

Cd²⁺和 Pb²⁺单一与复合污染对脊尾白虾的急性毒性效应研究

谢 嘉^{1,2,3}, 滕 佳^{1,3}, 刘永亮^{1,2}, 杨顶珑^{1,3}, 曹瑞文^{1,3}, 陈丽竹^{1,3}, 王 清¹,
李 斐¹, 吉成龙¹, 吴惠丰¹, 丛 明¹, 赵建民^{1,2}

(1. 中国科学院 烟台海岸带研究所, 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院 烟台海岸带研究所 牟平海岸带环境综合试验站, 山东 烟台 264003; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 近年来, 中国近岸重金属污染问题日趋严重。作者通过研究重金属 Cd²⁺和 Pb²⁺对脊尾白虾(*Palaemon carincauda*)的单一及复合急性毒性效应, 为其养殖水质管理提供科学依据。本研究采用半静态急性毒性测定方法, 开展了不同浓度 Cd²⁺和 Pb²⁺对脊尾白虾 96 h 内的急性毒性试验。研究结果表明: 在单一污染物暴露下, Cd²⁺对脊尾白虾 24、48、72、96 h 的半数致死质量浓度(LC₅₀)分别为 138.699、33.110、9.719、3.650 mg/L, Pb²⁺对脊尾白虾 48、72、96 h 的 LC₅₀ 分别为 254.541、62.750、29.074 mg/L; Cd²⁺、Pb²⁺对脊尾白虾 96 h 的安全质量浓度分别为 0.365 和 2.907 mg/L; 在等浓度配比(1:1)暴露下, Cd²⁺和 Pb²⁺复合污染对目标生物在 48、72、96 h 暴露期间的毒性相加指数(additive index, AI)分别为 0.155、0.068、0.258。综上所述, Cd²⁺对脊尾白虾的毒性较 Pb²⁺更强, Cd²⁺和 Pb²⁺对脊尾白虾的复合污染均表现出较明显的协同作用。

关键词: Cd²⁺; Pb²⁺; 急性毒性; 复合毒性; 脊尾白虾(*Palaemon carincauda*)

中图分类号: S949 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2017)05-0027-07

DOI: 10.11759/hyxx20161011004

近年来, 随着工业废水和生活污水的排放, 中国近海环境的污染状况日趋加重, 对海洋生物的生存和海洋生态环境安全构成了严重威胁。重金属污染因其具有持续时间长、难以降解且易通过食物链积累放大等特点, 受到了广泛关注^[1]。镉和铅是海洋环境中普遍存在的重金属污染物, 已被列入中国重金属污染综合防治的重点整治对象。过量的重金属进入生物体, 通常会对机体产生毒害作用, 进而引发疾病甚至导致死亡, 同时还能够被机体所富集, 并通过食物链的生物放大作用威胁人类健康^[2]。在海洋环境中, 污染通常以复合污染的形式出现; 重金属污染物对海洋生物不仅具有单一毒性, 而且往往存在交互作用, 易产生联合毒性^[3]。

脊尾白虾(*Palaemon carincauda*)又称白虾, 是中国沿海的重要经济虾类。由于其耐温耐盐范围广、活力强且易于培养, 近年来已成为中国海水养殖的重要品种之一^[4]。目前, 关于重金属对虾类的毒性效应研究已有较多报道。国内外学者先后开展了重金属对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)^[5-6]、日本沼虾(*Macrobrachium nipponensis*)^[7-9]、脊尾白虾(*P.*

carincauda)^[10-11]、克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)^[12]、罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)^[13]、斑节对虾(*Penaeus monodon*)^[14]和黑褐新糠虾(*Neomysis awatschensis*)^[15]等虾类的急性毒性研究。近年来, 关于复合污染对虾类的急性毒性研究也有所报道。王志铮等^[16]研究了 Hg²⁺、Zn²⁺、Cr⁶⁺对凡纳滨对虾幼体的单一急性毒性和联合毒性, 吕耀平等^[17]开展了 Cr⁶⁺、Mn⁷⁺和 Hg²⁺对日本沼虾的单一急性毒性和联合毒性研究。针对脊尾白虾幼虾, 张彩明等^[18]比较了 Cr⁶⁺、Mn⁷⁺和 Zn²⁺的单一毒性和联合毒性作用。作者以脊尾白虾为实验对象, 研究了 Cd²⁺和 Pb²⁺单一及复合

收稿日期: 2016-10-11; 修回日期: 2016-12-21

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14); 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室开放基金(KLMEES201301)

[Foundation: Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. KZZD-EW-14; Open Fund of Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, No. KLMEES201301]

