

DOI: 10.5846/stxb201211271682

韦晓慧, 慕芳红, 孙艳桃, 曹志泉. 海洋酸化条件下铜、镉对日本虎斑猛水蚤的急性毒性效应. 生态学报, 2014, 34(14): 3879-3884.

Wei X H, Mu F H, Sun Y T, Cao Z Q. Effect of simulated ocean acidification on the acute toxicity of Cu and Cd to *Tigriopus japonicus*. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 3879-3884.

## 海洋酸化条件下铜、镉对日本虎斑猛水蚤 的急性毒性效应

韦晓慧, 慕芳红\*, 孙艳桃, 曹志泉

(中国海洋大学海洋生命学院, 青岛 266003)

**摘要:**以日本虎斑猛水蚤 (*Tigriopus japonicus*) 为试验生物, 采用高纯度 CO<sub>2</sub> 和空气的混合气体调配试验所需酸化海水 (pH 值 7.70、7.30、6.50), 研究不同海水酸化条件下铜、镉对海洋生物的急性毒性效应。结果表明: 单一 CO<sub>2</sub> 酸化海水对日本虎斑猛水蚤存活的影响不显著; 海水酸化对铜和镉急性毒性的影响效应有差异。铜在低 pH 值 (6.5) 时对日本虎斑猛水蚤的毒性最强, 96h LC<sub>50</sub> 浓度为 0.64 mg/L, 明显低于 pH 值为 8.0、7.7、7.3 对日本虎斑猛水蚤的 96h LC<sub>50</sub> 浓度, 其分别为 1.98、1.19、1.05 mg/L, 随 pH 值下降, 96h LC<sub>50</sub> 下降了近 3 倍。海水酸化使镉的 96h LC<sub>50</sub> 略呈下降趋势, 但对其急性毒性影响效应并不显著; pH 值为 7.7 和 7.3 时, 铜的安全浓度分别为 11.9、10.5 μg/L, 接近于中国海水二类水质标准。本研究表明随着海洋酸化的进程我国近海水域将面临铜污染加剧的威胁。

**关键词:** 海洋酸化; 铜; 镉; 日本虎斑猛水蚤; 急性毒性

## Effect of simulated ocean acidification on the acute toxicity of Cu and Cd to *Tigriopus japonicus*

WEI Xiaohui, MU Fanghong\*, SUN Yantao, CAO Zhiqian

College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

**Abstract:** Heavy metals pollution in marine environments has caused great damage to marine biological and ecological systems. Heavy metals accumulate in marine creatures, after which they are delivered to higher trophic levels of marine organisms through the marine food chain, which causes serious harm to marine biological systems and human health. Additionally, excess carbon dioxide in the atmosphere has caused ocean acidification. Indeed, about one third of the CO<sub>2</sub> released into the atmosphere by anthropogenic activities since the beginning of the industrial revolution has been absorbed by the world's oceans, which play a key role in moderating climate change. Modeling has shown that, if current trends in CO<sub>2</sub> emissions continue, the average pH of the ocean will reach 7.8 by the end of this century, corresponding to 0.5 units below the pre-industrial level, or a three-fold increase in H<sup>+</sup> concentration. The ocean pH has not been at this level for several millions of years. Additionally, these changes are occurring at speeds 100 times greater than ever previously observed. As a result, several marine species, communities and ecosystems might not have time to acclimate or adapt to these fast changes in ocean chemistry. In addition, decreasing ocean pH has the potential to seriously affect the growth, development and reproduction reproductive processes of marine organisms, as well as threaten normal development of the marine ecosystem. Copepods are an important part of the meiofauna that play an important role in the marine ecosystem. Pollution of the marine

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (41106122); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2010CM013); 中国海洋大学高校基本科研业务费青年教师科研专项基金资助项目 (201113043); 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室开放基金资助项目 (201018)

