

生物抑制剂(Mexel[®]432)对3种经济型底栖生物的 急性毒性效应

王 叶^{1,2,3}, 李 磊^{2,3}, 唐保军^{2,3}, 陈启沂^{1,2}, 蒋 玫^{2,3}

(1.上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 2.中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;
3.中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部低洼盐碱地水产养殖重点实验室, 上海 200090)

摘 要: Mexel[®]432 作为一种新型生物抑制剂, 可治理电厂冷却水循环系统管道中的污损生物。本研究采用半静水实验方法研究了 Mexel[®]432 对 3 种经济型底栖生物: 皱纹盘鲍 (*Haliotis discus hannai*)、光棘球海胆 (*Mesocentrotus nudus*) 和日本蟳 (*Charybdis japonica*) 的 96 h 急性毒性效应。结果表明, Mexel[®]432 对 3 种生物的毒性存在明显的时间-效应和剂量-效应关系。Mexel[®]432 对皱纹盘鲍、光棘球海胆及日本蟳 3 种生物的 96 h 半致死浓度 (LC_{50}) 分别为 8 mg/L、11 mg/L、186 mg/L, 安全浓度 (safety concentration, SC) 为 0.80 mg/L、1.10 mg/L、18.60 mg/L。3 种底栖生物对 Mexel[®]432 的毒性敏感性强弱依次为皱纹盘鲍>光棘球海胆>日本蟳。

关键词: 生物抑制剂; Mexel[®]432; 底栖生物; 急性毒性

中图分类号: Q945.78; X17 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2023)03-0418-07

Acute toxic effects of the biology inhibitor Mexel[®]432 on three economic benthic organisms

WANG Ye^{1,2,3}, LI Lei^{2,3}, TANG Bao-jun^{2,3}, CHEN Qi-yi^{1,2}, JIANG Mei^{2,3}

(1.College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.East China Sea Fisheries Research Institute, Shanghai 200090, China; 3.Key Laboratory of Oceanic and Polar Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P.R. China; East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: Mexel[®]432, as a new biological inhibitor, can be used to treat biological filth in the pipes of cooling water circulation system in power plants. In this study, the acute toxicity of Mexel[®]432 on three common marine economic organisms: *Haliotis discus hannai*, *Mesocentrotus nudus*, *Charybdis japonica* was studied by semi-static water experiments. The results showed that there was a significant time-effect and dose-effect relationships between the toxicity of Mexel[®]432 to three organisms. The median lethal concentrations of Mexel[®]432 were 8 mg/L, 11 mg/L and 186 mg/L, and the safe concentrations were 0.80 mg/L, 1.10 mg/L and 18.60 mg/L, respectively. After stress, the toxicity of Mexel[®]432 to the three marine organisms was *Haliotis discus hannai*>*Mesocentrotus nudus*>*Charybdis japonica*.

Key words: biology inhibitor; Mexel[®]432; benthic species; acute toxicity

收稿日期: 2022-05-06, 修订日期: 2022-11-17

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金资助 (CARS-49); 中央公益科研机构基础研究基金 (2020TD14)

作者简介: 王 叶 (1996—), 女, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 研究方向为海洋生态环境, E-mail: 15114230653@163.com

通讯作者: 蒋 玫, 研究员, 从事渔业生态环境工作, E-mail: jiangrose73@163.com

滨海电厂因邻近海滨,通常采用海水作为冷凝器的循环冷却水。由于在直流冷却水系统中往往附着藤壶、贝类、藻类等海洋生物,容易引发管路堵塞,严重影响着电厂的安全性、可靠性和经济性^[1]。为防治和控制此类海洋污损生物,滨海电厂通常投放杀生剂来控制海洋污损生物数量。现有的杀生剂具有较强的氧化性,能使微生物体内与新陈代谢有关的酶发生氧化从而杀死微生物^[2];亦可穿透细胞壁,影响营养物质吸收,使细胞死亡;或者生成致癌的三氯甲烷和有毒的可吸附有机卤化物(AOX)等有害物质抑制生物的存活^[3]。这类杀生剂虽然性价比较高,但容易造成海洋环境污染。近年来,开发环境友好型以及对非目标生物危害性小的高质量、高性能可替代产品逐渐成为学者研究的重点。然而现阶段已开发出的杀生剂对污损生物的杀灭效果不理想,并且可能会对海洋环境造成一定污染,因此开发绿色环保型杀生剂控制技术需求日益迫切。Mexel®432作为一种新型的海生物抑制剂,目标生物对其不会产生抗药性,且在水体环境中易降解,对环境污染相对较小。同时Mexel®432作为脂肪族胺表面活性剂的混合物,由亲水基和疏水基两部分构成,亲水基形成分子保护膜,疏水基降低凝聚力。这种结构使Mexel®432形成“两性结构物”,可在附着基质表面形成一层薄膜,从而防止微生物和海生物体形成附着^[4-5]。作为活性剂和杀生剂的替代品,Mexel®432已在美国、法国等多个国家得到应用^[6-7],但目前关于Mexel®432对水生生物的特殊毒性尚不明确,并且国内对Mexel®432的研究也未见报道。

皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)隶属软体动物门(Mollusca),主要分布于我国北部沿海海域,是具有重要养殖价值的经济贝类^[8]。光棘球海胆(*Mesocentrotus nudus*)作为棘皮动物(Echinodermata)中的重要经济物种,具有较高的食用和药用价值^[9]。日本蟳(*Charybdis japonica*)隶属甲壳纲(Malacostraca),属沿岸定居性种类,在温带、热带均有分布,是我国北方沿海常见的一种经济蟹类^[10]。因此,基于底栖生物的广布性和经济性原因,本文选取3种生物作为实验对

象,通过室内急性毒性实验,探讨Mexel®432的生物毒性效应,以评估该生物抑制剂作为绿色环保型杀生剂应用的可行性,也为海洋环境保护的科学决策提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 实验海水

实验海水为天然海水,经过三级沉淀砂滤处理,去除杂质,再经三层棉纱布和过滤棉过滤后使用。海水盐度为28.59,pH为8.08,水温为21℃。

1.1.2 实验试剂

Mexel®432试剂为白色乳化液,由上海核原环保科技有限公司提供,室温保存,实验开始前用去离子水配制实验母液,准确称量1.00 g Mexel®432溶于1 L的去离子水中,制备成1.00 g/L的实验母液(现配现用)。采用Lovibond®色度仪(Tintometer® Group,英国)测定实验母液浓度。

实验母液浓度测定:取33 mL待测试验溶液加入50 mL具塞玻璃量筒中,加入5 mL三氯甲烷和1粒显色药片,用力振荡比色管30 s后,再静置30 s。具塞玻璃量筒中的溶液静置分层,取下层三氯甲烷层3 mL加入色度仪特定比色管中,放入色度仪的左边工位。同时取33 mL过滤自然海水(未加药剂)加入50 mL具塞玻璃量筒中,重复上述步骤,将比色管放入色度仪的右边工位,作为参考色度。转动色度仪的比色盘,目测两侧色标相符,读取待测试验溶液的浓度。

1.1.3 实验生物

皱纹盘鲍幼鲍取自荣成某鲍鱼养殖场,壳长(20.70±0.50) mm,壳宽(1.00±0.90) mm,体质量(1.76±0.26) g。实验前先暂养7 d,期间每日定时换水和投喂颗粒复合饲料,24 h充氧,暂养期间幼鲍活力良好,摄食正常。实验前24 h停止喂食。选取活力强,健康,无外伤的幼鲍开展实验。

光棘球海胆幼胆取自荣成某海胆育苗场,壳径(22.74±0.16) mm,体质量(1.03±0.50) g。实验开始前先暂养7 d,每3 d投喂1次海带。实验前24 h停止喂食,选择健康、活动频繁、棘刺管足正常、未受任何疾病感染的个体开展实验。

日本蟳幼蟳取自荣成近岸海域,头胸甲宽

(30.28±9.78)mm, 体质量(5.62±0.62)g。实验前先暂养 7 d, 期间每日定时换水和投喂颗粒复合饲料, 全天充气。实验前 24 h 停止喂食。选取游泳活力强、大螯和附肢齐全的幼螯开展实验。

