

生物效应比(BER)技术预测我国水生生物基准探讨

王晓南¹, 闫振广¹, 刘征涛^{1*}, 王婉华¹, 张 聪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, 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: 基于中国与美国间生物敏感性的差异, 对生物效应比(BER)技术预测我国水生生物基准值进行了研究。首先, 对中美共有的且急性生物毒性数据符合3门8科的污染物进行筛选, 然后, 依据两国物种的敏感性与代表性建立基于不同生物组合的BER技术, 最后, 对不同生物组合BER技术预测水生生物急性基准值与实测基准值进行比较与分析, 筛选出预测效果较好的BER技术。结果表明: 共筛选出9个中美共有且毒性数据丰富的污染物(As(III)、Cr(VI)、Hg、Cu、Zn、Pb、对硫磷、毒死蜱和三丁基锡), 依据本土生物毒性数据推导出该9种污染物的我国水生生物急性基准值分别为201.72、2.64、0.74、1.32、55.83、92.25、0.12、0.36和0.38 $\mu\text{g/L}$ 。此外, 在对7种生物组合方式BER技术的预测效果进行分析比较的基础上, 初步提出基于同属或科的生物组合方式的BER技术可较好地对应9种污染物的本土水生生物急性基准值进行预测。研究结果可为在本土生物毒性数据缺乏时充分利用现有毒性数据或进行少量毒性试验的基础上对我国水生生物急性基准值的预测提供帮助。

关键词: 生物效应比; 水生生物基准; 预测基准值; 中国; 美国

中图分类号: X171.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2016)01-0276-10

Study of using biological effect ratio (BER) method to predict the aquatic life criteria in China. WANG Xiao-nan¹, YAN Zhen-guang¹, LIU Zheng-tao^{1*}, WANG Wan-hua¹, ZHANG Cong² (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). *China Environmental Science*, 2016, 36(1): 276~285

Abstract: In this study, predicted aquatic life criteria using biological effect ratio (BER) method based on the difference of species sensitivity between China and the USA was investigated. First, pollutants with acute toxicity data from 3 Phyla and 8 Families that both in China and the USA were selected. Second, the different biological groups were developed for BER method based on the sensitivity and representation of species of the two countries. Third, effective BER method was selected based on the comparison of predicted criteria maximum concentration (CMC) and the measured CMC. Results showed that: 9 pollutants of As(III), Cr(VI), Hg, Cu, Zn, Pb, parathion, chlorpyrifos and TBT both in China and the USA were selected, and the measured CMCs for protecting the Chinese native aquatic species were derived to be 201.72, 2.64, 0.74, 1.32, 55.83, 92.25, 0.12, 0.36 and 0.38 $\mu\text{g/L}$, respectively. Moreover, comparison of predicted criteria and the measured criteria of 7 different biological groups for BER method showed that BER method of biological groups based on the same genera or family could predict the CMCs of 9 pollutants in China well. The result of this study could provide useful information for predicting CMC making full use of the existed toxicity data or just carrying out less toxicity test when toxicity data of native species is lacking.

Key words: biological effect ratio (BER); aquatic life criteria; predicted criteria; China; USA

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。其中,在水生生物基准技术方法研究方面,国内学者对水生生物基准推导过程中最少生物毒性数据需求^[5]、水质参数归一化^[6-7]、水生生物基准受试物种的筛选^[8-11]

等技术方法进行了研究。在水生生物基准值推导

收稿日期: 2015-05-26

基金项目: 国家水体污染与治理科技重大专项(2012ZX07501-003-06); 环境基准与风险评估国家重点实验室自由探索基金(SKLECR20140FP06)

* 责任作者, 研究员, liuzt@craes.org.cn

方面,国内学者一般进行污染物对本土生物的生态毒理学试验或进行生物毒性数据搜集,然后依据所得到的急慢性毒性数据,采用相应的方法推导这些污染物的水生生物基准值,如:依据搜集的毒性数据先后推导了硝基苯^[12]、镉^[13]、氨氮^[14]、锌^[15]等污染物的水生生物基准值;其他学者则进行污染物的生态毒理学试验并结合搜集的毒性数据先后推导了氯酚类化合物^[16]、三氯生^[17]、硝基苯^[18]、四溴双酚-A^[19]等污染物的水生生物基准值.通过不断地研究和发展,我国水生生物基准研究工作逐步从对国外的相关技术方法进行引进和学习,发展到对我国本土水生生物基准方法学和技术体系进行探索和研究.

在推导本土水生生物基准时,美国^[20]、澳大利亚^[21]等国家推荐使用本土物种的毒性数据,并且有学者对使用非本土物种毒性数据推导出的基准值能否保护本土水生生物提出了质疑^[22].因此,各国在推导本国水生生物基准时,基本均面临本土生物毒性数据缺乏的问题.即使在水生生物基准发展较早的美国,至今也才推荐了 58 种污染物(化学的、物理的、生物的)的水生生物基准值.在我国,由于水生生物基准研究工作起步较晚,各项相关研究尚不完善,并且我国也存在本土物种的生态毒理学数据普遍较缺乏的问题.因此,在推导水生生物基准时,如何利用好现有的生物毒性数据,如何解决本土毒性数据缺乏的问题,成为水生生物基准研究中急需解决的重要问题.

在推导水生生物基准时,直接采用他国生物毒性数据或基准值存在争议^[22],然而,如果将各类污染物的水生生物基准都从头开始研究、测试、推导,短期内难以发挥有效的科技支撑作用.本文以中国与美国为例,利用中美物种间的毒性效应差异比,对生物毒性效应比(BER)技术预测水生生物基准值进行探讨.设定 BER 等于“我国某一类群生物的毒性值”除以“美国同一类群生物的毒性值”,我国预测的水生生物基准值等于美国基准值乘以 BER.该方法的探索,以期在本土生物毒性数据缺乏时,为我国水生生物基准的研究与推导提供有用的技术信息.

