、有疑点的数据(未设立对照组、对照组大量死亡等)、性质不稳定(易挥发、易水解)而未采用流水式试验等的毒性数据不可用.完成初步筛选后,需进一步对毒性数据进行二次筛选,二次筛选原则包括:浮游甲壳类生物的急性毒性试验终点为 48-h LC_{50} 或 EC_{50} ,鱼、贝、虾、蟹等生物的试验终点是 96-h LC_{50} 或 EC_{50} ,优先选择流水式试验结果及对试验溶液浓度有监控的毒性数据;所有毒性数据都要求有明确的测试终点、测试时间及对测试阶段或指标的详细描述、按照标准方法进行测试.当同一个物种或同一个终点有多个毒性值可用时,使用该多个值的几何平均值为种平均急性值(species mean acute values, SMAV)^[20].

1.2 中美共有污染物的筛选

US EPA 至今共推荐了 58 种污染物的水生生物基准值,由于对美国水生生物分类的认识有限,本研究在进行中美水生生物物种敏感性差异研究时,只

采用了 US EPA 公开发布的 58 种污染物的毒性数据作为美国物种毒性数据.为进行中美水生生物物种敏感性差异的分析研究,依据 1.1 节的搜集和筛选原则,结合文献[23]和中国生物物种名录(http://data.sp2000.cn/2011_cnode_c/info_checklist.php),搜集和筛选这 58 种污染物的我国本土生物毒性数据,其中在我国自然水体有分布的物种也被归为本土生物进行数据搜集.

生物毒性数据搜集筛选完成后,需要对数据能否达到最少生物毒性数据需求(minimum toxicity data requirement, MTDR)进行判别.在水生生物水质基准研究工作中,为使推导的基准值具有代表性和准确性,利用 SSD 法推导基准值时有 MTDR 的要求,不同的国家对 MTDR 的要求有所不同,其中 US EPA 于 1985 年制定的“推导保护水生生物及其用途的水质基准的技术指南”中指出需满足“3 门 8 科”本土水生动物的毒性数据^[20].我国水质基准研究相对滞后,对于 MTDR 研究的报道也较少,现有的研究多集中在依据美国“3 门 8 科”MTDR 的基础上,进行生态毒理学试验或搜集毒性数据推导污染物的水生生物基准值^[11, 12, 15, 17, 18],也有学者在美国“3 门 8 科”的基础上对我国 MTDR 进行了探索和分析^[3].但总体来说,相对于发达国家,我国水生生物基准研究尚处于学习和探索阶段,MTDR 的研究也不系统和全面,因此,本研究中水生生物基准 MTDR 选用 US EPA“3 门 8 科”的要求,但由笔者先前的研究可知^[24],我国本土鱼类以鲤科鱼为主,因此,把“3 门 8 科”MTDR 要求中“1 种鲑科鱼类”改为“1 种鲤科鱼类”,筛选出中美共有的且毒性数据满足“3 门 8 科”的污染物.

1.3 中美水生生物基准物种敏感性比较

本研究采用 SPSS 20.0 中的双样本 Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验,对中美物种间的敏感性差异进行比较.K-S 检验是一种非参数检验,其中 k_s 是一个检验统计量,用于检验 2 组分布的显著性差异水平($P < 0.05$ 时差异显著).K-S 检验常被用于检验 2 个样本是否来自同一个分布,并且已被用于比较不同分类群生物间的敏感性差异^[6, 15, 16, 25].此外,本研究采用数量级差异分析法对中美物种 SSD 分布的重要点位 HC_5 (hazard concentration of 5% species, 对 5% 的生物产生危害的浓度)和 HC_{50} 进行比较, HC_5 和 HC_{50} 是水生生物基准研究中重要的两个点,其中 HC_5 在美国、澳大利亚、欧盟等国家和地区经常被直接用于计算水质基准值(水质基准值 = HC_5 /

AF, $1 \leq AF \leq 5$), HC_{50} 在荷兰 RIVM ETX2.0 水质基准计算程序中也是重要的一个指标,可反映 50% 水生生物不受危害的浓度. 中美各污染物之间 HC_5 和 HC_{50} 的差异比较主要采用数量级差异分析法,有学者在进行水质基准研究中认为,如果 HC_5 之间差异在一个数量级内^[6, 26~31],则差异较小;如果 HC_5 之间差异超过一个数量级,则差异较大. US EPA^[32] 在预测水生生物毒性时,如果预测值和原值的差异在 5 倍(0.5 个数量级)以内,则认为差异很小. 因此,在本研究中典型污染物 HC_5 和 HC_{50} 差异分析中,如果中美间 HC_5 或 HC_{50} 差异在 0.5 个数量级以内,则认为差异较小;在一个数量级以内,则认为差异可接受;超过一个数量级,则认为差异较大不可接受.

