

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来  
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期  
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立40周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战 ..... 王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙(4801)

河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险 ..... 王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅(4810)

海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展 ..... 袁东星, 黄勇明, 王婷(4822)

环境水体中硫化物的分析方法:从实验室分析到原位监测 ..... 李鹏, 林坤德, 袁东星(4835)

环境水体中无机砷现场分析方法研究进展 ..... 薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑(4845)

海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望:厦门大学痕量元素平台建设进展 ..... 黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华(4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展 ..... 骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠(4869)

水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制 ..... 王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮(4876)

中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物 ..... 史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林(4888)

中国油气系统甲烷逸散排放估算 ..... 陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍(4905)

2015~2020年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征 ..... 李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖(4914)

九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征 ..... 程宏, 陈荣(4924)

厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征 ..... 姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红(4931)

九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制 ..... 戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪(4939)

福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制 ..... 杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪(4950)

厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制 ..... 潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红(4961)

改性生物炭固定床对模拟湖水体中  $Mn^{2+}$  的吸附 ..... 赵浩, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟(4971)

基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测 ..... 徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤(4982)

紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯 ..... 徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 谯扬(4992)

研究报告

2019年秋季海南省4次臭氧污染过程特征及潜在源区分析 ..... 符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅(5000)

伊犁河谷夏季  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  中水溶性无机离子浓度特征和形成机制 ..... 陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文(5009)

城区与郊区  $PM_{2.5}$  污染及传输特征差异性 ..... 齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超(5018)

南京北郊 BTEX 特征及健康风险评估 ..... 冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀(5030)

我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估 ..... 孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱弈, 马长文, 叶建锋(5040)

东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析 ..... 陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕(5053)

长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析 ..... 刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇(5064)

青藏高原湖泊水环境特征及水质评价 ..... 刘智琦, 潘保柱, 韩语, 李刚, 王韬轶(5073)

基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水地球化学特征及控制因素 ..... 查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿(5084)

丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系 ..... 贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男(5096)

镉沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能 ..... 王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科(5106)

基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群 ..... 章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇, 厉巍(5115)

寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析 ..... 杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广(5123)

中国旱作农田一氧化氮排放及减排:Meta 分析 ..... 田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾江新(5131)

硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响:Meta 分析 ..... 刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠(5140)

不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤  $CH_4$  和  $N_2O$  排放的影响 ..... 邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 缙广林(5149)

不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及  $NO$  和  $N_2O$  排放的影响 ..... 唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊(5159)

基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征 ..... 刘孝平, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标(5169)

基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析 ..... 高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫(5180)

基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析 ..... 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋(5192)

老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中  $Cd^{2+}$  的影响 ..... 王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏(5205)

磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响 ..... 芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球(5214)

牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响 ..... 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高(5224)

磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和镉累积的影响 ..... 帅祖革, 刘汉斌, 崔浩, 魏世强(5234)

重庆开州区菜地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估 ..... 方林发, 叶莘莘, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然(5244)

基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应 ..... 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文(5253)

黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征 ..... 许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉(5263)

土壤多功能性对微生物多样性降低的响应 ..... 陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟(5274)

氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响 ..... 苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方(5286)

碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比 ..... 李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣(5294)

中国能源消费碳排放的空间化与时空动态 ..... 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 顾斌斌, 杜海波(5305)

京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的  $CO_2$  协同减排效益评估 ..... 杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束榭(5315)

我国塑料污染防治政策分析与建议 ..... 李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会(5326)

《环境科学》征订启事(4821) 《环境科学》征稿简则(5213) 信息(5052, 5191, 5273)

# 中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物

史天一<sup>1</sup>, 洪海征<sup>1,2\*</sup>, 王明华<sup>1</sup>, 谭巧国<sup>1,2</sup>, 史大林<sup>1,2</sup>

(1. 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102; 2. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361102)

**摘要:** 自20世纪70年代末, 中国海洋生态毒理学萌芽发展, 基于生态毒理学的剂量-反应原理开始利用海洋生物开展污染物毒性测试, 以评估污染物对于海洋生物及海洋生态系统的影响。21世纪以来, 应用于毒性测试的海洋生物物种变得更为广泛且多样, 常用的海洋生物包括海洋藻类、原生动物、轮虫动物、环节动物、软体动物、棘皮动物、节肢动物、头索动物和海洋鱼类等。这些受试生物已用在多种海洋污染物的毒理学研究上, 为海洋污染物的生态风险评估及海水水质基准的制定提供科学基础。浅述近年来中国海洋生态毒理学研究中毒性测试生物的应用情况, 特别对其中常用的6种(类)海洋模式生物, 包括中肋骨条藻、扇形游仆虫、牡蛎(多种)、海胆(多种)、日本虎斑猛水蚤和海洋青鳞鱼在毒性测试上的应用展开较为具体的介绍。

**关键词:** 海洋生态毒理; 毒性测试; 受试生物; 海洋模式生物; 海洋生态系统

**中图分类号:** X171.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)11-4888-17 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202205350

## Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China

SHI Tian-yi<sup>1</sup>, HONG Hai-zheng<sup>1,2\*</sup>, WANG Ming-hua<sup>1</sup>, TAN Qiao-guo<sup>1,2</sup>, SHI Da-lin<sup>1,2</sup>

(1. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**Abstract:** Since the late 1970s, marine ecotoxicology began to sprout and develop in China. Based on the principles of dose-response relationships, some marine organisms are used in toxicity tests to evaluate the impact of marine pollutants on marine organisms and marine ecosystems. At the early stage, marine ecotoxicological research mainly focused on the bioaccumulation, biomagnification, and biodegradation of traditional pollutants such as heavy metals, radioactive elements, organotin, petroleum hydrocarbons, and pesticides, as well as their toxic effects on survival, growth, and other physiological indicators. With the development of Chinese industry, marine pollution has become increasingly serious. In addition to the traditional marine pollutants, toxicological research has been conducted on emerging pollutants with potential risks to marine ecosystems, such as POPs, emerging organic pollutants, nanomaterials, and microplastics. Moreover, the species of marine organisms used in toxicity testing have become more diverse. The selection of testing organisms is essential for evaluating toxicity correctly. The toxicity tests should be conducted on a variety of organisms from different trophic levels to ensure the comprehensive understanding of the impact of pollutants on marine ecosystems. The major types of marine organisms used in the toxicity testing include marine alga, protozoa, rotifera, annelida, mollusc, echinoderma, arthropoda, cephalopoda, and marine fish, which have been used in the toxicological studies of various marine pollutants. The outcome results can serve as the scientific basis for the ecological risk assessment of marine pollutants and the establishment of seawater quality criteria. It should be noted that the sensitivity of different testing organisms to different types of pollutants is quite diverse. Therefore, in addition to conducting a battery of tests on a variety of species which play important roles in marine ecosystems, elucidating the toxic mechanisms in different species is also important for marine ecotoxicological studies. The application of the above-mentioned organisms in marine ecotoxicology research in recent years is briefly reviewed here. Particularly, the six commonly used marine model species (*Skeletonema costatum*, *Euplotes vannus*, oysters, sea urchins, *Tigriopus japonicus*, and *Oryzias melastigma*) used in toxicity testing are introduced in detail.