1.2 实验方法

1.2.1 皱纹盘鲍

采用 96 h 半静态实验方法, Mexel[®]432 的实验浓度按照预实验结果等梯度设为 4 mg/L、6 mg/L、8 mg/L、10 mg/L、12 mg/L、14 mg/L 和 16 mg/L, 共 7 个实验组, 以天然海水作为空白对照组。每组设置 3 个平行, 每个平行组投放 30 只皱纹盘鲍。实验在透明玻璃缸(35 cm×25 cm×30 cm)内进行, 实验溶液体积为 15 L, 每隔 24 h 更换全部实验溶液, 期间不投喂, 保持实验用水溶解氧≥6 mg/L, 观察记录 24 h、48 h、72 h、96 h 皱纹盘鲍幼鲍的中毒症状及死亡情况, 及时取出死亡个体。皱纹盘鲍的死亡判断标准为: 腹足完全无自主吸附力, 腹足朝上, 用镊子多次触碰躯体完全无反应。

1.2.2 光棘球海胆

采用 96 h 半静态实验方法, Mexel[®]432 的实验浓度按照预实验结果等梯度设置为 9 mg/L、10 mg/L、11 mg/L、12 mg/L、13 mg/L 共 5 个实验组, 同时以天然海水作为空白对照组。每组设置 3 个平行, 每个平行组投放 30 只光棘球海胆幼胆。实验在透明玻璃缸(35 cm×25 cm×30 cm)内进行, 实验溶液体积为 15 L, 每隔 24 h 更换 100% 实验溶液, 期间不投喂, 连续充氧保持溶解氧≥6 mg/L, 分别于 24 h、48 h、72 h、96 h 观察记录幼胆死亡情况。用镊子多次触碰躯体完全无反应作为死亡判断标准。

1.2.3 日本蟳

采用 96 h 半静态实验方法, Mexel[®]432 的实验浓度按照预实验结果等间距设为 100 mg/L、200 mg/L、300 mg/L、400 mg/L、500 mg/L 共 5 个浓度组, 以天然海水作为空白对照组。每组设置 3 个平行, 每个平行组投放 30 只日本蟳幼蟳。实验在透明玻璃缸(80 cm×60 cm×60 cm)内进行, 实验溶液体积为 40 L, 每隔 24 h 更换全部实验溶液, 期间不投喂, 观察并记录 24 h、48 h、72 h、96 h 内日本蟳幼蟳死亡情况, 及时取出死

亡个体。以蟳体不游动、不吐泡为死亡判断标准。

1.3 数据处理

使用 SPSS 软件对数据进行整理和分析。采用概率单位法计算半致死浓度(LC₅₀)和半致死浓度的 95% 置信区间, 采用公式(1)计算安全浓度(safety concentration, SC), 并利用 SPSS 软件的单因素方差分析法(Duncan's test, *p*<0.05)检验数据间显著性差异^[11]。

SC = 96hLC₅₀ × 0.10 (1)

式中: SC 为安全浓度; LC₅₀ 为半致死浓度。

1.4 毒性单位分级体系

根据 GESAMP^[12] 提出的水生生物急性毒性分级标准进行评价, 分级标准具体如表 1 所示。

表 1 水生生物急性毒性分级标准
Tab.1 Toxicity rank standard of aquatic organism

等级	毒性级别	LC ₅₀ 、EC ₅₀ 或IC ₅₀ /mg·L ⁻¹
0	无毒	>1000
1	实际无毒	100 ~ 1000
2	低毒	10 ~ 100
3	中毒	1 ~ 10
4	高毒	0.1 ~ 1
5	极高毒	0.01 ~ 0.1
6	剧毒	≤0.01

2 结果与讨论

2.1 Mexel[®]432 对受试生物的行为影响

实验中观察到, 幼鲍受 Mexel[®]432 胁迫几个小时后开始沿着缸壁向水面爬, 附着在缸壁上, 并分泌少量黏液, 随着 Mexel[®]432 浓度的增加和时间的延长, 幼鲍开始分泌大量黏液, 水面上并伴有泡沫状漂浮物出现, 水体逐渐浑浊; 在较高浓度组(10 mg/L、12 mg/L、14 mg/L), 幼鲍出现不适开始左右扭动躯体, 一段时间后鲍肌肉开始松弛且附着力减弱, 渐渐脱离缸壁, 腹足朝上卧于缸底, 腹足蠕动挣扎但无法翻身, 多次触碰无反应, 逐渐死亡, 死亡个体肉质僵硬, 泛白, 表面光滑。

