

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

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

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估

王晓南¹, 闫振广¹, 刘征涛^{1*}, 张聪², 王伟莉¹

(1. 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; 2. 中海石油环保服务有限公司, 天津 300452)

摘要: 该研究对辽河流域重金属铬(VI)的水生生物毒性数据进行搜集与筛选, 推导辽河流域铬(VI)的水生生物基准值, 并对辽河流域 25 个采样点位采集水样, 测定铬(VI)的环境暴露浓度, 最后对辽河流域水生生物铬(VI)暴露的潜在风险进行评估。此外, 采用美国环境保护署(US EPA)物种间关系估算模型(ICE)对辽河流域物种毒性值进行预测, 并对基于预测毒性值的水生生物基准进行推导。结果表明, 辽河流域基于实测毒性数据的水生生物急性基准值(CMC)为 $17.73 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 慢性基准值(CCC)为 $12.15 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; ICE 模型预测的辽河流域生物毒性值推导的 CMC 值为 $13.97 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 实测 CMC 值与预测值比较接近, 表明 ICE 模型可应用于水生生物基准值的预测。铬(VI)的水质分析结果表明 25 个采样点位水体铬(VI)浓度较低, 均达到 GB 3838-2002 地表水质标准中铬(VI)的 I 类或 II 类标准, 水质状况良好; 然而, 在对水生生物的潜在风险方面, 通过生态风险评估得出 7 月辽河流域 25 个点位中环境暴露值超过慢性基准 CCC 值的有 7 个, 12 月超过慢性基准 CCC 值的有 6 个, 表明辽河流域个别点位铬(VI)暴露可能会对水生生物产生不可接受的风险。

关键词: 铬(VI); 辽河; 水生生物基准; 物种间关系估算; 环境暴露; 风险评估

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2414-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.2015.07.012

Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River

WANG Xiao-nan¹, YAN Zhen-guang¹, LIU Zheng-tao^{1*}, ZHANG Cong², WANG Wei-li¹

(1. 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; 2. China Offshore Environmental Services Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: In this study, toxicity data of aquatic species in Liaohe River for heavy metal chromium (VI) was collected and selected. The aquatic life criteria for chromium (VI) in Liaohe River was derived based on these toxicity data. Moreover, water samples of 25 sites in Liaohe River were collected, and the concentrations of chromium (VI) in these samples were analyzed. Finally, ecological risk assessment of chromium (VI) in Liaohe River was performed. Moreover, interspecies correlation estimation method (ICE) established by US EPA was used to predict the acute toxicity of species in Liaohe River, and aquatic life criteria based on predicted toxicity data was derived. The results showed that: the measured CMC (criteria maximum concentration), measured CCC (criteria continuous concentration) and the predicted CMC were 17.73 , 12.15 and $13.97 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Therefore, the ICE method could be used to predict the aquatic life criteria, because the predicted criteria value was very similar to the measured criteria value. Analysis of chromium (VI) showed that the chromium (VI) concentrations of the 25 sites in Liaohe River were all below Class I or Class II water quality standards (GB 3838-2002), and the water quality was in good condition. However, for the potential risk of chromium (VI) exposure to the aquatic life of Liaohe River, the result of ecological risk assessment showed that chromium (VI) concentrations in 7 sites exceeded the CCC in July, and chromium (VI) concentrations in 6 sites exceeded the CCC in December. Therefore, unacceptable effect on aquatic species caused by chromium (VI) exposure might have occurred in some sites of Liaohe River.

Key words: chromium (VI); Liaohe River; aquatic life criteria; interspecies correlation estimation (ICE); environmental exposure; risk assessment

目前,我国正在系统地开展环境基准技术方法研究^[1~4],包括:水生生物基准、生态学基准、沉积物基准、土壤环境基准等,并且进行了一些污染物(镉^[5]、氨氮^[6]、硝基苯^[7]、三氯生^[8]等)水生生物基准的推导,进行了生态学基准的研究与验证^[9],进行了太湖和辽河流域重金属沉积物基准的推导^[10]和铬(VI)的土壤环境基准的探索^[11]. 环境基准的研究与建立可为风险评估的研究提供基础数

据,为环境标准的制/修订提供科学依据,为污染物的环境管理工作提供技术支持。

收稿日期: 2014-12-11; 修订日期: 2015-02-11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-003); 环境保护公益性行业科研专项(2011467054); 环境基准与风险评估国家重点实验室自由探索基金项目(SKLECR20140FP06)

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

世界各国在建立本国环境基准时,或多或少均面临本土生物毒性数据缺乏的问题,因此,美国环境保护署(U. S. Environmental Protection Agency, US EPA)于2003年建立了物种种间关系估算模型(interspecies correlation estimation, ICE)^[12],用于解决物种毒性数据缺乏时对水质基准的预测,ICE模型能使用替代物种毒性数据来估算其他水生生物急性毒性数据,US EPA的水生生物ICE模型从建立至今,经过11 a不断地更新、补充,现由180个物种的关于1 266种化学物质的5 501个急性毒性数据组成;然而,由于慢性毒性数据的缺乏,至今尚未建立可靠的慢性毒性ICE模型.已有学者进行ICE模型估算生物急性毒性数据^[13],并对基准值进行预测,此外,还进行了基于ICE预测的基准值和基于实测数据基准值的比较,结果显示,ICE模型用于水质基准的推导时具有较高的准确性^[13].