**Key words:** marine ecotoxicology; toxicity test; toxicity testing organisms; marine model species; marine ecosystem

海洋面积占全球面积的71%, 存储巨大的资源和能量, 为海洋生物提供了巨大的生存空间。海洋生态系统包含复杂的能量流动和环境变化过程, 因此, 海洋生态环境对人类生存发展有着至关重要的影响, 并且对全球气候变化起着关键的调控作用。随着人们对于海洋生态保护意识的增强, 我国开展了大量的海洋生态毒理学研究, 基于剂量-反应关系原理开展了多种毒性测试, 评估海洋污染物对于海洋生物和海洋生态系统的影响。本文就中国海洋生态毒理学近年来常用的毒性测试生物及其应用情况进行综述。

### 1 海洋生态毒理学概述

海洋生态毒理学是研究海洋环境污染物特别是化学污染物对海洋生态系统危害的规律及其防护的

学科<sup>[1]</sup>, 其研究内容包括环境污染物对海洋生态系统中生物和非生物因素的影响, 及对生态系统物质流、能量流和信息流的毒性效应, 并综合评估其生态风险, 为制定海洋环境保护相关政策和污染防治措施提供科学依据<sup>[1]</sup>。海洋生态毒理学基于生态毒理学研究原理和研究方法, 通过对海洋生态系统及生物体在群落、种群、个体、细胞、基因和蛋白等不同水平进行一系列的污染物毒性测试, 获得剂量-反应关系, 并将结果外推至其他物种, 就污染物对海洋生态系统的影响进行风险评价<sup>[2]</sup>。在毒性测试中, 根据受试生物接触的污染物的剂量次数和暴露

收稿日期: 2022-05-31; 修订日期: 2022-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41676094, 42076149)

作者简介: 史天一(1995~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境毒理学, E-mail: 572873438@qq.com

\* 通信作者, E-mail: honghz@xmu.edu.cn

时间,可分为急性、亚急性、亚慢性和慢性毒性试验. 毒性测试的终点(endpoint)包括致死、抑制活动、抑制生长、胚胎毒性、发育毒性、繁殖毒性、遗传毒性、神经毒性、行为习性的改变、种群密度和结构的改变、群落结构和物种多样性的改变、群落演替的改变等. 此外,还可以在毒性测试中探究污染物的毒代动力学、致毒机制、有害结局路径(adverse outcome pathway)、两种或多种污染物或环境因子的联合效应等<sup>[3]</sup>.

## 2 中国海洋生态毒理学的发展

自1970年代末,海洋生态毒理学在中国逐步发展. 进入21世纪之前,我国海洋生态毒理研究主要集中于多种重金属(如汞、镉、铜、铅、铬等)、放射性元素、有机锡、石油烃和农药等传统污染物的生物累积、生物放大和生物降解等过程,以及对海洋生物光合作用、存活、生长、摄食、呼吸、行为、发育和繁殖等方面的毒性效应<sup>[4,5]</sup>. 随着中国工业不断发展进步,海洋环境污染问题逐渐加剧,关于海洋生态毒理学的研究也随之深入,其定义、研究目标及研究意义变得更为具体,研究范围更为宽广. 研究的污染物类型除传统海洋污染物外,持久性有机污染物、新型有机污染物、纳米材料和微塑料等对海洋生态系统存在潜在风险的污染物成为研究的主要对象. 同时,研究方向往宏观和微观两方面深入拓展,在宏观方面由个体水平拓展至生物种群、群落乃至生态系统;微观方面则深入探讨污染物的对海洋生物的致毒机制,例如利用新的分子生物学手段和多组学技术(基因组学、转录组学、蛋白质组学和代谢组学)研究污染物对海洋生物生理功能、细胞代谢途径、基因转录和蛋白表达等方面的改变.

在受试生物的选择上,早期研究体系中没有明显区分淡水和海水生物,例如曾选用非洲鲫鱼、白鲢和鲤鱼等常见淡水鱼类开展海洋污染物的毒性测试<sup>[5,6]</sup>. 随着海洋生态毒理学的不断发展,人们逐渐意识到海水环境与淡水环境中的盐度、密度、pH值、溶解氧和离子浓度等理化参数存在明显差异,这些差异会直接或间接地影响污染物的迁移和转化,并且海水生物与淡水生物的生理特征也不尽相同,这些导致了海水生物与淡水生物对于污染物的毒性响应存在差异<sup>[7]</sup>. 因此,在测试物种的选择上开始注意区分淡水种和海水种,海洋藻类、海洋原生动物、海洋软体动物、海洋节肢动物、海洋鱼类等物种逐渐被广泛应用于毒性测试试验中. 随着研究的不断进展,海洋生态毒理研究中受试生物的种类更为丰富,信息更加全面,认知更加深入,有利于

更为全面地探究海洋生态环境变化对海洋生态系统的影响<sup>[8]</sup>.

## 3 中国海洋生态毒理学研究中常用的毒性测试生物

在海洋生态毒理学研究中,受试生物的选择对于正确评价毒性至关重要,污染物的毒性评价需要从不同的营养级水平,即初级生产者、初级消费者和捕食者中选择合适的生物进行研究,以确保对生态风险评价的全面性<sup>[9]</sup>.

1983年,吴玉霖等<sup>[10]</sup>建议将毛蚶作为中国重金属污染检测的一种有效的指示生物. 1997年,周名江等<sup>[5]</sup>提出将黑褐新糠虾作为中国海洋生态毒理试验的标准生物之一. 21世纪以前,海洋生态毒理受试生物种类尚有局限,此后,多类海洋生物物种被广泛应用于海洋生态毒理学研究之中. 开展了急性和慢性暴露(包括单世代和多世代)下的胚胎毒性、发育毒性、神经毒性、双或多因素联合毒性等多种类型的毒理研究,并且结合分子和组学技术探究污染物的致毒和解毒机制,建立并运用毒代动力学模型监测并预测污染物的生物累积.

目前,我国海洋生态毒理研究中的受试生物已涉及海洋藻类、原生动物、轮虫动物、环节动物、软体动物、棘皮动物、节肢动物、头索动物(文昌鱼)和海洋鱼类等九大门类(表1).