**收稿日期:** 2012-11-27; **网络出版日期:** 2014-02-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanghongmu@ouc.edu.cn

environment can influence their growth and development, as well as the ecological processes they are involved in. Accordingly, there is important scientific value to investigation of the response of copepods to ocean acidification and heavy metals pollution. In the present study, we evaluated the effects of simulated future ocean acidification and the toxicological interaction between ocean acidity and heavy metals of Cu and Cd on *T. japonicus*. To accomplish this, harpacticoids were exposed to Cu and Cd concentration gradient seawater that had been equilibrated with CO<sub>2</sub> and air to reach pH 8.0, 7.7, 7.3 and 6.5 for 96 h. Survival was not significantly suppressed under single sea water acidification, and the final survival rates were greater than 93% in both the experimental groups and the controls. The toxicity of Cu to *T. japonicus* was significantly affected by sea water acidification, with the 96h LC<sub>50</sub> decreasing by nearly threefold from 1.98 to 0.64 mg/L with decreasing pH. The 96 h LC<sub>50</sub> of Cd decreased with decreasing pH, but there was no significant difference in mortality among pH treatments. The results of the present study demonstrated that the predicted future ocean acidification has the potential to negatively affect survival of *T. japonicus* by exacerbating the toxicity of Cu. The calculated safe concentrations of Cu were 11.9 (pH 7.7) and 10.5 (pH 7.3) μg/L, which were below the class I value and very close to the class II level of the China National Quality Standard for Sea Water. Overall, these results indicate that the Chinese coastal sea will face a contamination threat from Cu with increasing ocean acidification.

**Key Words:** ocean acidification; copper; cadmium; *Tigriopus japonicus*; acute toxicity

工业革命以来人类大量使用化石燃料造成大气中二氧化碳浓度上升,大气二氧化碳浓度已从工业革命前期的 280μL/L 上升至 380μL/L,海水吸收过量的二氧化碳降低了碳酸盐矿物平衡体系,使海水 pH 值不断下降。目前表层海水 pH 值平均值比工业革命前下降了至少 0.1 个单位,预计至 2100 年,海水 pH 值将下降 0.3—0.5 个单位,至 2300 年可能下降 0.77 个单位<sup>[1-2]</sup>。海水 pH 值是海洋化学环境的关键因子,即使细微变化都可能对海洋生态系统产生深刻影响。

目前,对海洋酸化的研究主要集中在钙化生物生长、发育等生理特征影响的研究。Widdicombe 和 Spicer 综述了海洋酸化对海洋生物的生理特征的影响效应并指出海洋酸化可能通过影响海洋生物生理、发育、行为和生活方式等多种途径危害海洋生物的多样性<sup>[3]</sup>。Zeebe 等人的研究表明海水 pH 值每下降 0.2—0.3 单位会延缓许多海洋生物包括珊瑚在内的钙化<sup>[4]</sup>。何盛毅等人研究了海洋酸化对马氏珠母贝胚胎和早期幼虫发育的影响<sup>[5]</sup>。然而海洋酸化不仅会直接影响海洋生物,而且可能加剧其他环境胁迫(如重金属)对海洋生物和生态系统的影响效应。如 Breitbarth 研究表明随着海水二氧化碳浓度的增加以及海水酸度的降低,海水中铁离子浓度随之增大从而加剧对海洋生物的毒性影响<sup>[6]</sup>。Pascal 等研究了海洋酸化与重金属的联合作用对两种猛水

蚤 *Schizopera knabeni* 和 *Amphiascoides atopus* 的毒性试验,结果表明海洋酸化增强了重金属对这两种猛水蚤的毒性效应<sup>[7]</sup>。但是当前海洋酸化与重金属等环境胁迫联合作用的相关研究还非常薄弱,不利于全面了解海洋酸化对海洋生物和生态系统的可能带来危害,亟待开展进一步研究。

日本虎斑猛水蚤被国内外广泛应用于毒性污染物(如内分泌干扰物、防污杀菌剂以及金属污染物)的检测<sup>[8-9]</sup>,并被 OECD 列入毒物测试候选标准生物名单。但目前还未见海洋酸化条件下重金属对其影响的研究报道。本研究利用 CO<sub>2</sub> 气体调节天然海水 pH 值,研究海洋酸化条件下铜、镉对日本虎斑猛水蚤的 96 h 急性毒性效应,探讨海洋酸化和重金属联合作用对其存活的影响,为海洋环境保护提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验所使用的日本虎斑猛水蚤 (*Tigriopus japonicus*) 成体,用人工网捕法采集于青岛市鲁迅公园附近高潮带岩礁水洼中。采集后于温度 (20 ± 2) °C、0.45 μm 过滤的自然海水 (pH 值 7.9—8.1) 以及光暗周期 L : D 为 16 h : 8 h 的条件下以三角褐指藻与酵母等比混合物作为饵料进行驯化培养。