重金属铬及其化合物是金属加工、电镀、制革等行业常用的基本原料,生产过程中产生的含铬废水、废渣、废气的排放可导致水体环境的污染.与持久性有机物(persistent organic pollutants, POPs)相似,重金属同样具有持久性、高毒性和生物累积性,所不同的是重金属不能被生物分解,因此,重金属的污染问题、环境管理问题已经引起人们的高度关注.在水体中,重金属铬主要以铬(Ⅲ)和铬(Ⅵ)形态存在,其中自然形成的铬(Ⅵ)较少,主要由人工合成,其对生物具有很强的毒性,毒性比Cr(Ⅲ)强100~1 000倍^[14].

本文对辽河流域铬(Ⅵ)的水生生物基准、环境暴露情况进行了研究,同时应用ICE模型预测辽河铬(Ⅵ)水生生物基准并对辽河流域各采样点位铬(Ⅵ)的生态风险进行评估,以期为辽河流域铬(Ⅵ)的水生生物基准建立、环境管理工作提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 材料

水样中铬(Ⅵ)测定所需材料:二苯碳酰二肼(分析纯,AR)、硫酸(AR)、磷酸(AR)、丙酮(AR)、重铬酸钾(优级纯,GR).

1.2 铬(Ⅵ)生物毒性数据的搜集与筛选

①对铬(Ⅵ)的水生生物毒性数据进行搜集,数据来源主要包括:中国知网(CNKI)、ECOTOX(<http://cfpub.epa.gov/ecotox/>)等数据库以及公开发表的文献;②依据文献[15]中物种的地理分布范

围筛选出分布于辽河流域的水生生物.

数据搜集完成后,参照美国水生生物基准指南^[16],对上述筛选后的生物毒性进行数据质量筛选.毒性数据的初步筛选原则,如: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筛选,二次筛选原则,如:浮游甲壳类、摇蚊幼虫类生物的急性毒性试验终点为48h LC₅₀(半致死浓度)或EC₅₀(半效应浓度),鱼、贝、虾、蟹等生物的试验终点是96h LC₅₀或EC₅₀,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.对于同一个物种或同一个终点有多个毒性值可用时,使用种平均急性值(species mean acute values, SMAV).

1.3 ICE模型预测水生生物毒性值

本研究采用US EPA建立的ICE v3.2.1模型^[12],结合1.2节筛选出的辽河流域水生生物实测急性毒性值,对辽河流域水生生物的毒性值进行预测,由于US EPA建立的ICE模型中预测物种多数为北美洲水生生物,因此,需结合文献[15]筛选ICE模型中可预测的辽河流域水生生物.

1.4 铬(Ⅵ)水生生物基准值的推导

依据美国水生生物基准指南^[16],对铬(Ⅵ)的属急性平均值(genus mean acute values, GMAV)进行计算和排序(排序第几为第R,最低的为1,最高的为N),采用下列公式计算急性基准值(criteria maximum concentration, CMC):

$$S^2 = \frac{\sum [(\ln \text{GMAV})^2] - [\sum (\ln \text{GMAV})]^2 / 4}{\sum P - (\sum \sqrt{P})^2 / 4}$$