1 材料与方法

1.1 生物毒性数据的搜集与筛选原则

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

数据搜集完成后,参照美国水生生物基准指南^[20],对搜集的生物毒性数据进行初步筛选.毒性数据的初步筛选原则包括:测试信息不完全、有疑点的数据(未设立对照组、对照组大量死亡等)、性质不稳定(易挥发、易水解)而未采用流水式试验等的毒性数据不可用.完成初步筛选后,需进一步对毒性数据进行筛选,二次筛选原则包括:浮游甲壳类生物的急性毒性试验终点为 48-h LC₅₀ 或 EC₅₀,鱼、贝、虾、蟹等生物的试验终点是 96-h 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.当同一个物种或同一个终点有多个毒性值可用时,使用该多个值的几何平均值 SMAV(种平均急性值)^[20].

1.2 中美共有污染物的筛选

US EPA 至今共推荐了 58 种污染物(生物、化学、物理)的水生生物基准值,由于对美国水生生物分类的认识有限,本文在进行 BER 技术研究时,只采用了 US EPA 公开发布的 58 种污染物的毒性数据作为美国物种毒性数据.为了进一步进行中美生物毒性效应比 BER 的分析研究,依据 1.1 节的搜集和筛选原则,结合《中国动物志》^[23]和中国生物物种名录(http://data.sp2000.cn/2011_cnnode_c/info_checklist.php),搜集和筛选该 58 种污染物的我国本土生物毒性数据,然后,依据“三门八科”^[20]最少生物毒性数据需求原则,筛选出中美共有的且毒性数据比较充足的污染物.

1.3 BER 技术预测水生生物急性基准初步分析

通过先前对水质基准受试生物筛选^[8-11,24]的研究,结合 US EPA 物种种间关系估算模型^[25]的研究,发现同类物种(如同目、同科、同属、同种)对同个污染物的敏感性比较相似,以至 US EPA 在其物种种间关系估算模型中指出:要优先选用

生物学距离 ≤ 3 (US EPA 规定同目生物学距离为 3、同科为 2、同属为 1)^[25]的替代物种进行估算来获取更为可靠的毒性值.因此,从 US EPA 现有的水生生物基准文件中可以得到不同生物分类对污染物的敏感情况,借鉴 US EPA 物种间关系估算方法、水效应比技术^[26],利用不同生物组合方式的中美物种间的敏感性差异,来对我国水生生物急性基准进行初步估算和预测.BER 技术的意义在于可充分利用现有的本土生物毒性数据或者进行少量的生物毒性试验,对我国水生生物基准进行估算和预测.

针对 1.2 节筛选的中美共有典型污染物,选择两国同类的并且敏感的生物进行组合,依据不同生物组合进行 BER(式 1)计算,然后采用 BER 技术预测我国的 HC_5 (5%物种危害浓度)或 FAV(最终急性值)(式 2),并对预测 HC_5 (FAV)值和实测 HC_5 (FAV)值进行数量级差异分析.前人研究提出,如果预测值和实测值间差异在一个数量级以内则认为差异较小、预测较好^[27-32],超过一个数量级则认为差异较大、预测较差.最后,依据不同生物组合 BER 技术的预测效果,初步提出我国 BER 预测技术.

BER=我国生物毒性数据/美国生物毒性数据 (1)
式中:我国生物毒性数据为我国不同生物组合方式物种急性毒性值的几何平均值,美国生物毒性数据为美国不同生物组合方式物种急性毒性值的几何平均值.

预测水生生物基准值=BER×美国水生生物基准值 (2)

式中:美国水生生物基准值为 US EPA 公布推荐的相关污染物的基准值.

1.4 实测水生生物基准值的推导

依据 US EPA 水生生物基准指南^[20],对 1.2 节筛选出的各污染物的 GMAV(属急性平均值)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(3~6)计算 CMC(急性基准值),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.

$$S^2 = \frac{\Sigma[(\ln GMAV)^2] - [\Sigma(\ln GMAV)]^2 / 4}{\Sigma P - (\Sigma \sqrt{P})^2 / 4} \quad (3)$$

$$A = S\sqrt{0.05} + L \quad (4)$$

$$FAV = e^A \quad (5)$$

$$CMC = FAV/2 \quad (6)$$

2 结果与分析

2.1 中美共有污染物的生物毒性数据

依据 1.2 节筛选原则,最终筛选出 9 个中美共有且本土生物毒性数据丰富的污染物,包括:As(III)、Cr(VI)、Hg、Cu、Zn、Pb、对硫磷、毒死蜱和三丁基锡(TBT).受篇幅限制,只列出毒死蜱、三丁基锡的本土生物毒性数据和文献来源(表 1、表 2),其中 Hg、Cr(VI)、As(III)和对硫磷的数据见前人研究^[24],Cu、Zn、Pb 的数据参考前研究^[30,33-34].美国共有污染物的生物毒性数据可在 US EPA 基准文件^[35]中查找.

表 1 毒死蜱的本土生物毒性数据

Table 1 Toxicity data of native species for chlorpyrifos

序号	LC ₅₀ /EC ₅₀ (ug/L)	物种	拉丁名	文献
1	0.89	白虾	<i>Penaeus vannamei</i>	[36]
2	1.08	摇蚊	<i>Chironomus sp.</i>	[37]
3	4.61	大型蚤	<i>Daphnia magna</i>	[38-40]
4	11.60	青虾	<i>Macrobrachium nipponense</i>	[41]
5	13.13	克氏原螯虾	<i>Procambarus clarkii</i>	[42]
6	22.90	中华绒螯蟹	<i>Eriocheir sinensis</i>	[43]
7	26.23	麦穗鱼	<i>Pseudorasbora parva</i>	[44,45]
8	50.00	草鱼	<i>Ctenopharynodon idellus</i>	[46]
9	52.00	河川沙塘鳢	<i>Odontobutis potamophila</i>	[47]
10	149.20	鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	[48]
11	160.00	尖脐膀胱螺	<i>Physa acuta</i>	[49]
12	171.00	剑尾鱼	<i>Xiphophorus helleri</i>	[45]
13	172.00	鲢鱼	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[50]
14	193.20	大鳞副泥鳅	<i>Paramisgurnus dabryanus</i>	[51]
15	200.00	多刺裸腹蚤	<i>Moina macrocopa</i>	[52]
16	557.67	鲫鱼	<i>Carassius auratus</i>	[53-55]
17	800.00	中华蟾蜍蝌蚪	<i>Bufo gargarizans</i>	[56]
18	2400.00	泽蛙蝌蚪	<i>Rana limnocharis</i>	[40]
19	4320.00	环棱螺	<i>Bellamyia lapidea</i>	[57]
20	6310.00	中华圆田螺	<i>Cipangopaludina chinensis</i>	[57]
21	8750.00	河蚬	<i>Corbicula fluminea</i>	[57]

