

本土淡水软体动物水质基准受试生物筛选

覃璐玫^{1,2}, 张亚辉^{2*}, 曹莹², 闫振广², 曾鸿鹄¹, 刘征涛²

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 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:作为水质基准体系中重要的指示生物类别, 淡水软体动物是水质基准受试生物的重要组成部分。参照美国水生生物基准技术指南, 从 ECOTOX 数据库及各类公开发表的文献中搜集、筛选了 12 种代表性本土淡水软体动物的生物毒性数据, 通过毒性数据分析, 获得对各淡水软体动物毒性最大的污染物, 主要包括农药、重金属和常规污染物三大类物质; 采用物种敏感度分布法对这 12 种软体动物的物种毒性数据进行敏感性分析, 若物种的累积概率小于 30% 则为较敏感, 该物种可作为基准研究受试生物。结果表明, 放逸短沟蜷(*Semisulcospira libertine*)对地乐酚的累积概率为 21%, 静水椎实螺(*Lymnaea stagnalis*)对氨的累积概率为 8%, 河蚬(*Corbicula manilensis*)对亚硝酸钠的累积概率为 3%。上述 3 种软体动物分别对农药(地乐酚)、常规污染物(氨和亚硝酸钠)为敏感物种, 可以作为相应污染物水质基准研究的受试物种。

关键词:淡水软体动物; 基准受试生物; 污染物; 物种敏感度分布; 水质基准

中图分类号: X820.3 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)09-1791-11 doi:10.11654/jaes.2014.09.017

Screening Native Freshwater Molluscs for Establishing Aquatic Life Criteria

QIN Lu-mei^{1,2}, ZHANG Ya-hui^{2*}, CAO Ying², YAN Zhen-guang², ZENG Hong-hu¹, LIU Zheng-tao²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. State Key Laboratory for Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effects and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: A series of systematic studies on water quality criteria (WQC) has recently been conducted in China. Screening of test organisms is an important part for developing WQC. Molluscs are major components of test organisms for establishing aquatic life criteria. According to the WQC derivation guidelines of the US EPA, toxicity data of twelve typical native freshwater molluscs were collected and screened from the ECOTOX database and other published literatures. Three types of pollutants that are most toxic to molluscs were pesticides, heavy metals and conventional pollutants. The species sensitivity distribution (SSD) of molluscs indicated that the cumulative probability of *Semisulcospira libertine* to dinoseb was 21%, *Lymnaea stagnalis* to ammonia 8% and *Corbicula manilensis* to sodium nitrite 3%. These three molluscs were also sensitive to pesticide (dinoseb) and to conventional pollutants (ammonia and sodium nitrite). Thus they could be regarded as test organisms for the aquatic life criteria.

Keywords: freshwater molluscs; criteria test organisms; pollutants; species sensitivity distribution; water quality criteria

淡水软体动物主要是指生活于淡水水域中隶属于软体动物门的腹足纲(*Gastropoda*)和瓣鳃纲(*Lamellibranchia*)的一类生物^[1], 它们是鱼类及禽类的

优质饵料, 是水生生态系统食物链的重要环节, 也是生物多样性的的重要组成部分^[2], 其生存状态对其他物种的生存与繁殖有很大的影响; 同时, 该类生物具有重要的生态学意义, 能有效控制淡水水体的外源污染, 对受污染的淡水水体具有明显的净化效果^[3], 并能调控水生生态系统结构, 对水生生态系统的良性循环起到重要作用^[4]。

由于淡水软体动物分布广泛, 种类繁多, 种群结

收稿日期: 2014-05-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-003); 国家自然科学基金(51268008)

作者简介: 覃璐玫(1988—), 女, 广西南宁人, 硕士研究生, 主要从事污水处理与技术研究。E-mail: qinlumei@outlook.com

* 通信作者: 张亚辉 E-mail: zhangyahui@craes.org.cn

构稳定,活动能力弱,易受污染物影响,生活周期长,对不同环境敏感性不同等特性,在一定程度上起到较好的水质监测作用^[5-6],被广泛用于水生生态系统的健康评价^[7]并作为水体污染的指示生物^[8-9]和湖泊营养级水平的指示生物^[10]等。例如有些软体动物可以吞食底泥并积累重金属,可以指示底泥中污染物的生物有效性^[11-12];尖膀胱螺(*Physella acuta*)、椎实螺(*Lymnaea*)、福寿螺(*Pomacea canaliculata*)等,常用于急性毒性试验,测定毒物对其存活、生长和生殖的影响^[13-15]。因淡水软体动物在水生生态系统中的重要地位及在水环境质量评价中所起的积极作用,美国环保局^[16]明确规定在推导水生生物基准时将软体动物纳入到受试物种体系中。

我国正在系统地开展淡水水生生物基准研究,而淡水软体动物是基准受试生物的重要组成部分,其毒性研究已有所报道^[17-18]。由于我国淡水软体动物种类繁多、地域差别大且对不同污染物的敏感性存在差异,本文针对我国淡水水体,筛选出具有本土代表性的软体动物,搜集该类物种的急性毒性数据,获得对污染物较敏感的淡水软体动物作为我国水生生物基准的受试生物,进而提出软体动物受试生物名单,为我国水生生物基准的研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 本土代表性淡水软体动物筛选

通过查阅《中国经济动物志-淡水软体动物》^[1]、《中国经济软体动物》^[19]、中国生物物种名录 2012 (http://data.sp2000.cn/2011_cnnode_c/info_checklist.php)、CNKI 数据库(<http://www.cnki.net/>)及各类已公开发表的文献,依据水生生物在我国的地理分布范围(3个省份以上)、生态学意义、经济价值及易获得性(易获得、易于在实验室条件下驯养繁殖)等指标,充分考虑生态毒理实验中常用的测试物种,筛选具有代表性且毒理实验常用的软体动物。

1.2 生物毒性数据筛选与分析

参考美国水生生物基准技术指南^[16]的数据筛选原则,对 ECOTOX 毒性数据库(<http://cfpub.epa.gov/ecotox/>)以及 CNKI 数据库中获得的淡水软体动物急性毒性数据进行初步筛选。急性毒性试验数据的筛选原则如下:①软体动物的急性毒性试验指标为 96 h LC₅₀ 或 EC₅₀;②优先选择对试验溶液浓度有监控的毒性数据;③同种污染物的急性毒性数据若差异过大,应被判断为有疑点的数据而谨慎使用;④一些有问题

或有疑点的数据(如没有设对照组等试验设计不科学的、试验生物曾经暴露于污染物中的)均不能采用^[20]。⑤所有毒性数据均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试验终点有多个毒性值可用时,采用几何平均值。

对筛选获得的合格急性毒性数据进行整理和排序,计算同种污染物的种平均急性毒性值(Species mean acute values, SMAV),通过对同一物种的不同污染物的 SMAV 从小到大进行排序,获得对目标生物毒性最大的污染物类别。

