

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

水生生物基准推导中物种选择方法研究

张铃松¹, 王业耀^{1,2*}, 孟凡生¹, 周岳溪¹, 于海斌²

(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, 北京 100012; 2. 中国环境监测总站, 北京 100012)

摘要: 运用 Mann-Whitney *U* 检验法对不同生物分类群内的物种对氨氮的毒性敏感性进行分析和统计检验, 并基于毒理学、生物分类学, 从抽样-推断的角度对物种选择进行讨论, 并对物种选择与基准推导方法的关系进行梳理。结果发现, 物种毒性数据中脊椎动物占绝大部分, 尤其是辐鳍纲, 与真实生态系统中物种类群结构不符; 大部分不同分类群间物种对氨氮的敏感性差异显著, 随着物种分类阶元级别降低, 大部分分类群内物种的差异逐渐减小, 个别分类群内物种的敏感性未呈现相似的规律, 尤其是相对不敏感的物种; 总体上, 能在一定程度上说明同一分类群内的生物有相对接近的敏感性。由抽样-推断理论与方法可知, 基准推导属于基于抽样设计的统计推断, 因此, 可以将生物分类类群作为物种选择的辅助变量, 依据水生生态系统中物种组成, 运用分层随机抽样技术进行物种选择, 以提高抽样效率和精度。

关键词: 水生生物水质基准; 统计外推法; 物种敏感度分布; 分层抽样

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3959-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.10.045

Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life

ZHANG Ling-song¹, WANG Ye-yao^{1,2}, MENG Fan-sheng¹, ZHOU Yue-xi¹, YU Hai-bin²

(1. State Key Laboratory for Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China)

Abstract: The Mann-Whitney *U* test method was used to analyze the species sensitivity to ammonia toxicity. And based on the analysis, the relationship between species selection method and WQC deriving method was studied by using toxicology, biological taxonomy and sampling-inference theory. Results showed that vertebrate species, especially the *Actinopterygii*, accounted for the vast majority in the toxicity test species. And the species composition of toxicity test species was inconsistent with the species composition of the ecosystem. Sensitivity to ammonia toxicity among different taxa varied significantly for most species except some species in individual taxa, especially the less sensitive species. The variable coefficient of interspecies decreased with the reduction of biological classification level. To a certain extent, it showed that the species sensitivities in the same taxa to toxicant were more similar than those in different taxa. According to sampling-inference theory, the WQC for aquatic life deriving method belonged to the design-based inference. And taxonomic groups could be used as auxiliary variables to conduct a stratified sampling for species selection in WQC deriving which could improve the sampling efficiency and precision.

Key words: WQC for aquatic life; statistical extrapolation method; species sensitivity distribution; stratified sampling

“水质基准”是一个自然科学的概念, 是基于科学实验和推论获取的客观结果, 它通常是指一定自然特征下, 水质成分对特定保护对象不产生有害影响的最大可接受浓度水平或限度^[1]。用于开发水质基准的方法称为水质基准方法学, 它是制定水生生物基准值的基础, 是环境科学领域的重要学科分支之一。按照原理, 可以分为评价因子法与统计外推法^[2], 两种方法均依赖于生物毒性试验以及对毒性数据的处理方法。水生生物基准的开发过程涉及了人类对物种敏感性的认识以及水质基准推导模型的选择等内容。从学科交叉的角度来看, 水生生物基准推导方法学需要借助毒理学、生物分类学、统计学等学科的成果来不断完善。其中, 毒理学主要关注研究化学物质对生物体的毒性反应、严重程度、发生频率和毒性作用机制的科学, 也是对毒性作用进行定性和定量评价的科学^[3]。从毒理学的角度考

虑, 物种的敏感性主要受物种吸收-消除动力学的差异、内部螯合机制的差异、生物转化速率的差异、生物化学受体性质的差异、受体再生速率的差异等几个方面的影响^[4]。生物分类学主要关注研究物种的系统发育, 探索种类之间历史渊源, 以阐明亲缘关系, 为分类提供理论依据。从生物分类学的角度看, 通常按照物种生理特征和系统发育关系等因素, 将全部生物按照界、门、纲、目、科、属、种等不同的阶元划分为不同分类群, 同一分类群内的生物具有更加相似的生理结构以及更加相近的亲缘关系^[5,6]。抽样推断是在按照特定原则从总体中抽取

收稿日期: 2014-02-10; 修订日期: 2014-04-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2014ZX07502002)

作者简介: 张铃松 (1982~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为水环境风险评估, E-mail: zlingsong@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yeyaoawang@163.com

部分样本,运用数理统计方法,对总体的某些参数作出具有一定可靠程度的估计^[7]。

在制定水生生物基准的过程中,毒性试验不可能涉及所有的水生生物,因此基准制定人员只能将全部或某一区域内的全部水生生物作为一个总体进行抽样,并通过评价因子或统计推断的方法对总体情况进行估计,以达到保护水生态系统的目的。截至目前,方法的运用还存在一些问题,其中物种选择是关键问题之一,尤其是对于统计外推法^[4]。该方法中假设毒性数据为随机获得,但受到多种因素的限制,物种选择往往出现一定的倾向性,此外,基准制定人员基于经验判断,可能会认为某些总体成员在某些方面具有代表性,因此总是将它们包含在样本中。目前 USEPA 在其导则文件以生物类群为基础做出物种选择限定,并规定至少要有 3 门 8 科的物种^[8],而其他国家也有类似的规定^[9-11]。虽然这种定规在毒性数据积累很少的情况下可以使毒性数据涵盖不同营养级、涉及的物种具有更大的生物分类学差异性,但是对物种进行限定的同时就破坏了物种选择的随机性原则。这种方案在某些场合或许是有有效的,但在数学上却不能保证它们的无偏性,因此也受到一些学者的质疑^[4]。