2 结果与分析

2.1 我国典型污染物的生物毒性数据与共有污染物筛选

US EPA 至今共推荐了 58 种污染物(生物、化学、物理)的水生生物基准值,为了后文进一步进行中美物种敏感性差异的分析研究,本研究依据 1.1 节的毒性数据搜集和筛选原则,搜集和筛选了这 58 种污染物的我国本土生物毒性数据. 其中,10 种污染物的本土生物毒性数据比较充足,并符合“3 门 8 科”的要求,主要包括 Hg、Cr(VI)、As(III)、Pb、Zn、Cu、对硫磷、毒死蜱、硝基苯、三丁基锡. 受篇幅和参考文献量的限制,本文只列出毒死蜱、三丁基锡的毒性数据和文献来源(表 1、表 2),其中,毒死蜱共有 3 门 14 科 20 种生物的急性毒性数据,三丁基锡共有 4 门 8 科 12 种生物的急性毒性数据. 表 1 和表 2 中美国水生动物毒性数据来源于美国基准文件,由于对美国水生生物分类的认识有限,本文未能列出其中文名称、具体的生物分类等信息. Hg、Cr(VI)、As(III)、对硫磷、硝基苯的毒性数据见文献^[6], Cu、Zn、Pb 的数据可见文献^[29, 33, 34].

表 1 毒死蜱的本土生物毒性数据
Table 1 Biological toxicity data of native species for chlorpyrifos

序号	我国生物毒性数据				美国基准文件中的毒性数据	
	$LC_{50}(EC_{50})$ / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	物种	拉丁名	文献	拉丁名	$LC_{50}(EC_{50})$ / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
1	0.89	南美白对虾	<i>Penaeus vannamei</i>	[35]	<i>Gammarus lacustris</i>	0.11
2	1.08	摇蚊	<i>Chironomus</i> sp.	[36]	<i>Gammarus pseudolimnaeus</i>	0.18
3	4.61	大型蚤	<i>Daphnia magna</i>	[37~39]	<i>Gammarus fasciatus</i>	0.32
4	11.60	青虾	<i>Macrobrachium nipponense</i>	[40]	<i>Pteronarcella badia</i>	0.38
5	22.90	中华绒螯蟹	<i>Eriocheir sinensis</i>	[41]	<i>Claasenia sabulosa</i>	0.57
6	26.23	麦穗鱼	<i>Pseudorasbora parva</i>	[42, 43]	<i>Leptoceridae</i> sp.	0.77
7	50.00	草鱼	<i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[44]	<i>Peltodytes</i> sp.	0.80
8	52.00	河川沙塘鳢	<i>Odontobutis potamophila</i>	[45]	<i>Neoplea striola</i>	1.38
9	67.55	蓝鳃太阳鱼	<i>Lepomis macrochirus</i>	[42, 43]	<i>Orconectes immunis</i>	6.00
10	149.20	鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	[46]	<i>Salmo gairdneri</i>	8.49
11	160.00	尖膀胱螺	<i>Physa acuta</i>	[47]	<i>Pteronarcys izal ifornlea</i>	10.00
12	172.00	鲢鱼	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[48]	<i>Lepomis macrochirus</i>	10.00
13	193.20	大鳞副泥鳅	<i>Paramisgurnus dabryanus</i>	[49]	<i>Salmo clarki</i>	18.00
14	200.00	多刺裸腹蚤	<i>Moina macrocopa</i>	[50]	<i>Salvelinus namaycush</i>	98.00
15	557.67	鲫鱼	<i>Carassius auratus</i>	[51~53]	<i>Plmephales promelas</i>	331.70
16	800.00	中华蟾蜍蝌蚪	<i>Bufo gargarizans</i>	[54]	<i>Aplexa hypnorum</i>	806.00
17	2 400.00	泽蛙蝌蚪	<i>Rana limnocharis</i>	[39]	<i>Carassius auratus</i>	806.00
18	4 320.00	环棱螺	<i>Bellamyia lapidea</i>	[55]	<i>Ictalurus punctatus</i>	806.00
19	6 310.00	中华圆田螺	<i>Cipangopaludina chinensis</i>	[55]	/	/
20	8 750.00	河蚬	<i>Corbicula fluminea</i>	[55]	/	/

2.2 中美物种敏感性差异分析

本研究对 10 种污染物的中美物种敏感性分布进行了拟合(图 1). 从图 1 中物种敏感性分布曲线和 95% 置信区间的差异可知, As(III)、Hg、Pb、Zn、硝基苯、对硫磷的中美 SSD 曲线比较接近, 95% 置信区间基本重合. 但毒死蜱、三丁基锡、Cu、