不同种类的受试生物对不同类型污染物的毒性敏感性存在差异. 例如传统海洋污染物重金属已在多种海洋生物上开展毒性测试. 已有研究表明日本虎斑猛水蚤、海胆和海洋青鲱鱼等受试生物对汞、镉等重金属的敏感性比扇形游仆虫和牡蛎高. 其中,日本虎斑猛水蚤、海胆和海洋青鲱鱼的胚胎发育期对重金属的毒性尤为敏感<sup>[35,47,67-71]</sup>. 在对石油烃类物质和燃油分散液毒性测试中,通过比较抑制中肋骨条藻生长的 $IC_{50}$ (concentration for 50% inhibition),抑制海胆胚胎发育的 $EC_{50}$ (concentration for 50% maximal effect)和海洋青鲱鱼胚胎的 $LC_{50}$ (concentration for 50% lethality),发现3个物种间的毒性敏感性大小顺序为:海洋青鲱鱼>海胆>中肋骨条藻<sup>[72-74]</sup>. 而中肋骨条藻对传统海洋污染物三苯基锡(triphenyltin, TPT)较海胆和日本虎斑猛水蚤更为敏感,TPT抑制中肋骨条藻生长的 $IC_{50}$ 为 $0.56 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而在海胆和日本虎斑猛水蚤中的 $LC_{50}$ 则高了一个数量级. 对持久性有机污染物——溴代阻燃剂六溴环十二烷(hexabromocyclododecane, HBCD)进行毒性测试发现,HBCDs暴露日本虎斑猛水蚤和

表 1 中国海洋生态毒理学研究中的受试生物

Table 1 Toxicity testing organisms applied in marine ecotoxicological studies in China

分类	海洋生物物种	文献
海洋藻类	海水小球藻、中肋骨条藻、三角褐指藻、新月菱形藻、球等边金藻、微型原甲藻、伪矮海链藻、威氏海链藻、杜氏盐藻、绿色巴夫藻、牟氏角毛藻和赤潮异弯藻	[11~16]
原生动物	扇形游仆虫	[17]
轮虫动物	褶皱臂尾轮虫	[18,19]
环节动物	小头虫、双齿围沙蚕、可口革囊星虫和裸体方格星虫	[20~23]
软体动物	太平洋牡蛎、褶牡蛎、近江牡蛎、沿海牡蛎、葡萄牙牡蛎、香港牡蛎、九孔螺、蚶岩螺、方斑东风螺、波部东风螺、栉孔扇贝、海湾扇贝、马氏珠母贝、翡翠贻贝、绿唇贻贝、紫贻贝、毛蚶、菲律宾蛤仔、黑莽麦蛤和光滑河兰蛤	[24~43]
棘皮动物	马粪海胆、虾夷马粪海胆、黄海胆、光棘球海胆和中间球海胆	[44~49]
节肢动物	日本虎斑猛水蚤、安氏伪镖水蚤、蒙古裸腹蚤、火腿许水蚤、近亲真宽水蚤、红纺锤水蚤、黑褐新糠虾、东方新糠虾、日本新糠虾和卤虫	[15,30,50~57]
头索动物	白氏文昌鱼	[58~60]
海洋鱼类	海洋青鳉鱼、大弹涂鱼、黑鲷、尾紫红笛鲷、赤鲷、褐菖鲈、褐牙鲷和大黄鱼	[14,15,61~66]

海洋青鳉鱼均诱导氧化胁迫,影响发育,两个物种对 HBCDs 的敏感性相似<sup>[50,61]</sup>。近年来,纳米材料的毒性主要在中肋骨条藻、日本虎斑猛水蚤和扇形游仆虫等受试生物上进行测试,这几种受试生物对纳米材料的毒性敏感性相当。例如,在纳米氧化锌 (nano-ZnO, nZnO) 暴露下,中肋骨条藻的  $IC_{50}$  为  $3.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[75]</sup>,而对日本虎斑猛水蚤的  $LC_{50}$  为  $2.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[76]</sup>; 银纳米颗粒 (silver nanoparticles, AgNPs) 抑制中肋骨条藻生长的  $IC_{50}$  为  $25.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[77]</sup>,而对扇形游仆虫的  $LC_{50}$  为  $30.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[77]</sup>。此外,AgNPs 等纳米材料在几种受试生物中的致毒机制比较相似,大多通过诱导氧化胁迫,或抑制生长,或破坏细胞微结构,或导致死亡。

因此,不同受试生物对不同类型的污染物的毒性敏感性存在较大的差异,而物种的敏感性是影响毒性评价的重要因素。为了更全面认知海洋污染物对海洋生态系统的影响,需要对海洋生态系统中具有重要功能的多种受试生物进行全面的毒性测试,同时深入探究致毒机制,才能对海洋污染物的生态风险进行科学的评估。下文将对几种常用的海洋受试生物的应用情况进行介绍,并对其中 6 种 (类) 海洋模式受试生物的主要毒性数据进行总结。

### 3.1 海洋藻类

浮游植物是海洋生态系统的重要组成部分,是初级生产者,光合作用是藻类最重要的生理功能之一。当污染物进入水体后,海洋污染物常常会干扰海洋浮游植物的光合和呼吸。同时,作为海洋初级生产者,污染物会通过海洋藻类沿食物链进入海洋生态系统,而不断发生生物富集和生物放大,影响食物链中的物质传递。因此,利用海洋藻类开展海洋生态毒理学研究具有重要意义。我国海洋生态毒理学发展之初,就广泛利用海洋藻类开展毒性测试。

中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 隶属于硅藻门 (Bacillariophyta) 中心硅藻纲 (Centricae) 圆筛藻目 (Concinodiscales) 骨条藻科 (Skeletonemaceae), 属温带和热带海洋硅藻类,是常见的浮游植物种类,可适应广温广盐的环境。中肋骨条藻分布极广,从北极到赤道、从外海高盐度到沿海低盐度水团均有分布,在我国各海区均有出现。由于其作为海洋微藻对外界胁迫因素较为敏感,且世代周期短,对环境变化响应迅速,在海洋生态毒理学研究中应用广泛。

当前,国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 已公布了中肋骨条藻作为国际通用种的标准测试方法 (ISO 10253:2016),用于测定水环境介质对海洋藻类的生长抑制情况。我国现有毒性测试研究中,多开展急性毒性及联合毒性测试,通过测定中肋骨条藻在海洋污染物暴露胁迫下的生长速率、生长曲线、叶绿素含量、光合作用参数、光合和呼吸速率来评估污染物的毒性效应 (表 2)。近年随着纳米材料和技术的发展,纳米颗粒物不断被排放,进入到海洋环境中,可能对海洋藻类产生毒性。利用中肋骨条藻对纳米颗粒物进行急性毒性测试,发现 AgNPs 会诱导细胞内产生过多的活性氧化物,降低细胞活力,并且通过电镜扫描观察,发现 AgNPs 会通过粘附在中肋骨条藻表面从而阻碍藻类的光吸收,抑制其光合效率<sup>[77]</sup>。nZnO 暴露下,中肋骨条藻细胞内锌的积累与生长抑制率具有良好线性关系,且 nZnO 的毒性要大于普通块状 ZnO<sup>[75]</sup>。此外,当纳米颗粒物与海洋中其他污染物共存时,也可能产生联合毒性效应。例如,利用纳米二氧化硅 (nano-SiO<sub>2</sub>, nSiO<sub>2</sub>) 和汞对中肋骨条藻进行联合毒性测试,发现 nSiO<sub>2</sub> 本身对中肋骨条藻没有产生生长抑制作用,但能够明