制约水质基准方法学发展的主要因素是物种敏感性认识的不足(机制认识的不足和毒性数据的积累较少),以及统计分析手段的运用不够。因此,作者认为物种选择方法的确定需要由两个方面入手:物种敏感性规律的充分认识以及抽样推断方法学的优化。当前的研究中涉及毒理学、分类学、抽样-推断理论的讨论非常少见。本研究以氨氮的水生生物毒性为例,对不同生物分类群内、群间物种的敏感性进行统计检验分析,并讨论了不同抽样-推断方法的特点,梳理物种选择与推断方法的关系,以期为基础方法学研究提供思路。

1 材料与方法

1.1 数据筛选及标准化方法

由于毒性试验在不同的实验室由不同实验人员进行,因此其实验结果可能受到各种因素的影响。为了保证数据的准确性、可靠性、可比性,因此需要在筛选过程中对毒性试验的质量控制与质量保证措施做出严格要求。参照文献^[8]中毒性试验标准方法和数据筛选原则,对毒性数据进行筛选。同时,为保证数据的可比性,对毒性数据进行标准化处理,以消除水质条件对测试结果的影响,借鉴 USEPA 在

推导氨氮水生生物基准时所采用的标准化模型进行毒性数据标准化^[12,13],如式(1)~(4):

$$AV_{7,T} = \frac{AV}{\left(\frac{0.0114}{1 + 10^{7.204-pH}} + \frac{1.6181}{1 + 10^{pH-7.204}} \right)} \quad (1)$$

$$AV_{7,20^{\circ}\text{C}} = AV_{7,T} \times 10^{0.036 \times (T-20)} \quad (2)$$

$$CV_{7,T} = \frac{CV}{\left(\frac{0.0278}{1 + 10^{7.688-pH}} + \frac{1.1994}{1 + 10^{pH-7.688}} \right)} \quad (3)$$

$$CV_{7,20^{\circ}\text{C}} = CV_{7,T} \times 10^{0.028 \times (T-20)} \quad (4)$$

式中,AV、CV 分别为毒性试验中获得的急性毒性值和慢性毒性值; $AV_{7,T}$ 、 $CV_{7,T}$ 分别为标准化至 pH = 7 时的急性毒性值和慢性毒性值; $AV_{7,20^{\circ}\text{C}}$ 、 $CV_{7,20^{\circ}\text{C}}$ 分别为标准化至 pH = 7、温度 20℃ 时的急性毒性值和慢性毒性值。

1.2 物种敏感性分析方法

在抽样调查中,很多时候对给定样本的总体分布参数情况并不十分了解,因此需要运用非参数检验过程对两个总体的分布是否存在显著性差异进行检验,来推断来自两个总体的分布是否存在显著性差异。Mann-Whitney U 检验中假设两个样本分别来自除了总体均值以外完全相同的两个总体,目的是检验两个独立样本是否来自于同一总体或两个总体均值是否有显著的差别。目前已有学者使用该方法对植物群落的区域差异显著性、不同水文站月均流量的水文变异进行检验^[14,15],其在生态学、水文学等领域有广泛的使用,是最常用的两个独立样本的非参数检验方法^[16]。其检验步骤可以概括为:将两个样本容量分别为 n_1 、 n_2 的数据混合,并按大小排序。然后按照由小到大的顺序依次赋值 1、2、3..., 该值称为其等级。当有数据相等时,则取该几个数据排序的平均值作为其等级。

分别求出两个样本的等级之和 W_1 、 W_2 ,并计算 Mann-Whitney U 检验统计量,

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - W_1 \quad (5)$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - W_2 \quad (6)$$

取 $\min(U_1, U_2)$ 与 U_α (临界值,经查表获得) 比较,当 $U < U_\alpha$ 时,拒绝 H_0 ,接受 H_1 ,当原假设为真时,随机变量 U 的均值可按照式(3)~(4)计算获得,其方差可按照式(5)计算获得:

$$E(U) = \frac{n_1 n_2}{2} \quad (7)$$

$$D(U) = \frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12} \tag{8}$$

当 n_1 和 n_2 为大样本时 ($n_1 \geq 10, n_2 \geq 10$), 随机变量可以用正态分布进行近似, 则令

$$Z =$$

$$\frac{W_{xy} - n_1 n_2 / 2}{\sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12} - \frac{n_1 n_2 (\sum_{i=1}^g \tau_i^3 - \sum_{i=1}^g \tau_i)}{12(n_1 + n_2)(n_1 + n_2 - 1)}}} \tag{9}$$

做出判断, 设两个总体的均值分别为 μ_1, μ_2 , 则

有 $H_0: \mu_1 \leq \mu_2, H_1: \mu_1 > \mu_2$, 如果 $Z < -Z_\alpha$, 则拒绝 H_0 ; $H_0: \mu_1 \geq \mu_2, H_1: \mu_1 < \mu_2$, 如果 $Z > Z_\alpha$, 则拒绝 H_0 ; $H_0: \mu_1 = \mu_2, H_1: \mu_1 \neq \mu_2$, 如果 $Z > -Z_{\alpha/2}$, 则拒绝 H_0 .

本研究中 Man-Whitney U 检验使用 SPSS 16.0 软件辅助完成.

2 结果与分析

2.1 物种类群分布

经检索筛选后, 获得的氨氮水生生物急性毒性数据如表 1 所示.