作者简介: 谢嘉(1989-), 女, 江西井冈山人, 博士研究生, 主要从事海洋生态毒理学研究, 电话: 0535-2109189, E-mail: jxie@yic.ac.cn; 赵建民, 通信作者, 研究员, 电话: 0535-2109170, E-mail: jmjzhao@yic.ac.cn

污染的急性毒性效应,并探索了其安全浓度,以期
为养殖环境的水质管理、渔业水质标准修订以及相
关渔业污染评估等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

脊尾白虾购自当地海产品市场,选择规格大小
相近的个体(体长 $4.14 \text{ cm} \pm 0.36 \text{ cm}$, 体质量 $0.50 \text{ g} \pm$
 0.08 g),置于实验室暂养 7 d。实验用海水经 300 目
筛绢过滤处理,盐度为 31.0 ± 1 , pH 为 7.8,温度为
 $13.0 \sim 15.0^\circ\text{C}$ 。暂养期间连续充气,每 24 h 换水 1 次,
并投喂对虾饲料,至实验前 24 h 停止喂食。

CdCl_2 和 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 均为分析纯试剂,购自国药化
学试剂公司,分别用去离子水配成 1.0 g/L 的储备液。

1.2 实验设计

1.2.1 单一急性毒性实验

采用急性毒性实验法^[19],测定单一污染物的急
毒性,实验周期为 96 h。根据预实验(96 h 后全活
和全致死浓度)确定了 5 个暴露浓度,分别为 4.0、
8.0、16.0、32.0 和 64.0 mg/L Cd^{2+} 以及 10.0、20.0、
40.0、80.0 和 160.0 mg/L Pb^{2+} 。实验过程中,各处理
组设置 3 个重复($n=3$),以自然海水作为对照组。暴
露实验在塑料水槽($100 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$)中进行,
每个水槽随机放入规格大小基本一致,附肢完整、活
力强的脊尾白虾 20 尾;暴露过程连续充气,日换水
量 100%。实验期间连续观察脊尾白虾的活动状况,
及时取出死亡个体,并记录 24、48、72、96 h 的死
亡数,计算各暴露时间下的 LC_{50} 。重金属安全质量
浓度(mg/L)的判定按下式计算: $96 \text{ h 安全浓度} =$
 $0.1 \times 96 \text{ h } \text{LC}_{50}$ 。

1.2.2 复合急性毒性实验

根据单一急性毒性实验结果,在相同实验条件
下,按照 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 浓度 1:1 的混合比例,设置 5
个不同的浓度进行复合毒性实验。记录各实验组脊
尾白虾在 24、48、72、96 h 的死亡数,计算各暴露
时间下的混合 LC_{50} 。

采用水生毒理联合效应 Marking 相加指数法^[20],
进行联合毒性的评价。按下列公式计算出生物毒性 S
值: $S = A_m/A_1 + B_m/B_1$; 式中: S 为生物毒性相加作用之
和; A_1 、 B_1 分别代表一种毒性物质单一毒性的 LC_{50} ;
 A_m 、 B_m 为混合毒性的 LC_{50} 。根据 S 值求得相加指数
(additive index, AI); 当 $S \leq 1$ 时, $\text{AI} = (1/S) - 1$; 当 $S > 1$

时, $\text{AI} = S - 1 + 1$ 。以 AI 值评价混合毒物的联合毒性效
应, $\text{AI} = 0$ 为毒性相加作用; $\text{AI} < 0$ 为拮抗作用; $\text{AI} > 0$ 为
协同作用。

1.3 数据处理和分析

实验数据采用 SPSS 16.0 软件进行分析,得出
 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 对脊尾白虾急性毒性效应的概率单位与
浓度对数的回归方程以及其 24、48、72、96 h 的 LC_{50}
和 95% 置信区间。利用单因素方差分析(One-Way
ANOVA)和 Duncan 检测法对组间数据进行差异性分
析,当 $P < 0.05$ 时认为差异性显著,并用回归分析法
作相关性检验。

2 实验结果与分析

2.1 脊尾白虾的中毒症状

染毒前期,白虾开始局促不安,快速游动;随暴
露时间的延长,白虾体侧翻、游动缓慢,最后伏于水
槽的底部,随着中毒程度的加深而逐渐死亡,体色
由半透明色变白,最后变为红色。各水槽的死亡数均
随暴露时间的延长而增加,表明脊尾白虾受污染物的
毒害作用逐渐加深。