实验所用的两种重金属盐分别为氯化铜和氯化

镉,均购自美国 Sigma 公司, Cu(  $\text{CuCl}_2$ , sigma, USA, 99.999%); Cd(  $\text{CdCl}_2$ , sigma, USA, 99.99+%), 预先用三蒸水制为 1 g/L 的母液, 于 4 °C 保存。实验时进行稀释。

实验用水采集于青岛鲁迅公园附近的海域, 用 0.45  $\mu\text{m}$  的微孔滤膜过滤。实验前 1—2 h, 把高纯度  $\text{CO}_2$  和空气的混合气体冲入过滤保温海水, 调配实验所需酸化海水 (pH 值 7.70、7.30、6.50), 然后密封且保温, 1—2 h 后再测定 pH 值和溶解氧浓度 (DO), 若无明显变化 (pH 值变化 < 0.1 个单位, 溶解氧饱和

度 > 90%), 作为酸化组用水。只充空气的海水作为对照组用水, pH 测量值为 8.00—8.10。使用梅特勒 DELTA320 pH 测定仪测量 pH 值, JPB1-608 溶解氧测定仪测 DO, 手持式折光仪测定盐度, 滴定法测定总碱度<sup>[10]</sup>。用盐度、总碱度和 pH (取最小值和最大值), 使用软件 SWCO<sub>2</sub> ([http://neon.otago.ac.nz/research/mfc/people/keith\\_hunter/software/software.htm](http://neon.otago.ac.nz/research/mfc/people/keith_hunter/software/software.htm)) 计算得出试验中海水的二氧化碳分压  $p(\text{CO}_2)$  (表 1)。

表 1 各试验组海水 pH 值、盐度、总碱度和二氧化碳分压值

Table 1 pH, salinity, total alkalinity and  $p\text{CO}_2$  level of different treatments at the experiment

|                   | 酸碱度<br>pH  | 盐度/‰<br>Salinity | 总碱度/(mmol/L)<br>Total alkalinity | 二氧化碳分压/(uatm)<br>$p\text{CO}_2$ |
|-------------------|------------|------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 对照组 Control       | 8.00(0.01) | 29.0             | 2.036                            | 352.74                          |
| 处理组 1 Treatment 1 | 7.72(0.02) | 29.1             | 2.086                            | 918.55                          |
| 处理组 2 Treatment 2 | 7.34(0.03) | 29.0             | 2.006                            | 2372.51                         |
| 处理组 3 Treatment 3 | 6.57(0.03) | 29.4             | 2.046                            | 15898.40                        |

## 1.2 实验方法

实验容器为密封性好的带内塞聚乙烯瓶, 以保证实验前后海水 pH 值等条件不变, 实验水体 270 mL。pH 值梯度设置为自然海水 (pH 值 8.00—8.10)、7.70、7.30、6.50。根据预实验结果设置各重金属浓度梯度 Cu: 0 (对照)、0.25、0.50、1.00、2.00、4.00 mg/L; Cd: 0 (对照)、2.50、5.00、10.00、15.00、20.00 mg/L。各处理组和对照组分别设 3 个平行。每瓶放入游动活泼的日本虎斑猛水蚤成熟个体 20 只, 置于温度 (20 ± 2) °C 的培养箱中, 光暗周期 16 h : 8 h。试验过程中不投饵。培养 96 h 后统计各实验组受试生物的死亡率。不游泳、轻敲烧杯壁或用大口滴管轻触不活动者认为死亡。

## 1.3 数据分析

试验终止后, 统计各实验组日本虎斑猛水蚤的死亡个数, 求死亡率。使用软件 SPSS13.0 统计分析实验数据, 得出各 pH 值条件下铜和镉的概率单位模型回归方程, 96h  $\text{LC}_{50}$  值, 和相应的 95% 置信区间。

## 2 结果与分析

### 2.1 海水酸化对日本虎斑猛水蚤的急性毒性效应

海水酸化 96 h 急性毒性试验中, pH 值 8.0、7.7、7.3 和 6.5 条件下, 日本虎斑猛水蚤的死亡率分别为

4.2%、0.8%、5.0% 和 2.5%。相关分析结果表明, 死亡率和 pH 值之间没有显著相关性 (Person  $R = 0.34$ ,  $P = 0.873 > 0.05$ )。one-way ANOVA 分析结果表明 4 个 pH 值梯度对日本虎斑猛水蚤的死亡率均属于同一齐次性子集, 无显著差异 ( $P > 0.05$ )。因此在 96 h 急性试验中, 单一的海水酸化对日本虎斑猛水蚤的急性毒性效应影响并不显著。

