

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20140604002

郑欣, 闫振广*, 刘征涛, 等. 水生生物水质基准研究中轮虫、水螅、涡虫类受试生物的筛选[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(1): 225-234

Zheng X, Yan Z G, Liu Z T, et al. Screening of native rotifers, hydra, planaria for deriving aquatic life criteria [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015, 10(1): 225-234 (in Chinese)

水生生物水质基准研究中轮虫、水螅、涡虫类受试生物的筛选

郑欣, 闫振广*, 刘征涛, 刘婷婷, 王晓南, 武江越, 王伟莉

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

收稿日期: 2014-06-04 录用日期: 2014-09-04

摘要: 轮虫、水螅、涡虫是水生生态系统的重要生物类群。因其对水体污染较敏感, 所以对水生生物基准研究有重要意义。依据我国生物区系资料及毒性数据丰度, 筛选出 8 种代表性本土轮虫、水螅、涡虫类生物。参照美国水生生物基准技术指南, 搜集、筛选了这 8 种代表性生物的急性毒性数据, 通过数据分析, 筛选出对各物种毒性最大的污染物, 主要包括重金属、农药、有机锡化物、表面活性剂、吡啶胺类杀菌剂。分析污染物的物种敏感度分布, 依据累积概率对代表性生物的物种敏感性进行分类, 结果为: 萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus*)、绿水螅 (*Hydra viridissima*)、普通水螅 (*Hydra vulgaris*) 对重金属铜的累积概率为 6.5%、8.5% 和 10.4%; 普通水螅 (*Hydra vulgaris*) 对重金属汞的累积概率为 6.3%; 龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*) 和四齿腔轮虫 (*Lecane quadridentata*) 对五氯酚钠的累积概率为 5.1% 和 7.6%; 褐水螅 (*Hydra oligactis*) 和绿水螅 (*Hydra viridissima*) 对三丁基氧化锡的累积概率为 6.9% 和 13.8%; 萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus*) 对氟啶胺的累积概率为 6.7%, 日本三角涡虫 (*Dugesia japonica*) 对四氯化碳、十二烷基苯磺酸钠的累积概率分别为 6.7% 和 7.1%。上述结果表明: 萼花臂尾轮虫、绿水螅对重金属铜敏感; 普通水螅对重金属铜和汞敏感; 龟甲轮虫和四齿腔轮虫对农药敏感; 褐水螅和绿水螅对有机锡化物敏感; 萼花臂尾轮虫对吡啶胺类杀菌剂敏感; 日本三角涡虫对四氯化碳、表面活性剂敏感。这 7 种代表性生物可作为相关污染物的水生生物基准受试物种。

关键词: 基准受试生物; 轮虫; 水螅; 涡虫; 水生生物基准; 物种敏感度分布

文章编号: 1673-5897(2015)1-225-10 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Screening of Native Rotifers, Hydra, Planaria for Deriving Aquatic Life Criteria

Zheng Xin, Yan Zhengguang*, Liu Zhengtao, Liu Tingting, Wang Xiaonan, Wu Jiangyue, Wang Weili

State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effect and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Received 4 June 2014 accepted 4 September 2014

Abstract: Rotifers, hydra, planaria are important biological community in aquatic ecosystem. They play important role on the study of aquatic life criteria due to their high sensitivity to pollutants. On the basis of biota data in Chi-

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07501-003-06); 科技部科技基础性工作专项 (2014FY120600)

作者简介: 郑欣 (1981-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为水质基准与标准, E-mail: Zhengxin@craes.org.cn

* 通讯作者 (Corresponding author) E-mail: zgyan@craes.org.cn

na, eight representative native rotifers, hydra, and planaria were selected. The pollutant acute toxicity data of these species were collected and screened according to the water quality criteria derivation guidelines of the US EPA. The results of data analysis showed that there were thirteen categories of pollutants which were most toxic to these species, including heavy metals, pesticides, organic tin compounds, surfactants, and pyridylamino fungicides. The species sensitivities were classified by the cumulative probability from the sensitivity distribution curves of the most toxic pollutants. The analysis of the species sensitivity distribution showed that the cumulative probability of *Brachionus calyciflorus*, *Hydra viridissima* and *Hydra vulgaris* to copper were 6.5%, 8.5% and 10.4%, respectively. *Hydra vulgaris* to mercury was 6.3%. *Keratella cochlearis* and *Lecane quadridentata* to sodium pentachlorophenolate were 5.1% and 7.6%. *Hydra oligactis* and *Hydra viridissima* to bis(tributyltin) oxide were 6.9% and 13.8%, respectively. *Brachionus calyciflorus* to fluazinam was 6.7%. *Dugesia japonica* to carbon tetrachloride and sodium dodecylbenzenesulphonate were 6.7% and 7.1%. These results showed that *Brachionus calyciflorus*, *Hydra viridissima* were sensitive to copper, and *Hydra vulgaris* was sensitive to copper and mercury. *Lecane quadridentata* and *Keratella cochlearis* were sensitive to pesticide. *Hydra oligactis* and *Hydra viridissima* were sensitive to organic tin compounds. *Brachionus calyciflorus* were sensitive to pyridine amides fungicides. *Dugesia japonica* was sensitive to carbon tetrachloride and surfactant. These seven species may act as the test organisms for development of water quality criteria.