1.3 污染物毒性数据筛选与分析

对目标生物毒性最大的污染物,参照上述数据筛选原则,重新筛选各污染物的急性毒性数据,将筛选得到的合格急性毒性数据进行大小排序,计算累积概率,进行软体动物对污染物的物种敏感性分析,确定对污染物较敏感的软体动物,进而提出基准受试生物名单。

目前关于物种敏感性数值的分级研究鲜有报道。欧美水质基准技术导则^[21-23]规定当受危害生物超过 50%时,生态风险等级为“严重”,将物种敏感性排序超过 50%的物种定为不敏感物种,并将保护 95%生物的浓度定为水质基准,如果一个生物的敏感性小于 5%,则不在水质基准的保护范围内,此时界定为非常敏感。当受胁迫的生物分别超过 15%和 30%时,污染物引起的生态风险定义为有明显风险和一定风险^[24-25],由此可将对物种敏感性超过上述限值的物种分为敏感和较敏感。

为了使淡水软体动物在污染物敏感性排序位置中更加直观明了,运用数据分析软件 Origin8.0 对筛选得到的急性毒性数据进行处理,绘制物种敏感性分布图。生物毒性数据的多少对基于物种敏感性分布图得出的结论非常重要,OECD^[26]建议用 5 个生物毒性数据量来绘制物种敏感性分布图,为了更准确判断物种敏感性,本文采用 8 个生物毒性数据量来绘制物种敏感性分布图。

2 结果与分析

2.1 本土代表性软体动物

软体动物可分为 8 个纲:单板纲(Monoplacophora)、多板纲(Polyplacophora)、无板纲(Aplacophora)、腹足纲(Gastropoda)、瓣鳃纲(Lamellibranchia)又称双壳纲(Bivalvia)、掘足纲(Scaphopoda)、头足纲

(Cephalopoda)和喙壳纲(Rostroconchia)。现有淡水水域中仅分布着腹足纲和瓣鳃纲两类软体动物。我国淡水腹足纲有 58 种(亚种),隶属于 27 属(亚属)7 科;瓣鳃纲 48 种,隶属于 18 属 6 科。我国淡水软体动物在全国都有分布,而较少分布于西北地区,其他六大地理区系分布较多^[1,19,27-28]。我国淡水软体动物具体区系分布见表 1。

按照物种筛选原则,及在我国分布范围的搜集,获得中国圆田螺等 12 种软体动物作为我国本土代表性软体动物,见表 2。它们分别属于田螺科(Viviparidae)、黑螺科(Melaniidae)、椎实螺科(Lymnaeidae)、扁蜷螺科(Planorbidae)、膀胱螺科(Physidae)、瓶螺科(Pilidae)、蚌科(Unionidae)和蚬科(Corbicula)8 科,其中以田螺科最多,12 种中占 3 种。在地理分布上,中国圆田螺、小椎实螺和河蚬分布最广泛,印度扁蜷螺分布区域相对较窄,其他软体动物分布范围均在三省以上,具有良好的本土代表性。

2.2 对软体动物毒性最大的污染物

对 12 种软体动物的急性毒性数据筛选排序,得到对每种软体动物毒性最大(即 96 h LC₅₀ 或 EC₅₀ 最小)的前三位污染物,如表 3 所示。由表 3 可知,软体动物毒性数据丰度不一,其中:中国圆田螺和三角帆蚌毒性数据最少,只筛出 1 种有毒污染物;其次是梨形环棱螺、瘤拟黑螺、小椎实螺和福寿螺筛出 2 种污染物;其他软体动物均可筛出 3 种污染物以上。筛选得到 27 种污染物主要分为农药、重金属和常规污染物 3 类,其中农药 13 种、重金属 4 种和常规污染物 10 种。13 种农药包括:2 种有机磷农药为灭多威和马拉硫磷;杀虫剂类为多效唑、三苯基锡醋酸盐、地乐酚、福美铁、氯氰菊酯、印楝素、印楝油、氯硝柳胺乙醇胺盐、阿维菌素、毒死蜱、高效氯氟菊脂;4 种重金属包括:三丁基氧化锡、重铬酸钾、硫酸铜、氯化镉;其他 10 种常规污染物包括:2,4,6-三氯酚、硝基苯、润滑油基础油、六氯丁二烯、氨、2,3,5-三氯酚、2,3,6-三

