

镉和汞两种重金属离子对四角蛤蜊的急性毒性

王晓宇^{1,2,3}, 王 清^{1,2}, 杨红生¹

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 河北工业大学海水资源高效利用化工技术教育部工程研究中心, 天津 300130)

摘要:采用毒理学实验方法,比较研究了 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 对四角蛤蜊(*Macra veneriformis* Reeve)急性毒性效应的差异,以期为进一步评价重金属离子对四角蛤蜊的毒性效应和作用机理等提供理论依据。死亡概率单位和实验液浓度对数的线性回归分析表明, Cd^{2+} 对四角蛤蜊在 24、48 和 96 h 的半致死浓度(LC_{50})分别为 15.961、5.149 和 2.383 mg/L, Hg^{2+} 的 LC_{50} 分别为 3.714、0.607 和 0.207 mg/L; Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 对四角蛤蜊的安全质量浓度分别为 0.023 8 mg/L 和 0.002 1 mg/L,分别是我国渔业水质标准(GB11607-89)限定量的 4.76 倍和 4.02 倍。

关键词:四角蛤蜊(*Macra veneriformis* Reeve); Cd^{2+} ; Hg^{2+} ; 急性毒性; 半致死浓度; 安全质量浓度

中图分类号:X171.5

文献标识码:A

文章编号:1000-3096(2009)12-0024-06

近年来,随着沿海经济的迅速发展,大量工业废水和生活污水等排放入海,据统计,直接排放入海的废水量达 80 亿 t 以上^[1],使我国沿海水域环境污染日益加重,尤其是重金属的污染非常突出,主要表现为重金属在沿海底质中的积累,如锦州湾^[2]的汞(Hg)、铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)和镉(Cd),珠江口^[2]的铜(Cu)、铅(Pb)和镉(Cd),胶州湾^[3]的汞(Hg)和镉(Cd)等均已不同程度地超过了海洋环境标准允许的含量。重金属污染具有分布范围广,持续时间长,不易在生物物质循环和能量交换中分解,而且能沿食物链转移等特点,会对水生生物和人体产生严重的危害作用。

因此,重金属对水生生物的毒害作用越来越受到人们的关注,急性毒性实验能够有效地评估污染物质的毒性大小和受试生物对污染胁迫的敏感程度,同时能够为慢性毒理学实验提供浓度指导,为水质标准的制定提供依据^[4]。有关铜,汞,镉,铅等对鱼类的急性毒性研究国内外已有许多的报道^[5~8],而重金属离子对贝类的急性毒性研究很少,尤其是重金属离子对四角蛤蜊的毒性研究国内外均未见报道。此外,海洋滩涂贝类作为主要的海洋食品之一,其栖息地多在滨海或河口地区,而且成体的移动性差,活动范围小,并具有滤食性的生活特点,容易暴露于各种海洋污染物中并发生富集现象,特别是受到重金属的污染和毒害^[9]。

四角蛤蜊(*Macra veneriformis* Reeve)属软体动物门,瓣鳃纲,真瓣鳃目,蛤蜊科,是常见底栖经济贝类,生活在泥沙滩潮间带,我国南北沿海均有分布,其营养价值较高。但是由于近岸海域环境污染

的加剧,受到污染物质的胁迫,四角蛤蜊自然资源大大衰退^[10],人工养殖的也时有病害发生。目前,有关重金属离子对四角蛤蜊的急性毒性作用尚未见报道。笔者研究了 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 对四角蛤蜊成贝的急性毒性效应,得出了 24、48 和 96 h 半致死浓度和安全质量浓度,可为进行重金属对水生生物的毒理学研究,为贝类品质和栖息环境监测,为制定养殖水质标准和废水排放标准,为防止污染和保护海洋环境资源等提供科学参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验生物