Keywords: test organisms; rotifers; hydra; planaria; aquatic life criteria; species sensitivity distribution

水生动物主要包括脊索动物门、节肢动物门、线形动物门、环节动物门、软体动物门、轮虫动物门、腔肠动物门和扁形动物门等,其中轮虫动物门、腔肠动物门和扁形动物门是水生动物中比较低等的类群。

轮虫属于轮虫动物门,是最小的多细胞动物,拥有最强散布能力和最高繁殖速率^[1]。轮虫广泛分布于各类淡水水体中,在沿海及河口地区也有分布。轮虫种类繁多,仅我国已确定的种类有450余种^[2],而且数量极大,作为淡水浮游动物主要组成部分,是鱼类等水生动物的理想开口饵料和优质食物^[3]。作为食物链的中间环节,轮虫对水生生态系统结构、功能和生物生产力的研究具有重要意义。轮虫也是生态毒理学研究的受试生物和重要的指示生物,尤其是臂尾轮虫属已广泛用于监测环境污染^[4],Belgis等^[5]评价了近千种化学物质对轮虫的毒性影响,发现轮虫对环境毒物的敏感性比蚤类更高,一些国家(如新西兰、比利时)把轮虫作为生态毒理学评价的受试生物,用于检测化工和农药生产厂家排放废水的毒性。

水螅是腔肠动物门的代表,是多细胞无脊椎动物,通常具有整个的再生能力。淡水水螅分布广泛,在世界上已经发现4属,即原水螅属、水螅属、柄水螅属和绿水螅属。原水螅属在我国尚未发现^[6],水螅具有双胚层结构,无性繁殖再生能力强,试验成本低,因此常作为急性毒性试验受试生物^[7]。

涡虫属扁形动物门,是水生生态系统的重要组成部分之一,多数为淡水种,淡水涡虫广泛分布于世界各地的洁净泉溪之中,对生活水环境变化反应敏感,在毒理学研究中作为实验动物,已报道的多种农药、重金属对涡虫急性毒性等的研究表明,以涡虫作为受试动物进行污染物的检测具有较高灵敏度^[8-9]。德国以涡虫作为I类水的一种指示生物^[10],我国台湾环保署也将涡虫作为贫腐水质的一种指示生物^[11]。日本三角涡虫作为淡水污染指示动物,在环境水源重金属污染研究评估方面起到重要作用。

轮虫、水螅和涡虫不仅在水质评价和生物检测中有广泛应用,在水质基准推算中也是重要选择对象,美国国家环境保护局(US EPA)于1985年制定了《推导保护水生生物及其用途的水质基准的技术指南》^[12],其中明确提出至少需要来自3门8科的水生生物急性毒性数据,包括节肢动物门或脊索动物门之外(如轮虫动物)的一科。从保护生物多样性的角度出发,制定水质基准和标准必须考虑不同生物分类和营养级别的各种水生生物^[13-14],轮虫、水螅和涡虫都是较为常见的小型淡水低等动物,能代表不同营养级别,选用合适的代表性物种对推导我国水质基准具有重要意义。水质基准受试生物筛选是我国发展本土水质基准的重要环节之一,最近

已有相关的系列研究^[15-18],利用物种敏感性分布分析方法对本土鱼类、两栖类、甲壳类、环节动物及水生昆虫进行了受试生物筛选研究,提出了建议作为基准受试生物的水生动物种类,弥补了国内外此方面研究的不足,但是对轮虫动物门、腔肠动物门和扁形动物门的物种筛选研究尚未见报道。

该研究选择我国本土代表性轮虫、水螅和涡虫,从中筛选出对每种生物毒性最大的污染物,分析各污染物的物种敏感度分布。在此基础上,提出本土轮虫、水螅和涡虫的基准研究受试生物名单,以期为我国水质基准研究提供支持。

1 材料与方法(Materials and Methods)

1.1 本土代表性轮虫、水螅、涡虫的筛选

依据公开发表的文献对我国轮虫、水螅、涡虫的分布进行调查,筛选原则包括地理分布、生态学意义、污染物毒性数据量、特有性及可获得性等,其中地理分布范围为重要指标。

1.2 毒性数据筛选与分析

参照水生生物基准的数据筛选原则^[12],筛查 ECOTOX^[19]及公开发表的文献中各类污染物对本土代表性轮虫、水螅、涡虫的急性毒性数据。数据筛选的主要原则包括:(1)要有明确的测试终点、暴露时间及试验条件的相关描述;(2)毒性试验指标为 24 h、48 h 或 96 h 的 LC_{50} ;(3)优先选择流水式试验及对试验溶液浓度有监控的毒性数据;(4)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;(5)同生物属的急性毒性数据如果差异过大(超出 1 个数量级),应作为有疑点的数据而谨慎使用;(6)对于同一个物种或同一个终点有多个毒性值可用时,使用其几何平均值。

对于筛选得到的毒性数据:首先利用同一物种的急性毒性值的几何平均值求出 SMAVs (species mean acute values 种平均毒性值),即同物种的 LC_{50} 和 EC_{50} 求得的几何平均值为急性种平均毒性值。并对污染物的 SMAVs 从小到大进行排序;选出排名前三的污染物名单,序号越小表明毒性越大;数据分析软件为 Origin9.0。

根据《生物监测技术规范(水环境部分)》^[20]中污染物的毒性分级标准,将目标污染物质对水生植物的毒性进行分级,即: $LC_{50} < 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为剧毒; $LC_{50} = 1 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为高毒; $LC_{50} = 100 \sim 1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

为中等毒性; $LC_{50} = 1000 \sim 10000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为低毒; $LC_{50} > 10000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为微毒或无毒。

1.3 污染物毒性数据筛选与分析

依据文献方法^[15-18],重新筛选对目标生物毒性最大污染物的急性生物毒性数据,计算 SMAV,然后对每种水生生物的不同污染物的 SMAV 排序,获得排序在前 3 位的污染物类别,对毒性最大的污染物,重新筛选其急性生物毒性数据,进行本土代表性轮虫、水螅、涡虫对各污染物的敏感度分析,确定对污染物敏感的生物类别,提出受试生物名单。