表 1 我国淡水软体动物主要分布区系

Table 1 Distribution of freshwater molluscs in China

地区 District	主要软体动物种类 Main species of molluscs
东北 Northeast China	田螺科的中国圆田螺、中华圆田螺、梨形环棱螺;鳃螺科的沼纹螺;椎实螺科的静水椎实螺、耳萝卜螺、折叠萝卜螺、卵萝卜螺、狭萝卜螺、小椎实螺、截口土蜗;拟沼螺科的排拟沼螺;黑螺科的方格短沟蜷、放逸短沟蜷;扁蜷螺科的半球对脉扁螺;蚌科的圆顶珠蚌、短褶矛蚌;无齿蚌亚科的背角无齿蚌、圆背角无齿蚌、舟形无齿蚌、蚌形无齿蚌、黄色蚌形无齿蚌、褶纹冠蚌;蚬科的河蚬、闪蚬;球蚬科的湖球蚬;膀胱螺科的尖膀胱螺
西北 Northwest China	田螺科的中国圆田螺、中华圆田螺;鳃螺科的泥污拟钉螺、长角涵螺、楔豆螺;椎实螺科的静水椎实螺、耳萝卜螺、折叠萝卜螺、卵萝卜螺、狭萝卜螺、小椎实螺;蚌科的圆顶珠蚌;无齿蚌亚科的背角无齿蚌、蚌形无齿蚌;蚬科的河蚬、闪蚬;球蚬科的湖球蚬
华北 North China	田螺科的中国圆田螺、中华圆田螺、方形环棱螺、梨形环棱螺、铜锈环棱螺;鳃螺科的长角涵螺、赤豆螺、楔豆螺、纹沼螺、大沼螺、光滑狭口螺;拟沼螺科的排拟沼螺;黑螺科的方格短沟蜷;椎实螺科的耳萝卜螺、折叠萝卜螺、卵萝卜螺、狭萝卜螺、小椎实螺、截口土蜗;扁蜷螺科的尖口圆扁螺、半球多脉扁螺;蚌科的圆顶珠蚌、圆头楔蚌、三角帆蚌、剑状矛蚌、射线裂脊蚌、背瘤丽蚌;无齿蚌亚科的背角无齿蚌、圆背角无齿蚌、舟形无齿蚌、河无齿蚌、蚌形无齿蚌、黄色蚌形无齿蚌、褶纹冠蚌、橄榄蛭蚌;蚬科的河蚬、球蚬科的湖球蚬;膀胱螺科的尖膀胱螺
华中 Central China	田螺科的中国圆田螺、中华圆田螺、方形环棱螺、梨形环棱螺、铜锈环棱螺、多棱角螺;鳃螺科的泥污拟钉螺、湖北钉螺、光钉螺、长角涵螺、赤豆螺、楔豆螺、纹沼螺、中华沼螺、大沼螺、光滑狭口螺;黑螺科的方格短沟蜷、放逸短沟蜷;椎实螺科的耳萝卜螺、小椎实螺;扁蜷螺科的尖口圆扁螺、半球多脉扁螺、印度扁蜷螺;蚌科的圆顶珠蚌、卵形尖嵴蚌、扭蚌、圆头楔蚌、巨首楔蚌、鱼尾楔蚌、三角帆蚌、短褶矛蚌、剑状矛蚌、射线裂脊蚌、棘裂脊蚌、背瘤丽蚌、洞穴丽蚌、失衡丽蚌、猪耳丽蚌、三巨瘤丽蚌、天津丽蚌、绢丝丽蚌、刻裂丽蚌、多瘤丽蚌;无齿蚌亚科的背角无齿蚌、舟形无齿蚌、球形无齿蚌、蚌形无齿蚌、褶纹冠蚌、高顶鳞皮蚌、刻纹蚬;蚬科的河蚬、闪蚬;球蚬科的湖球蚬;膀胱螺科的尖膀胱螺
华东 East China	田螺科的中国圆田螺、中华圆田螺、方形环棱螺、梨形环棱螺、铜锈环棱螺、多棱角螺;鳃螺科的湖北钉螺、光钉螺、长角涵螺、赤豆螺、楔豆螺、纹沼螺、中华沼螺、大沼螺、光滑狭口螺;拟沼螺科的排拟沼螺;黑螺科的方格短沟蜷、瘤拟黑螺;椎实螺科的静水椎实螺、耳萝卜螺、折叠萝卜螺、椭圆萝卜螺、小椎实螺;扁蜷螺科的凸旋螺、大脐圆扁螺、尖口圆扁螺、半球多脉扁螺;蚌科的圆顶珠蚌、卵形尖嵴蚌、扭蚌、圆头楔蚌、巨首楔蚌、鱼尾楔蚌、三角帆蚌、短褶矛蚌、剑状矛蚌、射线裂脊蚌、棘裂脊蚌、背瘤丽蚌、洞穴丽蚌、失衡丽蚌、猪耳丽蚌、三巨瘤丽蚌、天津丽蚌、绢丝丽蚌、刻裂丽蚌、多瘤丽蚌;无齿蚌亚科的背角无齿蚌、圆背角无齿蚌、舟形无齿蚌、球形无齿蚌、河无齿蚌、蚌形无齿蚌、黄色蚌形无齿蚌、褶纹冠蚌、高顶鳞皮蚌、橄榄蛭蚌;瓶螺科的福寿螺;蚬科的河蚬、刻纹蚬;球蚬科的湖球蚬;膀胱螺科的尖膀胱螺
华南 South China	田螺科的中国圆田螺、方形环棱螺、梨形环棱螺、铜锈环棱螺、多棱角螺;瓶螺科的光瓶螺、福寿螺;鳃螺科的泥污拟钉螺、湖北钉螺、长角涵螺、赤豆螺、楔豆螺、纹沼螺;黑螺科的方格短沟蜷、放逸短沟蜷、瘤拟黑螺;椎实螺科的耳萝卜螺、折叠萝卜螺、椭圆萝卜螺、小椎实螺;扁蜷螺科的凸旋螺、大脐圆扁螺、尖口圆扁螺、半球多脉扁螺;蚌科的圆顶珠蚌、背瘤丽蚌;膀胱螺科的尖膀胱螺;无齿蚌亚科的背角无齿蚌;蚬科的河蚬、闪蚬;
西南 Southwest China	田螺科的中国圆田螺、方形环棱螺、梨形环棱螺、多棱角螺;瓶螺科的光瓶螺;鳃螺科的泥污拟钉螺、赤豆螺、纹沼螺、大沼螺、光滑狭口螺;黑螺科的方格短沟蜷、放逸短沟蜷、瘤拟黑螺;椎实螺科的耳萝卜螺、小椎实螺;扁蜷螺科的凸旋螺、大脐圆扁螺、半球多脉扁螺、印度扁蜷螺;蚌科的圆顶珠蚌;无齿蚌亚科的背角无齿蚌;膀胱螺科的尖膀胱螺;蚬科的河蚬、闪蚬

注:根据文献[1,19,27-28]整理而成,表中各软体动物在我国分布范围均在三省以上。

表2 我国代表性软体动物种类及分布范围

Table 2 Typical species and geographic distribution of molluscs in China

动物分类 Classification of animals	物种名称 The name of the species	地理分布 Geographical distribution
田螺科 Viviparidae	圆田螺属 <i>Cipangopaludina</i>	中国圆田螺 <i>Cipangopaludina chinensis</i> 黑龙江、宁夏、河北、河南、安徽、福建、广东、四川等地
	中华圆田螺 <i>Cipangopaludina cahayensis</i>	陕西、河北、河南、安徽、湖北等地
黑螺科 Melaniidae	环棱螺属 <i>Bellamya</i>	梨形环棱螺 <i>Bellamya purificata</i> 辽宁、内蒙古、河北、河南、安徽、广东、云南等地
	短沟蜷属 <i>Semisulcospira</i>	放逸短沟蜷 <i>Semisulcospira libertina</i> 吉林、辽宁、安徽、浙江、江西、湖北、湖南、福建、广东、贵州、云南等地
椎实螺科 Lymnaeidae	拟黑螺属 <i>Melanoides</i>	瘤拟黑螺 <i>Melanoides tuberculata</i> 福建、广东、广西、四川、云南等地
	椎实螺属 <i>Lymnaea</i>	静水椎实螺 <i>Lymnaea stagnalis</i> 黑龙江、新疆、山东等地
	小椎实螺属 <i>Galba</i>	小椎实螺 <i>Galba pervia</i> 黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、河南、山东、山西、陕西、甘肃、青海、新疆、西藏、安徽、江苏、浙江、湖北、湖南、福建、广东、广西、贵州、云南、四川等地
扁蜷螺科 Planorbidae	印度扁蜷 <i>Indoplanorbis</i>	印度扁蜷螺 <i>Indoplanorbis exustus</i> 云南、湖南等地
膀胱螺科 Physidae	膀胱螺属 <i>Physa</i>	尖膀胱螺 <i>Physa acuta</i> 黑龙江、内蒙古、广东、香港等地
瓶螺属 <i>Pilaidae</i>	瓶螺属 <i>Pomacea</i>	福寿螺 <i>Pomacea canaliculata</i> 广东、广西、江西、福建、海南等地
蚌科 Unionidae	帆蚌属 <i>Hyriopsis</i>	三角帆蚌 <i>Hyriopsis cumingii</i> 河北、山东、安徽、江苏、浙江、江西、湖北等地
蜆科 Corbicula	蜆属 <i>Corbicula</i>	河蜆 <i>Corbicula manilensis</i> 黑龙江、吉林、辽宁、河北、河南、山东、安徽、浙江、江西、湖北、湖南、福建、广东、广西、云南、四川、陕西、山西、甘肃、宁夏、内蒙古等地