2.2 单一急性毒性实验

如表 1 所示,在暴露最初 24 h 内, Cd^{2+} 质量浓度低
于 32.0 mg/L 的处理组中脊尾白虾活力尚好,未出现死
亡个体,而高质量浓度暴露组(64.0 mg/L)死亡率达到
15%。暴露 24 h 后,脊尾白虾开始出现较明显的中毒症状,
且死亡率伴随暴露浓度的增加和暴露时间的延长迅速升
高,呈现明显的剂量-效应关系。暴露 48 h 后, 32.0 mg/L
 Cd^{2+} 处理组的死亡率达到 55%,而在暴露 72 h 后,高质
量浓度暴露组(64.0 mg/L)的死亡率达到 100%。

在 Pb^{2+} 处理组中,脊尾白虾的死亡率随暴露质
量浓度的增加和暴露时间的延长逐渐升高;其中,
10.0、20.0、40.0 mg/L 处理组在 72 h 内的死亡率均低
于 50%。在暴露 72 h 后,质量浓度升至 80.0、160.0 mg/L
时, Pb^{2+} 暴露组的死亡率均超过 60%(表 2)。

经概率单位法计算得出,在不同暴露时间点,
 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 对脊尾白虾的单一毒性死亡率与暴露
剂量具有较好的相关性。 LC_{50} 值随暴露时间的增加
而逐渐减小,且 Cd^{2+} 在 48、96 h 的 LC_{50} 值均低于
 Pb^{2+} 的 LC_{50} 值,表明 Cd^{2+} 对脊尾白虾的毒性较 Pb^{2+}
更强(表 3)。同时,对 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的安全质量浓度进
行计算,发现 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 对脊尾白虾的安全质量浓
度分别为 0.365 mg/L 和 2.907 mg/L 。

表 1 不同浓度 Cd^{2+} 暴露下脊尾白虾 96 h 内的累积死亡率

Tab. 1 Accumulative mortality of *P. carincauda* after Cd^{2+} exposure with different concentrations

质量浓度 (Cd^{2+} , mg/L)	累积死亡率(%)			
	24 h	48 h	72 h	96 h
对照	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a
4.0	0.00 ^a	3.33 ± 2.89 ^a	17.32 ± 0.57 ^b	53.49 ± 3.57 ^b
8.0	0.00 ^a	10.00 ^a	41.67 ± 7.22 ^c	64.17 ± 15.07 ^b
16.0	0.00 ^a	33.33 ± 5.77 ^b	64.44 ± 3.85 ^d	83.33 ± 14.33 ^c
32.0	3.33 ± 2.89 ^a	55.26 ± 6.96 ^c	95.83 ± 7.22 ^c	100.00 ^d
64.0	15.00 ± 5.00 ^b	63.24 ± 12.56 ^c	100.00 ^c	100.00 ^d

注: 表中同一列数据右上角相同字母表示差异不显著($P > 0.05$); 不同表示差异显著($P < 0.05$)(表 2、表 4 同)

表 2 不同浓度 Pb^{2+} 暴露下脊尾白虾 96 h 内的累积死亡率

Tab. 2 Accumulative mortality of *P. carincauda* after Pb^{2+} exposure with different concentrations

质量浓度 (Pb^{2+} , mg/L)	累积死亡率(%)			
	24 h	48 h	72 h	96 h
对照	0.00 ^a	0.00 ^a	1.85 ± 3.21 ^a	5.77 ± 5.89 ^a
10.0	0.00 ^a	6.66 ± 2.89 ^{ab}	14.09 ± 12.44 ^a	29.71 ± 6.18 ^b
20.0	6.66 ± 5.77 ^a	8.70 ± 7.78 ^{ab}	17.98 ± 4.80 ^{ab}	41.34 ± 11.29 ^{bc}
40.0	6.66 ± 2.89 ^a	14.33 ± 3.32 ^b	33.43 ± 8.42 ^b	54.50 ± 8.57 ^c
80.0	10.00 ± 5.00 ^a	29.69 ± 3.52 ^c	60.00 ± 10.00 ^c	75.00 ± 8.33 ^d
160.0	20.00 ± 10.00 ^b	41.37 ± 9.46 ^d	78.57 ± 10.38 ^d	88.88 ± 19.25 ^d

表 3 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 对脊尾白虾的单一毒性实验结果

Tab. 3 Results of single acute toxicity of Cd^{2+} and Pb^{2+} on *P. carincauda*