Cr(VI) 的中美 SSD 曲线和 95% 置信区间均偏差较大. 同时, 本研究采用双样本 K-S 检验对中美物种的敏感性分布差异进行了分析, 具体结果见表 3, 经过 K-S 检验可知中美物种对 Cu、毒死蜱、三丁基锡的敏感性存在显著性差异($P < 0.05$). 中美 SSD 曲线的偏差, 特别是低值区域的偏差将直接导致 HC_5 值

表 2 三丁基锡的本土生物毒性数据

Table 2 Biological toxicity data of native species for tributyltin						
我国生物毒性数据				美国基准文件中的毒性数据		
序号	LC ₅₀ (EC ₅₀) /μg·L ⁻¹	物种	拉丁名	文献	拉丁名	LC ₅₀ (EC ₅₀) /μg·L ⁻¹
1	1.17	折叠萝卜螺	<i>Radix plicatula</i>	[56]	<i>Hydra oligactis</i>	1.14
2	2.00	大型溞	<i>Daphnia magna</i>	[57]	<i>Hydra littoralis</i>	1.20
3	3.15	鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	[58]	<i>Chlorohydra viridissima</i>	1.80
4	5.82	孔雀鱼	<i>Poecilia reticulata</i>	[59]	<i>Pimephales promelas</i>	2.60
5	8.30	蓝鳃太阳鱼	<i>Lepomis macrochirus</i>	[60]	<i>Gammarus pseudolimnaeus</i>	3.70
6	16.60	羽摇蚊幼虫	<i>Chironomus plumosus</i>	[61]	<i>Daphnia magna</i>	4.30
7	28.70	鲫鱼	<i>Carassius auratus</i>	[62]	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	4.57
8	51.00	罗氏沼虾	<i>Macrobrachium rosenbergii</i>	[63]	<i>Lumbriculus variegatus</i>	5.40
9	145.55	苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i>	[64]	<i>Ictalurus punctatus</i>	5.50
10	241.55	穴附器毛突摇蚊	<i>Chaetocladius sexpilosus</i>	[65]	<i>Lepomis macrochirus</i>	8.30
11	285.40	红德永摇蚊幼虫	<i>Tokunagayusurika akamusi</i>	[61]	<i>Culex</i> sp.	10.20
12	335.63	霍甫水丝蚓	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	[64]	<i>Salvelinus namaycush</i>	12.73
13	/	/	/	/	<i>Elliptio camplanatus</i>	24 600.00

的差异. 因此本研究还对两国物种敏感性分布的重要点位HC₅、HC₅₀值进行了比较, 由于USEPA“指南”方法只能计算FAV(HC₅)值而不能计算HC₅₀值, 因此在本研究中采用log-logistic SSD法, 分别对中美两国生物毒性数据进行了处理, 计算得出HC₅值和HC₅₀值, 然后对中美两国之间的HC₅、HC₅₀值进行差异比较(表4), 结果显示中美两国Cr(VI)、毒死蜱的HC₅值差异超过一个数量级, 毒死蜱的HC₅₀值差异超过一个数量级.

表 3 采用双样本 K-S 检验中美物种敏感性差异¹⁾

Table 3 Difference of species sensitivity distribution between China and the USA using two-sample K-S test

污染物	n ₁	n ₂	ks	P(K-S 检验)
As(Ⅲ)	15	16	0.394	0.998
Cr(VI)	29	34	1.059	0.212
Hg	46	33	0.681	0.742
Cu	57	54	1.596	0.012
Zn	25	44	0.940	0.340
Pb	24	10	0.465	0.982
毒死蜱	20	18	1.669	0.008
硝基苯	18	11	0.541	0.932
三丁基锡	12	13	1.366	0.048
对硫磷	27	38	0.802	0.542

1) n₁ 为污染物的我国生物毒性数据量, n₂ 为污染物的美国生物毒性数据量; ks 是用于决定差异是否显著的统计量; P(K-S 检验) 反差异是否显著, 当 P<0.05 时, 表明存在显著差异

3 讨论

从图 1 的物种敏感性分布、SSD 曲线的差异可知, Cu、毒死蜱、三丁基锡的中美 SSD 曲线和 95% 置信区间均偏差较大. 中美 SSD 曲线的偏差, 特别是低值区域的偏差将直接导致 HC₅ 值的差异, 通过