显增强汞的毒性效应,推测是由于  $n\text{SiO}_2$  具有极强的吸附能力,吸附了汞离子的  $n\text{SiO}_2$  在藻类体内不断累积,从而产生了协同毒性效应<sup>[78]</sup>。除了纳米颗

粒,近年来中肋骨条藻也被用来测试海洋微塑料的毒性,不同粒径大小和不同材料的微塑料对藻类生长的抑制作用存在差异<sup>[79,80]</sup>。

表 2 中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 在中国海洋生态毒理学研究中的应用

Table 2 Application of *Skeletonema costatum* in marine ecotoxicological studies in China

研究类型	污染物名称	毒性效应及致毒机制	文献
急性毒性	四溴联苯醚(BDE-47)	$\text{IC}_{50}(96\text{ h}) = 293.0\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 主要致毒机制为诱导氧化胁迫,抑制光合参数,进而抑制生长	[81]
急性毒性	1-辛基-3-甲基咪唑溴([C8mim]Br)	$\text{IC}_{50}(96\text{ h}) = 39.9\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 主要致毒机制为诱导氧化胁迫,抑制光合参数,进而抑制生长	[82]
急性毒性	原油、燃料油分散液和添加溢油分散剂后的乳化液(WAF)	燃料油 WAF、燃料油 DWAF、原油 WAF 和原油 DWAF 的 $\text{IC}_{50}(96\text{ h})$ 分别为 10.9、0.5、3.0 和 7.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	[73]
急性毒性	纳米氧化锌( $n\text{ZnO}$ )	$\text{IC}_{50}(96\text{ h}) = 3.6\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 主要致毒机制为增加细胞内的总锌含量,进而抑制生长	[75]
急性毒性	银纳米颗粒(AgNPs)	$\text{IC}_{50}(24\text{ h}) = 25.8\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 主要致毒机制为诱导氧化胁迫,抑制光合系统光化学转化效率和光合蛋白表达	[77]
急性毒性	纳米二氧化钛( $n\text{TiO}_2$ )	$\text{IC}_{50}(96\text{ h}) = 50.0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 主要致毒机制为抑制光合系统功能	[83]
急性毒性	微塑料(mPVC)和塑料碎片(bPVC)	主要致毒机制为抑制生长及光合作用,且微塑料的毒性与粒径大小相关;mPVC( $1\ \mu\text{m}$ )具有生长抑制毒性;50.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 暴露 96 h 后的抑制率为 39.7%,叶绿素含量及光合效率显著降低	[80]
急性毒性和协同毒性	UVR 和 $\text{Cu}^{2+}$	UVR 和 $\text{Cu}^{2+}$ 协同暴露降低光合作用	[84]
急性毒性和联合毒性	UV 和 PAH(萘、菲、蒽、荧蒽、芘)	萘、菲、蒽、荧蒽和芘的 $\text{IC}_{50}(72\text{ h})$ 分别为 $(489.0 \pm 6.5)$ 、 $(47.0 \pm 5.5)$ 、 $(39.0 \pm 2.4)$ 、 $(18.0 \pm 2.9)$ 和 $(24.0 \pm 2.0)\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; UV 照射增强多环芳烃的毒性	[13]
急性毒性和联合毒性	纳米铜( $n\text{Cu}$ )和碳纳米管(CNTs)	CNTs 的毒性低于 $n\text{Cu}$ ; CNTs 可以通过吸附铜离子并与其发生聚集,而降低 nano-Cu 对中肋骨条藻的生长和光合作用的胁迫毒性	[85]
急性毒性和联合毒性	纳米二氧化硅( $n\text{SiO}_2$ )和 $\text{Hg}^{2+}$	$\text{IC}_{50}(72\text{ h}) = 36.8\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; $n\text{SiO}_2$ 本身没有对中肋骨条藻产生生长抑制作用,但能够明显增强 $\text{Hg}^{2+}$ 对中肋骨条藻的毒性	[78]
急性毒性和联合毒性	聚苯乙烯(PS)和三苯基锡(TPT)	20.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 0.1 $\mu\text{m}$ 和 5.0 $\mu\text{m}$ PS 存在下,TPT 的 $\text{IC}_{50}$ 值分别从 0.6 增加到 0.9 和 0.7 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,PS 可降低 TPT 的毒性效应	[86]
急性毒性和联合毒性	三氯生(TCS)、聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)和 PVC800)	微塑料和 TCS 均有显著的生长抑制毒性;微塑料的抑制效应大小为:PVC800 > PVC > PS > PE; TCS 与微塑料的联合毒性强弱顺序为:PVC800 > PS > PVC > PE	[79]
急性毒性和联合毒性	海洋酸化和 $\text{Cd}^{2+}$	海洋酸化促进中肋骨条藻的生长,并显著减轻镉毒性	[87]
急性毒性和联合毒性	海洋酸化和苯并(a)芘(BaP)	高浓度 BaP ( $10.0\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 对中肋骨条藻的生长和光合作用有显著抑制效应,低浓度 ( $1.0\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.1\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 无效应;海洋酸化不影响 BaP 对中肋骨条藻的毒性	[88]

### 3.2 原生动物

原生动物是一类最原始、最低等和最简单的单细胞真核动物,种类繁多,分布广阔,数量庞大,是水生环境中最重要的生态类群之一,具有复杂的生物群落结构。原生动物作为自然界食物网中最底端的消费者,在物质循环和能量流动过程中起到重要作用<sup>[89]</sup>。与此同时,原生生物对栖息地的环境因素敏感度极高,在海洋环境中可以敏感地感知污染物的毒性,在生态环境监测中可作为指示生物,因此也被应用于各类毒性测试中<sup>[90]</sup>。

纤毛虫是原生动物中分布最广泛且物种多样性最高的一类,扇形游仆虫是一种进化地位较高等的海洋类纤毛虫,被称为最复杂的单细胞生物<sup>[91]</sup>。扇形游仆虫 (*Euplotes vannus*) 生活于海水环境中,隶属于原生动物界(Protista)纤毛门(Ciliophora)旋毛纲(Spirotrichea)游仆目(Hypotrichia)游仆科

(Euplotida)游仆虫属(*Euplotidae*)。扇形游仆虫个体小,在海洋环境中分布广泛;野外采样简单,实验室培养容易,且生长周期短,繁殖速度快;结构简单,其细胞膜直接与外界接触,细胞的反应能够及时反映环境变化扇形游仆虫属真核生物,较原核生物结构更为复杂,毒性测试结果可以类推至更多的海洋生物。此外,在部分极端环境下,也有原生动物存活,可以满足部分极端生态毒理研究的需求<sup>[92~95]</sup>,因此被推荐应用于海洋生态毒理测试研究中。

目前,我国多利用扇形游仆虫开展急性毒性测试,通过死亡率、生长曲线和生物量评估污染物毒性效应(表3)。例如,Ruan等<sup>[96]</sup>利用海水扇形游仆虫和淡水草履虫分别开展苯酚的急性毒性测试,对比两者的抗氧化酶活性和种群增长动态,发现两个物种在毒性作用下生理状态的时间序列存在差异,并结合毒代动力学模型预测苯酚的慢性

毒性效应剂量. 赵晓欢等<sup>[95]</sup>初步探究了纳米金属颗粒的细胞毒理学性征,对纳米铜(nano-Cu, nCu)和纳米氧化铜(nano-CuO, nCuO)暴露下的扇形游仆虫进行活体观察,发现暴露1h后扇形游

仆虫运动状态和形态发生不同程度的改变,处理3h后,细胞破裂,死亡,认为nCu和nCuO会破坏细胞结构,如线粒体、细胞核等,并通过引起细胞氧化应激反应导致致死效应.