表 1 水生生物氨氮急性毒性值
Table 1 Acute toxicity of ammonia to aquatic life

门	纲	目	科	种	SMAV ¹⁾ (以 N 计) /mg·L ⁻¹	数据来源
扁形动物门 Platyhelminthes	涡虫纲 Turbellaria	三肠目 Tricladida	枝肠涡虫科 Dendrocoelidae	<i>Dendrocoelum lacteum</i>	119.5	[17, 18]
环节动物门 Annelida	寡毛纲 Oligochaeta	带丝蚓目 Lumbriculida	带丝蚓科 Lumbriculidae	<i>Lumbriculus variegatus</i>	218.7	[19 ~ 21]
		单向蚓目 Haplotaxida	颤蚓科 Tubificidae	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	170.2	[22]
				<i>Tubifex tubifex</i>	216.5	[17, 18]
		刺鱼目 Gasterosteiformes	刺鱼科 Gasterosteidae	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	281.5	[17]
				<i>Oncorhynchus aguabonita</i>	112.1	[17]
脊椎动物门 Vertebrata	辐鳍纲 Actinopterygii	鲑形目 Salmoniformes	鲑科 Salmonidae	<i>Oncorhynchus clarkii</i>	78.92	[17]
				<i>Oncorhynchus gorbusha</i>	180.7	[17]
				<i>Oncorhynchus kisutch</i>	87.05	[17, 23, 24]
				<i>Oncorhynchus mykiss</i>	82.88	[17, 25 ~ 29]
				<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	82.39	[30]
				<i>Prosopium williamsoni</i>	51.93	[17]
				<i>Salmo salar</i>	183.3	[17]
				<i>Salmo trutta</i>	102	[17]
				<i>Salvelinus fontinalis</i>	156.3	[17]
				<i>Salvelinus namaycush</i>	159.3	[17]
		鲮形目 Cyprinodontiformes	花鲤科 Poeciliidae	<i>Gambusi affinis</i>	219.3	[17]
				<i>Poecilia reticulata</i>	74.66	[31, 32]
		鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	<i>Campostoma anomalum</i>	115.9	[17]
				<i>Cyprinella lutrensis</i>	196.1	[17]
				<i>Cyprinella spiloptera</i>	83.8	[17]
				<i>Cyprinella whipplei</i>	80.94	[17]
				<i>Cyprinus carpio</i>	106.3	[17]
				<i>Hybognathus amarus</i>	72.55	[33]
				<i>Notemigonus crysoleucas</i>	63.02	[17]
				<i>Notropis topeka</i>	96.72	[34]
				<i>Pimephales promelas</i>	159.2	[17, 26, 27, 35 ~ 41]
				<i>Catostomus commersonii</i>	157.5	[17, 38]
		鲈形目 Perciformes	河鲈科 Percidae	<i>Catostomus platyrhynchus</i>	136.2	[42]
				<i>Chasmistes brevirostris</i>	69.36	[17]
				<i>Deltistes luxatus</i>	56.62	[43]
				<i>Etheostoma nigrum</i>	71.45	[41]
				<i>Etheostoma spectabile</i>	77.17	[17]
				<i>Sander vitreus</i>	117.1	[25, 40]

续表 1

门	纲	目	科	种	SMAV ¹⁾ (以 N 计) /mg·L ⁻¹	数据来源
脊椎动物门 Vertebrata	辐鳍纲 Actinopterygii	鲈形目 Perciformes	棘臀科 Centrarchidae	<i>Lepomis cyanellus</i>	150.8	[17]
				<i>Lepomis gibbosus</i>	77.53	[17]
				<i>Lepomis macrochirus</i>	104.5	[17,27,36,40]
				<i>Micropterus dolomieu</i>	150.6	[44]
				<i>Micropterus salmoides</i>	86.02	[45]
				<i>Micropterus treculii</i>	54.52	[46]
				<i>Morone americana</i>	132.7	[17]
				<i>Morone chrysops</i>	144	[47]
				<i>Morone saxatilis</i>	246.2	[17]
				<i>Morone saxatilis</i> × <i>chrysops</i>	70.22	[48]
	两栖纲 Amphibia	无尾目 Anura	丽鱼科 Cichlidae	<i>Oreochromis mossambicus</i>	185.2	[49]
				<i>Cottus bairdii</i>	222.2	[17]
				<i>Catostomus platyrhynchus</i>	142.4	[17,25~27,38,44,40]
				<i>Acipenser brevirostrum</i>	156.7	[43]
				<i>Actinonaias ligamentina</i>	63.89	[51]
				<i>Pseudacris crucifer</i>	61.18	[36]
				<i>Pseudacris regilla</i>	83.71	[52,53]
				<i>Rana pipiens</i>	96.38	[36]
				<i>Xenopus laevis</i>	122.5	[52~54]
				<i>Callibaetis skokianus</i>	364.6	[36]
节肢动物门 Arthropoda	昆虫纲 Insecta	蜉蝣目 Ephemeroptera	四节蜉科 Baetidae	<i>Callibaetis</i> sp.	166.7	[17]
				<i>Drunella grandis</i>	442.4	[17]
		襀翅目 Plecoptera	网石蝇科 Perlidae	<i>Skwala americana</i>	192.4	[17]
				<i>Philartctus quaeris</i>	994.5	[36]
		鞘翅目 Coleoptera	长角泥虫科 Enallagma sp.	<i>Stenelmis sexlineata</i>	735.9	[28]
				<i>Enallagma</i> sp.	164	[21]
		蜻蛉目 Odonata	细螳科 Coenagrionidae	<i>Erythromma najas</i>	2 515	[43]
				<i>Pachydiplax longipennis</i>	233	[55]
		双翅目 Diptera	摇蚊科 Chironomidae	<i>Chironomus riparius</i>	1 029	[27]
				<i>Chironomus tentans</i>	451.8	[56]
	软甲纲 Malacostraca	等足目 Isopoda	桫水虱科 Asellidae	<i>Asellus aquaticus</i>	378.2	[57]
				<i>Caecidotea racovitzai</i>	387	[51]
				<i>Crangonyx pseudogracilis</i>	270.5	[25,58]
				<i>Crangonyx</i> sp.	122.2	[36]
				<i>Hyaella azteca</i>	192.6	[59]
		十足目 Decapoda	螯蛄科 Cambaridae	<i>Orconectes immunis</i>	1550	[25]
				<i>Orconectes nais</i>	303.8	[17]
				<i>Procambarus clarkii</i>	138	[36]
				<i>Chydorus sphaericus</i>	162.6	[60]
	鳃足纲 Branchiopoda	枝角目 Cladocera	蚤科 Daphnidae	<i>Ceriodaphnia acanthine</i>	154.3	[61]
				<i>Ceriodaphnia dubia</i>	134.2	[17]
				<i>Daphnia magna</i>	157.7	[27,51,61~62]
				<i>Daphnia pulicaria</i>	99.03	[17]
				<i>Simocephalus vetulus</i>	142.9	[17]