### 2.2 海水酸化对铜急性毒性效应的影响

不同 pH 值条件下, 铜对日本虎斑猛水蚤的 96 h 急性毒性试验结果见表 2, 图 1。在各 pH 值水平, 死亡率都随铜浓度的升高呈上升趋势; 96 h  $\text{LC}_{50}$  随着海水酸度的增加而呈降低趋势, 依次为 pH 值 8.0 > 7.7 > 7.3 > 6.5。对海水 pH 值和 96h  $\text{LC}_{50}$  进行相关分析, 两者之间具有显著的相关性 (Kendall's  $R = 1.00$ ,  $P = 0.04 < 0.05$ )。two-way ANOVA 分析表明, 不同 pH 值对铜急性毒性有显著影响 ( $P = 0.002 < 0.05$ )。由图 1 所示: 在对照组和 0.25 mg/L 浓度组, 最高死亡率都出现在 pH 值 = 7.3, 随着铜浓度升高, 在 0.5、1、2 和 3.5 mg/L 浓度组, 最高死亡率都出现在 pH 值 = 6.5。尤其是在 3.5 mg/L 浓度组, 随着 pH 值的下降, 死亡率呈现阶梯型的上升趋势。因此, 随海水酸化程度增高, 铜对日本虎斑猛水蚤的急性毒性效应显著增强。

表 2 海水酸化条件下铜对日本虎斑猛水蚤的急性毒性

Table 2 Acute toxicity of Cu on *T. japonicus* at different pH levels

| 酸碱度<br>pH | 96h 半致死浓度<br>96h LC <sub>50</sub> /<br>(mg/L) | 95%置信区间<br>Confidence limits /<br>(mg/L) | 回归方程<br>Regression<br>equation |
|-----------|---|--|--------------------------------|
| 8.0       | 1.98  | 1.39—3.36                                | $Y = -0.56x + 1.86$            |
| 7.7       | 1.19  | 0.80—1.89                                | $Y = -0.12x + 1.59$            |
| 7.3       | 1.05  | 0.65—1.78                                | $Y = -0.03x + 1.36$            |
| 6.5       | 0.64  | 0.44—0.87                                | $Y = 0.43x + 2.20$             |

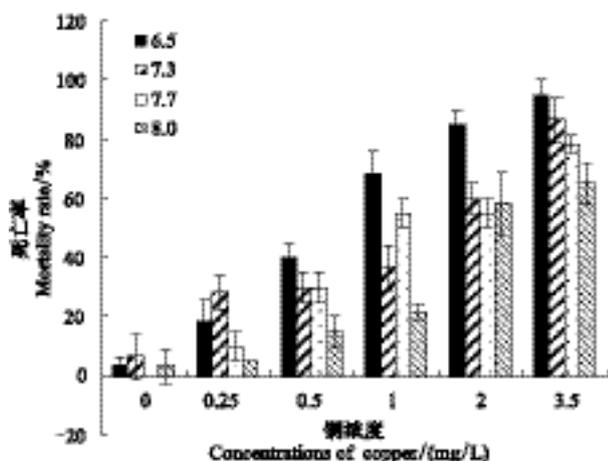


图 1 不同铜浓度、不同 pH 值条件下日本虎斑猛水蚤的致死率

Fig.1 The mortality of *T. japonicus* exposed to different Cu concentrations at different pH levels

### 2.3 海水酸化对镉急性毒性效应的影响

不同 pH 条件下,镉对日本虎斑猛水蚤的急性毒性试验结果见表 3, 图 2。镉对日本虎斑猛水蚤的 96h LC<sub>50</sub>随着海水酸度的增加依次下降。但 two-way ANOVA 分析表明,不同海水 pH 值条件下镉对日本虎斑猛水蚤的死亡率无显著差异 ( $P = 0.109 > 0.05$ )。且由图 2 所示,Cd 各浓度组间,pH 值对死亡率的影响没有呈现规律性的变化。因此,尽管海水酸化使镉对日本虎斑猛水蚤的 96h LC<sub>50</sub>呈下降趋势,但实验组间死亡率未呈现规律性变化,差异不显著。

