

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2019.06.001

介形类对重金属敏感性研究进展

唐振平^{1,2}, 周霞飞^{1,2}, 马如莉^{1,2}, 王正庆^{1,2}, 刘 珊^{1,2}, 陈 亮^{1,2*}

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;
2. 衡阳市核燃料循环地质理论与技术重点实验室, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 重金属污染日趋严重, 介形类作为评估重金属污染的指示生物被广泛关注。在对介形类关于重金属污染敏感性研究系统分析的基础上, 明确了重金属污染对介形类存在毒性作用; 对从介形类的野外采集到室内培养工作做了详细介绍; 总结对比了利用介形类的3种常见毒性实验方法的具体步骤及其优缺点, 特别是低成本、操作简易的6 d 免培养/免维护接触毒性实验。通过实验数据收集, 发现介形类毒性实验能够在毫克每升(mg/L)或微克每升($\mu\text{g/L}$)水平上检测金属和参比毒物的毒性, 证明该方法是一种可行的生物检测程序, 可用于污染水的常规监测、工业废水安全评估、土壤和沉积物毒性研究。提出了利用介形类评估重金属污染未来的研究方向, 以期对重金属污染的生物评价与监测提供参考。

关键词: 重金属; 介形类; 敏感性; 毒性实验

中图分类号: X835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-0062(2019)06-0001-07

Research Progress on the Sensitivity of Ostracods to Heavy Metals

TANG Zhenping^{1,2}, ZHOU Xiafei^{1,2}, MA Ruli^{1,2}, WANG Zhengqing^{1,2},
LIU Shan^{1,2}, CHEN Liang^{1,2*}

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Hengyang Key laboratory of Geological Theory and Technology for the Nuclear Fuel Cycle, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Heavy metal pollution is becoming more and more serious, and ostracods have been widely used as an indicator organism for assessing heavy metal pollution. Based on an analysis of the system of ostracods to heavy metal contamination, the toxic effects of heavy metal pollution to ostracods were clarified. The field collection and indoor cultivation work

收稿日期: 2019-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402002); 2018年青年骨干教师出国研修项目(留金发[2018]3103号)

作者简介: 唐振平(1962-), 男, 研究员, 博士, 主要从事环境勘探与污染控制、环境管理等方面的研究。E-mail: 120007233200@usc.edu.cn。* 通信作者: 陈 亮(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为水环境保护与治理方面的研究。E-mail: 715342131@qq.com

of the ostracods are introduced in detail. The specific steps and advantages and disadvantages of the three common toxicity test methods using ostracods were summarized and compared, especially the low-cost, easy-to-use 6 d culture-free/maintenance contact toxicity test. Through experimental data collection, it was found that the ostracods toxicity test can detect the toxicity of metal and reference poisons at the level of milligrams per liter (mg/L) or micrograms per liter ($\mu\text{g/L}$), which proves that the method is a viable biological test procedure for routine monitoring of contaminated water, industrial wastewater safety assessment, and soil and sediment toxicity studies. The research direction of using ostracods to evaluate the future of heavy metal pollution is proposed, in order to provide reference for the biological evaluation and monitoring of heavy metal pollution.

key words: heavy metal; ostracod; sensitivity; toxicity test

0 引 言

近年来,越来越多的证据支持底栖动物在评估重金属污染对生态系统影响方面可发挥重要作用^[1-3]。底栖动物中的小型甲壳动物介形类因为其个体微小,数量种类丰富,分布范围广,易于采集和进行实验室培养等一系列特点正被广大学者作为毒性评价材料使用^[4]。利用介形类特别是 *Cypris subglobosa* 和 *Heterocypris incongruens* 进行的重金属毒性实验,可在水体^[5]、沉积物^[6-8]、污泥^[9-10]、工业污染物^[11-13] 和道路粉尘^[14-16] 等不同污染介质中进行。介形类现生种的重金属毒性实验可提供重金属污染对该生物体和整个生态系统影响的第一手资料^[17],对于提高人们对重金属污染关于环境潜在有害影响的认识具有重要意义。为此,本文归纳与总结国内外重金属对介形类现生种的毒性实验研究,并指出目前存在的问题与未来发展趋势。