续表 1

门	纲	目	科	种	SMAV ¹⁾ (以 N 计) /mg·L ⁻¹	数据来源
软体动物门 Mollusca	瓣鳃纲 Lamellibranchia	河蚌目 Unionoida	河蚌科 Unionidae	<i>Actinonaias pectorosa</i>	79.46	[17]
				<i>Alasmidonta heterodon</i>	109	[51]
				<i>Epioblasma capsaeformis</i>	31.14	[51]
				<i>Fusconaia masoni</i>	47.4	[48]
				<i>Lampsilis abrupta</i>	26.03	[51]
				<i>Lampsilis cardium</i>	50.51	[63]
				<i>Lampsilis fasciola</i>	48.11	[17]
				<i>Lampsilis higginsii</i>	41.9	[63]
				<i>Lampsilis rafinesqueana</i>	69.97	[51]
				<i>Lampsilis siliquioidea</i>	55.42	[51,64]
				<i>Lasmigona subviridis</i>	23.41	[48]
				<i>Potamilus ohioensis</i>	109	[51]
				<i>Pyganodon grandis</i>	70.73	[56]
				<i>Utterbackia imbecillis</i>	46.93	[17]
				<i>Venustaconcha ellipsiformis</i>	23.12	[51]
				<i>Villosa iris</i>	34.23	[17]
	腹足纲 Gastropoda	肺螺目 Pulmonata	球蚬科 Planorbidae	<i>Musculium transversum</i>	89.36	[25]
			椎实螺科 Lymnaeidae	<i>Lymnaea stagnalis</i>	88.62	[22]
			膀胱螺科 Physidae	<i>Physa gyrina</i>	164.5	[25]
			扁蜷螺科 Planorbidae	<i>Planorbella trivolvis</i>	211.6	[25]
		吸螺目 Sorbeoconcha	川蜷科 Pleuroceridae	<i>Pleurocera uncialis</i>	68.54	[65]
			Lithoglyphidae	<i>Fluminicola</i> sp.	62.15	[48]

1) SMAV: species mean acute value, 物种平均急性毒性值, 标准化至 pH = 7, T = 20℃

由表 1 可以看出, 脊椎动物门的毒性数据最多, 为 49 种, 占全部毒性数据的 49%, 其次为节肢动物门和软体动物门, 分别占 25% 和 22%, 最少的两门为环节动物门和扁体动物门, 仅占 3% 和 1%。而在纲这一分类阶元, 辐鳍纲动物毒性数据最多, 占 45%, 其次为瓣鳃纲和鳃足纲, 分别占 17% 和 6%。这与鱼类具有更加重要的经济、娱乐价值不无关系。自然界中, 节肢动物门的数量最多^[66,67], 而河流、湖泊等水生态系统中, 节肢动物门的物种数量通常是最多的。按照随机法对水生生物进行抽样, 则节肢动物门物种具有相对较高的人样概率。然而由毒性数据的物种类群分布可

以看出, 物种毒性数据中脊椎动物明显占据绝大部分, 尤其是辐鳍纲鱼类。当脊索动物门(或辐鳍鱼纲)中动物对毒性物质非常敏感或耐受性非常强时, 势必影响到最终获得的基准值, 同样当对特定区域进行生态风险进行评价时出现偏差的可能性也会大大增加。

2.2 毒性敏感性分析

将 2.1 节中检索获得的毒性数据按照生物分类法进行分类, 并绘制敏感性差异箱式图, 如图 1 所示。同时, 采用 2.2 节中方法, 将不同生物分类阶元内的物种作为独立样本进行 Mann-Whitney 检验, 结果如表 2~5 所示。

表 2 门急性毒性 U 统计量的精确概率值

Table 2 Exact U statistics probability of acute toxicity of different phylum				
		环节动物门	脊椎动物门	节肢动物门
	N ¹⁾ (变异系数)	3(0.135 7)	49(0.453 8)	25(1.206 9)
脊椎动物门	49(0.453 8)	0.018		
节肢动物门	25(1.206 9)	0.834	0.000	
软体动物门	22(0.655 7)	0.002	0.000	0.000

1) 样本数量, 下同

的物种有更加接近的物种敏感度。由表 3 的 Mann-Whitney 检验结果可以看出,寡毛纲与昆虫纲、软甲纲的 U 统计量的精确概率值分别为 0.225、0.497,辐鳍纲与两栖纲、鳃足纲、腹足纲的 U 统计量的渐近概率值分别为 0.366、0.199、0.826,昆虫纲与软甲纲的精确概率值为 0.31,鳃足纲与腹足纲则为 0.662,因此,在 0.1 的置信水平下没有显著差异。而其余几个纲之间的 U 统计量的精确概率值均小于 0.1,说明在 0.1 的置信水平下,存在显著差异。

由图 1 及表 4 可知,辐鳍鱼纲中鲑形目、鲤形目、鲈形目敏感性较为接近,其变异系数为0.394 5~0.447 5,说明各目内的不同物种的敏感性差异并不大;由表 4 的 Mann-Whitney 检验结果可知,河蚌目与其他 5 个目,鲤形目与枝角目、无尾目与枝角目的 U 统计量检验结果均小于 0.1,因此物种敏感度在 0.1 的置信水平下有显著差异. 鲑形目与鲤形

目、鲈形目、无尾目、枝角目,鲤形目与鲈形目、无尾目,鲈形目与无尾目、枝角目的 U 统计量检验结果均大于 0.1,因此,在 0.1 的置信水平下没有显著差异. 此外,还可以看出隶属于同门、同纲的“目”的 U 统计量检验结果均大于隶属于不同门、不同纲的“目”的 U 统计量检验结果,这在一定程度上说明同一生物分类群中的生物具有相对接近的敏感性.