对两国物种敏感性分布的重要点位 HC₅、HC₅₀ 值进行比较, 结果显示中美两国 As(Ⅲ)、Hg、Cu、Zn、Pb、对硫磷、硝基苯、三丁基锡的 HC₅ 和 HC₅₀ 差异均未超过 0.5 个数量级, Cr(VI)、毒死蜱的 HC₅ 值差异超过 1 个数量级, 毒死蜱的 HC₅₀ 值差异超过 1 个数量级. Sunderam 等^[66] 分别采用澳大利亚本土水生生物和非澳大利亚本土生物对硫丹的水生生物基准值进行了计算与比较, 结果发现硫丹的本土水生生物基准值和非本土基准值的差异不显著, 他们认为可以采用非澳大利亚本土生物计算基准值. 也有学者比较了污染物 2,4-二氯酚的我国本土生物和非本土生物所计算的水生生物基准值^[16], 得出采用本土生物与非本土生物所推导的基准值不存在显著性差异. 但是, Davies 等^[22] 通过对澳大利亚本土鱼类、甲壳类与北美虹鳟的毒性研究, 指出在利用非本土生物毒性数据推导的水生生物基准来保护本土物种时尚存在一定的争议, 还需对更多的污染物、更多的生物分类群进行更多毒性终点的研究与比较后, 才能较好地采用非本土生物毒性数据的合理性进行研究. Dyer 等^[67] 通过研究发现, 不同分布区域(寒带、温带、热带)的鱼类物种对污染物的敏感性是存在差异的. 与前人研究结果相似, 本研究的结果表明对有些污染物[As(Ⅲ)、Hg、Cu、Zn、Pb、对硫磷、硝基苯、三丁基锡], 中美间的物种敏感性差异较小, 推导的 HC₅ 和 HC₅₀ 差异不显著, 在环境污染应急管理或紧急情况时, 可以暂时借鉴美国的生物毒性数据或基准值; 然而, 有些污染物[Cr(VI)、毒死蜱]的中美间物种敏感性差异较大, 推导的 HC₅ 和 HC₅₀ 的差异较为显著, 在该情况下如

果直接采用美国水生生物基准值来保护我国水生生物,可能会存在“欠保护”或“过保护”的风险.