关于物种敏感性分级的研究较少,根据水质基准技术惯例,水质基准值可以保护 95% 生物^[12 21],因此如果生物的累积概率(生物受污染物胁迫的比例)小于 5%,即使是水质基准也无法对其进行保护,可将该生物界定为非常敏感,当受胁迫的生物分别超过 15% 和 30% 时,污染物具有“一定风险”和“明显风险”^[22],物种累积概率低于上述限值的生物分别属于敏感和较敏感,根据荷兰公共卫生和环境研究院(RIVM)风险评估技术导则,当受胁迫生物超过 50% 时,污染物为“严重风险”^[23],可将物种累积概率超过 50% 的物种定义为不敏感。

2 结果(Results)

2.1 本土代表性轮虫、水螅、涡虫

调研结果表明,我国轮虫常见的有旋轮属(Philodina)、猪吻轮属(Dicraniphorus)、腔轮属(Lecane)和水轮属(Epiphanes)等,常见的萼花臂尾轮虫(Brachionus calyciflorus)、褶皱臂尾轮虫(Brachionus plicatilis)、四齿腔轮虫(Lecane quadridentata)、龟甲轮虫(Keratella cochlearis)分布范围如表 1。在世界上已发现的 4 属水螅包括原水螅属(Protohydra)、水螅属(Hydra)、柄水螅属(Pelmatohydra)和绿水螅属(Chlorohydra),我国存在分布记录的水螅属有普通水螅(Hydra vulgaris)、褐水螅(Hydra oligactis)和绿水螅(Hydra viridissima)。涡虫是扁形动物门(Platyhelminthes)涡虫纲(Turbellaria)中淡水生活的习见种类,属三肠目(Tricladida),世界上已发现近 400 种,我国记录 7 种,由于我国动物学界从事涡虫研究者甚少,因此,主要根据 ECOTOX 数据库的毒性效应数据,结合本土具有典型代表性的物种和以往的研究数据,选择了涡虫纲里唯一的世界广布种,日本三角涡虫(Dugesia japonica),它分布最广,是亚洲东部常见的一种。

表 1 我国本土代表性轮虫、水螅、涡虫及其分布范围

Table 1 Native representative rotifers , hydra , planaria and their distributions in China

物种名称 Species	门 Phylum	科属 Family / Genus	区域分布 Distribution
萼花臂尾轮虫 Brachionus calyciflorus	轮虫动物门 Rotifera	臂尾轮虫科/臂尾轮虫属 Brachionidae/Brachionus	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、新疆、西藏、四川、湖北、湖南、江西、安徽、浙江、江苏、广东、广西等 Heilongjiang , Jinlin , Liaoning , Inner Mongolia , Xinjiang , Xizang , Sichuan , Hubei , Hunan , Jiangxi , Anhui , Zhejiang , Jiangsu , Guangdong , Guangxi provinces , etc.
褶皱臂尾轮虫 Brachionus plicatilis	轮虫动物门 Rotifera	臂尾轮虫科/臂尾轮虫属 Brachionidae/Brachionus	沿海河口 Coastal , estuary
四齿腔轮虫 Lecane quadridentata	轮虫动物门 Rotifera	腔轮科/腔轮属 Lecanidae/Lecane	分布广泛 Widely distribute
龟甲轮虫 Keratella cochlearis	轮虫动物门 Rotifera	臂尾轮虫科/龟甲轮属 Brachionidae/Keratella	遍布中国各地 ,在长江中下游湖泊池塘中十分常见 Widely distribute in China ,common in lakes and ponds in middle and lower Yangtze River
褐水螅 Hydra oligactis	腔肠动物门 Coelenterata	水螅属 Hydra	分布广泛 Widely distribute
绿水螅 Hydra viridissima	腔肠动物门 Coelenterata	水螅属 Hydra	分布广泛 Widely distribute
普通水螅 Hydra vulgaris	腔肠动物门 Coelenterata	水螅属 Hydra	分布广泛 Widely distribute
日本三角涡虫 Dugesia japonica	扁形动物门 Platyhelminthes	三角涡虫属 Dugesia	在全国分布于除青海省、内蒙古自治区和新疆以外的各省 Widely distribute in China except Qinghai , Inner Mongolia and Xinjiang province

2.2 对轮虫、水螅、涡虫毒性最大的污染物

对 8 种代表性物种的急性毒性数据筛选排序 , 毒性最大的 3 种污染物如表 2 所示 , 筛选得到的 13 种污染物主要包括 4 种重金属、3 种农药、2 种有机锡化物、2 种表面活性剂、1 种吡啶胺类杀菌剂 , 所有污染物对筛选物种表现为剧毒 , 氰脲胺对萼花臂尾轮虫和日本三角涡虫毒性最大 , SMAVs 分别为 $1.6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $46.73 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 三丁基氧化锡对褐水螅和绿水螅毒性最大 , SMAVs 分别为 $0.71 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.70 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 三正丁基氢锡对萼花臂尾轮虫和褶皱臂尾轮虫毒性都较大 , SMAVs 分别为 $19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $11 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 重金属铜、银、镉、汞毒性较大 , 对普通水螅毒性最大的 3 种污染物均为重金属 , 而对龟甲轮虫和日本三角涡虫毒性排前 3 位的不包括重金属 , 3 种农药敌百虫、五氯酚钠、2,3,

4- β -四氯苯酚 , 对龟甲轮虫毒性较大 , 其中五氯酚钠对四齿腔轮虫和龟甲轮虫毒性排名第一 , 表面活性剂十二烷基硫酸钠、十二烷基苯磺酸钠对轮虫和涡虫均有较大毒性。