氯酚、苯酚、抗霉素、亚硝酸钠。从 96 h LC₅₀ 或 EC₅₀ 来看,中国圆田螺、中华圆田螺、瘤拟黑螺、印度扁蜷螺、福寿螺和三角帆蚌对污染物的耐受能力相对较强,其他软体动物对污染物耐受能力相对较小。

2.3 污染物的物种敏感性分布和基准受试生物的确定

27 种污染物中有 22 种污染物的生物毒性数据量在 8 个以上,由此绘制这 22 种污染物的物种敏感性分布图,如图 1 所示,污染物对应的淡水软体动物在散点图中以箭头标示,用以指示软体动物对目标污染物的敏感性。软体动物对污染物的累积概率和敏感性如表 4 所示。

由图 1 和表 4 可知,放逸短沟蜷对地乐酚的累积概率为 21%,静水椎实螺对氨的累积概率为 8%,河蜆对硝酸钠的累积概率为 3%,这 3 种软体动物对目标污染物较敏感,属于敏感物种。而其他软体动物对目标污染物的累积概率均大于 30%,属于不敏感物种。继而可确定我国水生生物基准的本土受试软体动物为黑螺科的放逸短沟蜷、椎实螺科的静水椎实螺及蜆科的河蜆。

3 讨论

国内外关于水质基准研究中敏感受试生物的筛选少有研究,US EPA^[44]虽形成较为完善的水质基准技术体系,但只曾提出使用北美物种作为测试物种,而未对敏感性的受试物种进行说明。鉴于本土受试生物

针对区域水质基准的制定极其重要,本文采用国际上广泛应用于生态风险评估^[45]和水质基准推导^[46-47]的 SSD 法对水质基准研究中的受试生物进行敏感性分析。该法可以通过物种敏感性排序对生物的敏感性进行判断^[48],进而提出敏感受试生物名单。有研究^[49-52]采用 SSD 法对水中鱼类、两栖类、甲壳类、环节动物类与水生昆虫类进行敏感性分析,并提出了部分物种可作为相应污染物的水质基准研究的受试生物。

我国淡水软体动物种类繁多,分布范围广,因此本文按照地理分布区系作为筛选本土代表软体动物的主要依据。通过对软体动物的地理分布范围的搜集和分析,所选择的软体动物基本分布在 3 个省份以上。因多数软体动物缺乏足够的毒性数据,故初步筛选 12 种本土代表性软体动物,进而筛选出的敏感物种以作为基准受试生物的候选物种。为促进我国区域水质基准研究的进展,需加强对不同地域软体动物的调查与毒性试验研究,以降低软体动物作为我国本土代表性受试生物的不确定性。

软体动物因其自身特点及毒理试验过程中的易获得性等因素,污染物的毒性数据丰度及敏感性均存在一定的差异,有些软体动物筛选出的污染物较少,且由毒性最大的污染物筛选出的生物毒性数据量普遍较少;再者,多数软体动物对其周围存在的污染物不敏感,较少用于急性毒性试验研究,毒性数据量较少,将其作为我国本土受试生物的研究鲜有报道。因

表 3 对 12 种软体动物毒性最大的污染物
Table 3 Pollutants most toxic to twelve molluscs

物种名称 Biological name	污染物 Pollutant	种平均 LC ₅₀ 或 EC ₅₀ / μg·L ⁻¹ SMAV/μg·L ⁻¹	浓度范围/μg·L ⁻¹ Concentration range/μg·L ⁻¹	数据来源 Data source
中国圆田螺 <i>Cipangopaludina chinensis</i>	多效唑	12 800		文献[29]
中华圆田螺 <i>Cipangopaludina cahayensis</i>	重铬酸钾	7280	6760~8320	文献[30]
	2,4,6-三氯酚	8980	8540~9430	文献[30]
	硝基苯	104 230	314~464	文献[30]
梨形环棱螺 <i>Bellamya purificata</i>	硫酸铜	382		文献[31]
	氯化镉	3390	2819~4078	文献[31]
放逸短沟蜷 <i>Semisulcospira libertina</i>	三苯基锡醋酸盐	80		文献[32]
	地乐酚	130		文献[32]
	福美铁	500		文献[32]
瘤拟黑螺 <i>Melanoides tuberculata</i>	氯氰菊酯	2800	2300~3300	文献[33]
	润滑油基础油	324 000		文献[34]
静水椎实螺 <i>Lymnaea stagnalis</i>	三丁基氧化锡	42		文献[35]
	六氯丁二烯	210	170~270	文献[36]
	氨	820		文献[37]
小椎实螺 <i>Galba perversa</i>	2,3,5-三氯酚	525		文献[18]
	2,3,6-三氯酚	1925		文献[18]
印度扁蜷螺 <i>Indoplanorbis exustus</i>	印楝素	32 825		文献[38]
	苯酚	125 750	107 100~146 750	文献[39]
	印楝油	1 081 342		文献[38]
尖膀胱螺 <i>Physa acuta</i>	毒死蜱	160		文献[14]
	阿维菌素	340		文献[40]
	高效氯氟氰菊酯	1643		文献[40]
福寿螺 <i>Pomacea canaliculata</i>	灭多威	2595		文献[41]
	马拉硫磷	18 680		文献[41]
三角帆蚌 <i>Hyriopsis cumingii</i>	重铬酸钾	10 400		文献[42]
河蚬 <i>Corbicula manilensis</i>	抗霉素	86	64~116	文献[43]
	氯硝柳胺乙醇胺盐	235	157~351	文献[43]
	亚硝酸钠	250		文献[43]

注:表内“空白”表示未测;本研究筛选得到的数据均为 96 h LC₅₀。

Note: The “blank” in the table indicates NS. Data for this study were all 96 h LC₅₀.

此,在推导污染物的水生生物基准时,应充分考虑物种对污染物的敏感性差异。该研究对物种敏感性排序的差异性分析(图 1)发现,因放逸短沟蜷对地乐酚(农药)较敏感,在推导我国农药的水生生物基准时,放逸短沟蜷可作为敏感的软体动物类受试生物;静水椎实螺对氨(常规污染物)较敏感、河蚬对亚硝酸钠(常规污染物)较敏感,在推导常规污染物的水生生物基准时,静水椎实螺和河蚬可作为敏感的软体动物类受试生物;而淡水软体动物能在体内大量积累重金属而不产生明显毒性作用,对重金属不敏感,在推导重金属污染物的水生生物基准时,由于毒性数据缺乏,目前没有筛选出合适的淡水软体动物作为基准受试生物,这有待进一步试验研究。