表 4 目急性毒性 U 统计量的精确概率值

Table 4 Exact U statistics probability of acute toxicity of different order						
	鲑形目	鲤形目	鲈形目	无尾目	枝角目	
	N (变异系数)	11(0.394 5)	13(0.404 2)	14(0.447 5)	4(0.281 3)	6(0.164 8)
鲤形目	13(0.404 2)	0.608				
鲈形目	14(0.447 5)	0.809	0.685			
无尾目	4(0.281 3)	0.571	0.624	0.442		
枝角目	6(0.164 8)	0.350	0.087	0.153	0.019	
河蚌目	17(0.492 7)	0.000	0.001	0.000	0.039	0.000

由图 1 及表 5 可知,河蚌科最为敏感,16 种河蚌科物种的变异系数为0.502 5;鲑科、鲤科、棘臀科等敏感性比较接近,其中样本数量较多的鲑科、鲤科的变异系数为0.394 5、0.402 2,说明该几个科的科内物种敏感性比较相似.但同时值得注意的是蜋蛄科、细蟪科两个科的科内物种敏感性差异很大,这说明隶属于同一分类群内的物

种的敏感性并不全部呈现相似的规律,尤其是相对不敏感的物种.由表 5 中 Mann-Whitney 检验结果可知,河蚌科与其他 8 个科的敏感性在 0.1 的置信水平下有显著差异;河鲈科与蚤科,蜋蛄科与鲑科、鲤科、棘臀科的敏感性在 0.1 的置信水平下有显著差异,而其他几个科之间则没有显著差异.

表 5 科急性毒性 U 统计量的精确概率值

Table 5 Exact U statistics probability of acute toxicity of different family									
	鲑科	鲤科	亚口鱼科	棘臀科	狼鲈科	蚤科	河蚌科	河鲈科	
	N (变异系数)	11(0.394 5)	9(0.402 2)	4(0.471 5)	6(0.380 6)	4(0.491 6)	5(0.170 8)	16(0.502 5)	3(0.280 8)
鲤科	9(0.402 2)	0.766							
亚口鱼科	4(0.471 5)	0.571	0.710						
棘臀科	6(0.380 6)	0.525	0.864	1.000					
狼鲈科	4(0.491 6)	0.661	0.414	0.486	0.610				
蚤科	5(0.170 8)	0.510	0.190	0.413	0.177	0.905			
河蚌科	16(0.502 5)	0.000	0.001	0.037	0.008	0.005	0.000		
河鲈科	3(0.280 8)	0.291	0.600	1.000	0.548	0.400	0.071	0.045	
蜉蝣科	3(1.162 5)	0.060	0.036	0.114	0.095	0.229	0.250	0.002	0.100

3 讨论

如前所述,在基准推导中,毒性试验不可能涉及所有物种,仅能选择部分物种进行调查,而抽样是从全部研究对象中选取部分单位进行调查,并据此对全部调查研究对象作出估计的一种调查方法,基准方法学中的物种选择本质上属于抽样-推断理论的范畴.抽样调查在保证结果精确的前提下,通过样本获得反映总体情况的信息,起到全面调查的作用.因此样本的充分代表性是总体估计准确性的必要前提,抽样方法的设计关系到推断结果的准确性.依据抽样推断理论与方法,使用不同的物种选择方法

时,需要结合适当的推断方法才能尽可能地降低误差^[7].

3.1 物种选择与基准推导方法的关系

水生生物对污染物的敏感性分布规律是客观存在而不受外界因素影响的,因此其中并不包含概率问题,但受到目前认知水平的限制,人们依然缺乏一个水生生态系统对污染物毒性作用敏感性、耐受性的精确系统的理论描述.为了获得保护水生生物的水质基准值,基准制定人员采样采用统计外推的概率估计方法来获得基准值.而在基准推导中,需要考虑物种敏感性及其在整个水生生态系统所处的水平这两个变量才能完成敏感性与累积概率的拟合,达

到总体推断的目的。但当某一物种被抽中进行毒性试验,其中仅包含该物种的敏感性信息,而累积概率则是通过多个样本排序,并按照相同的权重人为赋予的,这就需要在物种选择时构造随机过程,将非随机问题转换为随机问题,才能保证其无偏性,因此从理论上讲,其对应的推断方法应该为基于抽样设计的推断 (design-based inference, DBI)^[68,69],在 DBI 中假设总体中各个单元的目标参数固定不变,当要对总体进行推断时,需要对抽样方法进行设计,使其具有随机性,进而利用随机样本进行总体参数的推断。当前基准推导方法可以分为评价因子法和统计外推法^[2],而对物种敏感度的认识是一个渐进的过程,在不同的阶段会有不同数量的物种毒性数据,因此不同的物种选择方法需要结合适当的基准推导方法。按照上述分析,可以依据物种选择方法以及所获得的毒性数据多少将其划分两个阶段,如图 2 所示。