2.3 污染物的物种敏感度分布与基准受试生物的确定

根据对 8 种代表性物种毒性最大 13 种污染物的急性毒性数据 , 绘制各污染物的物种敏感度分布如图 1 所示。

目前根据累积概率对物种敏感性分级的研究较缺乏 , 最近的研究认为物种敏感度与累积概率关系为 : 累计概率大于 5% 小于 15% 时属敏感 , 大于 15% 小于 30% 时较敏感 , 大于 50% 时不敏感 , 敏感物种可推荐为基准受试生物^[12,18-20] , 轮虫、水螅、涡虫对污染物的累积概率和敏感性如表 3 所示。

表 2 对代表性轮虫、水螅、涡虫毒性最大的污染物
Table 2 The most toxic pollutants to the rotifers , hydra and planaria

物种名称 Species	污染物 Pollutant	SMAV/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	ρ 范围/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) Range of ρ /($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	数据来源 Data source
萼花臂尾轮虫 Brachionus calyciflorus	氟啶胺 Fluazinam	1.6	1.2 ~ 2.1	[19]
	Ag^+	7.5	7.2 ~ 7.9	
	三正丁基氢锡 Tributyltin	19	13 ~ 25	
褶皱臂尾轮虫 Brachionus plicatilis	Cu^{2+}	10	320 ~ 1160	[19]
	三正丁基氢锡 Tributyltin	11		
	Hg^{2+}	65		
四齿腔轮虫 Lecane quadridentata	五氯酚钠 Sodium pentachlorophenate	10	320 ~ 1160	[19]
	Cu^{2+}	330		
	十二烷基硫酸钠 Sodium dodecyl sulfate	745		
龟甲轮虫 Keratella cochlearis	五氯酚钠 Sodium pentachlorophenate	7.5	82.5 ~ 310	[19]
	敌百虫 Trichlorfon	16		
	2,3,4,6-四氯苯酚 2,3,4,6-Tetrachlorophenol	690		
褐水螅 Hydra oligactis	三丁基氧化锡 Tributyltin oxide	0.71	1.58 ~ 1.87	[22]
	Hg^{2+}	56.2		
	Cu^{2+}	84		
绿水螅 Hydra viridissima	三丁基氧化锡 Tributyltin oxide	1.70	7 ~ 14	[24]
	Cd^{2+}	3.00		
	Cu^{2+}	27.84		
普通水螅 Hydra vulgaris	Hg^{2+}	10	200 ~ 1 500	[19, 25]
	Cu^{2+}	34.4		
	Cd^{2+}	159.9		
日本三角涡虫 Dugesia japonica	氟啶胺 Fluazinam	46.73	—	[19]
	十二烷基苯磺酸钠 Sodium dodecylbenzene sulfonate	230		
	四氯化碳 Carbon tetrachloride	547.72		

注:SMAV 表示种平均毒性值。 Note: SMAV stands for species mean acute values.

表 3 8 种代表性轮虫、水螅、涡虫对污染物的累积概率及敏感性

Table 1 Cumulative probability and sensitivity of the eight rotifers , hydra and planaria to the pollutants

物种名称 Species	化学物质 Chemical	累积概率/% Cumulative probability / %	物种敏感性 Species sensitivity
萼花臂尾轮虫 Brachionus calyciflorus	氟啶胺 Fluazinam	6.67	敏感 Sensitive
	Ag^+	18.9	较敏感 Relative sensitive
	三正丁基氢锡 Tributyltin	65.0	不敏感 Not sensitive
褶皱臂尾轮虫 Brachionus plicatilis	Cu^{2+}	2.60	非常敏感 Very sensitive
	三正丁基氢锡 Tributyltin	80.0	不敏感 Not sensitive
	Hg^{2+}	25.6	较敏感 Relative sensitive
四齿腔轮虫 Lecane quadridentata	五氯酚钠 Sodium pentachlorophenate	7.59	敏感 Sensitive
	Cu^{2+}	54.1	不敏感 Not sensitive
	十二烷基硫酸钠 Sodium dodecyl sulfate	2.60	非常敏感 Very sensitive
龟甲轮虫 Keratella cochlearis	五氯酚钠 Sodium pentachlorophenate	5.06	敏感 Sensitive
	敌百虫 Trichlorfon	15.9	较敏感 Relative sensitive
	2,3,4,6-四氯苯酚 2,3,4,6-Tetrachlorophenol	50.0	不敏感 Not sensitive
褐水螅 Hydra oligactis	三丁基氧化锡 Tributyltin oxide	6.90	敏感 Sensitive
	Hg^{2+}	26.2	较敏感 Relative sensitive
	Cu^{2+}	23.1	较敏感 Relative sensitive
绿水螅 Hydra viridissima	三丁基氧化锡 Tributyltin oxide	13.8	敏感 Sensitive
	Cd^{2+}	0.560	非常敏感 Very sensitive
	Cu^{2+}	8.47	敏感 Sensitive
普通水螅 Hydra vulgaris	Hg^{2+}	6.25	敏感 Sensitive
	Cu^{2+}	10.4	敏感 Sensitive
	Cd^{2+}	49.2	较不敏感 Relative not sensitive
日本三角涡虫 Dugesia japonica	氟啶胺 Fluazinam	26.7	较敏感 Relative sensitive
	十二烷基苯磺酸钠 Sodium dodecylbenzene sulfonate	7.14	敏感 Sensitive
	四氯化碳 Carbon tetrachloride	6.67	敏感 Sensitive

