

五种底栖动物对优控污染物的敏感性评价

王伟莉¹, 闫振广^{1*}, 何丽¹, 王晓南^{1,2}, 孟双双¹, 郑欣¹, 刘征涛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. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 参照美国水生生物基准技术指南以及欧盟、美国和中国优控污染物名录, 搜集、筛选了伸展摇蚊、日本沼虾、河蚬、霍甫水丝蚓和泥鳅等 5 种代表性淡水底栖动物的优控污染物生物毒性数据, 通过数据分析, 筛选出对淡水底栖动物毒性最大的 10 种优控污染物, 主要包括有机氯农药和重金属两大类。对筛选得到的 10 种优控污染物的物种敏感度分布进行了分析, 结果表明伸展摇蚊与泥鳅对有机氯农药较为敏感, 具有作为相关农药污染的指示生物以及水质基准研究的受试生物的潜力。

关键词: 底栖动物; 优控污染物; 物种敏感性; 有机氯农药; 重金属

中图分类号: X171.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2013)10-1856-07

Sensitivity evaluation of five zoobenthos to priority pollutants. WANG Wei-li¹, YAN Zhen-guang^{1*}, HE Li¹, WANG Xiao-nan^{1,2}, MENG Shuang-shuang¹, ZHENG Xin¹, LIU Zheng-tao¹ (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. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *China Environmental Science*, 2013, 33(10): 1856~1862

Abstract: The toxicity data of priority pollutants of five representative freshwater zoobenthos were collected and screened according to the water quality criteria derivation guidelines of the US and the lists of priority pollutant of EU、USA and China. The five zoobenthos included *Chironomus tentans*、*Macrobrachium rosenbergii*、*Corbicula manilensis*、*Limnodrilus hoffmeisteri* and *Misgurnus anguillicaudatus*. A list of ten priority pollutants that were most toxic to the five zoobenthos was obtained, and it mainly included two categories of chemicals — organochlorine pesticides and heavy metals. Species sensitivity distributions of the ten priority pollutants were analyzed. The results showed that *Chironomus tentans* and *Misgurnus anguillicaudatus* are more sensitive to organochlorine pesticides, so they may be the indicator organisms of relational pesticides pollution and the tested organisms in water quality criteria study.

Key words: zoobenthos; priority pollutant; species sensitivity; organochlorine pesticides; heavy metals

底栖动物是水生生态系统的重要组成部分, 对维持水生生态系统功能完整性有重要作用^[1]. 淡水底栖动物主要包括环节动物、软体动物及节肢动物等无脊椎底栖动物和部分底栖鱼类^[2], 广泛分布于各种水体中. 底栖动物是生态系统中物质循环和能量流动的积极消费和转移者, 有着承上启下的关键作用^[3], 并通过摄食、掘穴和建管等扰动活动直接或间接影响水生生态系统^[2,4], 能调节沉积物-水体之间的物质交换, 促进水体自净等^[5].

由于底栖动物种群结构较为稳定; 活动能力较弱, 易受污染物影响; 生活周期长而稳定, 能综合反应较长时间段内的水体质量; 物种多样性高, 不同物种对环境敏感度不同; 种类较多且分布广

泛, 被视为水环境监测中重要的指示生物^[4], 利用底栖动物的种群结构、优势种类、数量等环境评价指标来评价水体的质量状况是目前发展最好、应用最广、得到广泛推荐的水质生物评价方法体系^[5-10]. 不同种类的底栖动物对环境的耐受度不同, 如摇蚊和蜉蝣目物种对水体污染较为敏感, 而寡毛类则为中污染和重污染的指示物种^[11].