表 3 海水酸化条件下镉对日本虎斑猛水蚤的急性毒性

Table 3 Acute toxicity of Cd on *T. japonicus* at different pH levels

| 酸碱度<br>pH | 96h 半致死浓度<br>96h LC <sub>50</sub> /<br>(mg/L) | 95%置信区间<br>Confidence limits/<br>(mg/L) | 回归方程<br>Regression<br>equation |
|-----------|---|---|--------------------------------|
| 8.0       | 7.63  | 2.82—16.12                              | $Y = -2.61 + 2.95x$            |
| 7.7       | 7.37  | 5.82—9.10                               | $Y = -2.88x + 3.32$            |
| 7.3       | 6.44  | 0.05—20.66                              | $Y = -1.66x + 2.05$            |
| 6.5       | 6.31  | 1.42—13.27                              | $Y = -2.04x + 2.55$            |

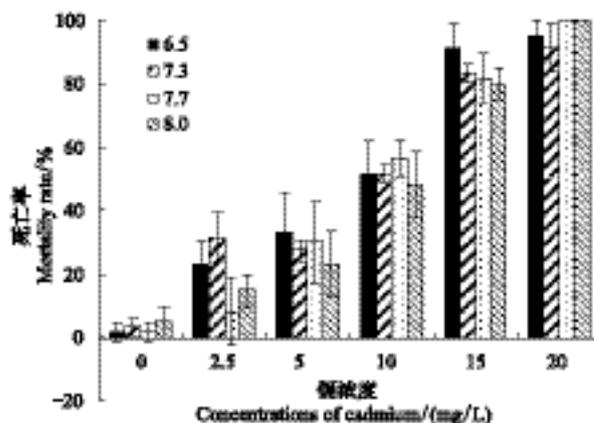


图 2 不同镉浓度、不同 pH 值条件下日本虎斑猛水蚤的致死率

Fig.2 The mortality of *T. japonicus* exposed to different Cd concentrations at different pH levels

### 3 讨论

本研究结果显示,目前预测的未来 300 年海洋酸化程度的短期暴露本身对日本虎斑猛水蚤存活影响不大。Pascal 等报道了海洋酸化对两种猛水蚤 *Schizopera knabeni* 和 *Amphiascoides atopus* 的 96h 急性毒性试验,这两个种类的 LC<sub>10</sub> 分别为 pH 值 6.06 和 pH 值 6.41, LC<sub>50</sub> 更分别低至 pH 值 5.00 和 5.75<sup>[6]</sup>。张达娟等比较了二氧化碳酸化和盐酸酸化对 7 种桡足类的急性毒性,其中日本虎斑猛水蚤对酸化的耐受性明显高于其他营浮游生活的种类,其 24 h 和 48 h LC<sub>50</sub> 分别为 5.85 和 5.93,认为桡足类对海水酸化的耐受性具有一定的种类特异性<sup>[11]</sup>。日本虎斑猛水蚤多生活于高潮带水洼,其生境受季节、昼夜和潮汐影响环境因子波动极大,抵御环境变化能力较强,0.4—0.7 个单位的 pH 值下降对其成体存活的影响较小,对酸化短期胁迫表现出了较强的耐性。而一些生境长期稳定,运动能力较弱的猛水蚤则对海水酸化表现出较弱的耐性<sup>[12]</sup>,因此来自不同生境类型的生物对酸化的响应机制可能不同,不同类群和种类的生物对酸化胁迫的耐性也可能表现出差异,不同暴露时间对实验结果也具有一定程度的影响,在综合评价海洋酸化对生物的影响时应充分考虑这一点。

重金属对桡足类的急性毒性效应一般以半致死浓度 LC<sub>50</sub> 作为效应终端,暴露时间相同情况下 LC<sub>50</sub>

越小,说明该重金属毒性越强。本研究实验结果表明铜对日本虎斑猛水蚤的急性毒性效应大于镉,pH 值 8.0 条件下,铜的 96h  $LC_{50}$  为 1.98 mg/L,镉的 96h  $LC_{50}$  为 7.63 mg/L,分别在历史报道铜和镉对该种的 96h  $LC_{50}$  结果范围之内<sup>[13]</sup>。随着海水 pH 值降低,铜和镉对日本虎斑猛水蚤的 96h  $LC_{50}$  都呈下降趋势,根据美国国家科学院与工程院 NAS/NAE 应用金属对受试动物的 96h  $LC_{50}$  浓度乘以 0.01 的应用系数获得海水环境安全浓度标准的方法<sup>[14]</sup>,本研究所获得的铜和镉的安全浓度阈值及其见表 4,与我国环保部制定的海水水质标准(GB3097—1997)比较发现,