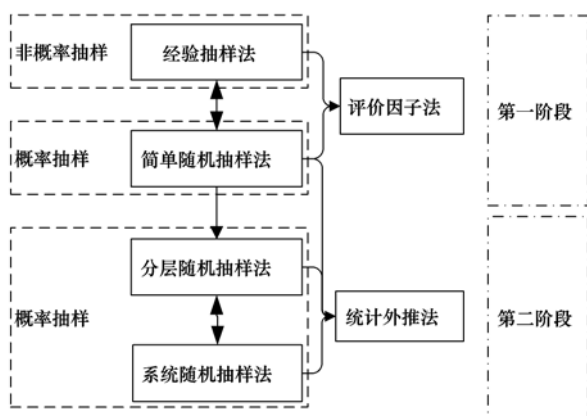


图 2 物种选择方法与基准推导方法的关系

Fig. 2 Relationship of species selecting methods and criteria deriving methods

概括来讲可以将基准推导划分为两个阶段,对于某一种新的化学品,人们往往对其环境毒理性了解很少,因此通常基于研究人员的经验利用经验判断抽样法选择某些常用毒理学模式生物进行毒性学试验,或者按照简单随机法选取受试生物进行毒理试验。前者的样本为非随机获得,仅能依靠评价因子法进行基准推导,而后者则可能由于毒性数据太少,也仅能使用评价因子法进行基准值推导,因此将其划分为第一阶段,在该阶段内,采用保守的方式进行基准推导是最妥当的。随着毒性数据的增加和认识的逐渐深入,通过物种敏感性分析可以对其内部规律进行总结,对与物种敏感性有较高相关性的辅助变量进行识别,从而进一步利用分层随机抽样

法或系统随机抽样法等更加高效的概率抽样方法进行物种选择,进而使用统计外推法进行基准值推导,此时基准推导由保守方式逐渐向更加接近真实水平的情况接近。

3.2 物种选择方法的改进

结合第 2 节中检验分析结果可以推断同一生物分类群内的物种有更加接近的物种敏感度,因此毒性数据涉及越多的生物分类群,其种间差异可能就越大,所得到的物种敏感度分布曲线也可能更加接近真实情况。由第 3 节中分析讨论可知,当前基准推导中物种选择受到很多因素的影响而出现一些倾向性,从生物分类学上来看,鲤形目、鲢形目、鲈形目以及鲢科、亚口鱼科、鲤科、鲈科、棘臀科均属于脊椎动物门辐鳍鱼纲动物,它们之间的物种敏感性在 0.1 的置信水平下没有显著差异,但现有的毒性数据中,涉及该类的数量却占 48%。而节肢动物门中的昆虫纲、软甲纲、腮足纲之间却有较大的差异,但现有的毒性数据中,涉及该类的数量仅占 25%,也远远低于其在自然生态系统中所占的比例。而物种敏感性按照生物分类群呈现出同类相似,异类相异的特点,因此可以将生物自然分类作为对物种敏感性进行划分的辅助变量,并采用分层抽样法进行物种选择,以此作为分类群的随机样本。然而,由于不同生态系统中物种类群结构差异巨大,同一生态系统中不同物种类群内物种数量差异也十分明显,因此,以生态系统中各生物类群内的物种数量为依据进行样本数量分配,并在推断时进行适当的权重处理是非常必要的。此外,由于毒性数据获取非常困难,因此往往无法一次性获得较多的毒性数据,然而为了提高推断估计的精度,很多情况下都需要在原有样本的基础上,进行样本的补充,随后利用已有样本和补充样本进行推断估计,从而完成对现有基准的修订。为了能够以较高效率完成抽样,在物种选择时应当涵盖更广泛的生物类群,因此,通过生物分类阶元由高至低在尚未涉及的分类群内进行随机选取,可以提高抽样效率。

4 结论

(1) 基准推导方法理论上属于基于抽样设计的推断,水生生物对污染物的敏感性客观存在而不受外界因素影响,其中并不包含概率问题,在基准推导的物种选择时需要人为构造随机过程将其转化为随机性问题,才能保障推断的可靠性。从氨氮毒性数据的物种类群分布来看,物种毒性数据中脊椎动物

明显占据绝大部分,尤其是辐鳍纲鱼类,而节肢动物则仅占 25%,与大多数生态系统中物种类群结构不符,说明物种选择出现一定的倾向性,这势必影响到最终获得的基准值,出现偏差的可能性也会大大增加。

(2)大多数不同分类群间水生生物对氨氮的敏感性差异显著,随着物种分类阶元分类级别降低,大部分分类群内物种呈现差异逐渐减小的趋势,能够在一定程度上说明同一自然分类群中的生物有更为接近的敏感性,个别分类群内物种的敏感性未呈现相似的规律,尤其是相对不敏感的物种。因此,在基准推导的物种选择时,可以运用分层抽样技术,即将生物的自然分类作为辅助变量对物种敏感性进行划分,并以生态系统中各生物类群内的物种数量为依据进行样本数量分配,进而在各分类群内进行随机抽样,从而提高抽样效率和精度。当对基准进行修订需要样本补充时,则按照生物分类阶元由高至低,在尚未涉及的分群内进行随机选取。

参考文献:

- [1] 冯承莲, 吴丰昌, 赵晓丽, 等. 水质基准研究与进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, **42**(5): 646-656.
- [2] 孟伟, 吴丰昌. 水质基准的理论与方法学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 张爱华, 孙志伟. 毒理学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] Posthuma L, Suter II G W, Traas T P. Environmental and ecological risk assessment: Species sensitivity distributions in ecotoxicology[M]. Washington DC: Lewis Publishers, 2002.
- [5] 谢强, 卜文俊, 于昕, 等. 现代动物分类学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [6] 周长发. 生物进化与分类原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] 冯士雍, 倪加勋, 邹国华. 抽样调查理论与方法[M]. (第二版). 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [8] US EPA. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses [R]. Duluth, Minnesota: Office of Research and Development Environmental Research Laboratories, 1985. 1-54.
- [9] CCME. A protocol for the derivation of water quality guidelines for the protection of aquatic life [R]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2007.
- [10] RIVM. Guidance document on deriving environmental risk limits in the Netherlands [R]. Bilthoven: the Netherlands: National Institute of Public Health and the Environment, 2001.
- [11] ANZECC and ARMCANZ. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality Volume 1-The guidelines [R]. Canberra: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand. 2000.
- [12] US EPA. 1999 update of ambient water quality criteria for ammonia [R]. Washington DC: Office of Water, 1999.
- [13] US EPA. Aquatic life ambient water quality criteria for ammonia-freshwater [R]. Washington DC: Office of Water, 2013.
- [14] 杨维康, 蒋慧萍, 王雪芹, 等. 古尔班通古特沙漠区大沙鼠对荒漠植物群落的扰动效应[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(10): 2020-2025.
- [15] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 水文变异下的黄河流域生态流量[J]. 生态学报, 2011, **31**(17): 4826-4834.
- [16] Black K. Business statistics: Contemporary decision making [M]. Hoboken: John Wiley and Sons, 2009.
- [17] US EPA. Draft 2009 update of aquatic life ambient water quality criteria for ammonia-freshwater 2009 [R]. Washington DC: Office of Water, 2009. 37-38.
- [18] Stammer H A. The effect of hydrogen sulfide and ammonia on characteristic animal forms in the saprobic system [J]. Vom Wasser, 1953, **20**: 34-71.
- [19] Besser J M, Ingersoll C G, Leonard E N, et al. Effect of zeolite on toxicity of ammonia in freshwater sediments: Implications for toxicity identification evaluation procedures [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1998, **17**(11): 2310-2317.
- [20] Hickey C W, Vickers M L. Toxicity of ammonia to nine native New Zealand freshwater invertebrate species [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1994, **26**(3): 292-298.
- [21] Schubaur-Berigan M K, Monson P D, West C W, et al. Influence of pH on the toxicity of ammonia to *Chironomus tentans* and *Lumbriculus variegatus* [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1995, **14**(4): 713-717.
- [22] Williams K A, Green D W J, Pascoe D. Studies on the acute toxicity of pollutants to freshwater macroinvertebrates. 3. Ammonia [J]. Archiv fur Hydrobiologie, 1986, **106**(1): 61-70.
- [23] Buckley J A. Acute toxicity of un-ionized ammonia to fingerling coho salmon [J]. The Progressive Fish-culturist, 1978, **40**(1): 30-32.
- [24] Robinson-Wilson E F, Seim W K. Thelethaland sublethaleffectsofa zirconiumprocess effluentonjuvenilesalmonids [J]. Water Resources Bulletin, 1975, **11**(5): 975-986.
- [25] Arthur J W, West C W, Allen K N, et al. Seasonal toxicity of ammonia to five fish and nine invertebrates species [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1987, **38**(2): 324-331.
- [26] DeGraeve G M, Overcast R L, Bergman H L. Toxicityofunderground coalgasification condenserwaterand selected constituents toaquaticbiota [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1980, **9**(5): 543-555.
- [27] Reinhold K A, Pescitelli S M. Effects of cold temperature on toxicity of ammonia to rainbow trout, blue gills and fathead minnows [R]. Champaign: Illinois Natural History Survey, 1982.
- [28] Thurston R V, Chakoumakos C, Russo R C. Effect of fluctuating