光棘球海胆幼胆在 24 h 内未出现明显差异, 48 h 后所有浓度组海胆活动能力逐渐迟缓, 个别棘刺出现脱落, 海胆管足出现少量卷曲, 贴壁不

紧,高浓度组(11 mg/L、12 mg/L、13 mg/L)海胆管足卷曲更为严重,棘刺变白并开始脱落,玻璃缸内出现长丝状絮状排泄物,幼胆个体开始死亡;随着胁迫时间的延长,幼胆大多数棘刺脱落严重,逐渐死亡,长丝状絮状排泄物更加明显;96 h时,幼胆棘刺几乎全部脱落,管足已无依附性,个体几乎不动,外物触碰时也无反应,实验过程中发现幼胆死亡个体身体暗红色加深,围口膜颜色加深现象更加明显。

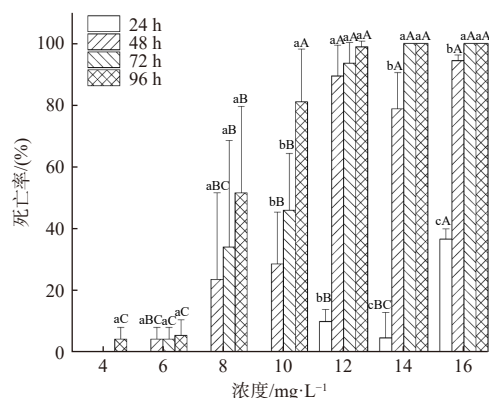
当日本蟳幼蟳受 Mexel®432 胁迫几个小时后游动剧烈;48 h时,高浓度组(500 mg/L)日本蟳幼蟳半数以上死亡,蟳体完全不游动,贴伏于缸体底部;72~96 h时,幼蟳摄食量明显下降,用玻璃棒触碰前螯无反应,腹部上翻沉于缸底。

2.2 Mexel®432 对3种生物的毒性效应

2.2.1 Mexel®432 对皱纹盘鲍的毒性效应

在 Mexel®432 的不同浓度处理下皱纹盘鲍的死亡率随时间和浓度的变化如图1所示,实验过程空白对照组未出现死亡现象。24 h时,12 mg/L、14 mg/L、16 mg/L 三个高浓度组均出现死亡个体,其他低浓度组未见死亡;48 h时,12 mg/L 浓度组死亡率高达80%以上;随胁迫时间的推移,皱纹盘鲍的死亡率随 Mexel®432 浓度的增加呈现升高的趋势,且高浓度实验组死亡率明显高于低浓度组,表明皱纹盘鲍对低浓度的 Mexel®432 具有一定的耐受性;96 h时,高浓度组(12 mg/L、14 mg/L、16 mg/L)死亡率达100%,与对照组存在明显差异,表现出良好的时间-效应和剂量-效应。由表2可知, Mexel®432 对皱纹盘鲍的96 h LC_{50} 为8.00 mg/L, SC 为0.80 mg/L,95%置信区间为7.19~8.83 mg/L。已有研究发现, Mexel®432 可作用于贝类的鳃表面,改变贝类鳃的结构,影响细胞膜的通透性^[13]。本实验结果显示,低浓度组(4 mg/L、6 mg/L、8 mg/L)24 h内 Mexel®432 对其几乎无影响,实验进行48 h时,12 mg/L 浓度组的死亡率>80%,实验进行96 h时,10 mg/L 浓度组的死亡率达80%以上,12 mg/L 浓度组的死亡率达100%,而对照组的幼鲍行动自如,未出现死亡。可能是由于 Mexel®432 破坏了皱纹盘鲍鳃部表面的细胞,抑制了鳃的呼吸,阻碍了气体交换和物质交换,从

而导致其因窒息或饥饿死亡。实验过程中,皱纹盘鲍无选择性地摄入大量的实验溶液,使 Mexel®432 在其体内富集,短时间(24 h)胁迫下,皱纹盘鲍表现出行动迟缓,吸附力减弱等一系列应激反应,长时间(96 h)胁迫下,体内积累的药剂逐步增加,导致皱纹盘鲍出现大量的死亡现象。根据统计分析可知,不同浓度组与对照组相比, Mexel®432 对生物死亡率均具有显著差异($p<0.05$),3种生物的死亡率随胁迫浓度的增加而增加,也随胁迫时间的延长而增加。这与已报道的斑马贻贝(*Dreissena polymorpha*)研究结果一致,斑马贻贝在 Mexel®432 浓度为7 mg/L时持续胁迫22 h,死亡率可到100%,6 mg/L 浓度间歇性胁迫30 d,可杀死斑马贻贝全部个体,10 mg/L 浓度间接胁迫15 d,斑马贻贝死亡率达100%^[14],可见 Mexel®432 胁迫所引起的生物死亡率变化与胁迫浓度和胁迫时间具有一定的相关性。