$$L = \frac{\sum (\ln \text{GMAV}) - S(\sum \sqrt{P})}{4}$$

$$A = S \sqrt{0.05} + L$$

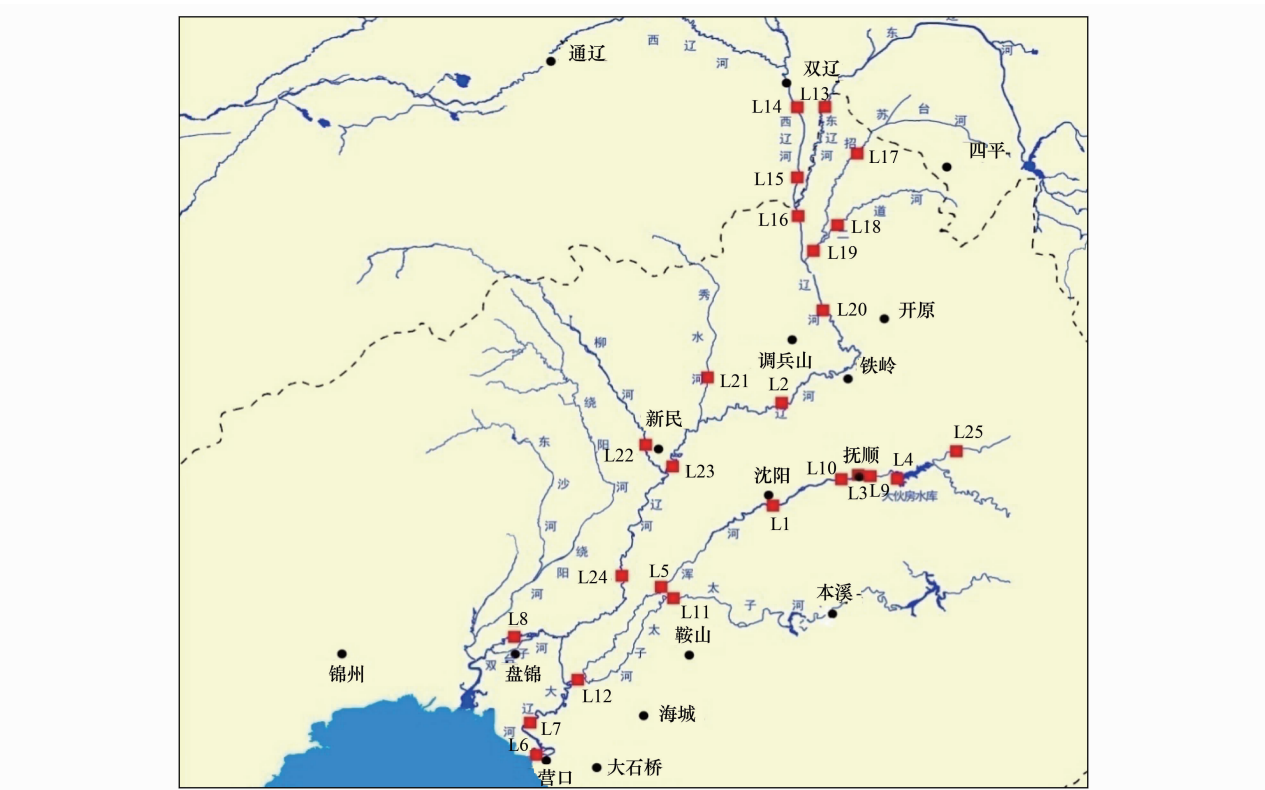
$$\text{FAV} = e^A$$

$$\text{CMC} = \text{FAV} / 2$$

式中,P为累积概率 $P = R / (N + 1)$,L为选择P值最接近0.05的4个GMAV和相应的P值进行计算,FAV为最终急性值,可用于计算CMC值.

1.5 铬(Ⅵ)环境暴露浓度分析

本研究分别于2012年7月与12月对辽河流域进行水体样品采集,采样点位25个(图1),各采样



L1. 浑河大桥; L2. 鲁家大桥; L3. 将军桥; L4. 大伙房水库; L5. 北道沟浑河桥; L6. 辽河入海口; L7. 田庄台大桥; L8. 盘锦大桥; L9. 天湖大桥; L10. 和平桥; L11. 太子河小北河桥; L12. 三分岔河大桥; L13. 王奔东辽河大桥; L14. 王奔西辽河大桥; L15. 胜利大桥; L16. 沙坑李; L17. 招苏台河; L18. 宝力北桥; L19. 段船房子桥; L20. 通江口大桥; L21. 公主屯大桥; L22. 新柳大桥; L23. 毓宝台大桥; L24. 红庙子辽河大桥; L25. 南杂木大桥

图 1 辽河各采样点位置分布示意

Fig. 1 Location distribution of different sampling sites of Liaohe River

点位水体中铬(VI)的含量采用二苯碳酰二肼分光光度法^[17]测定,经预处理后,取待测水样置于 50 mL 比色管中,用水稀释至标线,加入(1:1)硫酸溶液和(1:1)磷酸溶液各 0.5 mL,摇匀.加入二苯碳酰二肼显色剂,摇匀.5~10 min 后,于 540 nm 波长处,用 30 mm 比色皿,以水作参比,测定吸光度并作空白校正,测定铬(VI)的含量.

1.6 铬(VI)生态风险评估

辽河流域各点位铬(VI)的生态风险评估采用风险熵值(RQ)法计算^[18]:

$RQ = \text{环境暴露浓度} / \text{辽河流域铬(VI) 急慢基准值}$
RQ 大于 1,表明短期/长期铬(VI)暴露下可能对水生生物产生不可接受的危害.

2 结果与分析

2.1 辽河水生生物毒性数据

共筛选出 5 门 13 科 18 属 23 种辽河水生生物对重金属铬(VI)的急慢性毒性数据(表 1、表 2),分别包括脊索动物门鲤科、鲑科、茴鱼科、合鳃鱼

科和蛙科的 8 种鱼类和两栖类生物,节肢动物门蚤科、猛水蚤科、长臂虾科、摇蚊科的 11 种甲壳类和昆虫类生物,环节动物门颤蚓科、带丝蚓科的 2 种环节类生物,软体动物门田螺科的 1 种软体类生物,腔肠动物门水螅科的 1 种生物.