污染物	暴露时间(h)	回归方程	R^2	LC_{50} (mg/L)	LC_{50} 95%置信区间
Cd^{2+}	24	$y = 2.244x - 1.071$	0.624	138.699	89.294 ~ 918.795
	48	$y = 2.905x + 0.729$	0.917	33.110	26.595 ~ 43.767
	72	$y = 4.161x + 0.644$	0.960	9.719	7.976 ~ 12.034
	96	$y = 4.343x + 1.066$	0.905	3.650	0.00 ~ 5.841
Pb^{2+}	24	$y = 2.145x - 0.400$	0.756	—	—
	48	$y = 2.120x + 0.549$	0.916	254.541	148.159 ~ 764.431
	72	$y = 1.265x + 2.735$	0.944	62.750	46.454 ~ 96.743
	96	$y = 1.267x + 3.239$	0.980	29.074	18.609 ~ 56.858

注: “—” 表示未测出数据

2.3 复合急性毒性实验

在单一暴露实验基础上, Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 按照等浓度比 1 : 1 进行复合毒性实验。脊尾白虾 96 h 内的累积死亡率如表 4 所示, 可见脊尾白虾的死亡率随暴露浓度的增大和暴露时间的延长逐渐升高, 存在明显的剂量/时间-效应关系。在复合暴露下, Cd^{2+} 对脊尾白虾 48、72、96 h 的 LC_{50} 分别为 21.638、6.563、2.208 mg/L, Pb^{2+} 的 LC_{50} 分别为 54.094、16.408、5.521 mg/L, 可见两种重金属暴露的 LC_{50} 均低于单一暴露。此外, 在 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 复合暴露下, 48、72、

96 h 的毒性相加指数 AI 分别为 0.155、0.068、0.258 (表 5), 复合毒性效应均表现为协同作用。

3 讨论

本研究比较了 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 对脊尾白虾的单一急性毒性效应, 结果发现随 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 质量浓度的增大和暴露时间的延长, 毒性效应会相应地增强, 其对脊尾白虾的毒性影响存在明显的剂量/时间-效应关系。在同等实验条件下, Cd^{2+} 对脊尾白虾的毒性较 Pb^{2+} 更强, 该结果与在其他水生生物中的报道类似^[21-24]。此外, Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 对脊尾白虾的安全质量浓度分别为

0.365 mg/L 和 2.907 mg/L, 均高于中国海水养殖用水水质标准^[25](NY 5052-2001)所规定的指标($\text{Cd}^{2+} \leq$

0.005 mg/L, $\text{Pb}^{2+} \leq 0.05$ mg/L), 表明脊尾白虾对 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 具有较强的耐受性。

表 4 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 复合暴露下脊尾白虾 96 h 内的累积死亡率

Tab. 4 Accumulative mortality of *P. carincauda* after combined exposure with Cd^{2+} and Pb^{2+}

质量浓度 (Cd+Pb, mg/L)	累积死亡率(%)			
	24 h	48 h	72 h	96 h
对照	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a	3.33 ± 2.89 ^a
2.0 + 5.0	0.00 ^a	8.33 ± 5.77 ^{ab}	12.69 ± 2.75 ^a	44.13 ± 9.03 ^a
4.0 + 10.0	0.00 ^a	20.00 ± 8.66 ^{bc}	27.17 ± 3.18 ^b	79.87 ± 4.81 ^b
8.0 + 20.0	1.67 ± 2.89 ^a	35.88 ± 14.72 ^{cd}	54.60 ± 13.51 ^c	90.74 ± 8.49 ^c
16.0 + 40.0	8.33 ± 2.89 ^a	45.52 ± 14.20 ^d	85.61 ± 12.92 ^d	100.00 ^d
32.0 + 80.0	10.00 ^b	53.70 ± 8.49 ^d	100.00 ^c	100.00 ^d

表 5 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 对脊尾白虾的复合毒性结果

Tab. 5 Results of joint toxicity of Cd^{2+} and Pb^{2+} on *P. carincauda*

受试时间 (h)	LC ₅₀ (mg/L)		S	AI	作用方式
	Cd ²⁺	Pb ²⁺			
48	21.638	54.094	0.866	0.155	协同作用
72	6.563	16.408	0.937	0.068	协同作用
96	2.208	5.521	0.795	0.258	协同作用

将本研究获得的 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 对脊尾白虾的 LC₅₀ 与其他虾类进行比较(表 6), 发现不同虾类对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的耐受性存在较大差异。其中, 针对海水虾类, 姚庆祯等^[6]报道了 Cd^{2+} 凡纳滨对虾幼虾 48 h 的 LC₅₀ 为 1.930 mg/L; 臧维玲等^[14]发现 Cd^{2+} 对斑节对虾 96 h 的 LC₅₀ 为 0.286 mg/L; 李建军等^[15]研究表明 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 对黑褐新糠虾 96 h 的 LC₅₀ 分别为 0.161 和 1.917 mg/L。针对淡水虾类, 董学兴等^[12]报道了 Cd^{2+} 对克氏原螯虾幼虾 48 h 的 LC₅₀ 为 1.371 mg/L; 戴习林等^[13]研究表明 Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾 96 h 的 LC₅₀ 为 0.020 mg/L; 张亚娟等^[7]和黄勇等^[9]分别报道了

Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 对日本沼虾 96 h 的 LC₅₀ 分别为 0.019 和 122 mg/L。本研究表明, 除了 Pb^{2+} 对日本沼虾的 LC₅₀(122 mg/L)高于脊尾白虾外, 脊尾白虾对 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的敏感性均低于其他种类的成体虾。这种差别除与受试生物的种类、规格、生长条件及生物个体的健康状况有关外, 也可能与 pH、硬度、无机和有机配位体、固体悬浮物等水质因素有关, 即重金属对生物的毒性随水、悬浮物、可沉积颗粒等介质不同而有所差异^[9, 26]。此外, 重金属污染物的毒性常随温度升高而增强。本研究中采用的水温较低, 可能是导致重金属毒性较低的原因。

表 6 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 对几种虾类 LC₅₀(mg/L)的比较

Tab. 6 Comparison of LC₅₀ (mg/L) values of Cd^{2+} and Pb^{2+} on different shrimp species

污染物	实验生物	24 h	48 h	72 h	96 h	文献来源
Cd^{2+}	脊尾白虾	138.699	33.110	9.719	3.650	本研究
Cd^{2+}	凡纳滨对虾幼虾	2.22	1.930	—	—	[6]
Cd^{2+}	斑节对虾	2.101	1.065	0.411	0.286	[14]
Cd^{2+}	黑褐新糠虾	2.679	0.625	0.250	0.161	[15]
Cd^{2+}	克氏原螯虾幼虾	5.315	1.371	0.414	—	[12]
Cd^{2+}	罗氏沼虾幼虾	0.039	0.028	0.021	0.020	[13]
Cd^{2+}	日本沼虾	0.038	0.022	—	0.019	[7]
Pb^{2+}	脊尾白虾	—	254.541	62.750	29.074	本研究
Pb^{2+}	黑褐新糠虾	13.750	13.750	9.583	1.917	[15]
Pb^{2+}	日本沼虾	—	—	—	122	[9]

注: “—” 表示无相关数据

近年来,国内外学者对 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 对多种生物的联合毒性开展了大量工作,多数认为两者共存表现为协同作用^[27-30],这与本研究得出的结论基本一致。在生物体内,重金属的复合毒性主要通过干扰其正常的生理、生化过程而发挥作用,也可影响细胞膜的结构和功能,从而改变其通透性及转运能力^[21]。在本研究中,两种重金属离子 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的复合作用对脊尾白虾在不同时间点(48、72 和 96 h)均表现出明显的协同作用。究其原因,一方面,可能是 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 共同作用诱导机体活性氧自由基的产生,对细胞造成氧化损伤,并使细胞膜通透性增加,导致重金属离子更易进入胞内,因而毒性增强^[18];另一方面, Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 会诱导机体金属硫蛋白(metallothionein, MT)的合成,当重金属离子与 MT 的螯合速率超过 MT 的合成速率时,重金属对生物的致毒能力将显著增强^[31]。此外,当生物体在对重金属进行富集时,可能会出现重金属之间相互促进的作用。Ginneken 等^[27]研究发现,当 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 共同作用于栉水虱(*Asellus aquaticus*)时,机体对重金属的吸收速率显著升高,且两种重金属能相互促进吸收,呈现明显的协同作用。类似的协同效应在 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 对虹鳟鱼(*Oncorhynchus mykiss*)的急性暴露研究中有报道^[28]。Komjarova 等^[29]采用同位素技术,发现 Cd^{2+} 暴露浓度升高可导致大型蚤(*Daphnia magna*)对 Pb^{2+} 的富集速率显著升高。然而,重金属的复合作用较为复杂,化学性质相近的重金属元素能够以相似的方式和途径作用于生物体,从而竞争细胞表面的结合位点以及相关的代谢系统,这必然会影响重金属对生物体的毒性效应。此外,联合毒性效应还与污染物的组成、测试生物以及环境因素密切相关^[32]。有关 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 对脊尾白虾的复合毒性作用途径和机理尚需进一步研究与探讨。