表 2 三丁基锡的本土生物毒性数据

Table 2 Toxicity data of native species for TBT

序号	LC ₅₀ /EC ₅₀ (μg/L)	物种	拉丁名	文献
1	1.17	折叠萝卜螺	<i>Radix plicatula</i>	[58]
2	2.00	大型溞	<i>Daphnia magna</i>	[59]
3	3.15	鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	[60]
4	5.82	孔雀鱼	<i>Poecilia reticulata</i>	[61]
5	16.60	羽摇蚊幼虫	<i>Chironomus plumosus</i>	[62]
6	28.70	鲫鱼	<i>Carassius auratus</i>	[63]
7	51.00	罗氏沼虾	<i>Macrobrachium rosenbergii</i>	[64]
8	145.55	苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i>	[65]
9	241.55	穴附器毛突摇蚊	<i>Chaetocladius sexpilosus</i>	[66]
10	285.40	红德永摇蚊幼虫	<i>Tokunagayusurika akamusi</i>	[62]
11	335.63	霍甫水丝蚓	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	[65]

2.2 不同生物组合方式的 BER 技术

依据中美典型污染物现有的生物毒性数据和生物敏感性分布,结合我国生物分类情况,选出 7 种不同生物组合方式的 BER 技术并计算 BER 值,然后对我国水生生物基准值进行预测并对预测效果进行分析.具体组合方式如下:

(1) 组合 1:我国大型溞+鲤鱼+鲫鱼+羽摇蚊/美国基准文件前 4 种^[35].

该组合关注的是中国重要物种和美国敏感性物种间差异:

大型溞:美国 MTDR 推荐了一种浮游甲壳类生物^[20],大型溞是其中的一种,并且该物种在我国分布广泛且毒性数据充足;

鲤鱼、鲫鱼:美国 MTDR 推荐了两种鱼类^[20],我国鱼类以鲤科为主,鲤科鱼中以鲤鱼、鲫鱼分布广泛且毒性数据较充足;

羽摇蚊:美国 MTDR 推荐的在水生生物基准推导过程中至少需要一种昆虫类生物的毒性数据^[20],其中羽摇蚊在我国分布广泛且常被用于生态毒理学试验.

美国基准文件前 4 种物种的名称和生物分类可在文献^[35]中查找.

(2) 组合 2:与美国基准文件前 4 属同类的我国 4 属/美国基准文件前 4 属,各污染物的属组合结果见表 3,我国缺少毒死蜱相应 4 属的毒性数据,因此未对其进行研究.

该组合关注的是中美敏感属间的差异,在计算水生生物基准值时,US EPA 关注前 4 属敏感性生物^[20],它们对基准值的大小将产生最直接的影响.

表 3 我国的 4 个敏感生物属

Table 3 The 4 sensitive genera in China

污染物	本土物种			
As(III)	低额溞属	网纹溞属	蚤属	/
Cr(VI)	低额溞属	网纹溞属	蚤属	/
Hg	网纹溞属	蚤属	/	/
Cu	网纹溞属	蚤属	钩虾属	/
Zn	网纹溞属	蚤属	/	/
Pb	蚤属	钩虾属	/	/
对硫磷	低额溞属	蚤属	钩虾属	/
毒死蜱	/	/	/	/
TBT	鲤属	/	/	/

注:表中/为本土没有相应属的毒性数据

(3) 组合 3:我国 4 种与美国基准文件前 4 个物种同种的生物(同时考虑我国生物分类情况、本土基准受试生物筛选结果^[8-11]和现有毒性数据情况)/美国基准文件前 4 种,各污染物的物种组合结果见表 4,无同种生物时,用同属的其他物种替代.该组合关注的是中美敏感物种间的差异.

表 4 我国的 4 种敏感生物物种

Table 4 The 4 sensitive species in China

污染物	本土物种			
As(III)	锯顶低额溞	模糊网纹溞	蚤状溞	大型溞
Cr(VI)	锯顶低额溞	蚤状溞	大型溞	透明溞
Hg	大型溞	模糊网纹溞	蚤状溞	青虾
Cu	模糊网纹溞	麦穗鱼	蚤状溞	大型溞
Zn	大型溞	模糊网纹溞	鲤鱼	鲫鱼
Pb	蚤状钩虾	大型溞	鲤鱼	模糊网纹溞
对硫磷	蚤状溞	锯顶低额溞	湖泊钩虾	大型溞
毒死蜱	摇蚊	河虾	大型溞	中华绒螯蟹
TBT	鲤鱼	大型溞	鲫鱼	孔雀鱼

(4) 组合 4:我国溞科大型溞+蚤状溞+锯顶低额溞+模糊网纹溞/美国基准文件中同类的 4 个溞科物种.

该组合关注的是中美敏感性溞科物种间的差异,由 2.1 节本土生物毒性数据和美国生物毒

性数据排序可知,淡水枝角类生物如蚤科的蚤属、低额蚤属、网纹蚤属的物种对各类污染物的敏感性均排在前列,因此,本文尝试对我国 4 种枝角类蚤科敏感性生物(大型蚤、蚤状蚤、模糊网纹蚤、锯顶低额蚤,没有毒性数据时可用同属或同科的物种替代)和美国基准文件中相似的 4 个蚤科物种(没有同种的数据时可用同属同科的数据代替,同属同科数据不足 4 个时可用与我国同种的数据重复一次计算;没有蚤科数据时可用文件中敏感的甲壳纲其他物种代替)(表 5)进行 BER 分析.