1 介形类对重金属的敏感性

随着我国工业发展、矿产开发以及城市化速度加快,重金属污染问题日益严重。重金属通过城市生活垃圾、工业污水、采矿和冶金废弃物等不断排入水体中,吸附于悬浮物在水底沉积物中富集^[18]。除了水体的重金属污染,污水灌溉和化石燃料的燃烧等致使我国土壤特别是耕地以及大气沉降的重金属污染也十分严重^[19-21]。重金属是一种很难消除的累积污染物,其特点是污染残留物持续存在,容易积累,不易被微生物降解^[22]。重金属可通过食物链在生物体中循环和积累,破坏它们正常的生理和代谢活动,因此其对生态环境和人类健康均构成巨大的潜在威胁。

国外许多学者研究证实介形类对重金属污染

十分敏感。F. Ruiz^[23] 等认为介形类动物对重金属污染、油类排放和缺氧环境高度敏感。L. Marzali^[24] 等利用多元分析(部分冗余分析和变异划分)发现沉积物中遗留的低浓度汞污染物也可对介形类等底栖无脊椎动物具有生物有效性和毒性。B. S. Khangarot and S. Das^[1] 证明有必要将介形类纳入生物测试,以检测土壤、污泥、沉积物和水生系统中是否存在重金属污染。R. Khanal^[14-16] 等对城市道路粉尘中重金属铜和锌对介形类(*Heterocypris incongruens*)的毒性进行了研究,确定 20% 的死亡率为 14 d 死亡率可接受阈值。F. Sánchez-bayo^[25] 等测定了 468 种包括重金属在内的淡水污染物和海洋污染物对水生甲壳动物的急性毒性,其中包括 8 个介形类属种。B. S. Khangaro and P. K. Ray^[4] 观察了不同 pH 值下淡水介形类(*Cypris subglobosa*)的急性铜毒性,当 pH 值从 8.5 降至 5.5 时,Cu 毒性值增大,反之亦然。

目前,国内仅在介形类重金属敏感性方面做了少量研究工作。N. Yu^[26] 等评价了不同水载氨、磷酸盐浓度和 pH 值对介形类(*Physocypria kraepelini*)的致死中浓度(LC₅₀)和安全浓度的影响。陈仕梅^[27-28] 等采用急性毒性实验方法测定介形类(*Physocypria kraepelini*)对常见重金属 Cd、Zn、Cu 的半致死浓度(LC₅₀)和安全浓度,并发现重金属 Cu 可对介形类(*Cypridopsis vidua*)肠壁结构产生不可逆的损伤。

2 介形类室内毒性实验

2.1 介形类野外收集与实验室培养

介形类分布领域十分广泛,包括海洋和内陆各类型的水体,甚至在非洲的森林土壤中也发现介形类(*Mesocypria teretris*)^[29]。于淡水系统,介

形类大多生存在流速较慢的河流和小溪以及静水湖泊、池塘沼泽、小水坑、稻田等。该生物一般在浅水区采用筛孔尺寸为 75 μm 的手抄网将水搅浑后用八字法收集,较深水区则采用采泥器收集。将样品采集回实验室后,尽快置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 左右的温度,以保持其活性。介形类样品经过筛孔尺寸为 75 μm 和 300 μm 双层筛子筛取,残留于筛孔尺寸为 75 μm 的筛子沉积物是含介形类的主体,为挑样的主要对象。筛孔尺寸为 300 μm 的筛子残留沉积物一般不含介形类,故很少挑样。挑样在体视显微镜进行。

挑出介形类可置于烧杯充氧泉水中进行常温单属种培养。介形类实验室内培养可用蓝藻喂养,O. Schmit and G. Rossett^[30] 研究发现蓝藻(*Tolypothrix tenuis*)非常适合喂养介形类(*Eucypris vi-*

rens),也可用高蛋白类鱼食喂养。B. S. Khangarot and S. Das^[1] 使用干鱼食(*Shalimar Fish Food Co*)对介形类(*Cypris subglobosa*)喂养效果良好。

2.2 介形类室内毒性实验

在国际上用于化学品毒性筛选和污染物毒性监测最常用的生物检测方法之一是对底栖动物进行急性毒性实验,以确定生物的敏感性,并推导出生物致死中浓度(LC_{50})等相关指数^[31-34]。毒性实验为评估生态系统中毒物影响和归宿的必要工具,并被广泛用于确定合适生物作为生物指标和获得生态系统健康状况^[32]。毒性测试为污染物的传统监管方法提供了基础,也是许多风险评估的重要组成部分。介形类三种常见毒性实验总结如表 1 所示。