实验对象为二龄的健康四角蛤蜊,产地为日照,四角蛤蜊运回实验室后先暂养 7 d。在暂养期间,连续充气,每 24 h 换水 1 次,并且定时投饵(金藻 3011)喂养,暂养期间贝类活动正常,无病,死亡率低于 5%后方可进行实验;实验前 1 d 停止投饵,选择健康、反应灵敏、大小基本一致的四角蛤蜊随机分组进行实验。实验用贝壳长为 $31.83 \text{ mm} \pm 1.17 \text{ mm}$,壳高为 $28.53 \text{ mm} \pm 1.43 \text{ mm}$,湿质量为 $9.94 \text{ g} \pm 1.21 \text{ g}$ 。

收稿日期:2009-01-12;修回日期:2009-02-26

基金项目:国家基金委创新研究群体科学基金项目(40821004);国家 973 计划资助项目(2007CB407305);国家农业部公益性计划资助项目(nyhyzx07-047);国家海洋公益性行业科研专项资助项目(200805069)

作者简介:王晓宇(1980-),女,重庆江津人,博士研究生,主要从事养殖生态学方面的研究,电话:0532-82898596, E-mail: heyxiaoyu@163.com;杨红生,通信作者,研究员,电话:0532-82898620, E-mail: hshy-ang@ms.qdio.ac.cn

1.2 实验药品

CdCl₂·2.5H₂O(AR)和 HgCl₂(AR)均为国药集团化学试剂有限公司的产品,用去离子水分别配成含 Cd²⁺和 Hg²⁺质量浓度为 20 g/L 的母液,然后按照实验需要进行浓度稀释。

1.3 实验的理化条件

实验过程中的理化条件如下:
(1) 水温:15℃±2℃,在养殖棚内进行,保持水温的相对稳定性,实验过程中避免光照;(2)溶解氧:8.75 mg/L±0.09 mg/L,为保持实验过程中溶解氧处于饱和状态,进行持续微量充气;(3) pH:8.22,实验过程中每天定时测定两次 pH;(4) 盐度:33.0。

1.4 实验方法

实验严格按照联合国粮农组织(FAO)和美国公众健康协会(APHA)推荐的标准毒理学实验方法开展^[11,12]。

实验结果用 SPSS13.0 概率单位回归方法进行统计分析^[13]。

1.4.1 预备实验

实验期间用水为中科院海洋研究所养殖实验室提供的经砂滤、净化处理过的养殖用海水。每次换水前进行充分曝气,并且在实验室内预存放 3 d,以保持相应的理化因子稳定。并放入 30 只受试四角蛤蜊。

实验在 61.8 cm×43.0 cm×31.3 cm 的聚乙烯水族箱中进行,每一个水族箱中加入养殖海水 50 L。重金属以 10 倍之差设计 5 个浓度,每一浓度组分别随机放入经过实验室驯养的四角蛤蜊 30 只,实验处理 24 h,重复进行 3 次,实验期间饱和充气,不投饵,查明重金属的最小 100%致死浓度和不引起死亡的最大浓度。

1.4.2 急性毒性实验

根据预备实验的结果,在重金属的最小 100%致死浓度和不引起死亡的最大浓度之间,按等对数间距确定 5 个浓度组,设 1 个对照组,同时每个组另外设置两个平行组。每一实验组随机放入经实验室驯化的四角蛤蜊 30 只。实验期间每隔 24 h 换水 1 次,换水后添加重金属保持浓度恒定,实验过程中不投饵,随时取出死亡个体,并记录各组贝在 24,48 和 96 h 的死亡数。死亡的标准是两壳长久张开,斧足异常伸展于体外,外套膜萎缩,多次刺激无反应。

计算平均死亡率(并换算成概率单位)和实验液质量浓度对数,用 SPSS 统计软件求出概率单位与实验液质量浓度对数的回归方程,求出 24,48 和 96 h 的半数致死浓度(LC₅₀)及各自的 95%置信区间。并采用安全质量浓度公式 96 hLC₅₀×f 计算安全质量浓度。

2 实验结果

2.1 四角蛤蜊的中毒症状

四角蛤蜊在 5 种不同浓度的重金属溶液中呈现出明显的但程度不同的中毒症状。实验开始时所有实验组四角蛤蜊的贝壳都紧闭,进出水管极少伸出。随着实验时间的延长,低浓度组的四角蛤蜊贝壳逐渐张开,斧足向外伸展。中毒后期,贝壳张开,斧足极度伸展,外套膜萎缩,受刺激后贝壳不能快速关闭,或有闭壳反应却不能完全闭合。当贝壳完全张开,斧足露出体外但不展开,受刺激后外套膜没有反应,则表明四角蛤蜊完全死亡。