表 5 美国基准文件中的 4 种生物物种

Table 5 The 4species in US EPA criteria documents

污染物	美国基准文件物种			
As(III)	锯顶低额蚤	棘爪网纹蚤	蚤状蚤	大型蚤
Cr(VI)	锯顶低额蚤	蚤状蚤	大型蚤	老年低额蚤
Hg	大型蚤	棘爪网纹蚤	蚤状蚤	大型蚤
Cu	<i>Daphnia pulex</i>	棘爪网纹蚤	<i>Daphnia pulex</i>	大型蚤
Zn	大型蚤	模糊网纹蚤	蚤状蚤	网纹蚤
Pb	大型蚤	大型蚤	大型蚤	大型蚤
对硫磷	蚤状蚤	锯顶低额蚤	大型蚤	大型蚤
毒死蜱	<i>Gammarus fasciatus</i>	<i>Gammarus pseudolimnaeu</i>	湖泊钩虾	/
TBT	大型蚤	大型蚤	大型蚤	大型蚤

- (5) 组合 5:指定 4 属中各 1 种生物,同时考虑我国本土基准受试生物筛选结果/美国基准文件中同类的 4 属生物.
- 该组合关注的是中国重要物种和美国同类物种间差异,我国指定的 4 属为甲壳纲蚤科蚤属的大型蚤、硬骨鱼纲鲤科鲤属的鲤鱼、硬骨鱼纲鲤科鲫属的鲫鱼和昆虫纲摇蚊科摇蚊属的羽摇蚊幼虫.美国同类的 4 属生物优先选择与我国同种生物,没有同种生物时,依次以同属、同科、同纲的其他生物代替,如果数据还是不足,以所缺属的其他生物重复一次计算,各污染物的物种组合结果见表 6.
- (6) 组合 6:我国的 2 种鲤科鱼/美国的 2 种鲤科鱼.
- 该组合关注的是中国重要鲤科物种和美国同类物种间差异,我国指定的 2 种鲤科鱼为分布

广泛、毒性数据较充足的硬骨鱼纲鲤科鲤属的鲤鱼、硬骨鱼纲鲤科鲫属的鲫鱼.美国的 2 种鲤科鱼优先选择与我国同种生物(鲤鱼、鲫鱼),没有同种生物时,依次以同属、同科的其他生物代替,如果数据还是不足,以所缺属的其他生物重复一次计算,各污染物的物种组合结果见表 7.

表 6 美国基准文件中的 4 属生物物种

Table 6 Species of the 4genera in US EPA criteria documents

污染物	美国基准文件物种			
As(III)	大型蚤	黑头呆鱼	鲫鱼	摇蚊幼虫
Cr(VI)	大型蚤	黑头呆鱼	鲫鱼	摇蚊幼虫
Hg	大型蚤	黑头呆鱼	黑头呆鱼	摇蚊幼虫
Cu	大型蚤	黑头呆鱼	鲫鱼	摇蚊幼虫
Zn	大型蚤	黑头呆鱼	鲫鱼	豆娘(昆虫纲)
Pb	大型蚤	黑头呆鱼	鲫鱼	摇蚊幼虫
对硫磷	大型蚤	黑头呆鱼	鲫鱼	摇蚊幼虫
毒死蜱	湖泊钩虾	黑头呆鱼	鲫鱼	<i>Pteronarcella badia</i> (昆虫纲)
TBT	大型蚤	黑头呆鱼	黑头呆鱼	库蚊(昆虫纲)

注:黑头呆鱼为鲤科

表 7 美国基准文件中的 2 种鲤科鱼

Table 7 The 2cyprinid fish in US EPA criteria documents

污染物	美国基准文件物种	
As(III)	鲫鱼	黑头呆鱼
Cr(VI)	鲫鱼	黑头呆鱼
Hg	黑头呆鱼	黑头呆鱼
Cu	鲫鱼	鲤鱼
Zn	鲫鱼	鲤鱼
Pb	鲫鱼	黑头呆鱼
对硫磷	鲫鱼	黑头呆鱼
毒死蜱	鲫鱼	黑头呆鱼
三丁基锡	黑头呆鱼	黑头呆鱼

注:黑头呆鱼为鲤科

- (7) 组合 7:我国的 2 种鲤科鱼/美国 2 种鲑科鱼.
- 该组合关注的是中国重要鲤科物种和美国重要鲑科物种间差异,本文中我国指定的 2 种鲤科鱼为分布广泛、毒性数据较充足的硬骨鱼纲鲤科鲤属的鲤鱼、硬骨鱼纲鲤科鲫属的鲫鱼.美国鱼类以鲑科鱼为主,鲑科鱼毒性数据丰富,2 种鲑科鱼的选择较多,为使分析比较更为可靠,本文优

先选用数据充足的硬骨鱼纲鲑科的虹鳟和溪红点鲑.本文对中美2种鲤科鲑科鱼进行BER计算,探索中美两国各自主要鱼类物种用于BER技术的可行性.

2.3 实测本土水生生物基准值

依据 1.4 节水生生物基准值推导方法,结合 2.1 节搜集筛选到的本土水生生物毒性数据,计算 9 种共有污染物 As(III)、Cr(VI)、Hg、Cu、Zn、Pb、对硫磷、毒死蜱和三丁基锡的本土水生生物急性基准值(表 8).

表 8 9 种污染物的本土水生生物基准实测值

Table 8 Measured aquatic life criteria for 9pollutants

污染物	基准值(μg/L)	污染物	基准值(μg/L)
As(III)	201.72	Pb	92.25
Cr(VI)	2.64	对硫磷	0.12
Hg	0.74	毒死蜱	0.36
Cu	1.32	TBT	0.38
Zn	55.83		

2.4 预测本土水生生物基准值

采用不同生物组合方式 BER 技术预测与估算本土水生生物基准值的方法见 1.3 节,以生物组合 1 的预测方法为例:组合 1 的 BER 值=大型蚤、鲤鱼、鲫鱼与羽摇蚊毒性数据的几何平均值/美国基准文件前 4 种毒性数据的几何平均值,预测本土水生生物基准值=BER×美国水生生物基准值.