从表 1 可知,节肢动物门中浮游甲壳类的低额溞属、溞属和网纹溞属生物对重金属铬(VI)的敏感性最高,GMAV 值分别为 36.35、42.61 和 45.21 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.其他学者研究表明,浮游甲壳类生物对重金属铬^[5]、锌^[38]、氨氮^[6]、硝基苯^[39]、三氯生^[8]等污染物的敏感性排在较高的位置.表 1 中底栖甲壳类青虾对铬(VI)污染的敏感性低于浮游甲壳类,可见,虽然同属甲壳类生物,但浮游甲壳类与底栖甲壳类对污染物的敏感性却存在较大的差异.这可能是由生物的体型、生境的差异造成的,浮游甲壳类如溞类体型较小,而底栖甲壳类如虾、蟹类体型相对较大,大型生物一般对污染物的耐性比小型生物高;此外,底栖甲壳类长期与底泥接触,而底泥是水体污染物重要的汇,因此,一般认为底栖生物对污染物的

表 1 Cr(Ⅵ)的辽河水生生物实测急性毒性数据

Table 1 Measured acute toxicity data of Cr(Ⅵ) for aquatic species in Liaohe River					
序号	GMAV/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	SMAV/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	物种	拉丁名	文献
1	36.35	32.30	老年低额蚤	<i>Simocephalus vetulus</i>	[19]
2		40.90	锯顶低额蚤	<i>Simocephalus serrulatus</i>	[19]
3	38.10	38.10	水螅	<i>Hydra attenuata</i>	[20]
4	42.61	22.00	透明蚤	<i>Daphnia hyalina</i>	[21]
5		24.20	大型蚤	<i>Daphnia magna</i>	[19]
6		36.30	蚤状蚤	<i>Daphnia pulex</i>	[19]
7		61.34	隆线蚤	<i>Daphnia carinata</i>	[22]
8		118.45	短钝蚤	<i>Daphnia obtusa</i>	[23, 24]
9	45.20	45.20	棘爪网纹蚤	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>	[19]
10	2 241.00	2 241.00	青虾	<i>Macrobrachium nipponense</i>	[25]
11	2 462.81	2 462.81	正颤蚓	<i>Tubifex tubifex</i>	[26]
12	3 820.00	3 820.00	粗糙棘猛水蚤	<i>Attheyella crassa</i>	[27]
13	7 280.00	7 280.00	中华园田螺	<i>Cipangopaludina cathayensis</i>	[20]
14	10 700.00	10 700.00	鳊鱼	<i>Aristichthys nobilis</i>	[28]
15	12 095.45	12 095.45	夹杂带丝蚓	<i>Lumbriculus variegatus</i>	[29, 30]
16	13 160.00	13 160.00	鲢鱼	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[20]
17	21 961.00	21 961.00	虹鳉	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	[20]
18	28 810.00	28 810.00	中国林蛙蝌蚪	<i>Rana chensiensis</i>	[31]
19	52 986.00	52 986.00	摇蚊	<i>Chironomus</i> sp.	[32]
20	60 550.00	60 550.00	黄鳝	<i>Monopterus albus</i>	[33]
21	169 115.35	169 115.35	茴鱼	<i>Thymallus arcticus</i>	[34]
22	171 149.06	171 149.06	鲫鱼	<i>Carassius auratus</i>	[35, 36]
23	346 700.00	346 700.00	鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	[37]

表 2 Cr(Ⅵ)的辽河水生生物实测慢性毒性数据^[19]

Table 2 Measured chronic toxicity data of Cr(Ⅵ) for aquatic species in Liaohe River					
序号	GMCV/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	SMCV/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	ACR	物种	拉丁名
1	6.13	6.13	5.92	蚤状蚤	<i>Daphnia pulex</i>
2	19.90	19.90	2.06	锯顶低额蚤	<i>Simocephalus serrulatus</i>
3	39.91	39.91	1.13	棘爪网纹蚤	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>
4	6.13	32.30	5.27	老年低额蚤	<i>Simocephalus vetulus</i>

耐性高^[40].虽然底栖甲壳类对污染物的敏感性不如浮游甲壳类高,但其敏感性比其他类生物如鱼类、环节类高,并且是生态系统的重要组成部分,对水体能量、物质循环起到重要作用,因此,US EPA 在推导水生生物基准时,推荐至少采用“三门八科”水生生物毒性数据,其中包括一科底栖甲壳类生物(介形动物类、等足类、端足类、蜷蛄科等).