双样本 K-S 检验常被用于比较不同分类群生物间的敏感性分布差异^[6, 15, 16, 25, 68],本研究通过 K-S

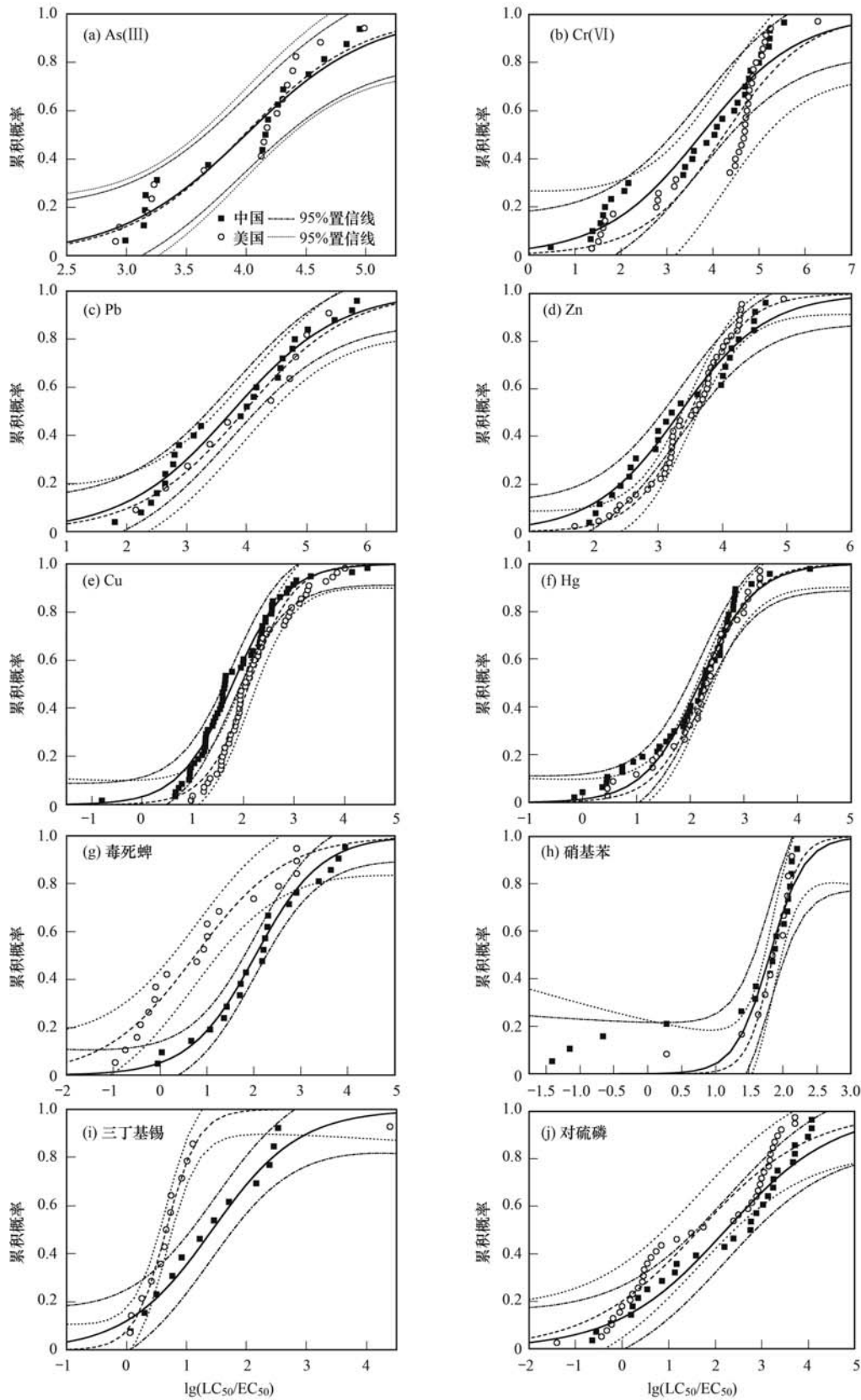


图 1 10 种污染物的中美物种敏感性分布

Fig. 1 Species sensitivity distribution of 10 pollutants between China and the USA

表 4 中美物种 HC₅ 和 HC₅₀ 值差异情况¹⁾
Table 4 Difference of HC₅ and HC₅₀ values between China and the USA

污染物	物种	HC ₅	差异倍数	HC ₅₀	差异倍数
As(Ⅲ)	中国物种	277.88	0.83	9 867.11	1.03
	美国物种	335.29		9 593.34	
Cr(VI)	中国物种	4.15	0.09	5 478.86	0.31
	美国物种	41.71		17 402.83	
Hg	中国物种	3.52	0.41	139.95	0.73
	美国物种	8.69		191.54	
Cu	中国物种	1.68	0.24	61.17	0.46
	美国物种	7.00		131.62	
Zn	中国物种	23.40	0.14	2 174.85	0.70
	美国物种	170.26		3 110.93	
Pb	中国物种	13.15	0.54	5 754.40	0.63
	美国物种	24.49		9 089.50	
毒死蜱	中国物种	0.63	63.00	116.70	21.14
	美国物种	0.01		5.52	
硝基苯	中国物种	11.23	0.56	63.49	0.89
	美国物种	19.88		71.21	
三丁基锡	中国物种	0.70	0.93	23.55	5.14
	美国物种	0.75		4.58	
对硫磷	中国物种	0.05	5.00	169.04	3.75
	美国物种	0.01		45.07	

1) HC₅ 或 HC₅₀对应As(Ⅲ)、Cr(VI)、Hg、Cu、Zn、Pb、对硫磷、三丁基锡、毒死蜱的单位为μg·L⁻¹,对应硝基苯的单位为mg·L⁻¹; 差异倍数通过中国 HC₅ 或 HC₅₀值/美国 HC₅ 或 HC₅₀值计算

检验(表3),得出中美物种对As(Ⅲ)、Hg、Cr(VI)、Zn、Pb、对硫磷、硝基苯的敏感性分布不存在显著性差异($P>0.05$),中美物种对Cu、毒死蜱、三丁基锡的敏感性分布存在显著性差异($P<0.05$). 有学者采用双样本 K-S 检验比较了 1 种污染物 2,4-二氯酚的我国本土生物和非本土生物的敏感性分布差异^[16],得出本土生物与非本土生物对 2,4-二氯酚的敏感性分布不存在显著性差异($P>0.05$). Maltby 等^[25]采用双样本 K-S 检验比较了 3 种污染物毒死蜱、二嗪磷、杀螟硫磷的欧洲节肢动物和北美洲节肢动物的敏感性分布差异,得出欧洲节肢动物和北美洲节肢动物对这 3 种污染物的敏感性分布差异不显著($P>0.05$),但是他们发现欧洲节肢动物对这 3 种污染物的敏感性普遍比北美洲节肢动物高. 由于他们的研究采用的污染物较少,因此,还需对更多的污染物、更多的生物分类群进行更多毒性终点的研究与比较后,才能较好地中美或者不同分布区域之间的物种敏感性分布差异进行研究. 因此,本研究通过双样本 K-S 检验结果也得出直接采用美国的生物毒性数据或基准值来保护我国的水生生物,可能会存在“欠保护”或“过保护”的风险.