美国及加拿大在推算淡水水质基准过程中,

收稿日期: 2013-02-26

基金项目: 国家水体污染与治理科技重大专项(2012ZX07501-003-06); 中国环境科学研究院改革启动经费专项项目(2011GQ-02, 2012YSKY18)

* 责任作者, 副研究员, zgyan@craes.org.cn

明确规定要求受试生物至少来自三门八科,其中至少包括一种底栖甲壳类生物^[12-13]。优控污染物是从众多有毒有害污染物中筛选出来的量大面广,对人体健康和生态平衡危害大,且具不可逆性和潜在威胁的污染物^[14-15]。自 20 世纪 70 年代起,美国、日本、前苏联及欧盟等纷纷公布了优控污染物名单^[14],我国也在 20 世纪 80 年代末开展了优控污染物的筛选工作^[15],确立了我国优控污染物名单。研究底栖动物对不同优控污染物的敏感性,筛选较为敏感的底栖生物并分析不同底栖动物的耐受度,对指示水环境质量和水质基准研究具有重要意义。

本文选择 5 种中国常见底栖动物:伸展摇蚊(*Chironomus tentans*)、日本沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)、河蚬(*Corbicula manilensis*)、霍普水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)和泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*),筛选出对 5 种底栖动物毒性最大的优控污染物,同时确定底栖动物对不同类别优控污染物的敏感性,为进一步筛选特异性水体污染指示生物和水质基准受试物种提供依据。

1 材料与方法

1.1 底栖动物的选择

选择 5 种底栖动物:伸展摇蚊、日本沼虾、河蚬、霍甫水丝蚓和泥鳅,分别属于节肢动物门昆虫纲及甲壳纲、软体动物门、环节动物门和脊椎动物门,基本上能够代表我国水体中常见的底栖动物种类^[16-20],多用于水质评价。此外,在河流水质评价体系中,沼虾与蚬类视为中等耐污种,寡毛纲及泥鳅视为耐污种群,敏感种多为一些蜉蝣目、翅目种属^[21],摇蚊幼虫对不同种类的污染物敏感性不同^[22],这 5 种底栖动物对于淡水底栖生物类群具有较好的代表性。

1.2 底栖动物毒性数据筛选与分析

参考美国水生生物基准技术指南^[12]的数据筛选原则,对 ECOTOX 毒性数据库^[23](<http://cfpub.epa.gov/ecotox/>)以及 CNKI 数据库(<http://www.cnki.net/>)^[24]中获得的底栖动物毒性数据进行初步筛选。数据筛选原则为:摇蚊幼虫的急性毒性试验指标为 48h LC₅₀,其他底栖动物是 96h LC₅₀;

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;同种污染物的急性毒性数据如果差异过大,应被判断为有疑点的数据而谨慎使用;一些有问题或有疑点的数据(如没有设立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^[13]。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,使用几何平均值。

对筛选得到的合格急性毒性数据进行整理和排序。大致步骤:求得同种污染物的 SMAV (种平均急性毒性值),对同种底栖动物的不同污染物的 SMAV 从小到大进行排序,根据污染物 CAS 号综合中国、美国和欧盟^[15,25-26]发布的优控污染物名单进行筛选,获得对这 5 种底栖动物毒性最大的优控污染物类别。

1.3 优控污染物毒性数据筛选与分析

针对筛选得到的对 5 种底栖动物毒性最大的优控污染物名单,参考上述数据筛选原则,重新筛选各优控污染物的急性生物毒性数据,将筛选得到的合格急性毒性数据进行分析与排序,分析 5 种底栖生物对各优控污染物的敏感度,确定对优控污染物敏感的底栖生物类别。

2 结果与分析

2.1 底栖动物敏感的优控污染物

对 5 种底栖动物的急性毒性数据筛选排序,分别得到毒性最大的 3 种优控污染物,结果如表 1 所示。由表 1 可知,对 5 种底栖动物毒性最大的优控污染物分为两类,农药和重金属。重金属有 3 种,分别为 Cu²⁺、Zn²⁺和 Hg²⁺。除对伸展摇蚊毒性最大的毒死蜱为有机磷农药外,表 1 中其他农药均为有机氯农药,包括滴滴涕、氯丹、五氯酚及钠盐、硫丹、林丹和异狄氏剂及异狄氏醛。对伸展摇蚊和泥鳅毒性最大的 3 种优控污染物均为农药,对泥鳅毒性最大的 3 种优控污染物均属有机氯农药。河蚬和日本沼虾对重金属较为敏感。节肢动物伸展摇蚊、日本沼虾与脊椎动物泥鳅在 5 种底栖动物中对优控污染物较为敏感,而河蚬与霍普水丝蚓为优控污染物的耐受种。