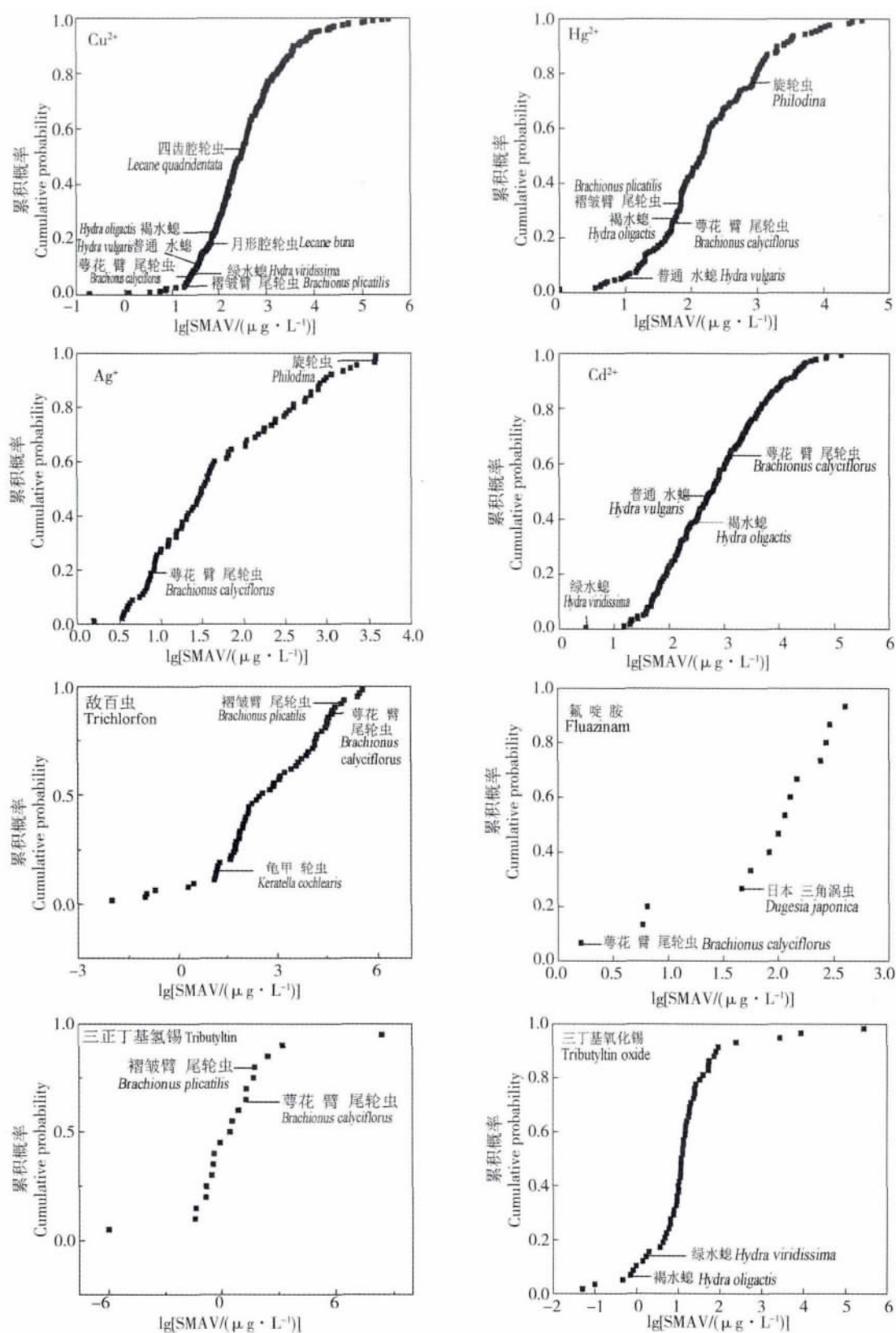


图1 13种污染物的物种敏感度分布曲线

Fig. 1 Species sensitivity distribution of the thirteen pollutants

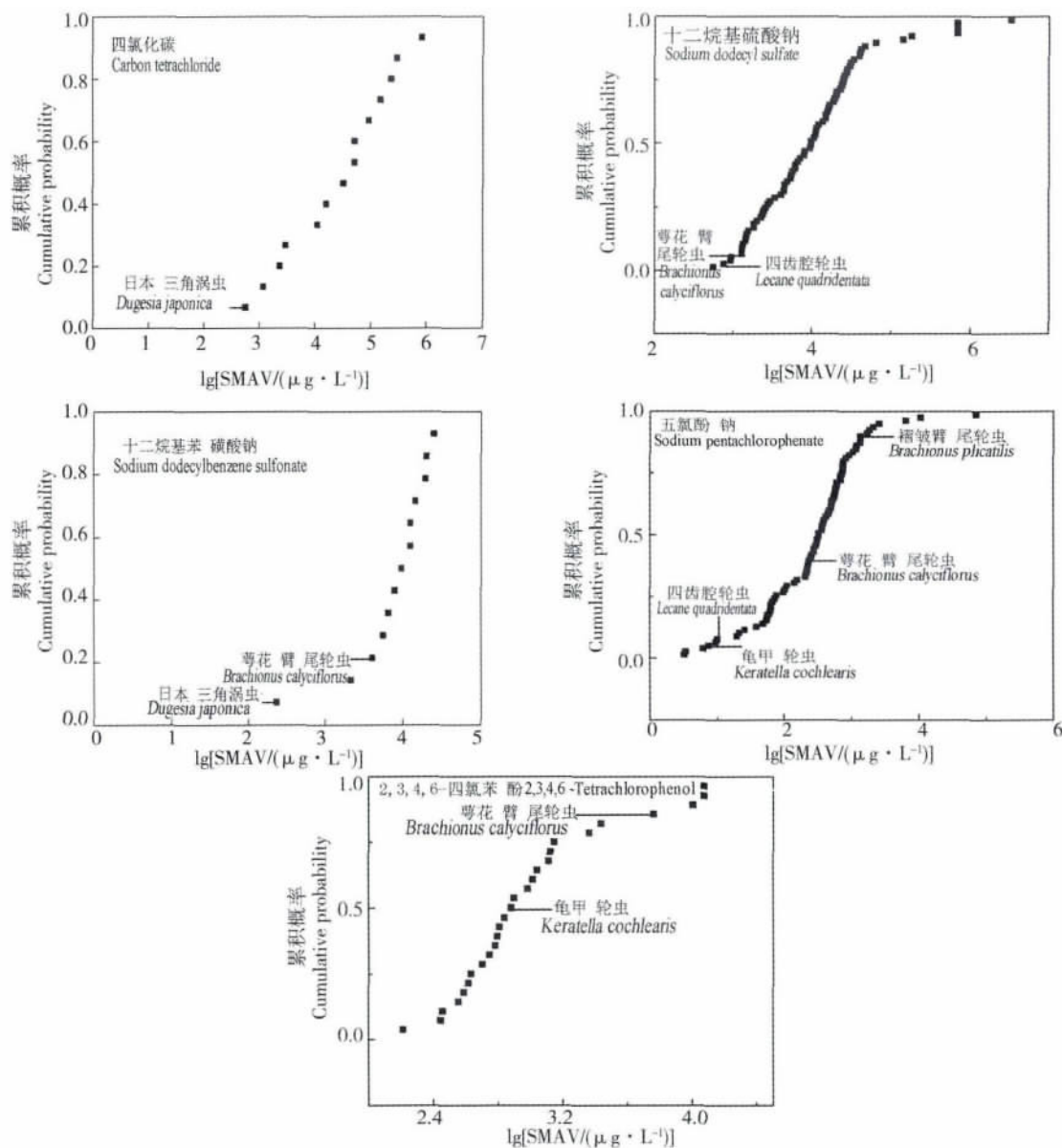


图 1 续

Fig. 1 Continued

由图 1 和表 3 可以看出,代表性轮虫和水螅对铜都较敏感,敏感性排序为褶皱臂尾轮虫 > 蓼花臂尾轮虫 > 绿水螅 > 普通水螅 > 褐水螅 > 四齿腔轮虫,其中褶皱臂尾轮虫的累积概率仅为 2.6%,低于 5%,表现为非常敏感,即使水质基准阈值可能也无法保护。而对蓼花臂尾轮虫毒性最大的 3 种污染物为氟啶胺、银、三正丁基氢锡,不包括铜。但是蓼花臂尾轮虫对铜的累积概率为 6.5%,表现为敏感,对银的累计概率为 18.9%,较敏感,重金属污染物对蓼花臂尾轮虫的毒性由大到小排序为银 > 铜 > 汞,表明在水环境中蓼花臂尾轮虫对重金属污染物很敏

感,蓼花臂尾轮虫对重金属污染物有很好的指示作用。汞对褶皱臂尾轮虫、褐水螅和普通水螅毒性排在前 3 位,其中褶皱臂尾轮虫敏感性大于褐水螅,普通水螅的累积概率最小,为 6.25%,表明普通水螅可作为重金属类污染物特别是汞的指示生物及基准研究受试生物。镉对水螅的毒性较大,特别是绿水螅,其在镉的物种敏感度分布中排名第一,累积概率仅为 0.56%,说明绿水螅对镉极度敏感,而褐水螅和普通水螅的累积概率均超过 30%,对镉相对不那么敏感。