注:小写字母表示相同浓度下不同时间段的死亡率差异($p<0.05$);大写字母表示相同时间下不同浓度的死亡率差异($p<0.05$)

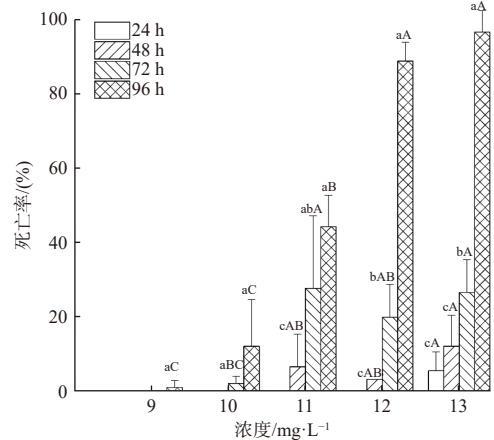
图1 不同浓度下 Mexel®432 对皱纹盘鲍的致死效应

Fig. 1 Lethal effects of Mexel®432 on *Haliotis discus hannai* at different concentrations

2.2.2 Mexel®432 对光棘球海胆的毒性效应

Mexel®432 对光棘球海胆的致死率如图2所示,对照组无死亡,9 mg/L、10 mg/L、11 mg/L、12 mg/L 四个浓度组24 h内均无死亡个体;所有浓度组72 h的光棘球海胆死亡率均低于30%;96 h时,12 mg/L、13 mg/L 实验组的死亡率达90%以上。由结果可知,随着胁迫时间的增加,

光棘球海胆的死亡数随浓度的增加而不断升高,与对照组存在明显差异($p<0.05$)。由表 2 可知, Mexel[®] 432 对光棘球海胆的 96 h LC_{50} 为 11.03 mg/L, SC 为 1.10 mg/L, 95% 置信区间为 10.88 ~ 11.18 mg/L。Mexel[®] 432 胁迫下对光棘球海胆的急性毒性具有时间-剂量效应关系。实验进行 48 h, 低浓度组(9 mg/L、10 mg/L、11 mg/L)死亡率 $<10\%$, 实验进行 96 h, 12 mg/L 浓度组光棘球海胆的死亡率达 90%, 13 mg/L 浓度组, 光棘球海胆的死亡率为 100%, 表现出随时间的延长和浓度的增加, 死亡率呈现升高的趋势。光棘球海胆在 Mexel[®] 432 胁迫 48 h 后, 吸附力下降, 对外界刺激反应迟缓, 体色加深; 死亡个体表现为棘刺剥落, 身体暗红, 围口膜处尤其明显。研究表明, 棘皮动物在外界污染物干扰下, 可进行非特异性免疫应答, 在体细胞免疫因子共同介导



注: 小写字母表示相同浓度下不同时间段的死亡率差异 ($p<0.05$); 大写字母表示相同时间下不同浓度的死亡率差异 ($p<0.05$)

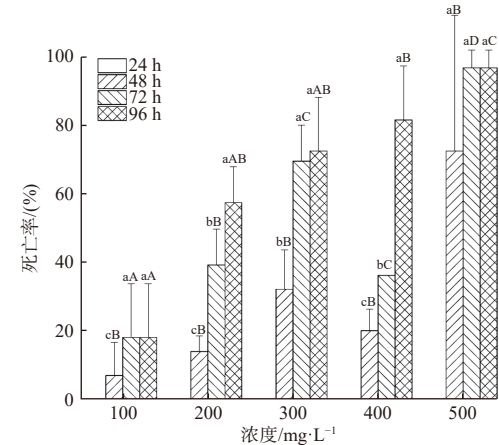
图 2 不同浓度下 Mexel[®] 432 对光棘球海胆的致死效应
Fig. 2 Lethal effects of Mexel[®] 432 on *Mesocentrotus nudus* at different concentrations

表 2 Mexel [®] 432 对 3 种生物的急性毒性及安全浓度				
Tab.2 Acute toxicity and safety concentrations of Mexel [®] 432 to three species of organisms				
物种	时间/h	96 h LC_{50} / mg·L ⁻¹	95%置信区间/ mg·L ⁻¹	SC / mg·L ⁻¹
皱纹盘鲍	96	8.00	7.19 ~ 8.83	0.80
光棘球海胆	96	11.0	10.88 ~ 11.18	1.10
日本蟳	96	186	165.63 ~ 205	18.6