根据最新研究可知^[49-52],已有关于我国本土鱼类、两栖类、甲壳类和环节动物与水生昆虫类进行受试生物筛选的研究报道,并根据不同的污染物提出相应的本土敏感受试物种,尚未出现对软体动物水质基准受试生物筛选的研究。软体动物作为污染物环境效应的重要指示生物,急需本土敏感受试生物补充我国软体动物水生生物基准。因此,该研究软体动物受试生物名单的提出为水生生物基准的研究提供了科学依据。但由于部分物种和污染物毒性数据的缺乏,难以对我国大量的本土软体动物进行敏感性分析评价,无法获得更加丰富的受试生物名单,使得该研究结果存在一定的不确定性,后续工作需加强淡水软体动物毒性试验的研究,不断积累淡水软体动物毒性数据,以降低

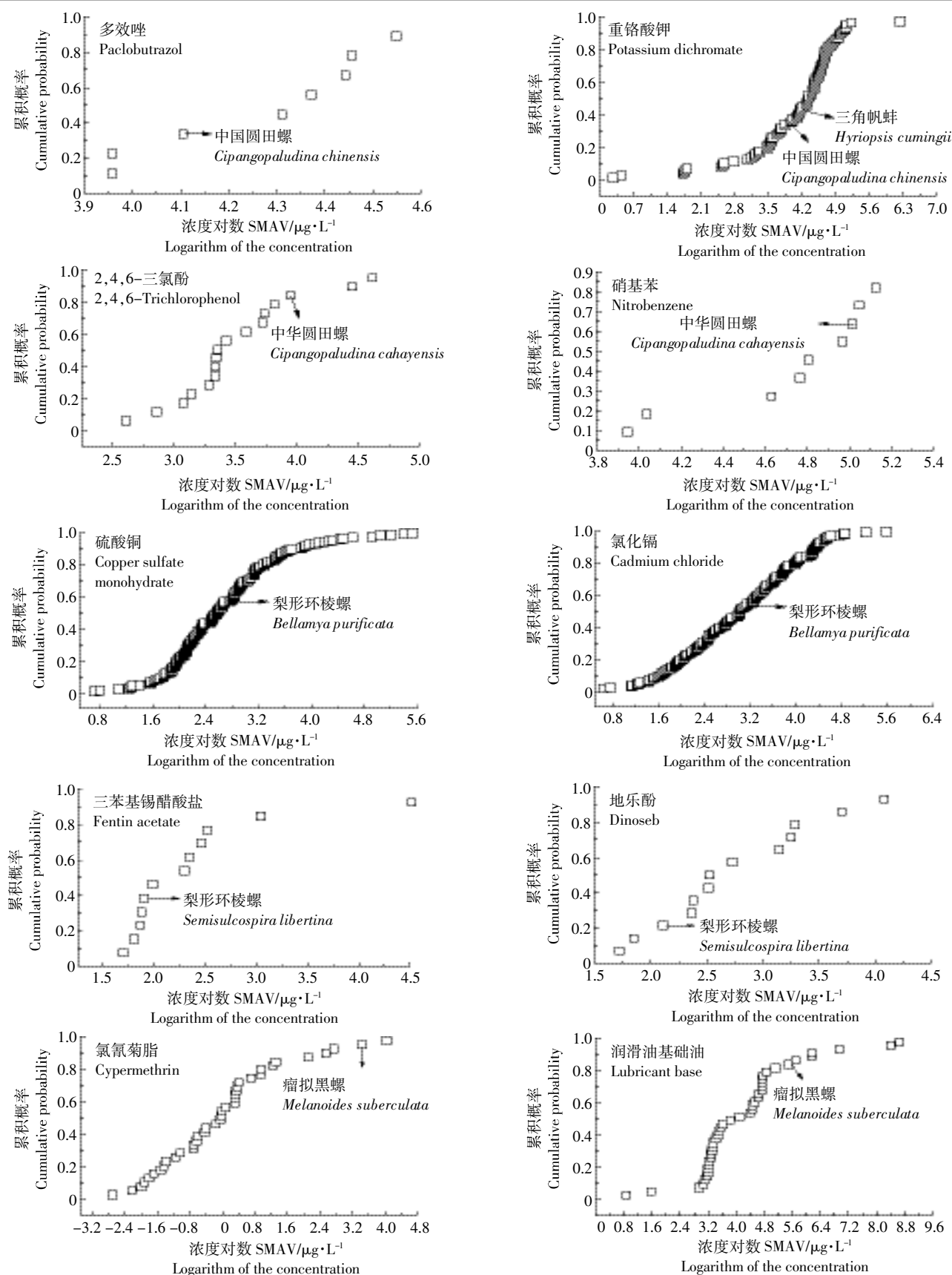
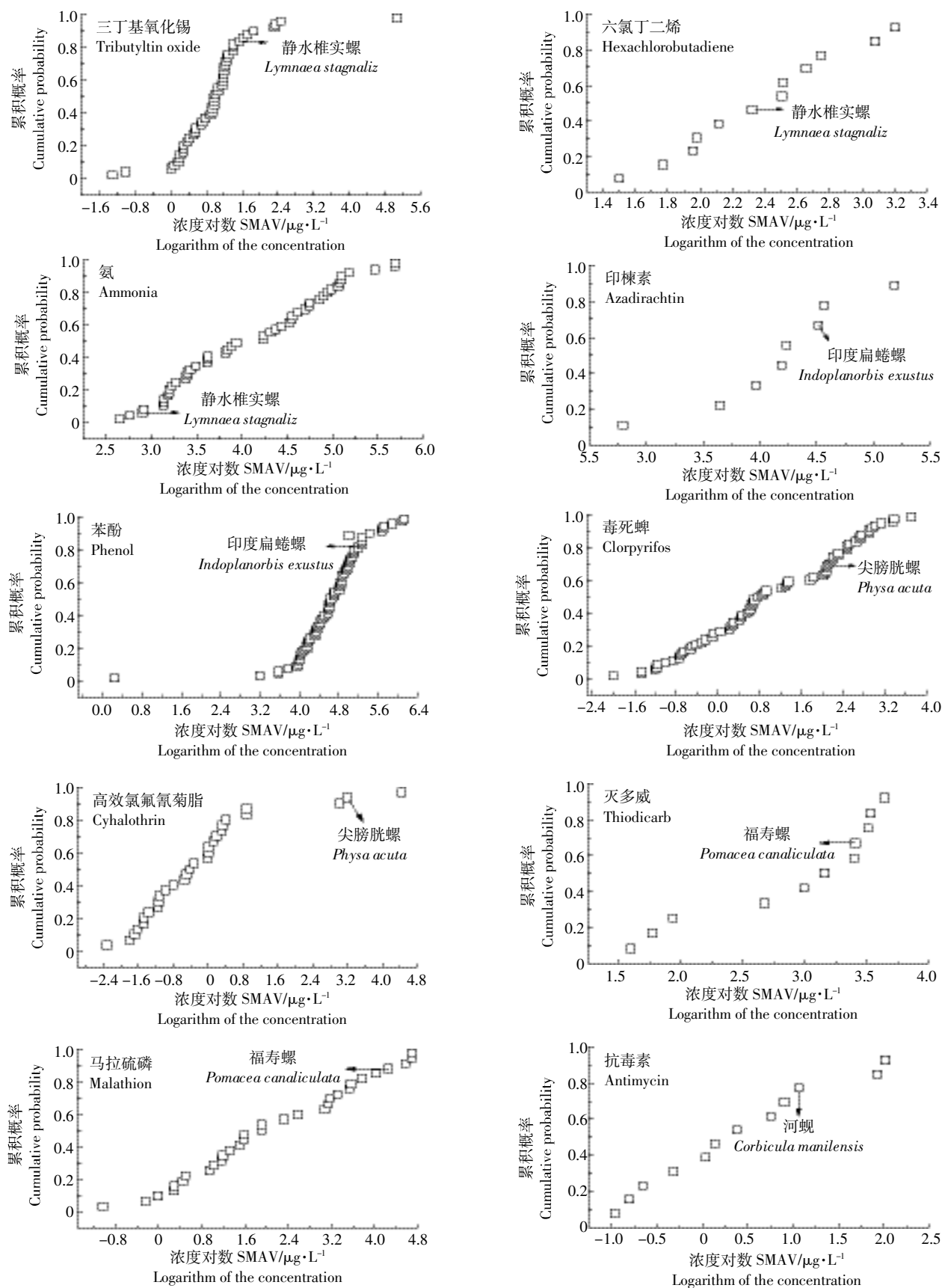