表 1 三种常用介形类的重金属毒性实验
Table 1 Three common heavy metal toxicity tests of ostracod

毒性实验	实验周期	研究对象	观察指标	常用测试属种	优点	缺点
急性毒性实验	24 ~ 96 h	水体	个体死亡	<i>Cypris subglobosa</i> <i>Stenocypris major</i> <i>Physocypris kraepelini</i>	操作简单; 结果直观; 周期短	使用动物量大 获得信息有限 测得结果波动大
6 d 免培养/ 免维护接触实验	6 d	沉积物 土壤 道路粉尘	个体死亡 生长抑制	<i>Heterocypris incongruens</i> <i>Hyalella azteca</i>	免培养/免维护; 可了解毒性有否 积蓄作用和耐受性	周期较长; 实验终点单一
慢性毒性实验	14 d	道路粉尘	个体死亡 生长抑制 产卵与孵化情况	<i>Heterocypris incongruens</i>	获得信息 丰富科学	周期长; 成本高

2.2.1 重金属污染水体对介形类毒性实验

重金属污染水体对介形类的毒性实验一般选择经典急性毒性实验,实验终点是个体死亡。经典急性毒性实验是评价毒物一般毒性作用的实验,可在较短的时间内获得毒物的相关信息。该毒性实验需要选取健康成年的介形类,设置足够的等间距剂量组,选择观测时间记录个体死亡情况,根据剂量-反应关系计算致死中浓度(LC_{50})。这种急性实验程序简单,结果直观,可快速得出 LC_{50} ,但存在使用动物量大,获得信息有限,测得 LC_{50} 值波动大的局限性。

陈仕梅^[27]等采用经典急性毒性实验方法对常见重金属离子 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 毒性进行实验。先进行预实验确定正式实验试液的大致质量浓度范围。正式实验时根据预实验确定的最大无致死剂量(LD_0)和绝对致死剂量(LD_{100})对 Cd^{2+} 设置 6

个等差间距质量浓度(0.04 ~ 2.56 mg/L),对 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 设置 9 个等对数间距质量浓度(Cu^{2+} 0.05 ~ 20.00 mg/L ; Zn^{2+} 0.86 ~ 600 mg/L)。该实验每个浓度设置 3 个重复组和一个空白对照组。取 50 mL 烧杯中放置 20 mL 相应浓度的溶液(25 $^{\circ}\text{C}$, $\text{pH} = 7$)为一实验组,每组溶液中加入 20 只成体介形类(*Physocypris kraepelini*),实验期间不喂食。设置 24、48、72、96 h 四个观测时间,每次观测记录死亡个体数并对其进行清除。结果发现 24、48、72、96 h 时 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 对 *Physocypris kraepelini* 的半致死浓度(LC_{50})分别为 1.37、0.39、0.21 和 0.04 mg/L , 217.27、34.36、23.77 和 8.42 mg/L 及 7.28、1.26、0.65 和 0.39 mg/L ,安全浓度分别为 0.004、0.842 和 0.039 mg/L 。

2.2.2 重金属污染沉积物/土壤对介形类毒性实验
重金属污染沉积物/土壤对介形类毒性实验

一般选择 ISO 14371 标准,一种用于测定污染沉积物对介形类(*Heterocypris incongruens*)致死和亚致死效应的标准化方法^[35],观察指标为个体死亡和生长抑制。这种实验方法由比利时根特大学环境毒理学和水生生态学实验室开发,也被称为 Toxkits^[36],其独特之处在于实验生物都使用休眠卵(处于惰性状态),从而使生物材料成为可能,长期贮存开始进行毒性测试时孵化。利用休眠卵获得独立于种群培养的测试生物体,也被国际毒性测试标准所接受。例如,ISO 20665 标准^[37]描述了对 *Ceriodaphnia dubia* 的慢性毒性实验,以及 ISO 20666 标准^[38]描述了 48 h 对 *Brachionus calyciflorus* 进行的测试,两者均表明:实验可以用休眠卵孵化的生物体进行。实验选取孵化的新生介形类,置于加入毒物的测试板暴露生长 6 d,对其死亡和生长状况进行记录并计算得出致死中浓度(LC₅₀)和半最大效应浓度(EC₅₀)。这种 6 d 接触实验作为一个低成本和用户友好的工具,广泛应用于介形类对沉积物、土壤及道路粉尘的常规毒性检测。