表 1 对 5 种底栖动物毒性最大的优控污染物
Table 1 The most toxic priority pollutants to the five zoobenthos

底栖生物	优控污染物	SMAV(μg/L)	浓度范围(μg/L)
伸展摇蚊* <i>Chironomus tentans</i>	毒死蜱 ^[23]	0.72	0.63~0.85
	滴滴涕 ^[23]	1.00	/
	氯丹 ^[23]	5.80	/
河蚬 <i>Corbicula manilensis</i>	五氯酚及钠盐 ^[16,23]	250.00	180.00~270.00
	Cu ²⁺ ^[23,27]	1128.72	281.18~2600.00
	Zn ²⁺ ^[23]	6040.00	4720.00~7260.00
日本沼虾 <i>Macrobrachium rosenbergii</i>	硫丹 ^[23]	1.69	0.20~140.00
	Cu ²⁺ ^[23,28]	73.90	9.00~10250.00
	Hg ²⁺ ^[23,29]	157.18	50.00~430.00
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	林丹 ^[23]	430.00	/
	五氯酚及钠盐 ^[23]	642.26	330.00~1250.00
	Hg ²⁺ ^[23]	758.95	180.00~3200.00
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	硫丹 ^[23]	1.20	/
	异狄氏剂和异狄氏醛 ^[23]	4.90	/
	五氯酚及钠盐 ^[23]	120.00	/

注: *于伸展摇蚊的毒性数据均指对伸展摇蚊幼虫的毒性; /表示无数据

2.2 底栖动物对优控污染物的敏感性

搜集、筛选对 5 种底栖动物毒性最大的 10 种优控污染物的急性毒性数据,绘制优控污染物的物种敏感性分布曲线,并标注其中的底栖动物,如图 1 所示.根据《生物监测技术规范(水环境部分)》^[30],将化学物质对生物的毒性分级分为 5 个等级:LC₅₀ <1mg/L 为剧毒;LC₅₀ = 1~100mg/L 为高毒;LC₅₀ = 100~1000mg/L 为中等毒性;LC₅₀ = 1000~10000mg/L 为低毒;LC₅₀ >10000mg/L 为微毒或无毒.参照此毒性分级标准,除 Cu²⁺和 Zn²⁺对河蚬为高毒,其他各底栖动物最敏感的优控污染物对底栖动物均为剧毒.

根据荷兰水质基准文件^[31],在物种敏感度分布曲线(即 SSD 曲线)中,累积概率小于 5%的物种一般视为敏感物种,大于 50%为不敏感物种.由表 1 得知,毒死蜱是对伸展摇蚊毒性最大的优控污染物,但是由图 1 可知在毒死蜱整体的毒性数据中,伸展摇蚊并不是很敏感的物种,其敏感性排序在 30%以外.而在滴滴涕与氯丹毒性排序中,伸展摇蚊较敏感,分别在前 10%和前 5%以内,即伸展摇蚊可能属于对有机氯农药较为敏感的物种.

观察对河蚬毒性最大的 3 种优控污染物(五氯酚及钠盐、Cu²⁺和 Zn²⁺)的物种敏感度分布曲线,发现对于这 3 种污染物,河蚬均属不敏感物种,累积概率均大于 50%(排序为五氯酚及钠盐 > Zn²⁺ > Cu²⁺).对于 Cu²⁺,河蚬属耐污种,其毒性值远

大于多数其他物种.

对日本沼虾毒性最大的 3 种优控污染物的物种敏感度曲线中,该生物均处于较不敏感地位,即对于这 3 种污染物来说,日本沼虾为不敏感物种,累积概率均大于 30%,其中对 Cu²⁺的累积概率大于 50%,日本沼虾在这 3 种污染物中的累积概率排序为硫丹 > Hg²⁺ > Cu²⁺.

在对霍甫水丝蚓毒性最大的 3 种优控污染物曲线中,该生物累积概率均在 60%以上(林丹 > 五氯酚及钠盐 > Hg²⁺),表明霍甫水丝蚓对这 3 种污染物不敏感.

由硫丹、异狄氏剂及异狄氏醛与五氯酚及钠盐物种敏感度曲线可知,泥鳅对硫丹较为敏感,累积概率为 28%,在异狄氏剂及异狄氏醛物种敏感度分布曲线中泥鳅排序较后,累积概率 > 70%.