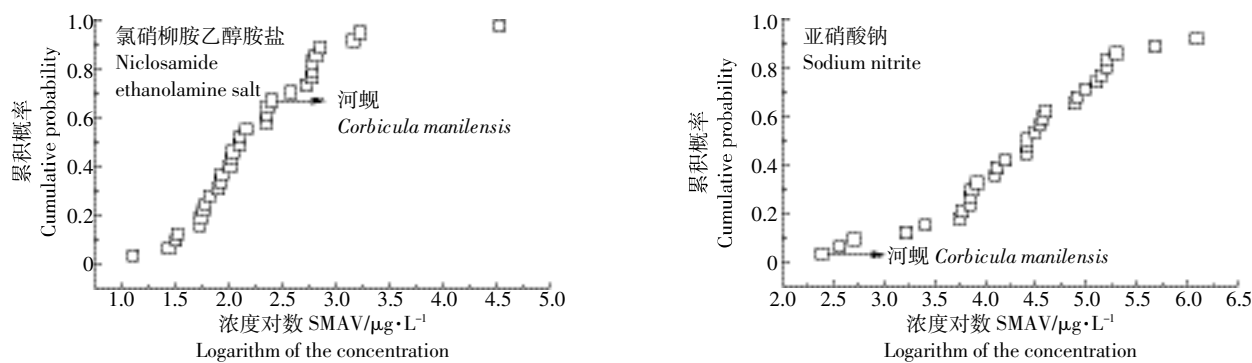
图1 22种污染物的物种敏感性分布图

Figure 1 Species sensitivity distribution of twenty-two pollutants



续图 1 22 种污染物的物种敏感性分布图

Continued figure 1 Species sensitivity distribution of twenty-two pollutants



续图 1 22 种污染物的物种敏感性分布图

Continued figure 1 Species sensitivity distribution of twenty-two pollutants

表 4 12 种软体动物对 27 种目标污染物的物种敏感性

Table 4 Species sensitivity of twelve molluscs to target pollutants

化合物 Compound	最敏感污染物 The most sensitive pollutants	生物名称 Biological name	毒性数据量/个 Toxicity data volume	排序 Rank	累积概率 Cumulative probability	物种敏感性 Species sensitivity
农药 Pesticides	多效唑	中国圆田螺(<i>Cipangopaludina chinensis</i>)	8	3	33%	相对不敏感
	三苯基锡醋酸盐	放逸短沟蜷(<i>Semisulcospira libertine</i>)	12	5	38%	相对不敏感
	地乐酚	放逸短沟蜷(<i>Semisulcospira libertine</i>)	13	3	21%	较敏感
	福美铁	放逸短沟蜷(<i>Semisulcospira libertina</i>)	6	3	43%	
	氯氰菊酯	瘤拟黑螺(<i>Melanoides tuberculata</i>)	38	37	95%	非常不敏感
	印楝素	印度扁蜷螺(<i>Indoplanorbis exustus</i>)	8	6	67%	不敏感
	印楝油	印度扁蜷螺(<i>Indoplanorbis exustus</i>)	4	3	75%	不敏感
	毒死蜱	尖膀胱螺(<i>Physa acuta</i>)	72	53	50%	不敏感
	阿维菌素	尖膀胱螺(<i>Physa acuta</i>)	7	4	50%	
	高效氯氟氰菊脂	尖膀胱螺(<i>Physa acuta</i>)	29	28	93%	不敏感
	灭多威	福寿螺(<i>Pomacea canaliculata</i>)	11	8	67%	不敏感
	马拉硫磷	福寿螺(<i>Pomacea canaliculata</i>)	31	28	88%	非常不敏感
	氯硝柳胺乙醇胺盐	河蚬(<i>Corbicula manilensis</i>)	32	21	64%	不敏感
重金属 Heavy metals	硫酸铜	梨形环棱螺(<i>Bellamya purificata</i>)	176	87	49%	相对不敏感
	氯化镉	梨形环棱螺(<i>Bellamya purificata</i>)	164	109	66%	不敏感
	三丁基氧化锡	静水椎实螺(<i>Lymnaea stagnalis</i>)	48	42	86%	非常不敏感
	重铬酸钾	三角帆蚌(<i>Hyriopsis cumingii</i>)	91	34	37%	相对不敏感
常规污染物 Conventional pollutants	2,4,6-三氯酚	中华圆田螺(<i>Cipangopaludina cahayensis</i>)	16	14	82%	非常不敏感
	硝基苯	中华圆田螺(<i>Cipangopaludina cahayensis</i>)	9	6	64%	不敏感
	润滑油基础油	瘤拟黑螺(<i>Melanoides tuberculata</i>)	42	36	84%	非常不敏感
	六氯丁二烯	静水椎实螺(<i>Lymnaea stagnalis</i>)	12	6	46%	相对不敏感
常规污染物 Conventional pollutants	氨	静水椎实螺(<i>Lymnaea stagnalis</i>)	48	4	8%	敏感
	2,3,5-三氯酚	小椎实螺(<i>Galba pervia</i>)	2	1	33%	
	2,3,6-三氯酚	小椎实螺(<i>Galba pervia</i>)	3	1	25%	
	苯酚	印度扁蜷螺(<i>Indoplanorbis exustus</i>)	71	54	77%	不敏感
	抗霉素	河蚬(<i>Corbicula manilensis</i>)	12	11	85%	非常不敏感
	亚硝酸钠	河蚬(<i>Corbicula manilensis</i>)	33	1	3%	非常敏感

注:表内“空白”表示毒性数据量少于 8 个时不进行物种敏感性分析。

Note:The “blank” in the table indicates that no species sensitivity was analyzed when the number of toxicity data was less than eight.