表3 扇形游仆虫(*Euplotes vannus*)在中国海洋生态毒理学研究中的应用

Table 3 Application of *Euplotes vannus* in marine ecotoxicological studies in China

研究类型	污染物名称	毒性效应及致毒机制	文献
急性毒性	氨	LC <sub>50</sub> (2 h) = 7 870.5 mg·L <sup>-1</sup>	[97]
急性毒性	呋喃西林	主要致毒机制为降低存活率,诱导氧化应激酶基因表达或者酶活性;呋喃西林(0~24.0 mg·L <sup>-1</sup> )暴露96 h,相同时间,不同浓度下存活率存在显著差异;同一浓度,不同时间点存活率也存在显著差异	[98~100]
急性毒性	纳米铜(nCu)和纳米氧化铜(nCuO)	nCu和nCuO对扇形游仆虫均有急性致死毒性和生长抑制毒性;nCu的LC <sub>50</sub> (6 h) = 345.3 μg·L <sup>-1</sup> ,EC <sub>50</sub> (18 h) = 0.3 μg·L <sup>-1</sup> ;nCuO的LC <sub>50</sub> (6 h) = 1.4 × 10 <sup>6</sup> μg·L <sup>-1</sup> ,EC <sub>50</sub> (18 h) = 72.1 μg·L <sup>-1</sup> ;毒性强弱顺序为:nCu > nCuO	[95]
急性毒性	银纳米颗粒(AgNPs)	LC <sub>50</sub> (12 h) = (30.0 ± 2.0) mg·L <sup>-1</sup> ;主要致毒机制为诱导氧化胁迫,导致线粒体功能障碍	[17]
急性毒性和联合毒性	微塑料(mMPs/nMPs)和Cd <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup> 的LC <sub>50</sub> (24 h) = 44.5 mg·L <sup>-1</sup> ;镉和微塑料毒性使得生物量减少,微塑料加剧了镉的生物积累和氧化应激	[67]

### 3.3 轮虫动物

轮虫是无脊椎动物中最常见的假体腔动物,分布广泛,体型微小,一般无色透明,生殖率高,繁殖快,周期短,具有较高的种群密度和增长率,且对多种有毒物质具有较强敏感性,既可作为水质变化的生物指示物,也可用于探究物种形成和种群群落变化.周文礼等<sup>[101]</sup>探究了3种赤潮藻对褶皱臂尾轮虫的急性毒性致死率和种群增长参数的影响.赤潮藻塔玛亚历山大藻对褶皱臂尾轮虫的生长发育有明显影响,降低其繁殖率,缩短其平均寿命<sup>[102]</sup>.此外,褶皱臂尾轮虫也被应用于重金属和有机污染物的毒性测试中<sup>[19,103~105]</sup>.

### 3.4 环节动物

多毛纲是环节动物中最多且较原始的一类,除极少数淡水生活外,均为海水生活种.在生态习性上,多毛纲分为自由生活的,可进行爬行、钻穴、游泳或远洋生存的游走类(errantia),和不能自由生活营固定穴居的隐居类(sedentaria).多毛纲常见沙蚕(*Hediste diversicolor*)是栖息在河口潮间带滩涂和浅水区的最重要和最丰富的品种之一,扮演着重要的生态角色<sup>[106,107]</sup>.

多毛类的生存环境属污染物易于高浓度聚集的潮汐带内,因此极易与污染物发生接触<sup>[108,109]</sup>,如重金属、持久性有机污染物、微塑料等.生物摄入是海洋微塑料(microplastics, MPs)进入食物网的重要途径,微塑料可沿食物链进行传递,从低营养级生物向高营养级生物传递;同时,由于微塑料粒径小、相对比表面积大且表面疏水,易于富集环境中其他

污染物并与其发生结合作用,而产生联合毒性<sup>[110,111]</sup>,当前已知微塑料与重金属<sup>[112]</sup>、有机污染物<sup>[113]</sup>和纳米颗粒物<sup>[114]</sup>具有复合毒性作用机制.利用双齿围沙蚕(*Perinereis aibuhitenensis*)进行MPs和苯并[a]芘[benzo(a)pyrene, BaP]的毒性探究,发现两者单一和联合毒性胁迫均可以激活氧化应激水平,且两者间具有一定的协同毒性效应<sup>[115]</sup>.同时,MPs会对双齿围沙蚕产生氧化胁迫作用,并影响其呼吸速率和排氨率<sup>[23]</sup>.

星虫目隶属于环节动物门,星虫是蠕虫状海洋无脊椎动物,体细长,多底栖生活,其中可口革囊星虫俗称海丁、沙虫,为我国的特有种,是我国红树林区的大型底栖经济动物之一.目前可口革囊星虫(*Phascolosoma arcuatum*)和裸体方格星虫(*Sipunculus nudus*)已被应用于重金属毒性测试中,通过急性毒性试验已探究了镉、锌、铅、铜和汞等多种重金属的毒性作用.有研究发现,镉和锌暴露可口革囊星虫48 h和96 h后存在明显的相互拮抗作用<sup>[21,116,117]</sup>,并且会影响其耗氧量和氨排泄功能<sup>[20]</sup>.

### 3.5 软体动物

软体动物中的双壳类和腹足类生物,如牡蛎、贻贝、扇贝、蛤蜊和螺等,其野生群体或海水养殖资源都是我国重要的沿海水产经济物种.各类软体动物在海洋生物毒性测试中也得到广泛应用.20世纪90年代末,美国将牡蛎和贻贝等作为近海海洋环境污染指示生物,用于监测重金属在海洋环境中的富集情况<sup>[118,119]</sup>,目前,太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)和蓝贻贝(*Mytilus edulis*)均为国际标准化

组织 (ISO) 推荐测试生物. 近年来, 我国利用太平洋牡蛎、褶牡蛎、近江牡蛎、沿海牡蛎和香港牡蛎等开展了众多海洋生态毒理学研究, 包括毒性测试、环境监测和毒代动力学研究等 (表 4).