龟甲轮虫和四齿腔轮虫对农药五氯酚钠最为敏

感 在污染物的物种敏感度分布中累积概率分别为 5.06% 和 7.59% ,均低于 15% ,而萼花臂尾轮虫的累积概率超过了 30% ,表现为相对不那么敏感,褶皱臂尾轮虫甚至对其有很强的耐受性。对于敌百虫,龟甲轮虫的累积概率为 15.9% ,较敏感,褶皱臂尾轮虫表现为不敏感。2,3,4,6-四氯苯酚对龟甲轮虫毒性高,但龟甲轮虫的累积概率达到了 50% ,说明对该农药不敏感。

萼花臂尾轮虫和褶皱臂尾轮虫对于三正丁基氢锡均很敏感,但是在三正丁基氢锡的物种敏感度分布中,二者的累积概率均超过 50% ,可能是毒性数据大部分来自甲壳类,缺少鱼、两栖类等水生生物数据;而三丁基氧化锡对褐水螅和绿水螅的毒性最大,其物种敏感度分布图中二者的累积概率也均低于 15% ,分别为 6.9% 和 13.8% ,表明水螅可能对有机锡化合物有较强的敏感性。

萼花臂尾轮虫和日本三角涡虫对氟啶胺最为敏感,二者在氟啶胺的物种敏感度分布中的累积概率也均低于 30% ,尤其是萼花臂尾轮虫对其耐受性最差,累积概率仅为 6.67% ,可以作为吡啶胺类杀菌剂污染的指示生物及基准研究受试生物。四齿腔轮虫在十二烷基硫酸钠的物种敏感性分布中累积概率为 2.6% ,低于 5% ,表现为非常敏感,不能成为水质基准保护的对象,日本三角涡虫对四氯化碳、十二烷基苯磺酸钠的敏感性位置排名第一,说明其对这 2 种污染物的指示作用比其他的水生动物更加灵敏,表明日本三角涡虫可作为这 3 种污染物水质基准推导的理想受试生物。

3 讨论 (Discussion)