我国水质基准研究的不确定性。

4 结论

(1)筛选出中国圆田螺、中华圆田螺、梨形环棱螺、放逸短沟蜷、瘤拟黑螺、静水椎实螺、小椎实螺、印度扁蜷螺、尖膀胱螺、福寿螺、三角帆蚌及河蚬 12 种代表性淡水软体动物的污染物毒性数据,获得对这些软体动物毒性最大的污染物,包括农药、重金属和常规污染物这三类污染物。通过物种敏感性分析,放逸短沟蜷、静水椎实螺和河蚬在地乐酚、氨及亚硝酸钠的物种敏感性排序中的累计概率均小于 30%,属于敏感物种,适合作为水生生物基准受试生物。

(2)由于生物对不同类型污染物的敏感性存在差异,放逸短沟蜷对地乐酚的累积概率为 21%,为较敏感物种,因此在推导农药类污染物的水生生物基准时,放逸短沟蜷可为理想的淡水软体动物基准受试生物;静水椎实螺对氨的累积概率为 8%,河蚬对亚硝酸钠的累积概率为 3%,这两个软体动物为对常规污染物敏感物种,因此在推导常规污染物的水生生物基准时,静水椎实螺和河蚬可为理想的基准受试生物。由于所选代表性淡水软体动物对重金属不敏感,不适合作为重金属敏感性受试生物。

参考文献:

- [1] 刘月英. 中国经济动物志:淡水软体动物[M]. 北京:科学出版社, 1979.
LIU Yue-ying. China's economic animals: Freshwater molluscs[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [2] 黎燕琼, 郑绍伟, 龚固堂, 等. 生物多样性研究进展[J]. 四川林业科技, 2011, 32(4): 12-19.
LI Yan-qiong, ZHENG Shao-wei, GONG Gu-tang, et al. Development of study in biodiversity[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2011, 32(4): 12-19.
- [3] 蔡永久, 姜加虎, 张 路, 等. 长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 4985-4999.
CAI Yong-jiu, JIANG Jia-hu, ZHANG Lu, et al. Structure of macro-zoobenthos in lakes along the Yangtze River and relationships with environmental characteristics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(16): 4985-4999.
- [4] US EPA. National recommended water quality criteria[R]. Washington DC: US EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, 2009.
- [5] 吴召仕, 蔡永久, 陈宇炜, 等. 太湖流域主要河流大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 湖泊科学, 2011, 23(5): 686-694.
WU Zhao-shi, CAI Yong-jiu, CHEN Yu-wei, et al. Assemblage structure investigation of macrozoobenthos and water quality bioassessment of the main river systems in Taihu Basin[J]. *Journal of Lake Science*, 2011, 23(5): 686-694.
- [6] 王 博, 廖剑宇, 刘全儒, 等. 东江干流浮游动物群落结构特征及与水质的关系[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013(6): 608-612.
WANG Bo, LIAO Jian-yu, LIU Quan-ru, et al. Community structure of zooplankton and its relation with water quality in Dongjiang River[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2013(6): 608-612.
- [7] 苏 玉, 曹晓峰, 黄 艺. 应用底栖动物完整性指数评价滇池流域入湖河流生态系统健康[J]. 湖泊科学, 2013, 25(1): 91-98.
SU Yu, CAO Xiao-feng, HUANG Yi. Stream ecosystem health assessment of inflow rivers in Lake Dianchi catchment by using Benthic Integrity Biotic Index[J]. *Journal of Lake Science*, 2013, 25(1): 91-98.
- [8] Hao O. Bioindicators for water quality evaluation: A review[J]. *Journal of the Chinese Institute of Environmental Engineering*, 1996, 6(1): 1-19.
- [9] Moncheva S, Namiesnik J, Apak R, et al. *Rapana venosa* as a bioindicator of environmental pollution[J]. *Chemistry and Ecology*, 2011, 27(1): 31-41.
- [10] Clarke A H. Gastropods as indicators of trophic lake stages[J]. *The Nautilus*, 1979, 94(4): 138-142.
- [11] 祝爱民, 肖 扬, 金 焰. 白马湖软体动物体内重金属含量调查[J]. 仪器仪表与分析监测, 2013, 5: 33-36.
ZHU Ai-min, XIAO Yang, JIN Yan. Survey of heavy metals in mollusk body of the Baima Lake[J]. *Instrument Analysis Monitoring*, 2013, 5: 33-36.
- [12] 高宝峰, 何 力, 张 征, 等. 铜锈环棱螺对汉江中下游重金属污染的指示作用[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(1): 128-131.
GAO Bao-feng, HE Li, ZHANG Zheng, et al. Indicative function of *Bellamyia aeruginosa* in the middle and lower stream of Hanjiang River[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(1): 128-131.
- [13] 赵本良, 章家恩, 代 魏, 等. 石灰氮对福寿螺的急性毒性效应[J]. 生态学杂志, 2011, 30(6): 1147-1152.
ZHAO Ben-liang, ZHANG Jia-en, DAI Wei, et al. Acute toxic effect of calcium cyanamide on Golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(6): 1147-1152.
- [14] 马军国, 张榜军, 李效宇. 尖膀胱螺对毒死蜱毒性的生物化学响应[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(5): 114-118.
MA Jun-guo, ZHANG Bang-jun, LI Xiao-yu. Biochemistry response of *Physa acuta* to chlorpyrifos toxicity[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(5): 114-118.
- [15] 宋志慧, 丛 林. 氧化乐果对静水椎实螺急性毒性和酶活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 6: 2534-2535.
SONG Zhi-hui, Cong Lin. Acute toxicity and influence on enzyme activities in *Lymnaea stagnalis* exposed to omethoate[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 6: 2534-2535.
- [16] Stephen C E, Mount D I, Hansen D J, et al. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses[M]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 1985.
- [17] 郑师梅, 周启星, 熊红霞. 腹足纲动物毒性测试候选物种的研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(8): 1390-1397.
ZHENG Shi-mei, ZHOU Qi-xing, XIONG Hong-xia. Discussion on