2.5 BER 技术预测本土水生生物基准初步分析

本文对上述 7 种生物组合方式的 BER 技术进行了探索和分析,对基于实测毒性数据的基准值和基于 BER 技术所预测的基准值进行了推导和差异分析,依据不同生物组合的预测效果,初步提出我国 BER 预测技术.7 种生物组合方式的 BER 技术对 9 种污染物水生生物的预测效果如下:

(1) 组合 1:我国大型蚤+鲤鱼+鲫鱼+羽摇蚊/美国基准文件前 4 种的 BER 技术预测效果见图 1,从图 1 可知,生物组合方式 1 所预测的基准值与实测推导的基准值差异在 1 个数量级以内的有 1 个,超过 1 个数量级的有 8 个,一般认为差异在 1 个数量级以内的预测效果较好,超过 1 个数量级

则预测效果较差^[24,27-32],可见生物组合方式 1 的 BER 技术对水生生物基准值的预测存在较大的不确定性.

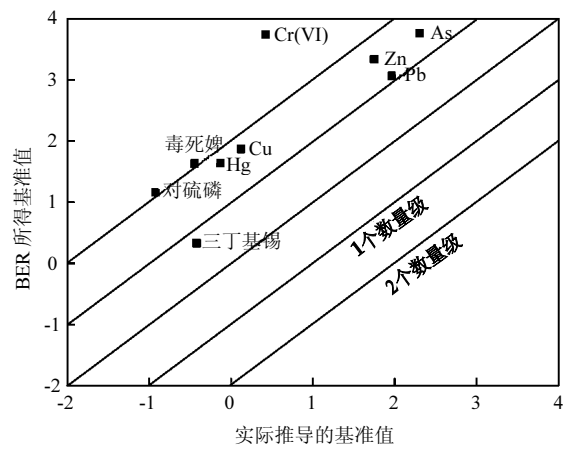


图 1 生物组合 1 预测基准值与实际值的比较
Fig.1 Comparison of measured criteria and predicted criteria based on BER method of biological group 1
图中横纵坐标值为对实际基准值和预测基准值进行对数处理 lg (μg/L)后的值,下同

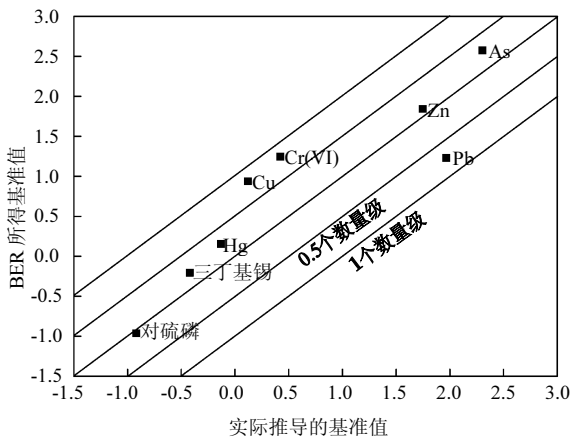


图 2 生物组合 2 预测基准值与实际值的比较
Fig.2 Comparison of measured criteria and predicted criteria based on BER method of biological group 2

(2) 组合 2:与 US EPA 基准文件前 4 属同类的我国 4 属/美国基准文件前 4 属的 BER 技术的预测效果见图 2.从图 2 可知,生物组合方式 2 所预测的基准值与实测推导的基准值差异在 0.5 个数量级以内的有 5 个,1 个数量级以内的有 3 个,差异在 1 个数量级以内的认为预测效果较

好^[24,27-32],可见与生物组合方式 1 相比,生物组合方式 2 的 BER 技术对水生生物基准值的预测较好。

(3) 组合 3:我国 4 种与美国基准文件前 4 个物种同种的生物(同时考虑我国生物分类情况、本土基准受试生物筛选结果和现有毒性数据情况)/美国基准文件前 4 种的 BER 技术预测效果见图 3。从图 3 可知,生物组合方式 3 所预测的基准值与实测基准值差异在 1 个数量级以内的有 8 个,超过 1 个数量级的有 1 个,差异在 1 个数量级以内的认为预测效果较好^[24,27-32],超过 1 个数量级则预测效果较差,可见生物组合方式 3 和 2 的预测效果相似,均比生物组合方式 1 的 BER 技术的预测效果好,但存在一定的不确定性。

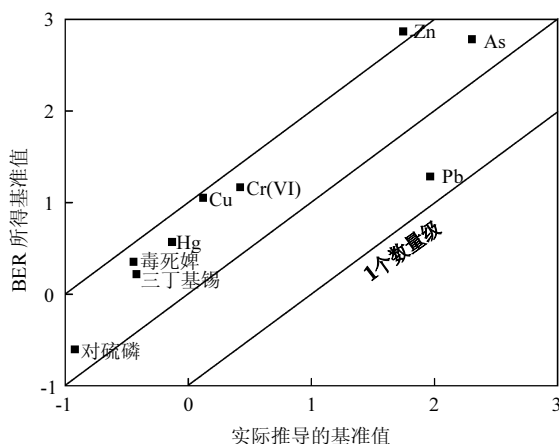


图 3 生物组合 3 预测基准值与实际值的比较
Fig.3 Comparison of measured criteria and predicted criteria based on BER method of biological group 3

(4) 组合 4:我国蚤科大型蚤+蚤状蚤+锯顶低额蚤+模糊网纹蚤/美国基准文件中同类的 4 个蚤科物种的 BER 技术预测效果见图 4。从图 4 可知,生物组合方式 4 所预测的基准值与实测推导的基准值差异在 0.5 个数量级以内的有 5 个,1 个数量级以内的有 4 个,差异在 1 个数量级以内则认为预测效果较好^[24,27-32],可见生物组合方式 4 的 BER 技术对水生生物基准值的预测效果较好。

(5) 组合 5:我国指定 4 属中各 1 种生物,同时考虑我国本土基准受试生物筛选结果/美国同类的 4 属生物的 BER 技术预测效果见图 5。从图 5

可知,生物组合方式 5 所预测的基准值与实测推导的基准值差异在 0.5 个数量级以内的有 7 个,1 个数量级以内的有 2 个,差异在 1 个数量级以内则认为预测效果较好^[24,27-32],可见生物组合方式 5 的 BER 技术对水生生物基准值的预测效果较好。