在毒性值的比较方面,表 1 中对毒死蜱最敏感的水生生物为浮游甲壳动物,其中美国最敏感的是甲壳纲的钩虾科(毒性值为 0.11 ~ 0.32 μg·L⁻¹),敏感性高于我国甲壳纲的对虾科(0.89 μg·L⁻¹),其次是昆虫纲的摇蚊科(1.08 μg·L⁻¹),美国也是昆虫类生物(0.38 ~ 1.38 μg·L⁻¹),我国甲壳纲十足目的青虾和中华绒螯蟹的敏感性(11.60 μg·L⁻¹、22.90 μg·L⁻¹)低于美国的 *Orconectes immunis*(6.00 μg·L⁻¹). 有研究表明,我国鱼类以鲤科鱼为主^[24],而美国以鲑科鱼为主^[20],表 1 中鲑科鱼对毒死蜱的敏感性(8.49、18.00、98.00 μg·L⁻¹)高于我国鲤科鱼(26.23、50.00、149.20、172.00、557.67 μg·L⁻¹). 因此,中美毒死蜱的 SSD 分布和 HC₅、HC₅₀的差异是由两国主要水生生物物种和其对毒死蜱敏感性的差异造成的,因此,在该条件下,直接采用美国基准值来保护我国水生生物可能存在较大的不确定性. 表 2 中,我国对三丁基锡最敏感的水生生物类别为软体动物、浮游甲壳类和鲤科鱼类(1.17 ~ 3.15 μg·L⁻¹),美国为水螅类、鲤科鱼类和浮游甲壳类(1.14 ~ 3.70 μg·L⁻¹),并且两国前几类生物对三丁基锡的敏感性相近,然而,我国昆虫类、环

节类(如摇蚊、苏氏尾鳃蚓)对三丁基锡的敏感性低于美国同类生物(*Culex* sp.、*Lumbriculus variegatus*),这也是中美 SSD 曲线在 HC₅₀ 区域差异较大的主要原因。

因此,考虑到不同生物分布区域物种间潜在的敏感性差异和物种差异,美国、澳大利亚等国家^[20, 21]提出在推导本国水生生物基准时应使用本土生物的毒性数据。

4 结论

(1) 以 US EPA 推荐的 58 种污染物水生生物基准为基础,对我国本土生物毒性数据进行搜集与筛选,筛选出中美两国共有的且生物毒性数据满足“3 门 8 科”的 10 种污染物,分别为 As(Ⅲ)、Cr(VI)、Hg、Cu、Pb、Zn、硝基苯、对硫磷、毒死蜱、三丁基锡。

(2) 通过双样本 K-S 检验得出中美物种对 Cu、毒死蜱、三丁基锡的敏感性分布存在显著性差异($P < 0.05$);同时,通过对重要点位 HC₅、HC₅₀ 值进行差异比较得出中美两国 Cr(VI)和毒死蜱的 HC₅ 值差异超过一个数量级,毒死蜱的 HC₅₀ 值差异超过一个数量级。结果表明有些污染物[如:Cr(VI)、毒死蜱等]的中美间物种敏感性差异较大,在这种情况下直接采用美国的生物毒性数据或基准值来保护我国的水生生物,可能会存在“欠保护”或“过保护”的风险。

参考文献:

- [1] 孟伟, 闫振广, 刘征涛. 美国水质基准技术分析与中国相关基准的构建[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(7): 757-761.
- [2] 王晓南, 闫振广, 刘征涛, 等. 生物效应比(BER)技术预测我国水生生物基准探讨[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 276-285.
- [3] 刘征涛, 王晓南, 闫振广, 等. “三门六科”水质基准最少毒性数据需求原则[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(12): 1364-1369.
- [4] 王晓南, 刘征涛, 闫振广, 等. 麦穗鱼物种敏感性评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2329-2334.
- [5] 闫振广, 余若楠, 焦聪颖, 等. 水质基准方法中若干关键技术探讨[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(4): 397-403.
- [6] Wang X N, Yan Z G, Liu Z T, et al. Comparison of species sensitivity distributions for species from China and the USA[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(1): 168-176.
- [7] Feng C L, Wu F C, Zhao X L, et al. Water quality criteria research and progress[J]. Science China Earth Sciences, 2012, **55**(6): 882-891.
- [8] 张铃松, 王业耀, 孟凡生, 等. 水生生物基准推导中物种选择方法研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3959-3969.
- [9] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 我国典型流域镉水质基准研究[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(10): 1221-1228.
- [10] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 我国淡水水生生物镉基准研究[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(11): 2393-2406.
- [11] 吴丰昌, 孟伟, 曹宇静, 等. 镉的淡水水生生物水质基准研究[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(2): 172-184.
- [12] 吴丰昌, 孟伟, 张瑞卿, 等. 保护淡水水生生物硝基苯水质基准研究[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(1): 1-10.
- [13] 陈曲, 郭继香, 孙乾耀, 等. 甲萘威的淡水水生生物水质基准研究[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(1): 84-91.
- [14] Wang X N, Liu Z T, Yan Z G, et al. Development of aquatic life criteria for triclosan and comparison of the sensitivity between native and non-native species [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **260**: 1017-1022.
- [15] Jin X W, Zha J M, Xu Y P, et al. Derivation of aquatic predicted no-effect concentration (PNEC) for 2, 4-dichlorophenol: comparing native species data with non-native species data[J]. Chemosphere, 2011, **84**(10): 1506-1511.
- [16] 罗茜, 查金苗, 雷炳莉, 等. 三种氯代酚的水生态毒理和水质基准[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(11): 2241-2249.
- [17] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 我国淡水生物氨氮基准研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1564-1570.
- [18] 张铃松, 王业耀, 孟凡生, 等. 硝酸盐对淡水水生生物毒性及水质基准推导[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3286-3293.
- [19] 王一喆, 闫振广, 张亚辉, 等. 七大流域氨氮水生生物水质基准与生态风险评估初探[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(1): 77-83.
- [20] US EPA. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses (PB 85-227049)[R]. Springfield, VA, USA: U. S. Environmental Protection Agency, 1985.
- [21] ANZECC, ARMCANZ. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality [R]. Canberra, Australia: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (ANZECC), Agriculture and Resources Management Council of Australia and New Zealand (ARMCANZ), 2000.
- [22] Davies P E, Cook L S J, Goenarso D. Sublethal responses to pesticides of several species of Australian freshwater fish and crustaceans and rainbow trout[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1994, **13**(8): 1341-1354.
- [23] 中国科学院中国动物志编辑委员会. 中国动物志[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [24] 王晓南, 郑欣, 闫振广, 等. 水质基准鱼类受试生物筛选[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(4): 341-348.
- [25] Maltby L, Blake N, Brock T C M, et al. Addressing interspecific variation in sensitivity and the potential to reduce this source of uncertainty in ecotoxicological assessments[R]. DEFRA project code PN0932. London, UK: Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2002.
- [26] Dyer S D, Versteeg D J, Belanger S E, et al. Comparison of species sensitivity distributions derived from interspecies correlation models to distributions used to derive water quality criteria[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(8): 3076-3083.
- [27] Dyer S D, Versteeg D J, Belanger S E, et al. Interspecies correlation estimates predict protective environmental concentrations[J]. Environmental Science & Technology, 2006,