全世界现存的轮虫种类约有 2 000 种,绝大多数在淡水水体中生活^[26],褶皱臂尾轮虫对盐度的适应能力很强,分布于河口的半咸水域,因此在淡水水质基准物种筛选中也可适时考虑。最近的研究利用物种敏感性分布分析方法对本土鱼类、两栖类、甲壳类、环节动物及水生昆虫进行了受试生物筛选,提出了建议作为基准受试生物的 10 种鱼类,5 种两栖类,12 种甲壳类,4 属环节动物,3 属水生昆虫。本研究筛选出 3 种轮虫、3 种水螅、1 种涡虫,污染物种类主要包括重金属、农药等。

铜和镉对水螅属的毒性大小取决于水螅物种,对于绿水螅,铜的毒性小于镉,但是对于普通水螅和褐水螅,铜的毒性大于镉,这与 Karntanut 等^[27]研究所得结论一致。有机锡化合物是一种较强的内分泌

干扰物,许多发达国家都将其列为优先控制的有毒污染物^[28-31],三丁基氧化锡对褐水螅和绿水螅的 SMAV 分别为 0.71 和 1.70 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,累积概率分别为 6.9% 和 13.8% ,但对正颤蚓毒性更大^[18],SMAV 仅为 0.1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,物种对三丁基氧化锡的累积概率均低于 15% ,表明褐水螅和绿水螅与正颤蚓均可作为基准受试生物。农药五氯酚钠对龟甲轮虫和四齿腔轮虫的毒性值远远低于推荐的环节动物基准受试生物仙女虫^[18],说明龟甲轮虫和四齿腔轮虫对此类污染物比环节动物更敏感,更适合作为基准受试生物。在自然水体中,表面活性剂的浓度较小,远未对水生生物产生毒害,但是在某些极端水域,如排污口处,由于生产与生活污水的集中排放,这些水体中表面活性剂的浓度可能很高,对河口性和沿岸性生物可能会产生明显的影响。因此,选取敏感的受试生物,对水体中有机化合污染物的监测和水质基准阈值推导有着重要的意义。萼花臂尾轮虫对十二烷基苯磺酸钠不是最敏感的,但累积概率小于 30% ,表明萼花臂尾轮虫也可作为表面活性剂的指示生物。

之前的研究显示,有机磷农药如毒死蜱、敌百虫等,有机氯农药如林丹等及菊酯类农药对鱼类、两栖类、甲壳类、环节动物及水生昆虫有较高毒性^[15-18]。在本研究中,有机磷农药敌百虫和有机氯农药五氯酚钠、四氯苯酚也对轮虫、水螅、涡虫毒性很强,龟甲轮虫和四齿腔轮虫对五氯酚钠的敏感性甚至要比其他类水生生物更高,而对鱼类毒性较高的菊酯类农药对轮虫、水螅、涡虫的毒性未在前列,可能由于此类研究较少,数据缺乏。而由于毒性数据的缺乏,还有本土的轮虫、水螅、涡虫未进行物种敏感性评价,随着研究不断深入和数据的积累,仍将有敏感的物种加入到基准受试生物名单中。

本研究中所搜集的试验数据均为急性毒性数据,而水质基准研究中慢性毒性数据更能反映物种的敏感性。但由于慢性试验时间长,费用高,慢性毒性数据相对不足,目前很多慢性毒性数据是根据急性慢性比值法 (ACR) 推算的,物种对污染物的敏感度趋势是相似的,因此在现阶段用急性毒性数据分析对污染物的敏感性可以为敏感受试生物筛选提供重要的参考。

综上所述,基于对本土代表性的轮虫、水螅、涡虫的物种敏感性分析,筛选出分属轮虫动物门、腔肠动物门和扁形动物门的 4 科 5 属的敏感性物种作为相关污染物水质基准研究中备选的受试生物,得出

了我国水生生物基准的本土受试轮虫、水螅、涡虫及对应的污染物,结果如下:萼花臂尾轮虫、绿水螅、普通水螅是铜的理想受试生物,普通水螅是汞的理想受试生物;龟甲轮虫和四齿腔轮虫是农药如五氯酚钠的理想受试生物;褐水螅和绿水螅是有机锡化合物如三丁基氧化锡的理想受试生物;萼花臂尾轮虫是吡啶胺类杀菌剂(如氟吡啶胺)的理想受试生物;日本三角涡虫是四氯化碳和表面活性剂如十二烷基苯磺酸钠的理想受试生物。

通讯作者简介: 闫振广(1972—),男,博士,副研究员,研究方向为水质基准与生态毒理学,发表论文50余篇。

参考文献(References):