2.2 Cd²⁺和 Hg²⁺对四角蛤蜊的毒性影响

根据预实验得到 Cd²⁺对四角蛤蜊不引起死亡的最大质量浓度为 1.64 mg/L,100%致死质量浓度为 36.44 mg/L;Hg²⁺对四角蛤蜊不引起死亡的最大质量浓度为 0.11 mg/L,100%致死质量浓度为 9.34 mg/L。毒性实验结果见表 1,表 2。

表 1 Cd²⁺对四角蛤蜊急性毒性实验结果

质量浓度 (mg/L)	累计死亡数(个)		
	24 h	48 h	96 h
1.64	0,0,0	6,7,7	13,15,16
3.56	3,3,4	15,15,14	24,22,25
7.73	6,6,6	21,22,23	27,27,27
16.78	15,14,14	30,30,30	30,30,30
36.44	30,30,30	30,30,30	30,30,30
对照	0,0,0	0,0,0	0,0,0

表 2 Hg²⁺对四角蛤蜊急性毒性实验结果

质量浓度 (mg/L)	累计死亡数(个)		
	24 h	48 h	96 h
0.11	0,0,0	3,3,4	8,8,9
0.34	1,1,1	10,9,11	21,21,21
1.03	3,4,3	22,23,22	27,28,26
3.10	11,10,8	30,30,30	30,30,30
9.34	30,30,30	30,30,30	30,30,30
对照	0,0,0	0,0,0	0,0,0

2.3 Cd²⁺和 Hg²⁺半致死浓度及其置信区间

计算平均死亡率(并换算成概率单位)和实验液质量浓度对数,利用 SPSS 统计软件,得到 Cd²⁺和

Hg²⁺对四角蛤蜊急性毒性效应的概率单位-浓度对数回归方程,以及各时间点的 LC₅₀ 值^[14],见表 3,表 4。

表 3 Cd²⁺对四角蛤蜊半致死浓度及其置信区间

Tab. 3 LC₅₀ and its confidence interval of Cd²⁺ to *M. veneriformis*

Cd 暴露时间(h)	概率单位-浓度对数回归方程	相关系数	<i>n</i>	LC ₅₀	LC ₅₀ 95%置信区间
24	$Y=5.037X-6.060$	0.951	30	15.961	4.383~19.353
48	$Y=3.777X-2.688$	0.987	30	5.149	3.561~6.392
96	$Y=2.645X-0.998$	0.941	30	2.383	0.051~5.239

表 4 Hg²⁺对四角蛤蜊半致死浓度及其置信区间

Tab. 4 LC₅₀ and its confidence interval of Hg²⁺ to *M. veneriformis*

Hg 暴露时间(h)	概率单位-浓度对数回归方程	相关系数	<i>n</i>	LC ₅₀	LC ₅₀ 95%置信区间
24	$Y=7.490X-4.268$	0.975	30	3.714	3.371~4.590
48	$Y=3.084X+0.669$	0.983	30	0.607	0.460~0.744
96	$Y=2.080X+1.424$	0.975	30	0.207	0.026~0.435