有 3 种底栖动物对五氯酚及钠盐具有一定敏感性,敏感性排序为泥鳅 > 日本沼虾 > 霍甫水丝蚓,但累积概率均大于 30%;日本沼虾和霍甫水丝蚓对 Hg²⁺、Cu²⁺和硫丹也具有一定的敏感性,其中日本沼虾对 Hg²⁺的敏感性大于霍甫水丝蚓,但它们对汞的累积概率均大于 30%;日本沼虾与河蚬对 Cu²⁺的累积概率均大于 50%,表明对 Cu²⁺不敏感(日本沼虾 > 河蚬);泥鳅与日本沼虾对硫丹相对较敏感,毒性排序在 30%左右(泥鳅 > 日本沼虾).另外,河蚬对 Zn²⁺的累积概率大于 50%,因此,5 种底栖动物对 3 种重金属都属于不敏感物种.

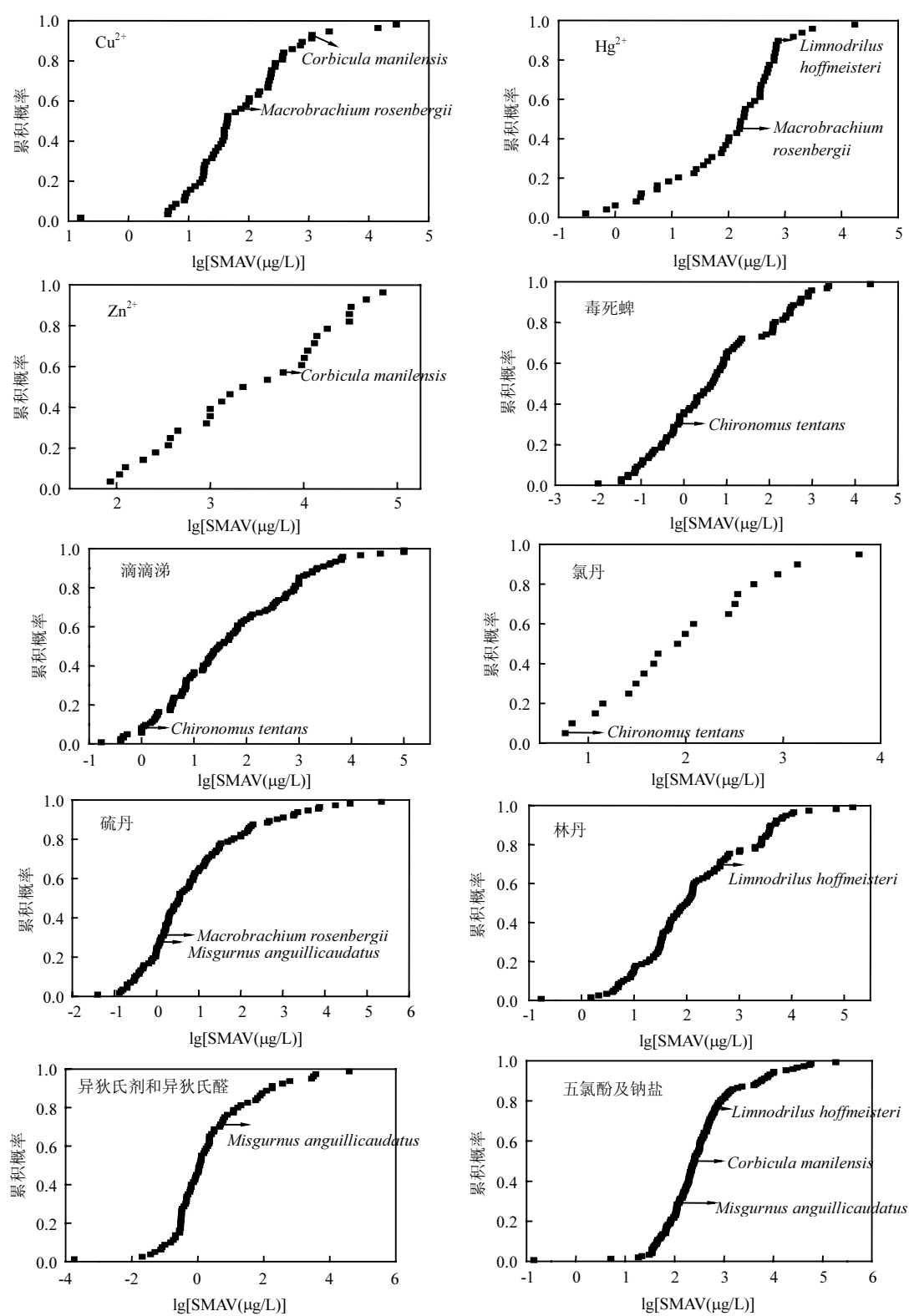


图 1 10 种优控污染物的物种敏感度分布曲线

Fig.1 Species sensitivity distribution of the ten priority pollutants

伸展摇蚊对滴滴涕和氯丹,以及泥鳅对硫丹和五氯酚及钠盐的累积概率小于 30%,表明这 2 种底栖动物对有机氯农药相对敏感,其中伸展摇蚊对氯丹尤为敏感,可作为此种农药的敏感性受试物种。

3 讨论

底栖动物在水生生态系统的食物链中处于中间环节,底栖动物群落健康与否,在很大程度上反映了整个水生态系统的健康程度^[21]。同时底栖动物运动不敏捷,定量采集容易,对水质和底质两方面的污染反应都敏感,其种类的多样性比鱼类大,其对水体污染的耐受性和适应性因种类或分类群的不同而有较大变化。因而底栖动物多在河流水质生态评价中用作指示生物。欧美国家已将底栖动物作为水质指示动物,用来检验水体质量,我国在这方面也做了很多研究^[32]。通过水质化学分析监测水质花费很大,而通过底栖动物进行生物监测可了解到水质的长期变化,且成本低,能综合表征污染物的毒性。