B. Kudlak^[39]等选择 6 d 免培养/免维护直接接触实验方法进行沉积物毒性实验,使个体在 6 d 内暴露于沉积物中。在 6 个重复实验和 3 个单独实验中对 8 个环境沉积物样本进行了测试。这些沉积物的特点是污染程度小,毒性低。将 *Heterocypris incongruens* 先进行培养皿孵化(48 h, 25 ℃, 连续光照),孵化后预喂养 4 h(1 小瓶螺旋藻粉),然后在显微镜下测定长度。实验在测试板中添加 2 cm³ 标准淡水,每组加入 1 cm³ 沉积物和 2 cm³ 藻类食物悬浮液,每块测试板中放入 10 只介形类,用封口膜密封并盖上盖子,静置(25 ℃, 黑暗, 6 d)。6 天后对实验组和对照组的死亡率及其生长长度进行测定(Lugol 溶液固定,显微镜下),数据处理和分析得出 LC₅₀ 和 EC₅₀。结果发现 Cd²⁺ 和 Hg²⁺ 的毒性最大,金属毒性降序为:

$$\text{Cd}^{2+} > \text{Hg}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cr}^{6+} > \text{N}^{2+} \approx \text{Mn}^{7+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Li}^{1+} > \text{Fe}^{3+}.$$

2.2.3 重金属污染道路粉尘对介形类毒性实验

利用介形类进行道路粉尘毒性实验,6 d 接触暴露实验方法被普遍使用^[14-16],但是 W. Niyomaneerat^[40]等认为 6 d 接触实验的周期太短以及实验终点单一(死亡率及生长抑制),最近提出了一种新的慢性毒性实验方法。这个实验的观察指标为 14 d 死亡率和 14 天生长抑制,以及在繁殖

过程中的平均寿命、产卵量、平均产卵量、平均寿命和产卵率等。实验程序分为营养暴露阶段(含沉淀物),繁殖阶段(不含沉淀物),孵化阶段(不含沉淀物)。14 d 的营养暴露阶段是按照第 6 天的介形类毒性实验程序设计的,但按比例扩大时间(14 d)。毒性实验开始是营养暴露阶段,分别在测试板中加入 2 cm³ 藻悬液、1 cm³ 道路粉尘沉淀物和 10 只新生介形虫,孵育 14 d(25 ℃, 24 h 黑暗),第 7 天和第 14 天进行观测。繁殖阶段在 14 d 的营养暴露阶段之后,持续到所有介形类动物死亡。这个阶段每隔 1 天,记录介形类的死亡数、繁殖数等。孵化阶段与繁殖阶段同时进行,同步记录产卵数。实验最终确定 14 d 可接受性的死亡率阈值为 20%。实验统计受试体平均寿命为 20.1 ~ 29.3 d,身体长度为 900 μm,产卵率在 56.8% ~ 76.8%,产卵第一天产蛋卵和平均产卵量分别为 18.9 ~ 22.9 个和 18.5 ~ 28.1 个。实验表明,14 d 慢性毒性实验中收集产卵率、孵化率等与繁殖有关的亚致死终点是必需的。

3 结 论

本综述对介形类关于重金属污染敏感性研究进行系统地分析,明确重金属污染对介形类存在毒性作用。根据本项目组实验室介形类培养经验,结合相关文献资料,对从介形类的野外采集到室内培养工作做了详细介绍。总结对比了利用介形类的 3 种常见毒性实验方法的具体步骤及其优缺点,特别是低成本、操作简易的 6 d 免培养/免维护接触毒性实验。

目前的毒性实验结果如表 2 所示,介形类毒性实验能够在毫克每升(mg/L)或微克每升(μg/L)水平上检测金属和参比毒物的毒性。该实验方法灵敏度高,操作简便,成本低,可靠性高,能准确评估重金属及参考毒物的急性毒性。因此,该方法是一种可行的生物检测程序,可用于污染水的常规监测、工业废水安全评估、土壤和沉积物毒性研究。

对底栖动物进行毒性实验是环境生物检测的有效方法之一,而介形类因为对重金属的敏感指示性和分布广的特点成为研究热门。介形类的重金属毒性实验广泛开展,但不同的实验方法和实验标准所得数据较难对比分析,故在一定程度上限制了这些数据在实际中的应用潜能。