4 结论

Cd^{2+} 单一暴露对脊尾白虾 24、48、72、96 h 的半致死质量浓度(LC_{50})分别为 138.699、33.110、9.719、3.650 mg/L,其安全质量浓度为 0.365 mg/L; Pb^{2+} 暴露对脊尾白虾 48、72、96 h 的 LC_{50} 分别为 254.541、62.750、29.074 mg/L,其安全质量浓度为 2.907 mg/L。在同等实验条件下, Cd^{2+} 对脊尾白虾的毒性大于 Pb^{2+} 。其中, Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的安全质量浓度均高于中国海水养殖用水水质标准(NY 5052-2001)。此外,在等浓度单位配比 1:1 的条件下,进行了 Cd^{2+} 、

Pb^{2+} 的复合毒性实验,计算出 48、72、96 h 的 AI 值分别为 0.155、0.068、0.258,表明复合毒性效应在各个暴露时间点均表现为协同作用。

参考文献:

- [1] 孙云明, 刘会峦. 海洋中的主要化学污染物及其危害[J]. 化学教育, 2001, 22(7): 1-4.
Sun Yunming, Liu Huiluan. The chemical pollutants and their harms in the ocean[J]. Journal of Chemical Education, 2001, 22(7): 1-4.
- [2] 朱玉芳, 崔勇华. 重金属元素在克氏原螯虾体内的生物富集作用[J]. 水生态学杂志, 2003, 23(1): 11-12.
Zhu Yufang, Cui Yonghua. The biological accumulation of heavy metals in *Procambarus clarkii*[J]. Journal of Hydroecology, 2003, 23(1): 11-12.
- [3] 王琳, 潘鲁青, 苗晶晶. 汞、镉和苯并[a]芘、多氯联苯对栉孔扇贝幼贝单一与联合毒性的研究[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(4): 535-540.
Wang Lin, Pan Luqing, Miao Jingjing. Single and joint toxicity of mercury, cadmium and benzo[a] pyrene, polychlorinated biphenyls 1254 for juvenile *Chlamys farreri*[J]. Marine Environmental Science, 2010, 29(4): 535-540.
- [4] 王兴强, 阎斌伦, 马胜, 等. 脊尾白虾生物学及养殖生态学研究进展[J]. 齐鲁渔业, 2005, 8: 21-23.
Wang Xingqiang, Yan Binlun, Ma Shen, et al. Study on the biology and cultural ecology of *Palaemon carinicauda*[J]. Shandong Fisheries, 2005, 8: 21-23.
- [5] Vangeas C, Espina S, Botello A V, et al. Acute toxicity and synergism of cadmium and zinc in white shrimp, *Penaeus setiferus*, juveniles[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1997, 58(1): 87-92.
- [6] 姚庆祯, 臧维玲, 戴习林, 等. 铜、镉、敌敌畏和甲胺磷对南美白对虾幼虾的急性致毒及相互关系[J]. 上海海洋大学学报, 2003, 12(2): 117-122.
Yao Qingzhen, Zang Weiling, Dai Xilin, et al. A acute toxic effects of copper, cadmium, dichlorvos and methamidophos on *Penaeus vannamei* larval shrimp and their interactions[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2003, 12(2): 117-122.
- [7] 张亚娟, 刘存歧, 王军霞, 等. 镉对日本沼虾的毒性研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(29): 16268-16270.
Zhang Yajuan, Liu Cunqi, Wang Junxia, et al. The toxic effects of Cd^{2+} on *Macrobrachium nipponense*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(29): 16268-16270.
- [8] 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.
Liu Cunqi, An Tongwei, Zhang Yajuan, et al. Toxicity study of Cu^{2+} on *Macrobrachium nipponense* [J]. Journal