- [1] 黄祥飞,席贻龙,诸葛燕. 轮虫[J]. 生物学通报, 1999, 34(11): 10-12
- [2] 许丹丹,席贻龙,马杰,等. Cd^{2+} 对角突臂尾轮虫和曲腿龟甲轮虫的急性毒性和生命表统计学参数的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4874-4880
Xu D D, Xi Y L, Ma J, et al. Acute toxicity and effect of Cd^{2+} on life table demography of *Brachionus angularis* and *Keratella valga* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 4874-4880 (in Chinese)
- [3] 陈天乙,于仁诚,孙红文. 有机锡对轮虫的毒性及QSAR分析[J]. 海洋通报, 1993, 12(6): 36-39
Chen T Y, Yu R C, Sun H W. Toxicity and QSAR of organotin compounds on *Fotifer* [J]. *Marine Science Bulletin*, 1993, 12(6): 36-39 (in Chinese)
- [4] Ferrando M D, Andreu E. Feeding behavior as an index of copper stress in *Daphnia magna* and *Brachionus calyciflorus* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology*, 1993, 106(2): 327-331
- [5] Belgis C, Persoone G. Cyst-based toxicity tests XVII—Prefeeding advantages in short-chronic rotifer micro-biotests [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60(1): 73-80
- [6] 史新柏,丁曙微,范学铭,等. 强壮水螅的特征及其与寡水螅的种间差别问题[J]. 动物学报, 1987, 33(2): 174-179
Shi X B, Ding S W, Fan X M, et al. The characteristics of *Hydra robusta* and its difference from *H. oligactis* [J]. *Acta Zoologica Sinica*, 1987, 33(2): 174-179 (in Chinese)
- [7] Beach M J, Pascoe D. The role of *Hydra vulgaris* (Pallas) in assessing the toxicity of freshwater pollutants [J]. *Water Research*, 1998, 32(1): 101-106
- [8] 刘昌平,刘昌利,王进. 四种常见农药对日本三角涡虫的急性毒性研究[J]. 中国林副特产, 2008, 6(6): 19-22
Liu C P, Liu C L, Wang J. Acute toxic study of four common pesticides on the *Dugesia japonica* [J]. *Forest By-Product and Speciality in China*, 2008, 6(6): 19-22 (in Chinese)
- [9] 赵江沙,曾兆. 铜、汞、铅对涡虫的急性毒性作用[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(6): 750-753
Zhao J S, Zeng Z. Acute toxicity of Cu^{2+} , Hg^{2+} and Pb^{2+} to planarian (*Dugesia japonica*) [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2004, 10(6): 750-753 (in Chinese)
- [10] 田贵全. 德国的水质分类、水环境质量及污水处理[J]. 山东环境, 1998, 86(5): 54-55
- [11] 陈广文,吕九全,马金友,等. 我国的淡水涡虫[J]. 生物学通报, 2000, 35(7): 11-14
- [12] 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
- [13] Yan Z, Zhang Z, Wang H, et al. Development of aquatic life criteria for nitrobenzene in China [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 162: 86-90
- [14] Yan Z, Wang H, Wang Y, et al. Developing a national water quality criteria system in China [J]. *Water Policy*, 2013, 15(6): 936-942
- [15] 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
Wang X N, Zheng X, Yan Z G, et al. Screening of native fishes for deriving aquatic life criteria [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(4): 349-355 (in Chinese)
- [16] 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
Cai J, Yan Z G, He L, et al. Screening of native amphibians for deriving aquatic life criteria [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(4): 349-355 (in Chinese)
- [17] 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
Zheng X, Yan Z G, Wang X N, et al. Screening of native crustaceans for deriving aquatic life criteria [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(4): 356-364 (in Chinese)
- [18] 王伟莉,闫振广,刘征涛,等. 水质基准本土环节动物及水生昆虫受试生物筛选[J]. 环境科学研究, 2014, 27(4): 365-372
Wang W L, Yan Z G, Liu Z T, et al. Screening of native annelids and aquatic insects for deriving aquatic life cri-

- teria [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(4): 365–372 (in Chinese)
- [19] US Environmental Protection Agency. ECOTOX Database [DB]. (2014-08-10) [2014-08-10]. <http://cfpub.epa.gov/ecotox/>
- [20] 国家环境保护局. 生物监测技术规范(水环境部分) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1986
- [21] Canadian Council of Ministers of the Environment. A protocol for the derivation of water quality guidelines for the protection of aquatic life 2007 [R]. Ottawa: CC-ME, 2007
- [22] 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 Z G, Liu Z T, Meng W. Development of emergency water quality standards for Cr^{6+} and Hg^{2+} in Liaohe River basin [J]. Engineering Sciences, 2013, 15(3): 26–32 (in Chinese)
- [23] Vlaardingen P L A V, 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]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2007
- [24] 陈娜, 郝家胜, 王莹, 等. 铜、铅、镉、锌、汞和银离子复合污染对水螅的急性毒性效应[J]. 生物学杂志, 2007, 24(3): 32–35
- Chen N, Hao J S, Wang Y, et al. Single and binary-combined acute toxicity of heavy metal ion Hg^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Ag^{+} , Zn^{2+} and Pb^{2+} to hydra [J]. Journal of Biology, 2007, 24(3): 32–35 (in Chinese)
- [25] 欧小兵, 李海云, 陈永煌, 等. 铜、镉对水螅的急性联合毒性作用[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(8): 584–588
- Ou X B, Li H Y, Chen Y H, et al. Toxicity and toxic effects of heavy metals cadmium and copper on Hydra sp [J]. Environmental Pollution & Control, 2006, 28(8): 584–588 (in Chinese)
- [26] 江巍, 宋振荣. 褶皱臂尾轮虫高密度培育技术的研究[J]. 福建水产, 2008(2): 13–16
- Jiang W, Song Z R. The high density cultivation technology of Brachionus plicatilis [J]. Journal of Fujian Fisheries, 2008(2): 13–16 (in Chinese)
- [27] Karntanut W, Pascoe D. Effects of removing symbiotic green algae on the response of Hydra viridissima (Pallas 1776) to metals [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 60(3): 301–305
- [28] Prange A, Jantzen E. Determination of organometallic species by gas chromatography inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 1996, 10(9): 105–109
- [29] De Mora S J, Pelletier E. Environmental tributyltin research: Past, present, future [J]. Environmental Technology, 1997, 18(2): 1169–1177
- [30] Laughlin R B. Bioaccumulation of TBT by aquatic organisms [M]. New York: Chapman & Hall, 1996: 331–357
- [31] 李红莉, 高虹, 徐晓琳, 等. 有机锡化合物在中国环境行为的研究状况[J]. 环境科学动态, 2003(2): 15–17