表 1 中对重金属铬(Ⅵ)最敏感的前 13 个物种均属无脊椎动物,后 10 个物种则属脊椎动物(夹杂带丝蚓、摇蚊除外),通过物种敏感性排序可知,无脊椎动物比脊椎动物敏感性高,其他学者也有相似的发现,Wang 等^[41]通过对 8 种污染物的无脊椎动物和脊椎动物的敏感性进行比较得出,无脊椎动物和脊椎动物的敏感性存在显著性差异;Malby 等^[42]通过比较发现欧洲河流中无脊椎动物和脊椎动物的敏感性存在显著差异;吴丰昌等^[38]在推导

锌的水质基准时,发现无脊椎动物中的甲壳类、其他类和脊椎动物中的鱼类的基准值存在较大的差异.

2.2 ICE 模型预测辽河水生生物毒性数据
采用实测毒性值(表 1)与 ICE 模型^[12]对水生生物急性毒性值进行预测,并依据文献[15]中地理分布范围对预测的物种进行筛选,得出辽河流域水生生物的毒性数据,见表 3.

表 3 中共有 3 门 8 科 12 种生物的预测毒性值,可预测的生物物种较少,主要因为 ICE 模型是 US EPA^[12]建立的,用于解决毒性数据缺乏时对水生生物基准值进行估算的方法,其关注的是北美洲的水生生物,因此,我国在建立本土水生生物基准时对其 ICE 模型的应用受到较大的限制.将来,随着我国水质基准的不断发展和毒性数据的不断完善,我国可建立基于本土水生生物的 ICE 模型.

表 3 Cr(Ⅵ) 的辽河水生生物预测急性毒性数据

Table 3 Predicted acute toxicity data of Cr(Ⅵ) for aquatic species in Liaohe River

序号	替代种	预测种	拉丁名	预测急性毒性值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
1	鲤鱼	鲫鱼	<i>Carassius auratus</i>	513 427. 80
2		叉尾鮰	<i>Ictalurus punctatus</i>	335 065. 68
3		鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	90 756. 24
4		虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	47 845. 37
5	大型蚤	栉水虱	<i>Asellus aquaticus</i>	2 004. 81
6		蚤状蚤	<i>Daphnia pulex</i>	32. 02
7		网纹蚤	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	48. 83
8	蚤状蚤	锯顶低额蚤	<i>Simocephalus serrulatus</i>	49. 69
9		大型蚤	<i>Daphnia magna</i>	27. 90
10		淡水钩虾	<i>Gammarus lacustris</i>	48. 51
11	虹鳟	羽摇蚊	<i>Chironomus plumosus</i>	3 817. 28
12	夹杂带丝蚓	三角涡虫	<i>Dugesia tigrina</i>	16 902. 94

2.3 实测与预测辽河铬(Ⅵ)水生生物基准

采用 1.3 节公式与表 1 实测毒性数据计算得出辽河流域 FAV 值为 $35.46\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, CMC 为 $17.73\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 由于慢性毒性数据不足,所以采用 $\text{CCC} = \text{FAV}/\text{FACR}$ 计算, FACR(最终急慢比)采用 ACR(同物种的急性与慢性毒性的比值)的几何平均值计算^[16](表 2),为 2.92,计算得出辽河流域 CCC 值为 $12.15\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 美国重金属铬(Ⅵ)的水生生物基准 CMC 值为 $16.02\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, CCC 值为 $10.98\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[43],本研究采用我国本土物种所推导的辽河铬(Ⅵ)水生生物 CMC 值与 CCC 值与美国基准值比较接近.

采用 1.3 节公式与表 3 预测毒性数据计算得出河流域 FAV 值为 $27.95\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, CMC 为 $13.97\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 由于慢性毒性数据不足,US EPA 尚未构建基于生物慢性毒性数据的 ICE 模型,因此,该文未对慢性毒性值进行预测,也未推导预测的慢性基准值.

预测 CMC 值与实测 CMC 值比较接近,两值相差 21%,其差异小于 1 个数量级,前人在进行水质基准研究中认为如果基准值之间差异在一个数量级内,则认为差异较小可接受^[13,44]. 研究结果表明 ICE 模型方法可较好地对水生生物基准值进行预测,有学者采用 ICE 模型对重金属锌的我国水生生物基准进行推导,并与实测值进行比较,得出 ICE 模型可较好的对锌的水生生物基准值进行预测^[45].