- 40(9): 3102-3111.
- [28] Blum D J W, Speece R E. Determining chemical toxicity to aquatic species [J]. Environmental Science & Technology, 1990, **24**(3): 284-293.
- [29] Feng C L, Wu F C, Dyer S D, *et al.* Derivation of freshwater quality criteria for zinc using interspecies correlation estimation models to protect aquatic life in China[J]. Chemosphere, 2013, **90**(3): 1177-1183.
- [30] Wu F C, Mu Y S, Chang H, *et al.* Predicting water quality criteria for protecting aquatic life from physicochemical properties of metals or metalloids [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(1): 446-453.
- [31] Awkerman J A, Raimondo S, Barron M G. Development of species sensitivity distributions for wildlife using interspecies toxicity correlation models [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(9): 3447-3452.
- [32] US EPA. Web-based interspecies correlation estimation (Web-ICE) for acute toxicity: user manual[M]. Gulf Breeze, FL: US EPA, 2013.
- [33] 吴丰昌, 冯承莲, 曹宇静, 等. 我国铜的淡水生物水质基准研究[J]. 生态毒理学报, 2011, **6**(6): 617-628.
- [34] 闫振广, 何丽, 高富, 等. 铅水生生物水质基准研究与初步应用[A]. 见: 环境安全与生态学基准/标准国际研讨会、中国环境科学学会环境标准与基准专业委员会 2013 年学术研讨会、中国毒理学会环境与生态毒理专业委员会第三届学术研讨会论文集[C]. 南京: 中国环境科学学会, 中国毒理学会, 2013.
- [35] 马继华, 蒋耀培, 刘泉, 等. “毒死蜱”对南美白对虾的急性毒性影响[J]. 水产科技情报, 2009, **36**(4): 192-194.
- [36] 葛士林, 曹传旺, 王志英. 3 种农药对红裸摇蚊体内蛋白质质量分数和 AChE 活性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2011, **39**(1): 108-109, 126.
- [37] 谭亚军. 四种杀虫剂对大型蚤(*D. magna*)的慢性毒性[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [38] 徐燕, 边文杰, 李少南, 等. 5 种杀虫剂在水-人工底泥系统中对大型蚤的急性毒性及其比较[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(5): 855-859.
- [39] 吴长兴. 毒死蜱和氟虫腈的环境毒理与风险[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [40] 来有鹏, 刘贤金, 余向阳, 等. 农药对河虾的急性毒性及其谷胱甘肽转移酶(GSTs)的影响[J]. 农药, 2008, **47**(11): 820-822.
- [41] 李康. 阿特拉津和毒死蜱对中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)的毒性效应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [42] 边文杰, 徐燕, 李少南, 等. 毒死蜱与鱼肝微粒体 P450 的相互作用[J]. 浙江农业学报, 2011, **23**(4): 776-781.
- [43] 李少南, 张莉, 边文杰, 等. 鱼类肝脏微粒体对于硫代磷酸酯类杀虫剂活化代谢率的种间差异[J]. 生态毒理学报, 2010, **5**(6): 809-816.
- [44] 李常健, 骆鹰, 杨锦兀, 等. 阿维菌素·毒死蜱对草鱼的毒性效应研究[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(6): 3365-3367.
- [45] 丁正峰, 薛晖, 王晓丰, 等. 毒死蜱(CPF)对河川沙塘鳢幼鱼的急性毒性[J]. 中国水产科学, 2012, **19**(3): 528-535.
- [46] 刘丽. 毒死蜱对鲤鱼的免疫毒性研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2013.
- [47] 马军国, 李效宇. 毒死蜱对尖膀胱螺的急性毒性试验[J]. 湖北农业科学, 2012, **51**(19): 4330-4332.
- [48] 马军国. 白鲢细胞色素 P450(CYP3A137)的克隆及其表达研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2013.
- [49] 夏晓华, 张林霞, 王莉娜, 等. 毒死蜱对大鳞副泥鳅的急性毒性及遗传毒性研究[J]. 河南农业科学, 2013, **42**(1): 129-131.
- [50] 王娜, 刘莉莉, 孙凯峰, 等. 有机磷农药的构效关系及其对浮游生物的毒性效应[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(1): 118-123.
- [51] 郑璐. 稻田排水中毒死蜱对鲫鱼毒性效应的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013.
- [52] 夏锦瑜, 王冬兰, 张志勇, 等. 毒死蜱和丙溴磷对鲫鱼的毒性效应及其在鱼体中的富集[J]. 江苏农业学报, 2010, **26**(5): 1088-1092.
- [53] 侯方浩, 余向阳, 赵于丁, 等. 毒死蜱对锦鲤性腺的影响及其在鱼组织中的富集[J]. 江苏农业学报, 2009, **25**(1): 188-191.
- [54] 尹晓辉, 朱国念, 邓建宇, 等. 毒死蜱对中华蟾蜍胚胎发育毒性及生态毒理效应[A]. 见: 第六届全国环境化学大会暨环境科学仪器与分析仪器展览会摘要集[C]. 上海: 中国化学会, 2011.
- [55] 沈坚, 赵颖, 李少南, 等. 三种常用农药对环棱螺、圆田螺和河蚬的急性毒性研究[J]. 农药学报, 2013, **15**(5): 559-566.
- [56] 宋志慧, 陈天乙, 马维琦. 有机锡化合物对萝卜螺的毒性作用[J]. 环境科学, 1997, **18**(4): 83-84.
- [57] 王珊珊, 冯流. 有机锡化合物的毒性效应及其影响因素[J]. 安全与环境学报, 2005, **5**(3): 12-15.
- [58] 张宝东, 张毓琪. 氯化三丁基锡对鲤鱼的急性毒性[J]. 交通环保, 1995, **16**(1): 18-19.
- [59] 谭燕, 李远友, 杜永兵, 等. 三丁基锡对孔雀鱼的毒性效应研究[J]. 环境化学, 2006, **25**(3): 315-319.
- [60] US EPA. Ambient aquatic life water quality criteria for Tributyltin (TBT)[R]. Washington, DC: US EPA, 2003.
- [61] 宋志慧, 陈天乙, 刘如冰. 三丁基锡对摇蚊幼虫的毒性作用[J]. 环境科学, 1998, **19**(2): 87-88.
- [62] 王蕾. 三丁基锡对非洲爪蟾和红鲫的毒性效应[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [63] 朱春华, 薛海波, 李广丽. 三丁基锡(TBT)对罗氏沼虾的毒性效应[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(3): 527-532.
- [64] 陈天乙, 郑素平, 于仁诚, 等. 有机锡化合物对水生无脊椎动物的毒性研究[J]. 环境化学, 1994, **13**(3): 266-268.
- [65] 陈天乙, 谭元生, 田明. 有机锡化合物对底栖动物的急性毒性研究[J]. 环境科学, 1994, **15**(5): 63-64.
- [66] Sunderam R I M, Thompson G B, Cheng D M H. Toxicity of endosulfan to native and introduced fish in Australia [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1992, **11**(10): 1469-1476.
- [67] Dyer S D, Belanger S E, Carr G J. An initial evaluation of the use of Euro/North American fish species for tropical effects assessments[J]. Chemosphere, 1997, **35**(11): 2767-2781.
- [68] 王晓南, 闫振广, 刘征涛, 等. 实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2414-2421.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-nu, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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