介形类重金属敏感性研究可在以下 5 方面进一步开展工作:

1) 利用介形类进行生物测试已广泛应用于沉积物或其它重金属污染质量评价和毒性筛选。然而关于毒物的剂量标准研究中并没有明确提到,或者是模糊的,因为它们通常被设定在无附加

物的控制沉积物上。因此,在今后的研究中,需要根据不同属种考虑实验室内和实验室间的条件可变性,建立统一的毒物剂量标准,以便提高不同研究数据的可对比性。

表 2 几种常见介形类的重金属致死中浓度(或最大半效应浓度值 $\mu\text{g/L}$)
Table 2 The LC_{50} (or EC_{50} $\mu\text{g/L}$) values of several common ostracoid species of heavy metals

属种	<i>Heterocypris incongruens</i> ^a	<i>Hyalella azteca</i> soft/tap water ^b	<i>Stenocypris major</i> ^c	<i>Cypris subglobosa</i> ^{a*}	
测试时间	6 d	7 d	96 h	48 h	
金属	Cu	890	56/121	25.2	550
	Ni	2 406	77/147	19 743	75 780
	Al	68 613	186/3 150	3 101	100 900
	Zn	11 839	70/404	1 189	3 400
	Cd	56.2	0.57/4.41	13.1	821
	Mg	53 543	–	510	11 770
	Pb	43 305	4.8/113	526	40 190
	Fe	–	1 000/3 150	278	115 200

注: * 表示半最大效应浓度 EC_{50} ; - 表示未收集到相关数据; a 表示数据来自于 Khangarot and Doc^[1]; b 表示数据来自于 Borgmann and Couillard^[41]; c 表示数据来自于 Shuhaimi-Othman and Yakub^[42]。

2) 利用单一属种生物对单一污染物的毒性测定不足以在混合物复杂和基质相互作用的实际环境分析中提供可靠的答案。因此,需要更多的资料和研究来评估标准化学品及其混合物的毒性。今后关于介形类特别是常用种 *Heterocypris incongruens* 的工作将要求对金属和有机物的标准混合物进行毒性测定,以便找到更准确和适当的剂量-反应关系,检测环境中污染物的复杂混合物所导致的毒性。

3) 生物毒性实验中,个体死亡为观察指标的研究是必需的,但是其它亚致死的观察指标也十分必要。通过生物体的其它亚致死观察指标可了解重金属对介形类的蓄积毒性及介形类的耐受性等其它具有科学意义的指标。

4) 生物实验室全年培养和维护生物材料的固有技术问题普遍存在。库存的维护费用限制了有限数量的高度专业化实验室的应用。这一毒性测试的基本瓶颈引发了研究,利用休眠卵免培养/免维护毒性实验是解决此问题的有效手段。但是除了常见种 *Heterocypris incongruens* 的开发商用以外,其它属种此方面的研究很少,国内尚未开展相关研究工作。

5) 介形类尚未成为常规大规模监测指示生物,今后需要在介形类研究方面投入更多的资源,使该生物在重金属污染毒性评价方面发挥更大的

作用。

参考文献:

[1] KHANGAROT B S, DAS S. Acute toxicity of metals and reference toxicants to a freshwater ostracod, *Cypris subglobosa* Sowerby, 1840 and correlation to EC_{50} values of other test models [J]. Journal of hazardous materials, 2009, 172 (2/3): 641-649.

[2] DEFUR P L. Use and role of invertebrate models in endocrine disruptor research and testing [J]. ILAR journal, 2004, 45 (4): 484-493.

[3] KHANGAROT B S, RAY P K. Investigation of correlation between physicochemical properties of metals and their toxicity to the water flea *Daphnia magna* Straus [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 1989, 18 (2): 109-120.

[4] KHANGAROT B S, RAY P K. Response of a freshwater ostracod (*Cypris subglobosa* Sowerby) exposed to copper at different pH levels [J]. Acta hydrochimica et hydrobiologica, 1987, 15 (6): 553-558.

[5] BERGIN F, KUCUKSEZGIN F, ULUTURHAN E, et al. The response of benthic foraminifera and ostracoda to heavy metal pollution in Gulf of Izmir (Eastern Aegean Sea) [J]. Estuarine, coastal and shelf science, 2006, 66 (3/4): 368-386.