2.4 辽河铬(Ⅵ)环境暴露浓度

本研究分别于 2012 年 7 月与 12 月对辽河流域进行水体样品采集,采样点位 25 个(图 1),通过二苯碳酰二肼法对水样铬(Ⅵ)含量进行测定,测定结果见表 4. 参照我国 GB 3838-2002 地表水质标准中铬(Ⅵ)含量 $\leq 10\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时为Ⅰ类水质,铬(Ⅵ)含量 $\leq 50\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时为Ⅱ类水质^[46],7 月辽河流域 25 个采样点位中达到Ⅰ类水水质标准的有 14 个,达到Ⅱ类水水质标准的有 11 个. 12 月辽河流域 25 个采

表 4 辽河各采样点位 Cr(Ⅵ) 的浓度

Table 4 Concentrations of Cr(Ⅵ) in different sampling sites of Liaohe River

采样点	点位	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		采样点	点位	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
		2012-07	2012-12			2012-07	2012-12
L1	浑河大桥	0.006	$<0.004^1)$	L14	王奔西辽河	0.015	0.011
L2	鲁家大桥	0.010	0.010	L15	胜利大桥	0.016	0.016
L3	将军桥	0.011	0.014	L16	沙坑李	0.018	0.015
L4	大伙房水库	0.008	0.009	L17	招苏台	0.007	0.009
L5	北道沟	0.008	0.008	L18	宝力北桥	0.009	<0.004
L6	辽河入海口	0.006	0.021	L19	段船房子桥	0.007	0.009
L7	田庄台大桥	0.007	0.016	L20	通江口特大桥	0.015	0.012
L8	盘锦大桥	0.010	0.015	L21	公主屯大桥	0.012	0.009
L9	天湖大桥	0.007	0.005	L22	新民柳河	0.014	0.008
L10	和平桥	0.007	0.004	L23	毓宝台	0.010	0.009
L11	小北河	0.007	0.007	L24	红庙子	0.013	0.010
L12	三岔河	<0.004	0.012	L25	南杂木	<0.004	<0.004
L13	王奔东辽河	0.006	<0.004				

1) 此值为二苯碳酰二肼方法的最低检出浓度

样点位中达到Ⅰ类水水质标准的有 16 个,达到Ⅱ类水水质标准的有 9 个. 总体上,25 个采样点位夏冬两季水体铬(VI)浓度差异较小,水质状况良好,均达到铬(VI)的地表水Ⅰ类或Ⅱ类水质标准.

7 月,水体铬(VI)浓度最高值出现在 L16(沙坑李)点位,达到 $0.018\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与 L16 相邻的 L15、L20 和 L14 点位的铬(VI)浓度也较高,分别达到 0.016 、 0.015 和 $0.015\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 由图 1 可知,点位 L16 是东西辽河交汇处,其中东辽河水体铬(VI)浓度较低(L13),而西辽河水体铬(VI)浓度较高(L14、L15),因此,西辽河可能为 L16 点位处水体铬(VI)的主要来源.

12 月东西辽河水体铬(VI)浓度分布与 7 月相似,东辽河水体铬(VI)浓度较低(L13),西辽河水体铬(VI)浓度较高(L14、L15),因此,可以判定西辽河为 L16 点位处水体铬(VI)的主要来源. 同时,由于 7 月和 12 月中 L17、L18、L19 点位水体铬(VI)

浓度较低,因此,招苏台河和二道河对 L20 点位水体铬(VI)的贡献较小,西辽河可能为 L20 点位水体铬(VI)的主要来源. 与 7 月不同,12 月辽河入海口 L6、L7、L8 点位水体铬(VI)较高,其中 L6 点位(营口辽河入海口)达到 $0.021\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这可能与周边人为活动的影响有关.

2.5 辽河铬(VI)生态风险评估

风险评估中,RQ 值大于 1 说明环境暴露浓度高于预测无效应浓度(predicted no effect concentration, PNEC)或环境基准值,表明水生生物在这样的环境暴露条件下受到危害影响的概率较大^[47]. 表 5 中,7 月辽河流域 25 个点位中环境暴露值均未超过急性基准 CMC 值($RQ\leq 1$),超过慢性基准 CCC 值的有 7 个点位($RQ>1$); 12 月辽河流域 25 个点位中环境暴露值超过急性基准 CMC 值的有 1 个点位,超过慢性基准 CCC 值的有 6 个点位($RQ>1$).

表 5 辽河各采样点位 Cr(VI)的 RQ 值
Table 5 Risk quotient of Cr(VI) in different sampling sites of Liaohe River

RQ					RQ				
采样点 点位	2012-07		2012-12		采样点 点位	2012-07		2012-12	
	急性	慢性	急性	慢性		急性	慢性	急性	慢性
L1 浑河大桥	0.32	0.49	0.14	<0.33	L14 王奔西辽河	0.83	1.23	0.60	0.91
L2 鲁家大桥	0.57	0.82	0.54	0.82	L15 胜利大桥	0.90	1.32	0.92	1.32
L3 将军桥	0.65	0.91	0.76	1.15	L16 沙坑李	1.00	1.48	0.83	1.23
L4 大伙房水库	0.47	0.66	0.49	0.74	L17 招苏台	0.37	0.58	0.50	0.74
L5 北道沟	0.47	0.66	0.43	0.66	L18 宝力北桥	0.49	0.74	0.14	<0.33
L6 辽河入海口	0.34	0.49	1.16	1.73	L19 段船房子桥	0.39	0.58	0.52	0.74
L7 田庄台大桥	0.39	0.58	0.90	1.32	L20 通江口特大桥	0.85	1.23	0.67	0.99
L8 盘锦大桥	0.57	0.82	0.83	1.23	L21 公主屯大桥	0.70	1.02	0.53	0.74
L9 天湖大桥	0.42	0.58	0.31	0.41	L22 新民柳河	0.77	1.15	0.47	0.66
L10 和平桥	0.37	0.58	0.24	0.33	L23 毓宝台	0.57	0.82	0.49	0.74
L11 小北河	0.37	0.58	0.42	0.58	L24 红庙子	0.72	1.07	0.54	0.82
L12 三岔河	0.16	<0.33	0.67	0.99	L25 南杂木	0.14	<0.33	0.16	<0.33
L13 王奔东辽河	0.34	0.49	0.19	<0.33					