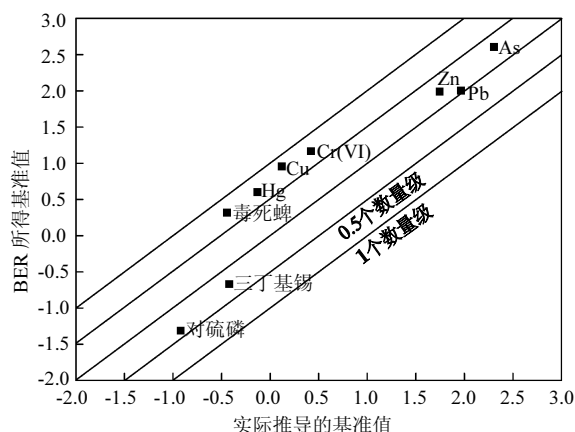


图 4 生物组合 4 预测基准值与实际值的比较
Fig.4 Comparison of measured criteria and predicted criteria based on BER method of biological group 4

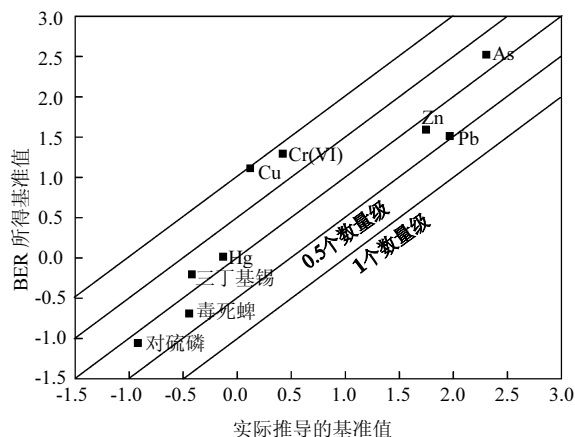


图 5 生物组合 5 预测基准值与实际值的比较
Fig.5 Comparison of measured criteria and predicted criteria based on BER method of biological group 5

(6) 组合 6:我国的 2 种鲤科鱼/美国的 2 种鲤科鱼的 BER 技术预测效果见图 6。从图 6 可知,生物组合方式 6 所预测的基准值与实测推导的基准值差异在 1 个数量级以内的有 7 个,超过 1 个数量级的有 2 个,差异在 1 个数量级以内则认为预测效果较好^[24,27-32],超过 1 个数量级则预测

效果较差,可见生物组合方式 6 的 BER 技术对水生生物基准值的预测效果存在一定的不确定性。

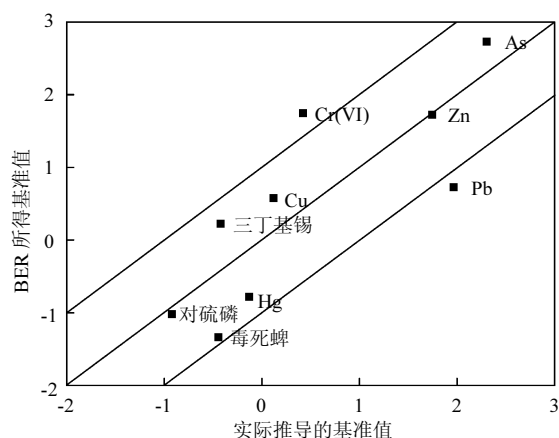


图 6 生物组合 6 预测基准值与实际值的比较

Fig.6 Comparison of measured criteria and predicted criteria based on BER method of biological group 6

(7) 组合 7: 我国的 2 种鲤科鱼/美国的 2 种鲑科鱼的 BER 技术预测效果见图 7。从图 7 可知, 生物组合方式 7 所预测的基准值与实测推导的基准值差异在 1 个数量级以内的有 8 个, 超过 1 个数量级的有 1 个, 差异在 1 个数量级以内则认为预测效果较好^[24,27-32], 超过 1 个数量级则预测效果较差, 可见生物组合方式 7 的 BER 技术对水生生物基准值的预测效果比生物组合方式 6 相对要好, 仍存在一定的不确定性。

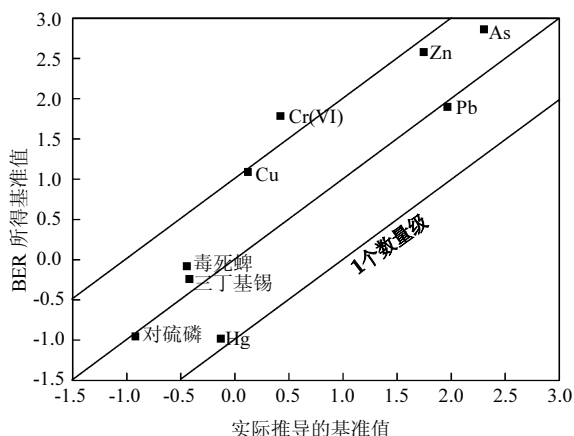


图 7 生物组合 7 预测基准值与实际值的比较

Fig.7 Comparison of measured criteria and predicted criteria based on BER method of biological group 7

从上述的 7 种生物组合方式的 BER 技术对 9 种污染物水生生物基准值预测效果来看, 基于科、属的生物组合方式 2、4、5 的 BER 技术可较好地 对水生生物基准值进行预测, 多数预测值的差异在 1 个数量级内, 甚至在 0.5 个数量级内, 表明预测效果较好^[24,27-32], 而基于种的生物组合方式 1、3、6、7 在预测基准值时存在一定的不确定性。

基于科、属的 BER 预测效果较好可能是因为: 基于科、属的生物组合方式包含了 4 种不同分类群的生物毒性数据, 生物分类比较全面, 具有一定的代表性和稳定性。荷兰在推导其国家水生生物基准时, 规定当存在 4 种不同生物分类群的毒性数据时, 即可推导水生生物基准值^[67]。US EPA 规定在推导各州水生生物基准值时, 需要至少 4 种不同生物分类群的物种毒性数据^[68]。此外, 美国 ICE 技术也指出在预测水生生物基准值时, 同科、同属替代—预测物种对的预测效果较好^[25]。通过比较分析可知, 本文基于科、属的生物组合方式 2、4、5 的 BER 技术对水生生物基准值的预测效果较好。而基于特定种的生物组合方式 6、7 的 BER 技术由于物种数量较少(2 种), 以致预测效果不确定性较大。基于不同生物分类间比较的组合方式 1 的 BER 技术, 由于中美间进行比较的生物分类差别较大, 以致预测效果很差。基于与美国前 4 种物种同种的 BER 技术(组合方式 3), 由于两国间特有物种的差异, 以致其预测效果也存在一定的不确定性。