下, 直接作用于受感染细胞^[15], 组织受损时, 该部位会发生浸润现象^[16]。本实验过程中, Mexel[®] 432 通过海胆摄食进入体内, 引发机体发生非特异性免疫应答, 产生红色细胞堆积于受损组织, 从而导致受感染部位变成暗红色。另外, 实验中发现 Mexel[®] 432 在水体表面可产生较丰富的泡沫, 这种现象可能干扰了水体与氧气的交换, 造成溶氧下降, 从而可能导致光棘球海胆因为缺氧而引起部分生理结构的毒性损害。

2.2.3 Mexel[®] 432 对日本蟳的毒性效应

Mexel[®] 432 对日本蟳胁迫 96 h 后的死亡情况如图 3 所示。可知实验过程对照组无死亡出现, 24 h 内所有浓度组日本蟳均未出现死亡; 48 h, 300 mg/L、400 mg/L、500 mg/L 浓度组出现较高死亡; 200 mg/L、300 mg/L、400 mg/L、500 mg/L 高浓度组在 96 h 内死亡率达 50% 以上, 与对照组存在明显差异。Mexel[®] 432 浓度越高死亡率越高, 随着实验时间延长, 死亡率呈现升高的趋势。由表 2 可知, Mexel[®] 432 对日本蟳的 96 h LC_{50} 为 186 mg/L, SC 为 18.6 mg/L。一般来说, 当甲壳动物处于低氧或缺氧条件时, 可以通过减少能量的消耗来维持机体的正常代谢, 即使受到胁迫因子的刺激, 甲壳动物仍能保持机体内环境的稳定^[17]。在本实验 72 h, Mexel[®] 432 浓



注: 小写字母表示相同浓度下不同时间段的死亡率差异 ($p<0.05$); 大写字母表示相同时间下不同浓度的死亡率差异 ($p<0.05$)

图 3 不同浓度下 Mexel[®] 432 对日本蟳的致死效应
Fig. 3 Lethal effects of Mexel[®] 432 on *Charybdis japonica* at different concentrations

度达 100 mg/L 时,日本蟳死亡率不到 20%,在低浓度 Mexel®432 胁迫下,短时间内日本蟳可以通过自身的机体调节维持稳定,如通过鳃的滤水量提高携氧率^[18],所以短时间内并不会产生明显毒性致死反应。目前认为较高浓度的 Mexel®432,可能对水生生物体内组织结构造成损伤,影响抗氧化能力,引起机体死亡^[19]。实验进行到 96 h 时,浓度为 200 mg/L 实验组,日本蟳的死亡率为 50%,且随着浓度的增加,死亡率逐渐增加;实验表明, Mexel®432 在日本蟳鳃表面形成的薄膜影响鳃组织的气体交换,导致部分日本蟳自身的供氧不足。同时,在高浓度 Mexel®432 的胁迫下,日本蟳鳃组织也可能受到生物膜的干扰导致携氧率降低,影响其正常的呼吸代谢,从而导致日本蟳死亡率增加。

2.3 Mexel®432 对 3 种生物的毒性分级评价

根据 GESAMP^[12] 对水生生物急性毒性分级标准, Mexel®432 对 3 种海洋生物毒性单位分级评价结果如表 3 所示, Mexel®432 对 3 种生物的毒性由强到弱为皱纹盘鲍>光棘球海胆>日本蟳,其中,日本蟳幼蟳对 Mexel®432 的敏感性不高,毒性属于“实际无毒”等级。

表 3 Mexel®432 对水生生物的毒性单位分级评价结果

Tab.3 Toxicity unit classification system assessment results of Mexel®432

生物种类	毒性等级	毒性
皱纹盘鲍	3	中毒
光棘球海胆	2	低毒
日本蟳	1	实际无毒

2.4 Mexel®432 对不同生物的毒性差异

LC_{50} 值是用于评价生物对污染物的敏感性以及污染物毒性大小的重要依据。本研究中,表 2 表明 3 种生物对 Mexel®432 的毒性敏感性由强到弱依次为皱纹盘鲍>光棘球海胆>日本蟳。按照毒性单位分级评价标准, Mexel®432 对皱纹盘鲍、光棘球海胆和日本蟳的毒性分别为中毒、低毒和实际无毒,这可能与生物的不同生态习性、个体大小以及生理结构有关。皱纹盘鲍属底栖植食性动物,依靠齿舌刮取食物^[20],同时摄入大量海水,能直接接触污染物,虽有坚硬