牡蛎隶属于软体动物门 (Mollusca) 双壳纲 (Bivalvia) 牡蛎目 (Ostreoida) 牡蛎总科 (Ostreioidea) 牡蛎科 (Ostreidae). 作为最具代表性的海洋双壳贝类生物, 其多栖息于浅海或河口区域, 分布范围广泛, 营固着生活或运动范围较小, 具滤食性, 重金属污染物易于在体内发生富集, 富集能力显著优于鱼类和藻类, 在河口生态系统的物质循环和能量流动过程中起着重要作用, 是河口环境生态的理想指示生物<sup>[120-122]</sup>. 例如, 为探究脱硫海水中汞对

海洋环境的影响, 刘锡尧等<sup>[123]</sup> 利用梯度方法在厦门燃煤电厂脱硫海水排出口附近吊养褶牡蛎, 研究其对总汞和甲基汞的中、长期富集规律, 评估其暴露风险及毒性效应. 此外, 毒代动力学模型也可实现对重金属在生物体内累积量的预测和分析. Tan 等<sup>[38]</sup> 通过 48 d 的移植试验, 测定了香港牡蛎在铬、镍、铜和锌等重金属污染下的毒代动力学模型, 以推测重金属在生物体内的积累效应.

此外, 施华宏等<sup>[40,41,124,125]</sup> 利用腹足类生物对有机锡污染导致的性畸变现象进行检测和研究, 提出可将分布广泛、性畸变特征明显和畸变程度较大的波部东风螺作为监测我国海洋有机锡污染的指示生物.

表 4 不同种牡蛎在中国海洋生态毒理学研究中的应用<sup>1)</sup>

Table 4 Application of different species of oysters in marine ecotoxicological studies in China

研究类型	物种	污染物名称	毒性效应及致毒机制	文献
急性毒性	褶牡蛎 (担轮幼虫) ( <i>Alectryonella plicatula</i> )	Hg <sup>2+</sup> 、Cu <sup>2+</sup> 、Pb <sup>2+</sup> 、Ni <sup>2+</sup> 和 Cr(VI)	对担轮幼虫期的毒性强弱顺序为: Hg <sup>2+</sup> > Cu <sup>2+</sup> > Ni <sup>2+</sup> > Pb <sup>2+</sup> > Cr(VI); LC <sub>50</sub> (96 h) 为 13、66、1 720、3 590 和 14 550 μg·L <sup>-1</sup>	[68]
急性毒性	褶牡蛎 ( <i>Alectryonella plicatula</i> )	Zn <sup>2+</sup> 、Cd <sup>2+</sup> 、Cu <sup>2+</sup> 、Cr(VI) 和 Se(IV)	毒性强弱顺序为: Cu <sup>2+</sup> > Se(IV) > Cd <sup>2+</sup> > Zn <sup>2+</sup> > Cr(VI); LC <sub>50</sub> (96 h) 分别为 2.6、4.1、8.8、81.8 和 378.1 mg·L <sup>-1</sup>	[35]
急性毒性	太平洋牡蛎 ( <i>Crassostrea gigas</i> )	Cu <sup>2+</sup> 、Pb <sup>2+</sup> 和 Cd <sup>2+</sup>	毒性强弱顺序为: Cd <sup>2+</sup> > Cu <sup>2+</sup> > Pb <sup>2+</sup> ; LC <sub>50</sub> (96 h) 分别为 21.4、21.8 和 23.0 mg·L <sup>-1</sup>	[69]
急性毒性	近江牡蛎 ( <i>Crassostrea rivularis</i> )	Cu <sup>2+</sup> 、Pb <sup>2+</sup> 和 Zn <sup>2+</sup>	毒性强弱顺序为: Cu <sup>2+</sup> > Pb <sup>2+</sup> > Zn <sup>2+</sup> ; Cu <sup>2+</sup> 、Pb <sup>2+</sup> 和 Zn <sup>2+</sup> 能诱导近江牡蛎 SOD 活性	[126]
急性毒性	太平洋牡蛎 ( <i>Crassostrea gigas</i> )	11 种丙溴磷农药和葱	毒性强弱顺序为: 辛硫磷 > 甲基异硫磷 > 丙溴磷 > 对硫磷 > 甲基对硫磷 > 水胺硫磷 > 速丙磷 > 甲胺磷 > 久效磷 > 敌敌畏 > 氧化乐果; LC <sub>50</sub> (96 h) 依次为 3.9、4.1、4.3、5.2、6.9、7.4、7.5、10.5、12.2、14.7 和 15.1 mg·L <sup>-1</sup> ; 葱的毒性大于丙溴磷农药	[127]
急性毒性	太平洋牡蛎 ( <i>Crassostrea gigas</i> )	单壁碳纳米管 (SWCNTs)	SWCNTs 暴露会对太平洋牡蛎的鳃和消化腺造成氧化损伤	[128]
亚慢性毒性	褶牡蛎 ( <i>Alectryonella plicatula</i> )	脱硫海水中的 Hg	暴露 37 d, 生物富集系数为 1.3 × 10 <sup>5</sup> ; 牡蛎消化腺对 THg 的富集含量显著高于腮	[123]
亚慢性毒性	太平洋牡蛎 ( <i>Crassostrea gigas</i> )	石油	肋道 30 d, LOAEL 为 50.0 mg·L <sup>-1</sup> , 结构损伤严重, 毒性效应明显	[129]
亚慢性毒性	葡萄牙牡蛎 ( <i>Crassostrea angulata</i> )	双酚 A (BPA)	LC <sub>50</sub> (96 h) = (26.9 ± 3.9) mg·L <sup>-1</sup> ; 2.0 mg·L <sup>-1</sup> BPA 暴露 16 d 后, 雌雄牡蛎性腺中积累的 BPA 约为对照组的 160 倍	[37]
亚慢性毒性	太平洋牡蛎 ( <i>Crassostrea gigas</i> )	聚乙烯 (PE) 和聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)	主要致毒机制为诱发氧化应激和影响甘油磷脂代谢过程, 脂质代谢、有氧代谢和凋亡途径相关基因表达显著上调; 但对牡蛎生理速率没有明显影响, 暴露 21 d 后, 高浓度 (1 000.0 μg·L <sup>-1</sup> ) 毒害作用大于低浓度 (10.0 μg·L <sup>-1</sup> ); PET 毒害作用大于 PE	[130]
亚慢性毒性和联合毒性	太平洋牡蛎 ( <i>Crassostrea gigas</i> )	海洋酸化和 Cd <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup> (10.0 μg·L <sup>-1</sup> ) 暴露 31 d, 鳃中 Cd <sup>2+</sup> 的生物累积作用大于消化腺; Cd <sup>2+</sup> 与海洋酸化对于牡蛎的氧化应激、组织病理损伤和细胞凋亡有协同作用	[131]
毒代动力学	香港牡蛎 ( <i>Crassostrea hongkongensis</i> )	Cr(VI)、Ni <sup>2+</sup> 、Cu <sup>2+</sup> 和 Zn <sup>2+</sup>	48 d 移植试验, 利用毒代动力学模型监测牡蛎体内的重金属积累; 摄取速率参数 k <sub>t</sub> 为 Cr(VI) (0.000 35 ± 0.000 21) g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> ; Ni <sup>2+</sup> (0.003 9 ± 0.002 6) g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> ; Cu <sup>2+</sup> (0.65 ± 0.25) g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> ; Zn <sup>2+</sup> (0.39 ± 0.15) g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>	[38]
动力学模型	近江牡蛎 ( <i>Crassostrea rivularis</i> ) 沿海牡蛎 ( <i>Saccostrea glomerata</i> )	Cd <sup>2+</sup> 、Se(IV) 和 Zn <sup>2+</sup>	动力学模型预测重金属的暴露途径和生物累积; 两种牡蛎的重金属摄取速率参数 k <sub>t</sub> 为 Cd <sup>2+</sup> : 0.72 g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> 和 0.53 g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> ; Se(IV): 0.060 g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> 和 0.064 g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> ; Zn <sup>2+</sup> : 2.05 g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> 和 1.21 g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>	[36]