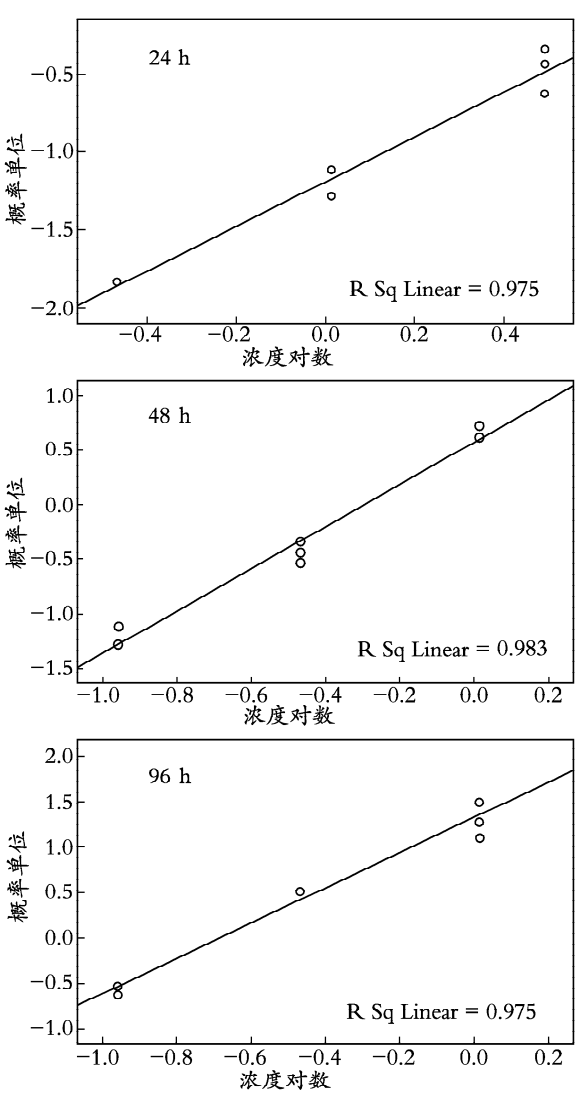
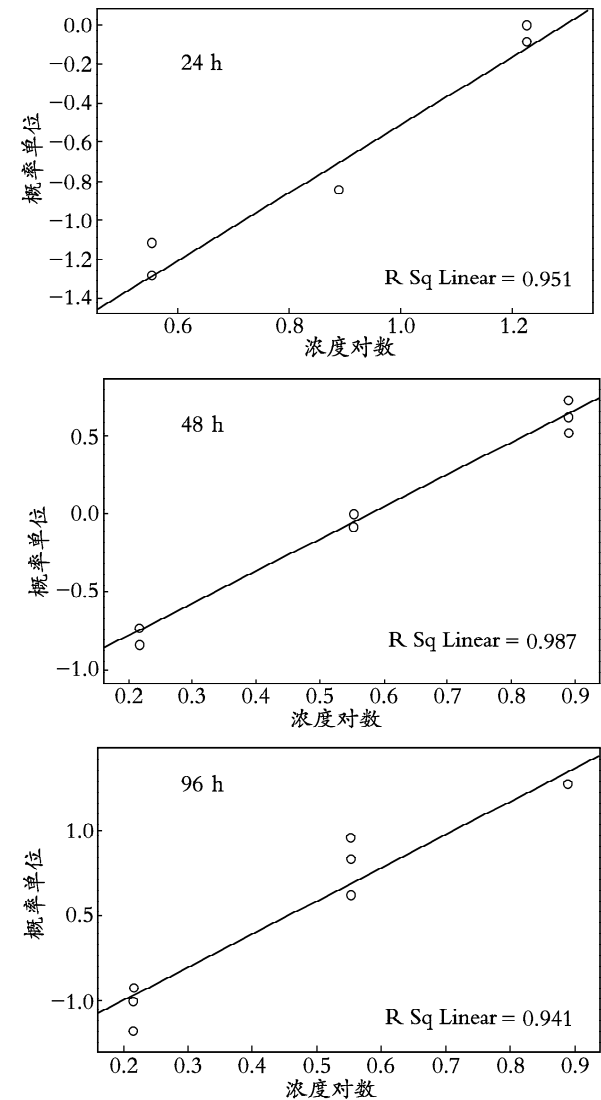


图 1 Cd²⁺对四角蛤蜊概率单位-浓度对数回归曲线
Fig.1 Probabilistic Regression's Curve of Cd²⁺ to *M. veneriformis*

图 2 Hg²⁺对四角蛤蜊概率单位-浓度对数回归曲线
Fig.2 Probabilistic Regression's Curve of Hg²⁺ to *M. veneriformis*