的外壳以及闭合闭壳肌等方式减少与 Mexel®432 的接触,但皱纹盘鲍的腹足完全裸露在外与实验溶液直接接触,持续的暴露胁迫对其产生了较强的毒性。光棘球海胆是底栖群居性动物,具有避光性,喜欢夜间活动,利用管足和棘进行运动,行动迟缓^[21],即使受到污染物胁迫也不能快速移动,同时其管足、棘以及围口膜完全浸润在实验溶液中,长时间胁迫会产生毒性,对其生长发育造成影响。此外实验所采用的皱纹盘鲍和光棘球海胆相较于日本蟳具有更小的个体尺寸,代谢也更为活跃,对污染物的反应和富集能力更为明显^[20],因此毒性敏感性较日本蟳更强。日本蟳的摄食强度表现为夜强昼弱,其耐饥饿能力强,能在常温下坚持 50 天左右不进食^[22]。推测本实验中日本蟳在 Mexel®432 胁迫下,自我保护而不进食或少进食,既能维持生命活力,也能减少污染物进入体内降低机体损伤。

通过与 Mexel®432 对其他水生生物毒性效应的研究结果比较,当 Mexel®432 浓度在 2 mg/L 以下时,虽不能导致地中海贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)死亡,但会损害其鳃部组织,同时引起体内氧化酶活性发生显著变化^[19];当 Mexel®432 的浓度为 20 mg/L 时,菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)的鳃部细胞活力降低,并对其鳃部细胞系的影响呈剂量依赖性增加^[4],贝类作为一种生物标志物,具有很好的指示作用。Mexel®432 对不同种类水生生物的毒性有很大差异,甚至对同一种类的毒性亦有所不同。例如,对微小亚历山大藻(*Alexandrium minutum*)、绿藻(*Tetraselmis suecica*)、球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)和杜氏盐藻(*Dunaliella salina*)等藻类 96 h LC_{50} 分别为: 43.3 μ g/L、10.1 mg/L、4.55 mg/L 和 7.21 mg/L^[23-24],这种差异性的原因可能与藻类的形态结构有关,如细胞壁及胞外胶被等^[25]。与藻类相比,鱼类对 Mexel®432 更敏感,如鲤鱼(*Cyprinus carpio*)、鲮鱼(*Pimephales promelas*)仔鱼、鳎(*Pleuronectes platessa*)的稚鱼和大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)的 96 h LC_{50} 分别为 0.73 mg/L、0.28 mg/L、0.83 mg/L 和 3.70 mg/L^[7,23]。本实验中 3 种生物的半致死浓度均高于上述鱼

类和绝大部分藻类,一方面可能与实验生物个体差异及种类有关,另一方面实验条件的不同也可能导致毒性数据的不一致。

3 结论

(1) 3种生物对 Mexel[®]432 的敏感性依次为皱纹盘鲍>光棘球海胆>日本蟳;其 96 h LC_{50} 分别为 8.00 mg/L、11.0 mg/L、186 mg/L; SC 分别为 0.80 mg/L、1.10 mg/L、18.6 mg/L。

(2) 当 Mexel[®]432 胁迫时间由 24 h 延长至 96 h 时,随着浓度的增加, Mexel[®]432 对皱纹盘鲍、光棘球海胆、日本蟳毒性效应明显增强,死亡率不断上升,呈现显著的时间-效应和剂量-效应。

参考文献:

- [1] 张树龙, 陆程, 李京, 等. 海水直流冷却水系统海生物防治技术研究[J]. 给水排水, 2020, 56(S1): 142-145.
- [2] 许力, 董文魁, 仲金魁, 等. 环保型杀生剂 THPS 在水处理中的应用[J]. 甘肃科技, 2004, 20(7): 54-55.
- [3] 钟云泰. 海水循环冷却系统海生物污染的控制[J]. 华东电力, 2004, 32(8): 30-33.
- [4] DOMART-COULON I, AUZOUX-BORDENAVE S, DOUMENC D, et al. Cytotoxicity assessment of antibiofouling compounds and by-products in marine bivalve cell cultures[J]. Toxicology in Vitro, 2000, 14(3): 245-251.
- [5] SPRECHER S L, GETSINGER K D. Zebra mussel chemical control guide[R]. Washington: Environmental Laboratory, U. S. Army Engineer Research and Development Center, 2000: 87-92.
- [6] AREHMOUCH L, TFIBEL V, CHAILLOU C, et al. Lethal effects of Mexel[®] 432 to common carp embryolarval stages in river water: influence of physicochemical parameters in synthetic ISO water[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1998, 17(9): 1767-1776.
- [7] AREHMOUCH L, GHILLEBAERT F, CHAILLOU C. Lethal effects of Mexel 432, an antifouling agent, on embryolarval development of common carp (*Cyprinus carpio* L.)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1999, 42(2): 110-118.
- [8] 刘璐璐. 皱纹盘鲍性腺核苷化学成分及护肝活性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [9] 陈锤. 紫海胆的生物学与养殖[J]. 海洋与渔业, 2007 (7): 32.
- [10] 丁金强. 日本蟳不同地理群体形态与生化特征的分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- [11] 夏重大, 王媛, 柴晓杰, 等. 三苯基锡和三丁基锡对海胆的急性毒性研究[J]. 河北渔业, 2014 (6): 6-9.
- [12] EMBANKMENT A. Revised GESAMP hazard evaluation procedure for chemical substances carried by ships[M]. 2nd ed. London: International Maritime Organization, 2013: 21-61.
- [13] STERZEL W. Toxicology of surfactants used in cosmetics[M]//RIEGER M M, RHEIN L D. Surfactants in Cosmetics. 2nd ed. New York: Routledge, 1997: 557-571.
- [14] GIAMBERINI L, CZEMBOR N, PIHAN J C. Effects of MEXEL 432 on the settling, detachment and mortality of adult zebra mussels[C]//Proceedings of the Fourth International Zebra Mussel Conference. Madison: University of Wisconsin Sea Grant Institute, 1994: 73-81.
- [15] WIBE A E, NORDTUG T, JENSSEN B M. Effects of bis(Tributyltin)oxide on antipredator behavior in threespine stickleback *Gasterosteus aculeatus* L[J]. Chemosphere, 2001, 44(3): 475-481.
- [16] RAFTOS D A, ROBBINS J, NEWTON R A, et al. A complement component C3a-like peptide stimulates chemotaxis by hemocytes from an invertebrate chordate—the tunicate, *Pyura stolonifera*[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2003, 134(2): 377-386.
- [17] LE MOUILLAC G, HAFFNER P. Environmental factors affecting immune responses in Crustacea[J]. Aquaculture, 2000, 191(1/2/3): 121-131.
- [18] ERIKSSON S P, BADEN S P. Behaviour and tolerance to hypoxia in juvenile Norway lobster (*Nephrops norvegicus*) of different ages[J]. Marine Biology, 1997, 128(1): 49-54.
- [19] LÓPEZ-GALINDO C, VARGAS-CHACOFF L, NEBOTE, et al. Sublethal responses of the common mussel (*Mytilus galloprovincialis*) exposed to sodium hypochlorite and Mexel[®] 432 used as antifoulants[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010, 73(5): 825-834.
- [20] 张柏豪, 方舟, 陈新军, 等. 海洋无脊椎动物重金属富集研究进展[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(4): 107-118.
- [21] 张凤瀛, 吴宝铃, 廖玉麟. 中国的海胆[J]. 生物学通报, 1957 (7): 18-25.
- [22] 王春琳, 薛良义, 刘凤燕, 等. 日本蟳实验生态及摄食习性的初步研究[J]. 齐鲁渔业, 1998, 15(3): 18-20.
- [23] LA CARBONA S, VIITASALO-FRÖSEN S, MASSON D, et al. Efficacy and environmental acceptability of two ballast water treatment chemicals and an alkylamine based-biocide[J]. Science of the Total Environment, 2010, 409(2): 247-255.
- [24] LÓPEZ-GALINDO C, GARRIDO M C, CASANUEVA J F, et al. Degradation models and ecotoxicity in marine waters of two antifouling compounds: sodium hypochlorite and an alkylamine surfactant[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(8): 1779-1785.
- [25] LEUNG A O W, LUKSEMBURG W J, WONG A S, et al. Spatial distribution of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in soil and combusted residue at Guiyu, an electronic waste recycling site in southeast China[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(8): 2730-2737.