1) LOAEL: 最小有害作用剂量 (lowest observed adverse effect level)

### 3.6 棘皮动物

海胆 (Echinoidea) 隶属于棘皮动物门 (Echinodermata) 海胆亚门 (Echinozoa) 海胆纲 (Echinoidea), 生物体呈球形、盘形或心脏形, 无腕, 是生活在海洋浅水区的无脊椎动物, 是海洋食物网关键的食草习性动物群体<sup>[132]</sup>, 在底栖生物群落的功能、动态和结构中起着重要作用<sup>[133]</sup>.

海胆的早期胚胎发育主要包括卵裂、囊胚、原肠胚、棱柱幼虫和长腕幼虫这 5 个典型的发育时期<sup>[134]</sup>, 各发育时期胚胎特点鲜明, 作为生物科学研究史上最早被使用的模式生物之一, 对探究生物的早期发育起了重要作用<sup>[135]</sup>. 有研究显示, 它的配子和胚胎对于海水中存在的污染物具有良好的敏感性, 即使是极低浓度下, 其对毒物的敏感性也大于很多其他生物体<sup>[136]</sup>. 因此, 海胆胚胎经常用于海水环境质量评估<sup>[137~139]</sup>. 1995 年美国环保署将海胆胚胎毒性试验方法列为标准的生物毒性测试方法, 同年海胆被列为海洋生态毒理学研究的模式生物<sup>[140,141]</sup>.

海胆作为海洋模式生物的优势总结如下<sup>[139,142~147]</sup>: 无脊椎动物, 结构简单; 作为发育生物学的早期模式生物, 生活史清晰简单, 早期胚胎发育过程已有较为透彻充分的研究, 且发育模式与脊椎动物相同; 体外受精, 配子易获得, 胚胎透明易于观察; 早期发育阶段对污染物高度敏感; 生命周期长, 亦可以用于长期生态毒理监测.

目前, 已利用马粪海胆、虾夷马粪海胆、光棘球海胆、中间球海胆和黄海胆等测试重金属、农药、有机污染物、石油烃和燃油及溢油分散剂 (WAFs) 等在急性和慢性暴露下的胚胎发育毒性、繁殖毒性和神经毒性等 (表 5). 例如, 刚锰<sup>[148]</sup>对马粪海胆进行 WAFs 暴露 30 d, 检测其胚胎发育周期内第 2、4、8 细胞期和囊胚期的抗氧化酶水平、基因组 DNA 的甲基化和损伤情况, 探究 WAFs 的分子毒理效应和遗传毒性机制. 段美娜等<sup>[149,150]</sup>利用沉底重燃油对虾夷马粪海胆进行 21 d 暴露, 以性腺指数、繁殖力、卵细胞尺寸、受精子代畸形率和生长

表 5 不同种海胆在中国海洋生态毒理学研究中的应用

Table 5 Application of different species of sea urchins in marine ecotoxicological studies in China

研究类型	物种	污染物名称	毒性效应及致毒机制	文献
急性毒性	光棘球海胆 ( <i>Mesocentrotus nudus</i> )	Zn <sup>2+</sup> 、Hg <sup>2+</sup> 、Cu <sup>2+</sup> 、Pb <sup>2+</sup> 和 Cd <sup>2+</sup>	主要致毒机制为降低受精率、导致胚胎延滞和畸形, 对精子细胞造成超微结构损伤; 胚胎毒性作用大小为: Hg <sup>2+</sup> > Cu <sup>2+</sup> > Pb <sup>2+</sup> > Zn <sup>2+</sup> > Cd <sup>2+</sup> ; 其中 Hg <sup>2+</sup> 的 LOAEL 为 0.01 μmol·L <sup>-1</sup> , 其他 4 种重金属高一个数量级	[47]
急性毒性	马粪海胆 ( <i>Hemicentrotus pulcherrimus</i> )	久效磷农药	主要致毒机制为抑制 DRD1mRNA 表达, 造成马粪海胆早期发育阶段多巴胺代谢异常, 多巴胺神经能系统发育和功能调控异常	[151]
急性毒性	虾夷马粪海胆 ( <i>Strongylocentrotus internedius</i> )	草甘膦、百草枯、异菌脲、代森锰锌、三唑醇、霜霉威、百菌清和速克灵	主要致毒机制为抑制胚胎发育; 对四腕幼虫期胚胎发育抑制的 EC <sub>50</sub> 值大小分别为: 草甘膦 (4.0 mg·L <sup>-1</sup> ) > 百草枯 (10.4 mg·L <sup>-1</sup> ) > 代森锰锌 (20.8 mg·L <sup>-1</sup> ) > 速克灵 (55.4 mg·L <sup>-1</sup> ) > 霜霉威 (56.1 mg·L <sup>-1</sup> ) > 异菌脲 (86.3 mg·L <sup>-1</sup> ) > 三唑醇 (273.2 mg·L <sup>-1</sup> ) > 百菌清 (647.4 mg·L <sup>-1</sup> )	[152]
急性毒性	黄海胆 ( <i>Glyptocidaris crenularis</i> )	三苯基锡 (TPT) 和三丁基锡 (TBT)	TPT 的 LC <sub>50</sub> (96 h) = 6.7 μg·L <sup>-1</sup> ; TBT 的 LC <sub>50</sub> (96 h) = 4.9 μg·L <sup>-1</sup>	[44]
急性毒性	海胆 (购自大连海宝渔业有限公司)	白灵“919”浓缩型溢油分散剂和 120# 燃料油	主要致毒机制为延迟胚胎发育, 具有明显胚胎毒性; 分散液对不同时期的海胆胚胎抑制 EC <sub>50</sub> : 2 细胞期 394.0 mg·L <sup>-1</sup> 、4 细胞期 254.0 mg·L <sup>-1</sup> 、8 细胞期 106.0 mg·L <sup>-1</sup> 和囊胚期 33.3 mg·L <sup>-1</sup> ; 乳液液对不同时期的海胆胚胎抑制 EC <sub>50</sub> : 2 细胞期 205 mg·L <sup>-1</sup> 、4 细胞期 106 mg·L <sup>-1</sup> 、8 细胞期 85.0 mg·L <sup>-1</sup> 和囊胚期 5.27 mg·L <sup>-1</sup>	[72]
亚慢性毒性	马粪海胆 ( <i>Hemicentrotus pulcherrimus</i> )	石油烃	暴露 30 d, 当石油烃浓度 > 50.0 mg·L <sup>-1</sup> 时出现明显的 DNA 损伤; 暴露时间与甲基化程度呈正比关系	[148]
世代毒性	虾夷马粪海胆 ( <i>Strongylocentrotus internedius</i> )	沉底重燃油	海胆对于重燃油的富集过程存在性别差异性和跨代毒性效应	[149]
世代毒性	海胆 (购自大连海宝渔业有限公司)	重燃油 HFO380 污染的孔隙水	主要致毒机制为显著减低配子排除率和雌海胆繁殖力; 且亲代暴露毒性可传递给子代, 有遗传毒性效应	[150]