湖泊中摇蚊科部分种的幼虫(如大红德永摇蚊(*Tokunagayusurika akamusi*)、羽摇蚊(*Chironomus plumosus*)和寡毛纲少数种[如霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)]被广泛用来作为水体污染指示生物^[33]。

研究底栖生物对污染物的敏感性对评价水质有重要意义。进入水体的有毒有害污染物种类众多,很多具有难降解及三致(致癌、致畸和致突变)效应,对生态环境和人体健康造成严重的、甚至是不可逆的影响。而优控污染物因量大面广、对人体健康和生态平衡危害大,更具潜在威胁,需要优先监测和控制^[15,34]。筛选对底栖生物敏感的优控污染物,对建立优控污染物生态评价及水质基准有重要意义。

摇蚊幼虫生活在各种类型的水体中,是种类最多,分布最广,密度和生物量最大的淡水底栖动物类群之一,人们常用其作为水体污染的主要指示生物^[35-37]。有研究表明,用摇蚊幼虫监测农药比用鱼类监测效果更好,对毒死蜱和 DDT 监测较灵敏^[38]。本文筛选结果显示,优控污染物中毒死蜱与滴滴涕、氯丹对伸展摇蚊最为敏感,同时在滴

滴滴涕与氯丹的物种敏感度分布曲线中,伸展摇蚊处于很敏感的地位,可将伸展摇蚊作为对滴滴涕和氯丹污染的指示生物,同时在研究这 2 类优控污染物毒性或者制定相关水质基准时,应考虑摇蚊幼虫的毒性效应。

本文筛选得到的另一种敏感的底栖动物为泥鳅。泥鳅一般被认为是耐污能力较强的淡水底栖鱼类^[39],对重金属的耐受力强于其他水生生物^[40],但对农药较为敏感。文献^[17]表明,4 种防治棉花害虫的农药对泥鳅的急性毒性较大。本文研究表明泥鳅对硫丹和五氯酚及钠盐等有机氯农药较为敏感,在这 2 种优控污染物的监测中可选择泥鳅作为底栖指示生物。