2.6 不确定性分析

由于美国至今仅推荐了 58 种污染物的水生生物基准值, 我国本土生物毒性数据也存在缺乏的问题, 因此, 通过筛选后本文进行了 9 种污染物的 BER 技术的探索与分析, 污染物数量较少可能会带来水生生物基准值估算的一些不确定性。采用 7 种生物组合方式来对中美水生生物基准预测与估算进行探索, 多样的生物组合方式可一定程度上减小 BER 估算预测的不确定性。

3 结论

3.1 在 US EPA 推荐的 58 种污染物的基础上, 结合“三门八科”生物毒性数据需求原则, 最终筛

选出 9 个中美共有且本土生物毒性数据较丰富的污染物,包括:As(III)、Cr(VI)、Hg、Cu、Zn、Pb、对硫磷、毒死蜱和三丁基锡(TBT);依据本土生物毒性数据,推导该 9 种污染物的本土水生生物急性基准值分别为:201.72、2.64、0.74、1.32、55.83、92.25、0.12、0.36 和 0.38 $\mu\text{g/L}$ 。

3.2 提出了 7 种本土生物组合方式的 BER 技术,并对基于实测毒性数据的基准值和基于 BER 技术所预测的基准值进行了差异分析,依据不同生物组合的预测效果,初步提出基于科或属的生物组合方式 2(与 US EPA 前 4 属同类的我国 4 属/美国基准文件前 4 属)、生物组合方式 4(我国蚤科大型蚤+蚤状蚤+锯顶低额蚤+模糊网纹蚤/美国基准文件中类似的 4 个蚤科物种)和生物组合方式 5(我国指定 4 属中各 1 种生物/美国同类的 4 属生物)的 BER 技术可较好地 9 种污染物的本土水生生物基准值进行预测。研究结果表明在充分地利用现有生物毒性数据或进行较少的生物毒性试验(4 种)的基础上可对我国水生生物基准值进行预测。

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.水环境质量基准方法与应用 [M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [3] 闫振广,余若祯,焦聪颖,等.水质基准方法学中若干关键技术探讨 [J]. 环境科学研究, 2012,25(4):397-403.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 王晓南,郑 欣,闫振广,等.水质基准鱼类受试生物筛选 [J]. 环境科学研究, 2014,27(4):341-348.
- [9] 郑 欣,闫振广,王晓南,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.
- [10] 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, 2014,27(4):349-355.
- [11] 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.
- [12] 吴丰昌,孟 伟,张瑞卿,等.保护淡水水生生物硝基苯水质基准研究 [J]. 环境科学研究, 2011,24(1):1-10.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 吴丰昌,冯承莲,曹宇静,等.针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.
- [16] Jin X, Zha J, Xu Y, et al. Derivation of aquatic predicted no-effect concentration (PNEC) for 2, 4-dichlorophenol: Comparing native species data with non-native species data [J]. Chemosphere, 2011,84(10):1506-1511.
- [17] Wang X, Liu Z, Yan Z, 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.
- [18] Yan Z, Zhang Z, Wang H, et al. Development of aquatic life criteria for nitrobenzene in China [J]. Environmental Pollution, 2012,162:86-90.
- [19] Yang S, Yan Z, Xu F, et al. Development of freshwater aquatic life criteria for tetrabromobisphenol A in China [J]. Environmental Pollution, 2012,169:59-63.
- [20] US EPA. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses (PB 85-227049) [R]. Duluth, Minnesota, Narragansett, Rhode Island; Corvallis, Oregon, USA: Office of Research and Development, Environmental Research Laboratories, U.S. Environmental Protection Agency, 1985.
- [21] ANZECC A. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality [R]. Canberra, Australia: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, 2000.
- [22] Davies P, Cook L, Goenarso D. Sublethal responses to pesticides of several species of Australian freshwater fish and crustaceans and rainbow trout [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1994,13(8):1341-1354.
- [23] 中国科学院.中国动物志 [M]. 北京:科学出版社, 1979.
- [24] Wang X, Yan Z, Liu Z, 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.
- [25] USEPA. Web-based interspecies correlation estimation (Web-ICE) for acute toxicity: User manual [M]. Gulf Breeze:USEPA, Office of Research and Development, 2013.
- [26] 闫振广,孟 伟,刘征涛,等.我国典型流域镉水质基准研究 [J]. 环境科学研究, 2010,23(10):1221-1228.
- [27] Dyer S, Versteeg D, Belanger S, et al. Comparison of species sensitivity distributions derived from interspecies correlation models to distributions used to derive water quality criteria [J]. Environmental Science and Technology, 2008,42(8):3076-3083.
- [28] Dyer S, Versteeg D, Belanger S, et al. Interspecies correlation