- candidate species of gastropoda organisms in toxicity testing[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(8):1390-1397.
- [18] 宋志慧, 杨鲁娜. 三氯酚对小椎实螺急性毒性作用和过氧化物酶活性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(20):10439-10441.
- SONG Zhi-hui, YANG Lu-na. Effects of 2, 3, 5-TCP and 2, 3, 6-TCP on acute toxicity and POD activity of *Galba perversa*[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(20):10439-10441.
- [19] 齐钟彦. 中国经济软体动物[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- QI Zhong-yan. China's economic molluscs[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- [20] 国家环境保护局. 生物监测技术规范(水环境部分)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1986.
- Ministry of environment protection of the People's Republic of China. Technical specifications requirements for monitoring of biology (Part of water environment) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1986.
- [21] Van Vlaardingen P L A, Verbruggen E M J. Guidance for the derivation of environmental risk limits within the framework of International and national environmental quality standards for substances in the Netherlands' (INS). Revision (PB 601782001) [R]. Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment, 2007.
- [22] 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: United States Environmental Protection Agency, 1985.
- [23] CCME. A protocol for the derivation of water quality guidelines for the protection of aquatic life 2007 [R]. Canada Ottawa: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2007.
- [24] 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(7):757-761.
- MENG Wei, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao. Analysis of guidelines for deriving water quality criteria in the United States and construction of related criteria in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009(7):757-761.
- [25] 闫振广, 刘征涛, 孟 伟. 辽河流域六价铬和无机汞应急水质标准研究[J]. *中国工程科学*, 2013, 15(3):26-32.
- YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, MENG Wei. Development of emergency water quality standards for Cr^{6+} and Hg^{2+} in Liaohe River basin[J]. *Engineering Science*, 2013, 15(3):26-32.
- [26] OECD. OECD Guidelines for the testing of chemicals[M]. Washington DC: Organization for Economic, 1994.
- [27] 马军国, 李效宇. 尖膀胱螺的生物学特征及光照对其生长繁殖影响的初步研究[J]. *四川动物*, 2012, 31(5):763-767.
- MA Jun-guo, LI Xiao-yu. Biological characteristics of *Physa acuta* and the effects of light on their growth and development[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2012, 31(5):763-767.
- [28] 杨叶欣, 胡隐昌, 李小慧, 等. 福寿螺在中国的入侵历史, 扩散规律和危害的调查分析[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(5):245-250.
- YANG Ye-xin, HU Yin-chang, LI Xiao-hui, et al. Historical invasion, expansion process and harm investigation of *Pomacea canaliculata* in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(5):245-250.
- [29] Liu Z, Zhou F, Jin H. Relationship between bioaccumulation, distribution of met and lipid content of aquatic organisms[J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 1995, 7(2):212-217.
- [30] 赵志刚, 张志生, 高士祥. 硝基苯对3种中国土著水生生物的毒性[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(1):54-59.
- ZHAO Zhi-gang, ZHANG Zhi-sheng, GAO Shi-xiang. Toxicity of nitrobenzene to three native species of aquatic organisms[J]. *Rural Eco-Environment*, 2011, 27(1):54-59.
- [31] 张清顺. 铜、镉对梨形环棱螺毒理效应的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- ZHANG Qing-shun. Studies on toxicological effects of copper and cadmium in *Bellamya purificata* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [32] Hashimoto Y, Nishiuchi Y. Establishment of bioassay methods for the evaluation of acute toxicity of pesticides to aquatic organisms[J]. *Journal of Pesticide Science*, 1981, 6(2):257-264.
- [33] Mule M, Lomte V. Cypermethrin (synthetic pyrethroid) toxicity to freshwater snail, *Thiara tuberculata* [J]. *Pollution Research*, 1992, 11(4):225-229.
- [34] Panigrahi A K, Konar S K. Acute toxicity of petroleum pollutants to fish, plankton and mollusc[J]. *Kalyani W Bengal India*, 1990, 8:229-232.
- [35] Mathijssen-Spiekman, Canton J H, Roghair C J, et al. Research after the toxicity of TBTO for a number of fresh water organisms (PB 668118-001) [R]. US: Public Health and Environ Chemosphere, 1989.
- [36] Leeuwangh P, Bult H, Schneiders L. Toxicity of hexachlorobutadiene in aquatic organisms[J]. *Elsevier Scientific Publishing Co, Amsterdam, Netherlands*, 1975, 6:167-176.
- [37] Williams K A, Green D W J, Pascoe D. Studies on the acute toxicity of pollutants to freshwater macroinvertebrates[J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1986, 106(1):61-70.
- [38] Singh K, Singh A, Singh D K. Molluscicidal activity of neem (*Azadirachta indica* A. Juss) [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 1996, 52(1):35-40.
- [39] Agrawal H. Evaluation of the toxicity of phenol and sodium pentachlorophenate to the snail *Indoplanorbis exustus* (Deshayes) [J]. *Journal of Animal Morphology and Physiology*, 1987, 34(1):107-112.
- [40] 马军国, 李效宇. 3种常用杀虫剂对尖膀胱螺的急性毒性试验[J]. *水生态学杂志*, 2011, 32(6):100-104.
- MA Jun-guo, LI Xiao-yu. Acute toxicity of lambda-cyhalothrin, imidacloprid and avermectin on *Physa acuta* [J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(6):100-104.
- [41] Tejada A, Bajet C, Magbauna M, et al. Toxicity of pesticides to target and non-target fauna of the lowland rice ecosystem[J]. *Environmental Toxicology in South East Asia*, 1994, 5:89-103.
- [42] 金洪钧, 周凤帆. 铬对三角帆蚌 (*Hyriopsis cumingii* Lea) 的急性毒性[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1978, 4:96-101.
- JIN Hong-jun, Chou Feng-fan. Acute chromium toxicity of the freshwater mussel, *Hyriopsis cumingii* Lea [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 1978, 4:96-101.

- [43] Chandler Jr, Jack H, Leif L, et al. Toxicity of fishery chemicals to the Asiatic clam, *Corbicula manilensis*[J]. *The Progressive Fish-Culturist*, 1979, 41(3):148-151.
- [44] US Environmental Protection Agency. 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.
- [45] Solomon K R, Baker D B, Richards R P, et al. Ecological risk assessment of atrazine in North American surface waters[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1996, 15(1):31-76.
- [46] Hose G C, Van P J. Confirming the species sensitivity distribution concept for endosulfan using laboratory, mesocosm, and field data[J]. *Archives of Environment Contamination and Toxicology*, 2004, 47(4):511-520.
- [47] 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.
- [48] Wheeler J R, Grist E P M, Leung K M Y, et al. Species sensitivity distribution: Data and model choice[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 45(1):192-202.
- [49] 王晓楠, 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.
WANG Xiao-nan, ZHENG Xin, YAN Zhen-guang, et al. Screening of native fishes for deriving aquatic life criteria[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(4):341-348.
- [49] 蔡靳, 闫振广, 何丽, 等. 水质基准两栖类受试生物筛选[J]. 环境科学研究, 2014(4):349-355.
CAI Jin, YAN Zhen-guang, HE Li, et al. Screening of native amphibians for deriving aquatic life criteria[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014(4):349-355.
- [52] 郑欣, 闫振广, 王晓楠, 等. 水质基准甲壳类受试生物筛选[J]. 环境科学研究, 2014, 27(4):356-364.
ZHENG Xin, YAN Zhen-guang, WANG Xiao-nan, et al. Screening of native crustaceans for deriving aquatic life criteria[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(4):356-364.
- [53] 王伟莉, 闫振广, 刘征涛, 等. 水质基准本土环节动物与水生昆虫受试生物筛选[J]. 环境科学研究, 2014, 27(4):365-372.
WANG Wei-li, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, et al. Screening of native annelids and aquatic insects for deriving aquatic life criteria[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(4):365-372.