另外 3 种底栖动物,日本沼虾、河蚬和霍甫水丝蚓对优控污染物均表现出不甚敏感或者不敏感。很多研究表明,日本沼虾对一些重金属和有机污染物反应较为敏感^[28,41-42]。本文研究结果显示,日本沼虾在对其毒性最大的 3 种优控污染物的敏感度排序中均相对不敏感,但日本沼虾对硫丹及 2 种重金属的毒性值确实较小,具有一定的敏感性。对河蚬的毒性研究较少,主要集中在其生物学特性、分类、胚胎发育、人工繁殖、时空分布、营养成分分析、呼吸和排泄等生理生化活性,对潮间带无机氮迁移转化的影响以及对重金属及有毒物质的富集作用等方面^[43-45]。金小伟等^[16]人研究了氯酚类化合物对河蚬的毒性,结果表明除五氯酚对河蚬为剧毒外,其他两种氯酚 2,4-DCP 和 2,4,6-TCP 毒性较弱,此外河蚬对 3 种氯酚的毒性相比鱼类和其他水生生物偏低。霍甫水丝蚓为世界分布的优势种^[32],作为耐污种在水体生态评价中具有重要地位^[21],多出现在污染较为严重的水体中。我国对霍甫水丝蚓的毒性研究较少,一些苯系物对霍甫水丝蚓为中毒或者低毒,重金属的相关研究也较少,一般多用来指示水体污染状态^[46-47]。本研究表明,在对霍甫水丝蚓毒性最大的 3 种优控污染物中,霍甫水丝蚓均不敏感。

对 5 种底栖动物毒性最大的优控污染物为农药与重金属。农药除毒死蜱为有机磷农药外,其他均为有机氯农药。毒死蜱作为替代高毒有机磷类农药的主要有机农药品种,在我国应用日益广

泛,其对于多数水生生物属于高毒性物质^[48-49]。本文中毒死蜍对伸展摇蚊毒性为剧毒,但伸展摇蚊对毒死蜍的敏感性一般。表 1 中其他如滴滴涕、硫丹、氯丹、林丹、五氯酚及钠盐和异狄氏剂及异狄氏醛为有机氯农药。有机氯农药(OCPs)被广泛应用于杀灭农业害虫和卫生害虫。其中滴滴涕(DDT)、艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂等由于难降解和高生态毒性而广泛受重视,被列入《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》^[50]中首批控制的 12 种化合物名单中。OCPs 性质稳定,在水体、土壤和生物体内难以降解,具有持久性、高残留,可长期贮存在水体、土壤、沉积物或生物体内,并可在生物圈内逐级富集累积,直接威胁着生态环境的安全及人类健康^[33,51-52]。伸展摇蚊和泥鳅对有机氯农药反应较为敏感,尤其是对于泥鳅,筛选出的 3 种毒性最大的优控污染物均为有机氯农药。

重金属对水生生物毒性研究较多,但是针对底栖动物的毒性研究多集中于底栖动物的生物累积及富集作用^[53-54]。本文选择的 5 种底栖动物对重金属不甚敏感。有研究表明,相比与鱼类、贝类等水生生物,重金属对甲壳类水生生物的急性毒性较大^[55],这与本文研究结果相吻合。

本文筛选出的对底栖动物毒性最大的优控污染物,以及对特定优控污染物敏感的底栖动物对于监测水体特定污染物有重要指示作用,同时也为制定相关评价体系和水质基准受试物种选择提供了理论依据。

4 结论

4.1 初步筛选出 10 种对 5 种代表性底栖动物毒性最大的优控污染物,包括 7 种农药和 3 种重金属。除毒死蜍为有机磷农药外,其余 6 种农药皆为有机氯农药,3 种重金属分别为 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Hg^{2+} 。

4.2 10 种优控污染物的物种敏感度分析表明,伸展摇蚊幼虫对有机氯农药滴滴涕和氯丹敏感,泥鳅对硫丹和五氯酚及钠盐较为敏感,而底栖动物对重金属普遍不甚敏感。伸展摇蚊幼虫和泥鳅可作为农药敏感性受试生物及为制定水生生物基准提供参考依据。

参考文献:

- [1] 陈家宽.上海九段沙湿地自然保护区科学考察集 [M]. 北京:科学出版社,2003:151-169.
- [2] 沈燕飞.苏南地区河流底栖动物群落结构特征及水质生物评价 [D]. 南京理工大学,2011.
- [3] 孙顺才,黄漪平.太湖 [M]. 北京:海洋出版社,1993:174-181.
- [4] 戴纪翠,倪晋仁.底栖动物在水生生态系统健康评价中的作用分析 [J]. 生态环境,2008,17(6):2107-2111.
- [5] 熊金林,梅兴国,胡传林.不同污染程度湖泊底栖动物群落结构及多样性比较 [J]. 湖泊科学,2003,15(2):160-168.
- [6] 池仕运,胡菊香,高少波,等.底栖动物监测方法研究进展 [J]. 河海大学学报,2010,38(2):356-360.
- [7] 国家环境保护局《水生生物监测手册》编委会.水生生物监测手册 [M]. 南京:东南大学出版社,1993.
- [8] 张咏,厉以强,沈燕飞,等.江苏地表水体大型底栖无脊椎动物生物多样性状况研究 [J]. 中国环境监测,2009,25(5):78-82.
- [9] 王琴,王海军,崔永德.武汉东湖水网区底栖动物群落特征及其水质的生物学评价 [J]. 水生生物学报,2010,34(4):739-746.
- [10] 徐成斌.辽河流域河流水质生物评价研究 [D]. 辽宁大学,2006.
- [11] 张远,张楠,孟伟.辽河流域河流生态系统健康的多要素评价 [J]. 科技导报,2008,26(17):36-41.
- [12] US EPA. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses [R]. Washington DC:US EPA, 1985.
- [13] 孟伟,闫振广,刘征涛.美国水质基准技术分析与中国相关基准的构建 [J]. 环境科学研究,2009,22(7):757-761.
- [14] 王晓燕,尚伟.水体有毒有机污染物的危害及优先控制污染物 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2002,23(3):73-78.
- [15] 周文敏,傅德黔,孙宗光.中国水中优先控制污染物黑名单的确定 [J]. 环境科学研究,1991,4(6):9-12.
- [16] 金小伟,查金苗,许宜平,等.3 种氯酚类化合物对河蚬的毒性和氧化应激 [J]. 生态毒理学报,2009,4(6):816-822.
- [17] 江辉,陈开健,刘建波,等.4 种农药对泥鳅的急性毒性及敏感性研究 [J]. 水利渔业,2005,25(2):74-78.
- [18] 刘伟男,范学铭,阙晓微,等.苯、苯酚、硝基苯对水丝蚓的急性毒性及超氧化物歧化酶活性的影响 [J]. 水生生物学报,2008,32(3):420-423.
- [19] 李浩.铜和镉对羽摇蚊幼虫(*Chironomus plumosus*)和红裸须摇蚊幼虫(*Procladius akamusi*)的毒性效应 [D]. 华中农业大学,2012.
- [20] 刘存歧,安通伟,张亚娟,等. Cu^{2+} 对日本沼虾的毒性研究 [J]. 安徽农业科学,2008,36(28):12285-12286.
- [21] 段学花,王兆印,徐梦珍.底栖动物与河流生态评价 [M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- [22] 闫宾萍.镍、汞和五氯酚对摇蚊幼虫的毒性作用 [D]. 青岛科技大学,2006.