[6] CHIAL B, PERSOONE G. Cyst-based toxicity tests XIV-application of the ostracod solid-phase microbioassay for toxicity monitoring of river sediments in Flanders (Bel-

- gium) [J]. Environmental toxicology, 2010, 17 (6): 533-537.
- [7] CHIAL B, PERSOONE G. Cyst-based toxicity tests XII- Development of a short chronic sediment toxicity test with the ostracod crustacean *Heterocypris incongruens*; Selection of test parameters [J]. Environmental toxicology: an international journal, 2002, 17(6): 520-527.
- [8] CHIAL B, PERSOONE G. Cyst-based toxicity tests XII- development of a short chronic sediment toxicity test with the ostracod crustacean *Heterocypris incongruens*; selection of test parameters [J]. Environmental toxicology, 2010, 17 (6): 520-527.
- [9] OLESZCZUK P. *Heterocypris incongruens* as a tool to estimate sewage sludge toxicity [J]. Environmental toxicology and chemistry, 2008, 27(4): 864-872.
- [10] OLESZCZUK P. The toxicity of composts from sewage sludges evaluated by the direct contact tests phytotoxkit and ostracodtoxkit [J]. Waste management, 2008, 28 (9): 1645-1653.
- [11] RAO P S, DURVE V S, KHANGAROT B S, et al. Acute toxicity of phenol, pentachlorophenol and sodium pentachlorophenate to a freshwater ostracod *Cypris subglobosa* (Sowerby) [J]. Acta hydrochimica et hydrobiologica, 2010, 11(4): 457-465.
- [12] RUIZ F, ABAD M, BODERGAT A M, et al. Marine and brackish-water ostracods as sentinels of anthropogenic impacts [J]. Earth-science reviews, 2005, 72 (1/2): 89-111.
- [13] SANCHEZ-BAYO F. Comparative acute toxicity of organic pollutants and reference values for crustaceans. I. Branchiopoda, Copepoda and Ostracoda [J]. Environmental pollution, 2006, 139(3): 385-420.
- [14] KHANAL R, FURUMAI H, NAKAJIMA F. Toxicity assessment of size-fractionated urban road dust using ostracod *Heterocypris incongruens* direct contact test [J]. Journal of hazardous materials, 2014, 264: 53-64.
- [15] KHANAL R, FURUMAI H, NAKAJIMA F. Characterization of toxicants in urban road dust by Toxicity Identification Evaluation using ostracod *Heterocypris incongruens* direct contact test [J]. Science of the total environment, 2015, 530: 96-102.
- [16] KHANAL R, FURUMAI H, NAKAJIMA F, et al. Carcinogenic profile, toxicity and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons accumulated from urban road dust in Tokyo, Japan [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2018, 165: 440-449.
- [17] KUDŁAK B, WOLSKA L, NAMIESNIK J. Determination of EC₅₀ toxicity data of selected heavy metals toward *Heterocypris incongruens* and their comparison to “direct-contact” and microbiotests [J]. Environmental monitoring and assessment, 2011, 174 (1/2/3/4): 509-516.
- [18] FANG H, HUANG L, WANG J, et al. Environmental assessment of heavy metal transport and transformation in the Hangzhou Bay, China [J]. Journal of hazardous materials, 2016, 302: 447-457.
- [19] 顾家伟. 我国城市大气颗粒物重金属污染研究进展与趋势 [J]. 地球与环境, 2019, 47(3): 385-396.
- [20] 庄国泰. 我国土壤污染现状与防控策略 [J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 477-483.
- [21] 房存金. 土壤中主要重金属污染物的迁移转化及治理 [J]. 当代化工, 2010, 39(4): 458-460.
- [22] 陈美玉, 周雅琪, 黄佳茵, 等. 水生生物重金属富集规律研究 [J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(8): 2085-2091.
- [23] RUIZ F, GONZÁLEZ-REGALADO M L, BORREGO J, et al. Ostracoda and foraminifera as short-term tracers of environmental changes in very polluted areas: the Odiel Estuary (SW Spain) [J]. Environmental pollution, 2004, 129(1): 49-61.
- [24] MARZIALI L, ROSIGNOLI F, DRAGO A, et al. Toxicity risk assessment of mercury, DDT and arsenic legacy pollution in sediments: A triad approach under low concentration conditions [J]. Science of the total environment, 2017, 593: 809-821.
- [25] SANCHEZ-BAYO F. Comparative acute toxicity of organic pollutants and reference values for crustaceans. I. Branchiopoda, Copepoda and Ostracoda [J]. Environmental pollution, 2006, 139(3): 385-420.
- [26] YU N, SHIMEI C, ERCHAO L I, et al. Tolerance of *Physocypris kraepelini* (Crustacean, Ostracoda) to waterborne ammonia, phosphate and pH value [J]. Journal of environmental sciences, 2009, 21(11): 1575-1580.
- [27] 陈仕梅, 禹娜, 周宇阳, 等. Cd²⁺, Zn²⁺ 和 Cu²⁺ 对 *Physocypris kraepelini* (介形纲) 的急性毒性实验 [J]. 微体古生物学报, 2010, 27(2): 118-124.
- [28] 陈仕梅, 李丹妮, 丁晴晴等. Cd²⁺ 对 *Cypridopsis vidua* (介形纲) 肠壁结构的毒性效应 (英文) [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2017(4): 168-179.
- [29] 郝诒纯, 茅绍智. 微体古生物学教程 [M]. 湖北: 中国地质大学出版社, 1993: 63-64.
- [30] SCHMIT O, ROSSETTI G, VANDEKERKHOVE J, et al. Food selection in *Eucypris virens* (Crustacea: Ostracoda) under experimental conditions [M] // Ostracodology—linking bio-and geosciences. Dordrecht: Springer, 2007: 135-140.
- [31] DEKKER T, GREVE G D, TER LAAK T L, et al. Development and application of a sediment toxicity test u-