- of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(28): 12285-12286.
- [9] 黄勇, 严奎靖, 龚睿. 三种重金属离子对青虾的急性毒性实验[J]. 养殖与饲料, 2008, 12: 52-54.
Huang Yong, Yan Kuijing, Gong Rui. Acute toxicity study of Cu^{2+} , Pb^{2+} and Ag^{2+} on *Macrobrachium nipponense*[J]. Animals Breeding and Feed, 2008, 12: 52-54.
- [10] 张彩明, 陈应华, 吴常文. Cu^{2+} 对脊尾白虾幼虾的急性毒性效应研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(8): 4599-4600.
Zhang Caiming, Chen Yinghua, Wu Changwen. Study on acute toxicity of Cu^{2+} to juvenile *Palaemon carinicauda*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(8): 4599-4600.
- [11] 郑琰晶, 魏社林, 吴进孝, 等. Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、SDS、DBS对脊尾白虾的毒性试验[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(5): 87-90.
Zheng Yanjing, Wei Shelin, Wu Jinxiao, et al. Toxicity effect of Cu^{2+} , Zn^{2+} , SDS and DBS on *Palaemon carinicauda*[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2006, 25(5): 87-90.
- [12] 董学兴, 吕林兰, 王爱民, 等. Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 对克氏原螯虾幼虾的毒性效应研究[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(3): 90-93.
Dong Xuexing, Lü Linlan, Wang Aimin, et al. Study on the acute toxicity of Cu^{2+} and Cd^{2+} acting on *Procambarus clarkii* juvenile[J]. Journal of Hydroecology, 2010, 3(3): 90-93.
- [13] 戴习林, 臧维玲, 杨鸿山, 等. Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾的毒性作用[J]. 上海海洋大学学报, 2001, 10(4): 295-302.
Dai Xilin, Zang Weiling, Yang Hongshan, et al. The toxic effects of Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} on giant freshwater prawn juvenile[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2001, 10(4): 295-302.
- [14] 臧维玲, 戴习林, 江敏, 等. Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 对斑节对虾幼虾的毒性作用[J]. 水产科技情报, 2001, 28(5): 198-201.
Zang Weiling, Dai Xilin, Jiang Min, et al. Toxic effects of Cu^{2+} and Cd^{2+} on giant tiger prawn *Penaeus monodon* juvenile[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2001, 28(5): 198-201.
- [15] 李建军, 杨笑波, 黄韧, 等. 五种重金属离子对黑褐新糠虾的急性毒性试验[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(2): 51-53.
Li Jianjun, Yang Xiaobo, Huang Ren, et al. Acute toxicity test of five heavy metal ions to *Neomysis awatschensis* [J]. Marine Environmental Science, 2006, 25(2): 51-53.
- [16] 王志铮, 吕敢堂, 许俊, 等. Cr^{6+} 、 Zn^{2+} 、 Hg^{2+} 对凡纳滨对虾幼虾急性毒性和联合毒性研究[J]. 渔业科学进展, 2005, 26(2): 6-12.
Wang Zhizheng, Lü Gantang, Xu Jun, et al. Study on the acute toxicity and joint toxicity of Cr^{6+} , Zn^{2+} and Hg^{2+} acting on *Litopenaeus vannamei* juvenile[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 26(2): 6-12.
- [17] 吕耀平, 李小玲, 贾秀英. Cr^{6+} 、 Mn^{7+} 和 Hg^{2+} 对青虾的毒性和联合毒性研究[J]. 上海海洋大学学报, 2007, 16(6): 549-554.
Lü Yaoping, Li Xiaoling, Jia Xiuying. Study on the acute toxicity and joint toxicity of Cr^{6+} 、 Mn^{7+} and Hg^{2+} on the *Macrobrachium nipponense*[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2007, 16(6): 549-554.
- [18] 张彩明, 陈应华. Cr^{6+} 、 Mn^{7+} 和 Zn^{2+} 对脊尾白虾幼虾的单一毒性和联合毒性[J]. 海洋环境科学, 2013, 2: 235-238.
Zhang Caiming, Chen Yinghua. Acute toxicity and joint toxicity of Cr^{6+} 、 Mn^{7+} and Zn^{2+} on *Palaemon carinicauda* juvenile[J]. Marine Environmental Science, 2013, 32, 2: 235-238.
- [19] 周永欣, 章宗涉. 水生生物毒性试验方法[M]. 北京: 农业出版社, 1989.
Zhou Yongxin, Zhang Zongshe. The method of aquatic toxicity test [M]. Beijing: China Agricultural press, 1989.
- [20] Marking L L. Method for assessing additive toxicity of chemical mixtures[J]. Aquatic Toxicology and Hazard Evaluation, 1977, 634: 99-108 .
- [21] 徐彦, 王悠, 周斌, 等. Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的单一和复合作用对菲律宾蛤仔的急性毒性效应研究[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(1): 6-10.
Xu Yan, Wang You, Zhou Bin, et al. Study on single and joint toxic effects of cadmium and lead on *Ruditapes philippinarum* [J]. Marine Environmental Science, 2013, 32(1): 6-10.
- [22] 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]. 水生态学杂志, 2006, 26(6): 82-83.
Wang Xingqiang, Yan Binlun, Cao Mei. Effect of CdCl_2 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ and HgCl_2 on survival of *Sinonovacula constricta* [J]. Journal of Hydroecology, 2006, 26(6): 82-83.
- [23] 谢湘筠, 林勇斌, 柯才焕. 重金属铅、镉对方斑东风螺幼体的急性毒性试验[J]. 漳州师范学院学报(自然科学版), 2007, 20(4): 93-96.
Xie Xiangyun, Lin Yongbin, Ke Caihuan. Acute toxicity tests of the lead and cadmium to *Babylonia areolata* veliger larvae [J]. Journal of Zhangzhou Normal University, 2007, 20(4): 93-96.
- [24] 叶素兰, 余治平. Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cr^{6+} 对鲢胚胎和仔鱼的急性致毒效应[J]. 水产科学, 2009, 28(5): 263-267.
Ye Sulan, Yu Zhiping. Acute toxicity of Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} and Cr^{6+} to embryos and larvae of bighead carp *Aristichthys nobilis* [J]. Fisheries Science, 2009, 28(5): 263-267.