- exposures on the acute toxicity of ammonia to rainbow trout (*S. gairdneri*) and cutthroat trout (*S. clarki*) [J]. Water Research, 1981, **15**(7): 911-917.
- [29] Thurston R V, Russo R C, Vinogradov G A. Ammonia toxicity to fishes: Effect of pH on the toxicity of the un-ionized ammonia species [J]. Environmental Science and Technology, 1981, **15**(7): 837-840.
- [30] Servizi J A, Gordon R W. Acute lethal toxicity of ammonia and suspended sediment mixtures to chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1990, **44**(4): 650-656.
- [31] Kumar N J, Krishnamoorthi K P. Evaluation of toxicity of ammoniacal fertiliser effluents [J]. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological, 1983, **30**(1): 77-86.
- [32] Rubin A J, Elmaraghy M A. Studies on the toxicity of ammonia, nitrate and their mixtures to the common guppy [R]. Columbus: Ohio State University, 1976.
- [33] Buhl K J. The relative toxicity of waterborne inorganic contaminants to the Rio Grande silvery minnow (*Hybognathus amarus*) and fathead minnow (*Pimephales promelas*) in a water quality simulating that in the Rio Grande, New Mexico [R]. Yankton: USGS Columbia Environmental Research Center, 2002.
- [34] Adelman I R, Kusilek L I, Koehle J, et al. Acute and chronic toxicity of ammonia, nitrite and nitrate to the endangered Topeka shiner (*Notropis topeka*) and fathead minnows (*Pimephales promelas*) [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2009, **28**(10): 2216-2223.
- [35] Sparks R E. The acute, lethal effects of ammonia on channel catfish (*Ictalurus punctatus*), bluegills (*Lepomis macrochirus*) and fathead minnows (*Pimephales promelas*) [R]. Report to Illinois, Project No. 20. 060. Chicago, Institute for Environmental Quality, 1975.
- [36] Diamond J M, Mackler D G, Rasnake W J, et al. Derivation of site-specific ammonia criteria for an effluent-dominated head waterstream [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1993, **12**(4): 649-658.
- [37] Thurston R V, Russo R C. Acute toxicity of ammonia to rainbow trout [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1983, **112**(5): 696-704.
- [38] Swigert J P. Survival and growth of warm water fishes exposed to ammonia under low-flow conditions [R]. West Lafayette: Indiana Water Resources Research Center, 1983.
- [39] Markle P J, Gully J R, Baird R B, et al. Effects of several variables on whole effluent toxicity test performance and interpretation [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2000, **19**(1): 123-132.
- [40] Mayes M A, Alexander H C, Hopkins D L, et al. Acute and chronic toxicity of ammonia to freshwater fish: A site-specific study [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1986, **5**(5): 437-442.
- [41] Nimmo D W R, Link D, Parrish L P, et al. Comparison of on-site and laboratory toxicity tests: Derivation of site-specific criteria for un-ionized ammonia in a Colorado transitional stream [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1989, **8**(12): 1177-1189.
- [42] Saiki M K, Monda D P, Bellerud B L. Lethal levels of selected water quality variables to larval and juvenile Lost River and shortnose suckers [J]. Environmental Pollution, 1999, **105**(1): 37-44.
- [43] Fontenot Q C, Isely J J, Tomasso J R. Acute toxicity of ammonia and nitrite to shortnose sturgeon fingerlings [J]. The Progressive Fish-culturist, 1998, **60**(4): 315-318.
- [44] Broderius S, Drummond R, Fiandt J, et al. Toxicity of ammonia to early life stages of the smallmouth bass at four pH values [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1985, **4**(1): 87-96.
- [45] Roseboom D P, Richey D L. Acute toxicity of residual chlorine and ammonia to some native Illinois fishes [R]. Urbana: Illinois State Water Survey, 1977.
- [46] Tomasso J R, Carmichael G J. Acute toxicity of ammonia, nitrite, and nitrate to the Guadalupe bass, *Micropterus treculi* [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1986, **36**(1): 866-870.
- [47] Ashe D, Tomasso J R, Eversole G A, et al. Toxicity of ammonia to fingerling white bass: Effect of selected environments on uptake dynamics [J]. The Progressive Fish-culturist, 1996, **58**(4): 277-280.
- [48] Single Euro Payments Area. Aquatic life ambient water quality criteria for ammonia-freshwater 2013 [R]. Washington DC: Office of Water, 2013.
- [49] Rani E F, Elumalai M, Balasubramanian M P. Toxic and sublethal effects of ammonium chloride on a freshwater fish *Oreochromis mossambicus* [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1998, **104**(1-2): 1-8.
- [50] Bader J A, Grizzle J M. Effects of ammonia on growth and survival of recently hatched channel catfish [J]. Journal of Aquatic Animal Health, 1992, **4**(1): 17-23.
- [51] Wang N, Ingersoll C G, Hardesty D K, et al. Contaminant sensitivity of freshwater mussels: Acute toxicity of copper, ammonia, and chlorine to glochidia and juveniles of freshwater mussels (*Unionidae*) [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2007, **26**(10): 2036-2047.
- [52] Schuytema G S, Nebeker A V. Comparative toxicity of ammonium and nitrate compounds to Pacific treefrog and African clawed frog tadpoles [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, **18**(10): 2251-2257.
- [53] Tietge J E, Ankley G T, DeFoe D L, et al. Effects of water quality on development of *Xenopus laevis*: A frog embryo teratogenesis assay-*Xenopus* assessment of surface water associated with malformations in native anurans [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2000, **19**(8): 2114-2121.
- [54] Harris R, Coley S, Collins S, et al. Ammonia uptake and its effects on iono regulation in the freshwater crayfish *Pacifastacus leniusculus* (Dana) [J]. Journal of Comparative Physiology B,

- 2001, **171**(8): 681-693.
- [55] Scheller J L. The effect of dieoffs of Asian clams (*Corbicula fluminea*) on native freshwater mussels (*Unionidae*) [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [56] Dehedin A, Piscart C, Marmonier P. Seasonal variations of the effect of temperature on lethal and sublethal toxicities of ammonia for three common freshwater shredders[J]. *Chemosphere*, 2013, **90**(3): 1016-1022.
- [57] Prenter J, MacNeil C, Dick J T A, *et al.* Lethal and sublethal toxicity of ammonia to native, invasive, and parasitized freshwater amphipods [J]. *Water Research*, 2004, **38** (12): 2847-2850.
- [58] Ankley G T, Schubauer-Berigan M K, Monson P D. Influence of pH and hardness on toxicity of ammonia to the amphipod *Hyaella Azteca*[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1995, **52**(10): 2078-2083.
- [59] Dekker T, Greve G D, TerLaak T L, *et al.* Development and application of a sediment toxicity test using the benthic cladoceran *Chydorus sphaericus* [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **140** (2): 231-238.
- [60] Parkhurst B R, Meyer J S, DeGraeve G M, *et al.* Reevaluation of the toxicity of coal conversion process waters [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1981, **26**(1): 9-15.
- [61] Gersich F M, Hopkins D L. Site-specific acute and chronic toxicity of ammonia to *Daphnia magna* Straus [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1986, **5**(5): 443-447.
- [62] Parkhurst B R, Bradshaw A S, Forte J L, *et al.* An evaluation of the acute toxicity to aquatic biota of a coal conversion effluent and its major components [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1979, **23**(3): 349-356.
- [63] Newton T J, Allran J W, O'Donnell J A, *et al.* Effects of ammonia on juvenile unionid mussels (*Lampsilis cardium*) in laboratory sediment toxicity tests [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, **22**(11): 2554-2560.
- [64] Myers-Kinzie M L. Factors affecting survival and recruitment of unionid mussels in small Midwestern streams [D]. West Lafayette, IN: Purdue University, 1998.
- [65] Goudreau S E, Neves R J, Sheehan R J. Effects of wastewater treatment plant effluents on freshwater mollusks in the upper Clinch River, Virginia, USA [J]. *Hydrobiologia*, 1993, **252** (3): 211-230.
- [66] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志(节肢动物门甲壳纲淡水枝角类)[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [67] 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物志(节肢动物门甲壳纲淡水桡足类)[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [68] 邹国华, 冯士雍. 超总体模型下有限总体的估计[J]. *系统科学与数学*, 2007, **27**(1): 27-38.
- [69] Daniel J N. Sampling essentials: Practical guidelines for making sampling choices [M]. Los Angeles: SAGE Publications, Inc., 2011.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行