2.4 概率单位-浓度对数回归曲线

运用 SPSS 统计软件,分别得到 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 对四角蛤蜊急性毒性效应的 24,48,96 h 概率单位-浓度对数回归曲线,见图 1,图 2。

2.5 安全质量浓度

运用经验公式: $96\text{ h LC}_{50} \times f$ 计算安全质量浓度^[15],本公式中 f 的取值,对于易分解,又很少造成残毒的化学物质一般用 0.05~0.1 之间的系数,而对于稳定且又易于在生物体内积累的污染物,其系数多选在 0.01~0.05 这个范围内。

本实验中 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 属于难分解、积累性强、毒性大的物质,所以 f 值皆取 0.01,计算出 Cd^{2+} 对四角蛤蜊的安全质量浓度为 0.023 8 mg/L, Hg^{2+} 对四角蛤蜊的安全质量浓度为 0.002 1 mg/L。

3 讨论

3.1 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 对埋栖性贝类的急性毒性效应

沿岸埋栖性贝类的栖息环境很容易遭受到来自陆源的各种污染物的污染,比如城市和工业排污,农业废弃物和港口作业等。研究重金属对近岸海域埋栖性贝类的急性毒性效应,对于用贝类进行污染物生态风险预警等意义重大。本实验研究了不同浓度的 Cd^{2+} , Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 对四角蛤蜊的急性毒性效应,得出 Cd^{2+} 对四角蛤蜊在 24,48 和 96 h 的半致死浓度(LC_{50})分别为 15.961、5.149 和 2.383 mg/L, Hg^{2+} 的 24,48 和 96 h LC_{50} 分别为 3.714、0.607 和 0.207 mg/L。结果表明,四角蛤蜊对重金属的中毒反应和死亡情况具有较强的时间依赖性和浓度依赖性。此外,本研究发现,重金属对四角蛤蜊的毒性效

应 $\text{Hg}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$ 。在其他生物的重金属急性毒性评价中也报道了相同的规律。陈娜等^[16]在研究 6 种重金属离子对水螅急性毒性效应中报道到,重金属离子单一实验结果表明,它们对水螅毒性大小顺序为 $\text{Hg}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ag}^{+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$ 。Lussier 等^[17]研究了几种重金属和氰化物对巴西拟糠虾(*Mysidopsis bahia*)的急性和慢性毒性效应,得到了各种重金属对巴西拟糠虾的 96 h 半数致死浓度,研究发现毒性作用大小为 $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Ag} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Pb}$ 。

将本研究得到的 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 对四角蛤蜊的半致死浓度与他人的研究结果进行比较(表 5),发现 Cd^{2+} 对四角蛤蜊的 96 h LC_{50} 比其他几种埋栖性贝类低,而 Hg^{2+} 对四角蛤蜊的 96 h LC_{50} 比其他几种埋栖性贝类高,说明四角蛤蜊相对于其他几种滩涂贝类而言,对 Cd^{2+} 的耐受性更高一些,而对 Hg^{2+} 的污染反应更敏感。据报道^[21,22], Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 对生物有着不同的作用机理。 Cd^{2+} 对生物有害影响首先是它能够通过离子通道进入细胞,参与细胞内的信号转导,使一定的代谢途径受阻,肾受损伤,酶活性受影响以及内分泌系统受危害,从而使生物体能失调; Hg^{2+} 能够引起中枢神经系统不可修复的损伤,而且能够和酶的巯基稳定结合,使酶失去活性,因而破坏了细胞的基本功能和正常代谢,致使生物中毒。四角蛤蜊相对于其他埋栖性贝类对 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的耐受性差异,可能是其对 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 不同中毒机理的一种外在反映。许多重金属对生物致毒机理是不同的,生物中毒后的症状也存在很大差异,因此在重金属急性毒性作用评价的基础上,进行重金属对生物体细胞和分子水平上的毒性效应和作用机理的进一步研究,意义非常重大。

表 5 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 对常见贝类的急性毒性评价(mg/L)

Tab. 5 Results of Cd^{2+} and Hg^{2+} acute toxicity tests on several common bivalves (mg/L)