在 pH 值为 8.0 时,铜的安全浓度高于海水水质一类标准,在 pH 值为 7.7 和 7.3 时,铜的安全浓度就很接近二类水质标准,在 pH 值为 6.5 条件下,铜的安全浓度高于海水水质二类标准,低于一类标准。对于镉,在 pH 值 8.0、7.7、7.3 和 6.5 条件下,其安全浓度都远远高于海水水质一类标准。据 2010 年国家环境部中国环境状况公报报告的近岸海域水质类别调查结果,我国近海海域二类和二类水质占接近 70%,因此,随着海洋酸化程度加剧,重金属铜将更加成为威胁我国近岸海水水体安全的污染物。

表 4 日本虎斑猛水蚤对铜和镉的安全浓度与国家海水水质标准的比较

Table 4 Comparisons of the safety concentration to *T. japonicus* and the national marine water quality standards of heavy metals

|  | 酸碱度 pH           |                 |                 |                  | 海水水质<br>一类标准                                 | 海水水质<br>二类标准                                  |
|--|------------------|-----------------|-----------------|------------------|--|---|
|  | 8                | 7.7             | 7.3             | 6.5              | Seawater quality<br>standards for<br>Grade I | Seawater quality<br>standards for<br>Grade II |
| 铜浓度/( $\mu\text{g/L}$ )<br>Concentration of Cu | 19.8(13.9—33.6)  | 11.9(8.00—18.9) | 10.5(6.50—17.8) | 6.4(4.40—8.70)   | <5.0   | <10.0   |
| 镉浓度/( $\mu\text{g/L}$ )<br>Concentration of Cd | 76.3(28.2—161.2) | 73.7(58.2—91.0) | 64.4(0.5—206.6) | 63.1(14.2—132.7) | <0.1   | <5.0  |

本实验结果表明海水酸化对铜和镉毒性的影响效应有所差异。铜虽然是生命活动必须的微量元素,但其浓度过高也会引起生物中毒,而镉是一种生物非必需的毒副作用很强的有毒元素<sup>[15]</sup>。海洋酸化造成海水碳酸盐体系的变化,主要表现在  $\text{OH}^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  浓度下降和  $\text{H}^+$  浓度的升高<sup>[16]</sup>。海洋酸化现象本身即使没有引起海洋生物的急性致死,但却能造成海洋生物生理、形态和行为特征的改变,逼迫其消耗额外的能量对抗这种环境胁迫,降低其对重金属毒害作用的抵御能力<sup>[3]</sup>。此外海水酸化对不同重金属毒性影响的机制有所差异。 $\text{Cd}^{2+}$  在海洋中常形成氯复合物,而  $\text{Cl}^-$  对 pH 的变化不敏感, $\text{Cu}^{2+}$  在海洋中常形成碳酸盐复合物,对海洋酸化敏感,随 pH 值下降释放更多的游离  $\text{Cu}^{2+}$ ,游离  $\text{Cu}^{2+}$  的毒性要远远高于复合物形态,因此在近岸,海洋酸化可能将沉积物中大量的  $\text{Cu}^{2+}$  释放于间隙水和上层水体,成为生物可利用状态,加剧铜污染的程度;另一方面,急性毒性试验过程中一般不投饵,重金属需通过体壁转移进入体内才表现出毒性。海洋酸化造成的  $\text{H}^+$  浓度的升高能与重金属离子竞争吸附位点从而减少重金属的吸收,从而降低重金属的毒性效应<sup>[6]</sup>。这些过

程的相互作用可能是导致本研究海水酸化显著加剧铜的急性毒性效应,而对镉的急性毒性效应存在一定的影响趋势,但不显著的原因。

本论文仅涉及二氧化碳引起的海水酸化及其与重金属联合作用对日本虎斑猛水蚤的急性毒性试验结果,未来工作中应进一步探索海洋酸化联合重金属等环境胁迫对其生理、生化和遗传的影响,并开展亚慢性和多世代尺度的研究进一步探索对生殖、发育的影响及其生物适应性。

#### References:

- [1] Caldeira K, Wickett M E. Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *Journal Geophysical Research Oceans*, 2005, 110(C9), doi: 10.1029/2004JC002671.
- [2] Fabry V J, Seibel B A, Feely R A. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science*, 2008, 65(3): 414-432.
- [3] Widdicombe S, Spicer J I. Predicting the impact of ocean acidification on benthic biodiversity: What can animal physiology tell us?. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 366(1/2): 187-197.