- sing the benthic cladoceran *Chydorus sphaericus* [J]. Environmental pollution, 2006, 140(2):231-238.
- [32] KHANGAROT B S, RAY P K. Investigation of correlation between physicochemical properties of metals and their toxicity to the water flea *Daphnia magna* Straus [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 1989, 18(2):109-120.
- [33] ROMAN Y E, DE SCHAMPHELAERE K A C, NGUYEN L T H, et al. Chronic toxicity of copper to five benthic invertebrates in laboratory-formulated sediment; Sensitivity comparison and preliminary risk assessment [J]. Science of the total environment, 2007, 387(1/2/3):128-140.
- [34] 马健伟, 刘美琪, 宋亚瑞, 等. 不同水生生物对沉积物中重金属的毒性评价 [J]. 当代化工, 2018, 47(11):2377-2380.
- [35] Water Quality-Determination of Freshwater Sediment Toxicity to *Heterocypris incongruens* (Crustacea, Ostracoda); ISO 14321 [S]. Geneva, Switzerland; The international organization for standardization, 2012.
- [36] WELLS P G, LEE K, BLAISE C. Microscale Testing in Aquatic Toxicology: Advance, techniques, and practice [M]. Boca Raton; CRC Press, 1998.
- [37] Water quality-Determination of chronic toxicity to *Ceriodaphnia dubia*; ISO 20665 [S]. Geneva, Switzerland; The international organization for standardization, 2008.
- [38] Water quality-Determination of the chronic toxicity to *Brachionus calyciflorus* in 48h; ISO 20666 [S]. Geneva, Switzerland; The international organization for standardization, 2008.
- [39] KUDŁAK B, WOLSKA L, NAMIESNIK J. Determination of EC_{50} toxicity data of selected heavy metals toward *Heterocypris incongruens* and their comparison to "direct-contact" and microbiotests [J]. Environmental monitoring and assessment, 2011, 174(1-4):509-516.
- [40] NIYOMMANEERAT W, NAKAJIMA F, TOBINO T, et al. Development of a chronic sediment toxicity test using the benthic ostracod *Heterocypris incongruens* and their application to toxicity assessments of urban road dust [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2017, 143:266-274.
- [41] BORGMANN U, COUILLARD Y, DOYLE P, et al. Toxicity of sixty-three metals and metalloids to *Hyalella azteca* at two levels of water hardness [J]. Environmental toxicology and chemistry: an international journal, 2005, 24(3):641-652.
- [42] SHUHAIMI-OTHMAN M, YAKUB N, RAMLE N A, et al. Toxicity of metals to a freshwater ostracod; *Stenocypris major* [J]. Journal of toxicology, 2011, 2011:1-8.

(责任编辑:周泉)