- estimates predict protective environmental concentrations [J]. Environmental Science and Technology, 2006,40(9):3102-3111.
- [29] Blum D, Speece R. Determining chemical toxicity to aquatic species [J]. Environmental Science and Technology, 1990,24(3): 284-293.
- [30] Feng C, Wu F, Dyer S, 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.
- [31] Wu F, Mu Y, Chang H, et al. Predicting water quality criteria for protecting aquatic life from physicochemical properties of metals or metalloids [J]. Environmental Science and Technology, 2012,47(1): 446-453.
- [32] Awkerman J, Raimondo S, Barron M. Development of species sensitivity distributions for wildlife using interspecies toxicity correlation models [J]. Environmental Science and Technology, 2008,42(9):3447-3452.
- [33] 吴丰昌,冯承莲,曹宇静,等.我国铜的淡水生物水质基准研究 [J]. 生态毒理学报, 2011,6(6):617-628.
- [34] 闫振广,何丽,高富,等.铅水生生物水质基准研究与初步应用 [J]. 环境科学与技术, 2014,37(4):31-37.
- [35] US EPA. 1995 Updates: water quality criteria documents for the protection of aquatic life in ambient water [R]. Office of Water, United States Environmental Protection Agency, 1996.
- [36] 马继华,蒋耀培,刘泉,等.“毒死蜱”对南美白对虾的急性毒性影响 [J]. 水产科技情报, 2009,(4):192-194.
- [37] 葛士林,曹传旺,王志英.3 种农药对红裸须摇蚊体内蛋白质质量分数和 AChE 活性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2011,39(1): 108-109.
- [38] 谭亚军.四种杀虫剂对大型蚤(*D. magna*)的慢性毒性 [D]. 浙江大学, 2004.
- [39] 徐燕,边文杰,李少南,等.5 种杀虫剂在水-人工底泥系统中对大型蚤的急性毒性及其比较 [J]. 农业环境科学学报, 2011,30(5): 855-859.
- [40] 吴长兴.毒死蜱和氟虫腈的环境毒理与风险 [D]. 杭州:浙江大学环境与资源学院, 2010.
- [41] 来有鹏,刘贤金,余向阳,等.农药对河虾的急性毒性及其谷胱甘肽转移酶(GSTs)的影响 [J]. 农药, 2008,47(11):820-822.
- [42] 丁正峰,薛晖,王晓丰,等.毒死蜱(CPF)对克氏原螯虾的急性毒性及组织病理观察 [J]. 生态与农村环境学报, 2012,28(4): 462-467.
- [43] 李康.阿特拉津和毒死蜱对中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)的毒性效应研究 [D]. 华东师范大学, 2005.
- [44] 边文杰,徐燕,李少南,等.毒死蜱与鱼肝微粒体 P450 的相互作用 [J]. 浙江农业学报, 2011,23(4):776-781.
- [45] 张莉,顾晓军,刘新.鱼类肝脏微粒体对于硫代磷酸酯类杀虫剂活化代谢率的种间差异 [J]. 生态毒理学报, 2010,5(6): 809-816.
- [46] 李常健,骆鹰,杨锦兀,等.阿维菌素-毒死蜱对草鱼的毒性效应研究 [J]. 安徽农业科学, 2011,39(6):3365-3367.
- [47] 丁正峰,薛晖,王晓丰,等.毒死蜱(CPF)对河川沙塘鳢幼鱼的急性毒性 [J]. 中国水产科学, 2012,19(3):528-535.
- [48] 刘丽.毒死蜱对鲤鱼的免疫毒性研究 [J]. 河南师范大学, 2013.
- [49] 马军国,李效宇.毒死蜱对尖膀胱鳅的急性毒性试验 [J]. 湖北农业科学, 2012,51(19):4330-4332.
- [50] 马军国.白鲢细胞色素 P450(CYP3A137)的克隆及其表达研究 [J]. 河南师范大学, 2013.
- [51] 夏晓华,张林霞,王莉娜,等.毒死蜱对大鳞副泥鳅的急性毒性及遗传毒性研究 [J]. 河南农业科学, 2013,1:129-131.
- [52] 王娜,刘莉莉,孙凯峰,等.有机磷农药的构效关系及其对浮游生物的毒性效应 [J]. 生态环境学报, 2012,21(1):118-123.
- [53] 郑璐.稻田排水中毒死蜱对鲫鱼毒性效应的研究 [D]. 吉林农业大学, 2013.
- [54] 夏锦瑜,王冬兰,张志勇,等.毒死蜱和丙溴磷对鲫鱼的毒性效应及其在鱼体中的富集 [J]. 江苏农业学报, 2010,26(5):1088-1092.
- [55] 侯方浩,余向阳,赵于丁,等.毒死蜱对锦鲤性腺的影响及其在鱼组织中的富集 [J]. 江苏农业学报, 2009,25(1):188-191.
- [56] 尹晓辉,朱国念,邓建宇,等.毒死蜱对中华蟾蜍胚胎发育毒性及生态毒理效应 [C]. 第六届全国环境化学大会暨环境科学仪器与分析仪器展览会摘要集, 2011.
- [57] 沈坚,赵颖,李少南,等.三种常用农药对环棱螺、圆田螺和河蚬的急性毒性研究 [J]. 农药学报, 2013,15(5):559-566.
- [58] 宋志慧,陈天乙,马维琦.有机锡化合物对萝卜螺的毒性作用 [J]. 环境科学, 1997,4:83-84.
- [59] 王珊珊,冯流.有机锡化合物的毒性效应及其影响因素 [J]. 安全与环境学报, 2005,5(3):12-15.
- [60] 张宝东,张毓琪.氯化三丁基锡对鲤鱼的急性毒性 [J]. 交通环保:水运版, 1995,16(1):18-19.
- [61] 谭燕,李远友,杜永兵,等.三丁基锡对孔雀鱼的毒性效应研究 [J]. 环境化学, 2006,25(3):315-319.
- [62] 宋志慧,陈天乙,刘如冰.三丁基锡对摇蚊幼虫的毒性作用 [J]. 环境科学, 1998,19(2):87-88.
- [63] 王蕾.三丁基锡对非洲爪蟾和红鲫的毒性效应 [J]. 华东师范大学, 2008.
- [64] 朱春华,薛海波,李广丽.三丁基锡(TBT)对罗氏沼虾的毒性效应 [J]. 生态学杂志, 2011,30(3):527-532.
- [65] 陈天乙,郑素平.有机锡化合物对水生无脊椎动物的毒性研究 [J]. 环境化学, 1994,13(3):266-268.
- [66] 陈天乙,谭元生,田明.有机锡化合物对底栖动物的急性毒性研究 [J]. 环境科学, 1994,15(5):63-64.
- [67] RIVM. Guidance document on deriving environmental risk limits in the Netherlands. Report No. 601501012 [R]. Bilthoven, the Netherlands: National Institute of Public Health and the Environment, 2001.
- [68] USEPA. Water quality standards handbook [M]. Washington DC: Office of Water, 1994.

作者简介: 王晓南(1986-),男,山西运城人,助理研究员,博士,主要从事生态毒理学、环境基准与风险评估研究.发表论文 20 余篇。