重金属	受试生物	24 h LC_{50}	48 h LC_{50}	96 h LC_{50}	文献来源
Cd^{2+}	四角蛤蜊	15.961	5.149	2.383	本研究
Cd^{2+}	皱纹盘鲍幼鲍	8.68	7.10	4.60	[18]
Cd^{2+}	海湾扇贝	5.85	4.52	3.45	[14]
Hg^{2+}	四角蛤蜊	3.714	0.607	0.207	本研究
Hg^{2+}	皱纹盘鲍幼鲍	0.282	0.164	0.123	[18]
Hg^{2+}	彩虹明樱蛤	—	—	0.109 9	[19]
Hg^{2+}	缢蛏	0.15	0.12	0.10	[20]

本研究得到的四角蛤蜊 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的安全质量浓度均高于我国渔业水质标准^[22](GB11607-89,镉 ≤ 0.005 mg/L,汞 $\leq 0.000 5$ mg/L)的限定,分别

是其 4.76 倍和 4.02 倍。表明四角蛤蜊对 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 有较强的耐受特性,容易产生富集,在重金属浓度相对较高的环境条件下不易表现出明显的受胁

迫症状。崔毅等^[23]对我国近岸海域海水中重金属的含量进行了调查分析(表 6),结果显示海水中镉和汞的含量均为本研究中四角蛤蜊的安全质量浓度的几十分之一,但是阮金山等^[27]在对厦门贝类养殖区重金属分布情况调查时发现,贝类养殖区海水重金属含量符合第二类《海水水质标准》,处于清洁水平,但是对贝类体内重金属含量测定发现,泥蚶体内镉含量超过国家农业部和国家海洋局 2001 年发布的《无公害食品、水产品中有毒有害物质限量》(NY5073-2001)。因此应该加强对四角蛤蜊养成产品中镉和汞等重金属含量的检测,以确保食品安全。此外,四角蛤蜊对重金属较强的耐受性和富集能力,可能会因为食物链的浓缩作用(被肉食性鱼类,蟹和水鸟等食用)而对生态系统产生潜在的风险。

表 6 我国近岸部分海域海水中镉和汞的含量
Tab.6 Concentrations of Cd and Hg in seawater from some coastal areas, China

重金 属元素	海水中的质量 浓度(μg/L)	海域	文献来源
Cd	1.13(0.85~1.52)	胶州湾	[23]
Cd	0.075(0.021~0.102)	大鹏湾	[24]
Hg	0.05(0.01~0.19)	大鹏湾	[24]
Cd	0.30(0.25~0.37)	珠江口	[24]
Hg	0.015(0.013~0.02)	珠江口	[24]
Cd	0.05(ND~0.11)	深沪湾	[25]
Hg	0.014(0.006~0.018)	深沪湾	[25]
Cd	0.078(0.023~0.186)	南黄海	[26]
Hg	0.003(0.001~0.008)	南黄海	[26]
Cd	0.05(0.025~0.190)	厦门贝类养殖区	[27]

3.2 重金属致毒机理研究方法的探讨

海洋沉积物环境中的重金属主要是以水溶态,可交换态,铁锰氧化物态,碳酸盐结合态,有机硫化物态和残渣态六种化学形态存在。一般认为,水溶态和交换态的重金属易被生物吸收利用,而残留态重金属一般不被生物利用,其他形态如碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机物结合态的生物可利用性主要取决于外界环境的变化^[31]。而四角蛤蜊是埋栖性贝类,移动能力差,长期被动地生活在沉积物环境中,因此在研究重金属离子对四角蛤蜊的毒性胁迫时,其沉积物环境中的重金属影响不可小视,此外由于污染物质能否进入生物体对生物造成毒害,不仅与某一环境下重金属的含量多少有关,还与该环境下重金属的赋存状态有关。因此评价环境中重金属污染对埋栖性贝类毒性效应时,应对不同的环