依据 US EPA 关于急慢性基准值 CMC 和 CCC 的表述^[16],如果某化学物质的 4 d 平均浓度超过 CCC 的次数不多于平均每 3 年 1 次,并且 1 h 平均浓度超过 CMC 的次数不多于平均每 3 年 1 次,淡水水生生物及其用途不会受到不可接受的影响. 虽然辽河流域 25 个采样点位水体质量状况良好,均达到 GB 3838-2002 地表水质标准中铬(VI)的Ⅰ类或Ⅱ类水质标准,但是在对水生生物的影响方面,辽河流域个别点位(辽河入海口、胜利大桥、沙坑李等)可能存在铬(VI)污染对水生生物产生不可接受危害的风险.

3 结论

(1) 共筛选出 5 门 13 科 18 属 23 种辽河水生生物对铬(VI)的实测急性毒性数据,其中,对铬(VI)最敏感的是浮游甲壳类生物,并且,无脊椎动物对铬(VI)的敏感性高于脊椎动物. 此外,采用 ICE 模型预测了 3 门 8 科 12 种辽河流域水生生物的急性毒性值.

(2) 推导得出辽河流域重金属铬(VI)的实测急性基准 CMC 值为 $17.73\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,慢性基准 CCC 值为 $12.15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;采用 ICE 模型估算的辽河流域

重金属铬(Ⅵ)的急性基准 CMC 值为 13.97 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,实测值与预测值比较接近,表明 ICE 模型可较好地对水生生物基准值进行预测。

(3) 辽河流域 25 个采样点位夏冬两季水体铬(Ⅵ)浓度差异较小,水质状况良好,均达到 GB 3838-2002 地表水质标准中铬(Ⅵ)的Ⅰ类或Ⅱ类水质标准。

(4) 7 月辽河流域 25 个点位中环境暴露值超过慢性基准 CCC 值的有 7 个($\text{RQ} > 1$); 12 月各点位中环境暴露值超过慢性基准 CCC 值的有 6 个($\text{RQ} > 1$)。依据 CMC 和 CCC 值的相关表述,在对水生生物的影响方面,辽河流域个别点位可能存在铬(Ⅵ)污染对水生生物产生不可接受危害的风险。

参考文献:

[1] 孟伟,张远,郑丙辉. 水环境质量基准、标准与流域水污染物总量控制策略[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(3): 1-6.

[2] 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.

[3] 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.

[4] Yan Z G, Yang N Y, Wang X N, *et al.* Preliminary analysis of species sensitivity distribution based on gene expression effect [J]. Science China Earth Sciences, 2012, **55**(6): 907-913.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 耿文华,陈继森,冯剑丰,等. 辽河浮游植物群落及生物多样性基准验证[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(1): 239-245.

[10] 邓保乐,祝凌燕,刘慢,等. 太湖和辽河沉积物重金属质量基准及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(1): 33-42.

[11] 王晓南,刘征涛,王婉华,等. 重金属铬(Ⅵ)的生态毒性及其土壤环境基准[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3155-3161.

[12] US EPA. Web-based interspecies correlation estimation (Web-ICE) for acute toxicity; User Manual[R]. Gulf Breeze: US EPA, Office of Research and Development, 2013.

[13] 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.

[14] Grabarczyk M, Korolczuk M, Tyszczyk K. Extraction and

determination of hexavalent chromium in soil samples [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2006, **386**(2): 357-362.

[15] 中国科学院. 中国动物志[M]. 北京: 科学出版社, 1979.

[16] US EPA. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses (PB 85-227049) [R]. Washington DC: US EPA, 1985.

[17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002, 346-349.

[18] EC (European Commission), Technical Guidance Document (TGD) on risk assessment in support of Commission Directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances and Commission Regulation (EC) No 1488/94 on risk assessment for existing substances and Directive 98/8/EC of the European parliament and of the council concerning the placing of biocidal products on the market, Part II, Technical Report, European Commission, Brussels, Belgium, 2003.