- 263-267.
- [25] NY 5052-2001. 无公害食品: 水产品中有毒有害物质限量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
NY 5052-2001. Pollutant-free food: limitation standard of hazardous and noxious substances in sea food[S]. Beijing: China Standards Press, 2006.
- [26] 张彩明. 几种常见重金属对日本黄姑鱼和脊尾白虾的毒性效应研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2013.
Zhang Caiming. Toxic effects of heavy metals on *Nibea japonica* and *Palaemon carinicauda* [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2013.
- [27] Ginneken M V, Jonge M D, Bervoets L, et al. Uptake and toxicity of Cd, Cu and Pb mixtures in the isopod *Asellus aquaticus*, from waterborne exposure [J]. Science of the Total Environment, 2015, 537: 170-179.
- [28] Winter A R, Playle R C, Dixon D G, et al. Interactions of Pb and Cd mixtures in the presence or absence of natural organic matter with the fish gill [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2012, 83(2): 16-24.
- [29] Komjarova I, Blust R. Multi-metal interactions between Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in water flea *Daphnia magna*, a stable isotope experiment [J]. Aquatic Toxicology, 2008, 90(90): 138-144.
- [30] Komjarova I, Blust R. Multimetal interactions between Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn uptake from water in the zebrafish *Danio rerio*[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(19): 7225-7229.
- [31] George S, Hodgson P, Todd K, et al. Metallothionein protects against cadmium toxicity -proof from studies developing turbot larvae[J]. Marine Environmental Research, 1996, 42(1): 52.
- [32] 叶海波, 林琴, 陈建弟, 等. 重金属复合污染的研究进展[J]. 台州学院学报, 2005, 27(6): 64-68.
Ye Haibo, Lin Qin, Chen Jiandi, et al. New advance in research of combined pollution by heavy metals[J]. Journal of Taizhou University, 2005, 27(6): 64-68.

Single and joint acute toxic effects of cadmium and lead on *Palaemon carinicauda*

XIE Jia^{1, 2, 3}, TENG Jia^{1, 3}, LIU Yong-liang^{1, 2}, YANG Ding-long^{1, 3}, CAO Rui-wen^{1, 3}, CHEN Li-zhu^{1, 3}, WANG Qing¹, LI Fei¹, JI Cheng-long¹, WU Hui-feng¹, CONG Ming¹, ZHAO Jian-min^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Muping Coastal Environment Research Station, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Oct. 11, 2016

Key words: Cd²⁺; Pb²⁺; acute toxicity; joint toxicity; *Palaemon carinicauda*

Abstract: The presence of heavy metals in the coastal environment has been of great concern due to their non-biodegradable nature. This study aims to investigate single and joint acute toxic effects of Cd²⁺ and Pb²⁺ on *Palaemon carinicauda* and provides the basis for the water quality management of aquaculture. The effects of different concentrations of Cd²⁺ and Pb²⁺ on *P. carinicauda* within 96 h were investigated by using the semistatic acute toxicity test. The results showed the following: (1) The 24, 48, 72 and 96 h median lethal concentrations (LC₅₀) of Cd²⁺ on *P. carinicauda* were 138.699, 33.110, 9.719 and 3.650 mg/L, respectively, and the 48, 72 and 96 h LC₅₀ of Pb²⁺ were 254.541, 62.750 and 29.074 mg/L, respectively. The 96 h safety concentrations (SC) of Cd²⁺ and Pb²⁺ on *P. carinicauda* were predicted to be 0.365 mg/L and 2.907 mg/L, respectively; (2) At a concentration ratio of 1 : 1, the additive index values for Cd²⁺ and Pb²⁺ were 0.155, 0.068, and 0.258 during the experiment time of 48, 72 and 96 h, respectively. These results indicated that Cd²⁺ presented higher toxicity toward the shrimps than Pb²⁺. Joint toxic effects of Cd²⁺ and Pb²⁺ demonstrated synergistic effects during the experimental period.

(本文编辑: 谭雪静)