境条件和不同的重金属赋存形态加以关注。
本研究进行了单一种类的重金属离子对四角蛤蜊的急性毒性作用评价。事实上,各种重金属离子共存时可能存在着某种协同作用或拮抗作用^[32,33]。此外,重金属的存在形态、水的盐度、温度、pH 值、溶解氧等理化因子的改变,也会导致重金属毒性改变^[34,35]。在四角蛤蜊的养殖过程中,应注意养殖水体中有害重金属的测定,并考虑复合毒物毒性的变化和相互影响。以防由于重金属污染而造成养殖种类体内大量积累,影响其生长和品质,影响经济效益。此外即使养殖贝类在重金属的安全浓度内存活,由于四角蛤蜊耐受性的差异和重金属不易分解和代谢,可能使四角蛤蜊体内积累大量的重金属,通过食物链影响人类的身体健康。

重金属急性毒性评价是一种经典的基础毒理学实验方法,旨在研究重金属大剂量一次染毒或 24 h 内多次染毒生物所引起的毒性效应^[36]。它能够有效地评估污染物质的毒性大小和受试生物对污染胁迫的敏感程度,同时能够为慢性毒理学实验提供浓度指导。但是要全面深入地研究重金属胁迫对贝类的毒性效应和作用机理,要探讨重金属污染对环境和生物资源造成的影响,仅仅局限于急性毒性评价是远远不够的。本研究将在重金属对四角蛤蜊急性毒性评价的基础上,深入开展重金属在四角蛤蜊细胞水平和分子水平上的作用机理的慢性毒理学研究,以期为揭示环境污染和生物资源衰退之间的相关关系,为建立快速有效的污染生物监测指标体系等提供科学依据和理论支持。

参考文献:

[1] 中国海洋年鉴编纂委员会中国海洋年鉴编辑部. 中国海洋年鉴[M]. 北京:海洋出版社, 1992. 183-106.
[2] 国家海洋局监测服务公司. 中国海洋环境监测十五年[M]. 北京:海洋出版社, 1994. 23-31.
[3] 徐晓达, 林振宏, 李绍全. 胶州湾的重金属污染研究[J]. 海洋科学, 2005, **29**(1): 48-53.
[4] Laura Ferrer, Santiago Andrade, Raúl Astasuain, *et al.* Acute toxicities of four metals on the early life stages of the crab *Chasmagnathus granulata* from Bahía Blanca estuary, Argentina [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 65: 209-217.
[5] 王瑞龙, 马广智, 方展强. 铜、镉、锌对唐鱼的急性毒性及安全浓度评价[J]. 水产科学, 2006, **25**(3): 117-120.
[6] 杨丽华, 方展强, 郑文彪. 重金属对鲫鱼的急性毒性及安全浓度评价[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2003, 2: 101-106.
[7] Taylor D, Maddock B G, Mance G. The acute toxicity of nine ‘grey list’ metals (arsenic, boron, chromium,