- [23] US EPA. ECOTOX Database[EB/OL]. <http://cfpub.epa.gov/ecotox/>.
- [24] 中国知网[EB/OL]. <http://www.cnki.net/>.
- [25] US EPA. National recommended water quality criteria [R]. Washington DC: US EPA, 2009.
- [26] European Parliament and Council. Environmental Quality Standards Directive[R]. Brussels: European Parliament and Council, 2008.
- [27] 曾丽璇,吴宏海,陈桂珠.镉、铜污染对河蚬过氧化氢酶活性的影响 [J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2007,4:81-97.
- [28] 刘 伟,吴孝兵,赵 娟.重金属 Cu^{2+} 对锦鲤和日本沼虾的急性毒性研究 [J]. 资源开发与市场, 2008,24(10):868-870.
- [29] 王宏伟,蔡端波,肖国华.有机硒对汞致日本沼虾毒性的拮抗作用 [J]. 水产科学, 2010,29(5):270-271.
- [30] 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.
- [31] 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) [R]. Netherlands National Institute for Public Health and the Environment, 2007.
- [32] 劳建国.鸭绿江水丝蚴生态结构及毒性实验分析 [D]. 大连海事大学, 2008.
- [33] 李天云.利用河蚬研究沉积物中有机氯农药和多环芳烃在生物体内的累积效应 [D]. 西南大学, 2008.
- [34] 许秋瑾,李 丽,梁存珍,等.淮安某县农村饮用水源中优控污染物的筛选研究 [J]. 中国环境科学, 2013,33(4):631-638.
- [35] 王俊才,方志刚,鞠复华.摇蚊幼虫分布及其与水质的关系 [J]. 生态学杂志, 2000,19(4):37.
- [36] Mousavi S K, Primicerio R, Amundsen P A. Diversity and structure of Chironomidae (Diptera) communities along a gradient of heavy metal contamination in a subarctic water course [J]. The Science of The Total Environment, 2003,307(1-3):93-110.
- [37] 齐 鑫,马勇军,潘志祥.水环境中的摇蚊幼虫研究进展 [J]. 台州学院学报, 2008,30(6):38-42.
- [38] Strickman D. Aquatic bioassay of 11 pesticides using larvae of the mosquito, *Wyeomyia smithii* (Diptera: Culicidae) [J]. Bulletin Environmental Contamination and Toxicology, 1955,35(1): 133-142.
- [39] 刘 民.亚硝酸盐对泥鳅毒性作用的研究 [D]. 山东师范大学, 2007.
- [40] 高晓莉,齐凤生,罗胡英,等.铜、汞、铬对泥鳅的急性毒性和联合毒性实验 [J]. 水利渔业, 2003,23(2):63-64.
- [41] 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.
- [42] 赵志刚.硝基苯等污染物对 4 种中国土著水生生物的毒性研究 [D]. 南京大学, 2011.
- [43] 李天云,黄圣彪,孙 凡,等.河蚬对太湖梅梁湾沉积物多环芳烃的生物富集 [J]. 环境科学学报, 2008,28(11):2354-2360.
- [44] Aldridge D C, Muller S J. The asiatic clam, *Corbicula fluminea*, in Britain: Current status and potential impacts [J]. Journal of Conchology, 2001,37(2):177-182.
- [45] 刘 敏,熊邦喜.河蚬的生态习性及其对重金属的富集作用 [J]. 安徽农业科学, 2008,36(1):221-224.
- [46] 范亚维,周启星,王媛媛,等.水体 BTEX 污染对大型溞和霍普水丝蚓的毒性效应及水环境安全评价 [J]. 环境科学学报, 2009,29(7):1485-1490.
- [47] Martínez-Tabche L, Mora B R, Oliván L G, et al. Toxic Effect of Nickel on Hemoglobin Concentration of *Limnodrilus hoffmeisteri* in Spiked Sediments of Trout Farms [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1999,42(2):143-149.
- [48] 王 川,周巧红,吴振斌.有机磷农药毒死蜱研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2011,34(7):123-127.
- [49] 孙凯峰,王 娜,刘莉莉,等.基于四尾栅藻响应的有机磷农药生态风险评估 [J]. 中国环境科学, 2013,33(5):868-863.
- [50] UNEP. Stockholm convention on persistent organic pollutants [R]. Stockholm:the Stockholm Convention, 2001.
- [51] 胡国成,许木启,戴家银,等.硫丹对水生生物毒理效应的研究进展 [J]. 中国水产科学, 2007,14(6):1042-1047.
- [52] 付 允,孙玉川,毛海红,等.地下河流域土壤中有机氯农药分布及来源分析 [J]. 中国环境科学, 2012,32(3):517-522.
- [53] 杜飞雁,王雪辉,贾晓平,等.大亚湾海域大型底栖生物种类组成及特征种 [J]. 中国水产科学, 2011,18(4):877-892.
- [54] 姚 波,纪会敏,孙明霞,等.大连沿海区域几种底栖生物对重金属的耐受力实验 [J]. 水产科学, 1996,15(2):16-20.
- [55] 张传永,刘 庆,陈燕妮.重金属对水生生物毒性作用研究进展 [J]. 生命科学仪器, 2008(6):3-7.

作者简介: 王伟莉(1987-),女,安徽亳州人,硕士,主要从事生态毒理学研究.发表论文 5 篇.