[19] Mount D I. Description of the toxicity tests performed on Cr^{6+} using Cladocerans [R]. Duluth MN: US EPA, 1982.

[20] 梁峰. 我国典型流域重金属的风险评价及六价铬水质基准的推导[D]. 南京: 南京大学, 2011.

[21] Baudouin M F, Scoppa P. Acute toxicity of various metals to freshwater zooplankton [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1974, **12**(6): 745-751.

[22] 吴永贵,黄建国,袁玲. 利用隆线趋光行为评价铬的生物毒性[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(1): 171-174.

[23] Rossini G D B, Ronco A E. Acute toxicity bioassay using *Daphnia obtusa* as a test organism [J]. Environmental Toxicology and Water Quality, 1996, **11**(3): 255-258.

[24] Coniglio L, Baudo R. Life-Tables of *Daphnia obtusa* (Kurz) surviving exposure to toxic concentrations of Chromium [J]. Hydrobiologia, 1989, **188-189**(1): 407-410.

[25] 吕耀平,李小玲,贾秀英. Cr^{6+} 、 Mn^{7+} 和 Hg^{2+} 对青虾的毒性和联合毒性研究[J]. 上海水产大学学报, 2007, **16**(6): 549-554.

[26] Maestre Z, Martinez-Madrid M, Rodriguez P. Monitoring the sensitivity of the Oligochaete *Tubifex tubifex* in laboratory cultures using three toxicants [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, **72**(8): 2083-2089.

[27] Di Marzio W D, Castaldo D, Pantani C, *et al.* Relative sensitivity of Hyporheic Copepods to chemicals [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, **82**(4): 488-491.

[28] 叶素兰,余治平. Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cr^{6+} 对鳙胚胎和仔鱼的急性致毒效应[J]. 水产科学, 2009, **28**(5): 263-267.

[29] Bailey H C, Liu D H. *Lumbriculus variegatus*, a benthic Oligochaete, as a bioassay organism [M]. In: Eaton J C, Parrish P R, Hendricks A C (eds.). Aquatic Toxicology. 3rd Symposium, ASTM STP 707, Philadelphia, PA, 1980.

[30] Ewell W, Gorsuch J, Kringle R, *et al.* Simultaneous evaluation of the acute effects of chemicals on seven aquatic species [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1986, **5**(9): 831-

840.

[31] 王维君. 铬对中国林蛙 (*Rana chensiensis*) 幼体的毒性效应 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2006.

[32] Larraín A, Riveros A, Bay-Sehmith E, *et al.* Evaluation of three larval instars of the midge *Chironomus petiolatus* as bioassay tools using a computationally intensive statistical algorithm [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1997, **33**(4): 407-414.

[33] 陈细香, 谢嘉华, 卢昌义, 等. 汞和铬对黄鳝的急性毒性研究[J]. 水利渔业, 2008, **28**(2): 103-104.

[34] Buhl K J, Hamilton S J. Relative sensitivity of early life stages of Arctic Grayling, Coho Salmon, and Rainbow Trout to nine inorganics[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1991, **22**(2): 184-197.

[35] Adelman I, Siesennop G. Acute toxicity of Sodium Chloride, Pentachlorophenol, Guthion, and Hexavalent Chromium to Fathead Minnows (*Pimephales promelas*) and Goldfish (*Carassius auratus*) [J]. Journal of Fisheries Research Board of Canada, 1976, **33**(2): 203-208.

[36] 杨丽华. 重金属(镉、铜、锌和铬)对鲫鱼的生物毒性研究 [D]. 广州: 华南师范大学, 2003.

[37] Thatheyus A J. Behavioral alterations induced by nickel and chromium in common carp *Cyprinus carpio* var *communis* (Linn) [J]. Environmental Ecology, 1992, **10**(4): 911-913.

[38] 吴丰昌, 冯承莲, 曹宇静, 等. 锌对淡水生物的毒性特征与水质基准的研究[J]. 生态毒理学报, 2011, **6**(4): 367-382.

[39] Yan Z G, Zhang Z S, Wang H, *et al.* Development of aquatic life criteria for nitrobenzene in China [J]. Environmental Pollution, 2012, **162**: 86-90.

[40] 王伟莉, 闫振广, 何丽, 等. 五种底栖动物对优控污染物的敏感性评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(10): 1856-1862.

[41] 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.

[42] Maltby L, Blake N, Van Den Brink P J, *et al.* Addressing interspecific variation in sensitivity and the potential to reduce this source of uncertainty in ecotoxicological assessments [R]. London (UK): UK Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2002.

[43] US EPA. Water quality criteria documents for the protection of aquatic life in Ambient water [R]. Washington DC: US EPA, 1995.

[44] 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, 2012, **47**(1): 446-453.

[45] 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.

[46] GB 3838-2002 地表水环境及质量标准[S].

[47] 化学品风险评估翻译组. 化学品风险评估 [M]. (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2010.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行