- copper, lead, nickel, tin, vanadium and zinc) to two marine fish species; Dab (*Limanda limanda*) and grey mullet (*Chelon labrosus*) [J]. **Aquatic Toxicology**, 1985, **7**(3): 135-144.
- [8] Sanjay P, Ravindra K, Shilpi S, *et al.* Acute toxicity bioassays of mercuric chloride and malathion on air-breathing fish *Channa punctatus* (Bloch) [J]. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 2005, **61**(1): 114-120.
- [9] Farrington J W, Goldberg E D, Risebrough R W, *et al.* U. S. "Mussel Watch" 1976-1978: An Overview of the Trace-Metal, DDE, PCB, Hydrocarbon and Artificial Radionuclide Data [J]. **Environment Science Technology**, 1983, **17**: 490-496.
- [10] 天津市海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室. 天津市海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1987. 90-93.
- [11] Ward G, Parrish P. Toxicity Tests [M]. FAO Doc. Téc. Pesca, 1982. Part6, 185:23.
- [12] APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), WPCF (Water Pollution Control Federation). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [M]. Washington DC: American Public Health Association, 1992. 1 200.
- [13] Reish D, Oshida P. Short-term static bioassays [M]. FAO Doc. Téc. Pesca, 1987. Part 10, 247: 62.
- [14] 李玉环, 林洪. 镉对海湾扇贝的急性毒性研究[J]. 海洋水产研究, 2006, **27**(6): 80-83.
- [15] 周永欣, 章宗涉. 水生生物与环境保护[M]. 北京: 中国农业出版社, 1983. 59-60.
- [16] 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.
- [17] Lussier S M, Gentile J H, Walker J. Acute and chronic effects of heavy metals and cyanide on *Mysidopsis bahia* (crustacea; mysidacea) [J]. **Aquatic Toxicology**, 1985, **17**(1-2): 25-35.
- [18] 隋国斌, 杨凤, 孙丕海, 等. 铅、镉、汞对皱纹盘鲍幼鲍的急性毒性试验[J]. 大连水产学院学报, 1999, **14**(1): 22-26.
- [19] 王志铮, 王伟定, 杨阳, 等. 4 种重金属离子对彩虹明樱蛤(*Moerella iridescens*)的急性致毒效应[J]. 海洋与湖沼, 2007, **38**(4): 373-378.
- [20] 叶寒青, 杨祥良, 周井炎, 等. 环境污染物质镉毒性作用机理研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2001, **8**(3): 9-12.
- [21] 费云芸, 刘代成. 低剂量汞元素的毒性作用机理[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2003, **18**(1): 88-90.
- [22] 国家环境保护局标准处. 中华人民共和国国家标准渔业水质标准[M]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- [23] 崔毅, 陈碧娟. 胶州湾海水、海洋生物体中重金属含量的研究[J]. 应用生态学报, 1997, **8**(6): 650-654.
- [24] 黄向青, 张顺枝, 霍振海. 深圳大鹏湾、珠江口海水有害重金属分布特征[J]. 海洋湖沼通报, 2005, **4**: 38-44.
- [25] 阮金山, 李秀珠, 罗冬莲. 深沪湾海水、沉积物及贝类体内重金属的含量与评价[J]. 福建水产, 2002, **25**(2): 14-20.
- [26] 贺志鹏, 宋金明, 张乃星, 等. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素[J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1 153-1 162.
- [27] 阮金山. 厦门贝类养殖区海水、沉积物和养殖贝类体内重金属含量的初步研究[J]. 热带海洋学报, 2008, **27**(5): 47-54.
- [28] 刘琼玉, 洪华生, 蔡立哲. 重金属锌、铅对菲律宾蛤仔的急性毒性试验[J]. 台湾海峡, 1997, **16**(1): 50-54.
- [29] 王兴强, 阎斌伦, 曹梅. 氯化镉、硝酸铅和氯化高汞对缢蛏存活率的影响[J]. 水利渔业, 2006, **26**(6): 82-83.
- [30] Nursita A I, Singh B, Lees E. The effects of cadmium, copper, lead, and zinc on the growth and reproduction of *Proisotoma minuta* Tullberg (Collembola) [J]. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 2005, **60**: 306-314.
- [31] 邵秘华, 王正方. 长江口海域悬浮颗粒物中铜铅镉的化学形态与分布特征研究[J]. 海洋与湖沼, 1992, **23**(2): 144-149.
- [32] Fernandez N, Beiras R. Combined toxicity of dissolved mercury with copper, Lead and cadmium on embryogenesis and early larval growth of the *Paracentrotus lividus* sea-urchin [J]. **Ecotoxicology**, 2001, **10**: 263-271.
- [33] 包坚敏, 王志铮, 陈启恒, 等. 4 种重金属对泥螺的急性毒性和联合毒性研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2007, **26**(3): 252-256.
- [34] Chong K, Wang W X. Bioavailability of sediment-bound Cd, Cr and Zn to the green mussel *Perna viridis* and the Manila clam *Ruditapes philippinarum* [J]. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, 2000, **255**: 75-92.
- [35] Schuhmacher M, Domingo J L, Llobet J M. Evaluation of the effect of temperature, pH, and bioproduction on Hg concentration in sediments, water, molluscs and algae of the delta of the Ebro river [J]. **Science of The Total Environment**, 1993, **134**(1): 117-125.
- [36] 周启星, 孔繁翔, 朱琳. 生态毒理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 76.