- [ 4 ] Zeebe R E, Zachos J C, Caldeira K, Tyrrell T. Carbon emissions and acidification. *Science*, 2008, 321(5885): 51-52.
- [ 5 ] He S Y, Lin C X, He M X, Yan Y. Impacts of ocean acidification on the development of *Pinctada martensii* embryo and early larva. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(4): 747-751.
- [ 6 ] Breitbarth E, Bellerby R J, Neill C C, Ardelan M V, Meyerhöfer M, Zöllner E, Croot P L, Riebesell U. Ocean acidification affects iron speciation during a coastal seawater mesocosm experiment. *Biogeosciences*, 2010, 7(3): 1065-1073.
- [ 7 ] Pascal P Y, Fleegeer J W, Galvez F, Carman K R. The toxicological interaction between ocean acidity and metals in coastal meiobenthic copepods. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(12): 2201-2208.
- [ 8 ] Kwok K W H, Leung K M Y. Toxicity of antifouling biocides to the intertidal harpacticoid copepod *Tigriopus japonicus* (Crustacea, Copepoda): Effects of temperature and salinity. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 51(8/12): 830-837.
- [ 9 ] Li L, Guo D H, Zhu X M. Study on acute toxicity of triazophos and acephate on marine copepods. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2008, 47(4): 602-606.
- [ 10 ] Dai M C, Gao G P, Bao X W. *Introduction to Marine Survey Method*. Qingdao: Ocean University of China Press, 2008.
- [ 11 ] Zhang D J, Li S J, Wang H Z, Guo D H. Comparative study on the acute toxicity of ocean Acidification driven by CO<sub>2</sub> and HCl on several marine copepods. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2011, 50(3): 631-636.
- [ 12 ] Thistle D, Sellback L, Carman K R, Fleegeer J W, Brewer P G, Barry J P. Simulated sequestration of industrial carbon dioxide at a deep-sea site: Effects on species of harpacticoid copepods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, 330(1): 151-158.
- [ 13 ] Kwok K W H, Grist E P M, Leung K M Y. Acclimation effect and fitness cost of copper resistance in the marine copepod *Tigriopus japonicus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(2): 358-364.
- [ 14 ] Li Y H, Lin H. Acute toxicity of cadmium to *Argopecten irradians*. *Marine Fisheries Research*, 2006, 27(6): 81-83.
- [ 15 ] Wang K. *Trace Elements in Life Science*. Beijing: China Measure Press, 1996: 850-885.
- [ 16 ] Orr J C, Fabry V J, Aumont O, Bopp L, Doney S C, Feely R A, Gnanadesikan A, Gruber N, Ishida A, Joos F, Key R M, Lindsay K, Maier-Reimer E, Matear R, Monfray P, Mouchet A, Najjar R G, Plattner G K, Rodgers K B, Sabine C L, Sarmiento J L, Schlitzer R, Slater R D, Totterdell I J, Weirig M F, Yamanaka Y, Yool A. Anthropogenic ocean acidification over the twenty first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 2005, 437(7059): 681-686.

#### 参考文献:

- [ 5 ] 何盛毅, 林传旭, 何毛贤, 严岩. 海洋酸化对马氏珠母贝胚胎和早期幼虫发育的影响. *生态学杂志*, 2011, 30(4): 747-751.
- [ 9 ] 李磊, 郭东晖, 朱小明. 三唑磷和乙酰甲胺磷对海洋桡足类的急性毒性研究. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2008, 47(4): 602-606.
- [ 10 ] 侍茂崇, 高郭平, 鲍献文. *海洋调查方法导论*. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2008.
- [ 11 ] 张达娟, 李少菁, 王桂忠, 郭东晖. 二氧化碳酸化和盐酸酸化对几种桡足类的急性毒性比较. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2011, 50(3): 631-636.
- [ 14 ] 李玉环, 林洪. 镉对海湾扇贝的急性毒性研究. *海洋水产研究*, 2006, 27(6): 80-83.
- [ 15 ] 王夔. *生命科学中的微量元素*. 北京: 中国计量科学出版社, 1996: 850-885.