率等为测试指标,发现海胆对沉底重燃油的富集过程存在性别差异,且存在跨代毒性效应。

### 3.7 节肢动物

节肢动物中的海洋桡足类和糠虾类,由于个体小、生命周期短、易于培养和操作,且对毒物具有较好的敏感性,因此常被国内外应用于毒性测试研究中。其中已知的海洋桡足类大约有 1200 多种,是第二大甲壳动物类群,是海洋生态系统中重要的浮游动物群落组成,在海洋次级生产力中占主要位置。同时,桡足类作为幼鱼的食物,本身食性复杂,是浮游植物和更高营养级生物之间连接的纽带,对海洋生态系统的能量流动和物质循环具有重要意义<sup>[153-155]</sup>。

早在 1939 年,日本虎斑猛水蚤 (*Tigriopus japonicus*) 已经被日本学者应用于探究氯化钾对性别分化的影响<sup>[156]</sup>。日本虎斑猛水蚤隶属于节肢动物门 (Arthropoda) 甲壳纲 (Crustacea) 桡足亚纲

(Copepoda) 猛水蚤目 (Harpacticoida),属小型海洋底栖浮游动物,生活在潮上带含较浅海水的岩石槽水洼中,广泛分布于西太平洋近海,在中国、日本和韩国附近海域均有分布,具广温性广盐性。成体蚤体长约 1.0 mm,体色为棕色或桔红色,雄性个体略小于雌性,具有执握肢,可根据第一触角形态区分性别<sup>[157]</sup>。作为毒性测试生物,该桡足类具备以下特点<sup>[158-160]</sup>:个体小,分布广泛,可在实验室实现长期培养,易于操作;外壳颜色鲜明,便于观察;雌性产卵量大,易于繁殖;耐温性耐盐性强,生存适应能力强,甚至可以适应极端环境;对毒物胁迫具有较好的敏感性;世代周期短,可以实现多世代长期慢性毒性测试;此外,日本虎斑猛水蚤的线粒体基因测序已完成,转录组研究也已广泛开展,有助于揭示污染物的致毒机制。

如表 6 所示,日本虎斑猛水蚤被广泛应用于进行急性毒性、单世代毒性、多世代毒性和联合毒性

表 6 日本虎斑猛水蚤 (*Tigriopus japonicus*) 在中国海洋生态毒理学研究中的应用<sup>1)</sup>

Table 6 Application of *Tigriopus japonicus* in marine ecotoxicological studies in China

研究类型	污染物名称	毒性效应及致毒机制	文献
急性和慢性毒性	甲氨基阿维菌素苯甲酸盐	主要致毒机制为抑制产卵量,毒性效应有性别差异;雌性成体的 LC <sub>50</sub> (96 h) = 7 156.0 μg·L <sup>-1</sup> ; 雄性成体的 LC <sub>50</sub> (96 h) = 3 637.0 μg·L <sup>-1</sup> ; 连续暴露 2 个世代,10 d 产卵量受到显著抑制,LOAEL 为 0.5 μg·L <sup>-1</sup>	[165]
急性毒性和联合效应	Cu <sup>2+</sup> 、Cd <sup>2+</sup> 和海洋酸化	随着海水 pH 值降低,Cu <sup>2+</sup> 和 Cd <sup>2+</sup> 对日本虎斑猛水蚤的 LC <sub>50</sub> (96 h) 都呈下降趋势;在最低 pH 值 6.5 时,Cu <sup>2+</sup> 的 LC <sub>50</sub> (96 h) = 0.6 mg·L <sup>-1</sup> ,Cd <sup>2+</sup> 的 LC <sub>50</sub> (96 h) = 6.3 mg·L <sup>-1</sup>	[70]
急性毒性和联合毒性	菲、苊和纳米二氧化钛 (nTiO <sub>2</sub> )	nTiO <sub>2</sub> 96 h 暴露,影响致死率的 NOAEL 为 5.0 mg·L <sup>-1</sup> ,LOAEL 为 20.0 mg·L <sup>-1</sup> nTiO <sub>2</sub> 和菲之间不存在明显的协同效应,与苊之间存在显著的联合协同效应	[166]
急性毒性和联合毒性	Pb <sup>2+</sup> 、Cd <sup>2+</sup> 和纳米氧化锌 (nZnO)	Cd <sup>2+</sup> 的 LC <sub>50</sub> (96 h) = 5.9 mg·L <sup>-1</sup> ,Pb <sup>2+</sup> 的 LC <sub>50</sub> (96 h) = 75.4 mg·L <sup>-1</sup> ; nZnO (1.0 mg·L <sup>-1</sup> ) 增加镉和铅的毒性	[167]
急性毒性和联合毒性	纳米氧化锌 (nZnO) 和三苯基锡 (TPT)	nZnO 的 LC <sub>50</sub> (96 h) = 2.4 mg·L <sup>-1</sup> ,TPT 的 LC <sub>50</sub> (96 h) = 4.1 μg·L <sup>-1</sup> ; nZnO 和三苯基锡联合暴露具有协同毒性效应	[76]
急性毒性和多世代毒性	六溴环十二烷 (HBCDs)	LOEC (96 h) > 800 μg·L <sup>-1</sup> ,LOAEL 为 8.0 μg·L <sup>-1</sup> ; 长期暴露诱导氧化胁迫,造成 DNA 氧化损伤,导致发育迟缓,致死效应很低; α、β-HBCDs 比 γ-HBCD 具有更高的诱导氧化应激的能力,α、β-HBCDs 的致死毒性大于 γ-HBCD; BCF 大小顺序为: α-HBCD > γ-HBCD > β-HBCD	[50,168]
急性毒性和多世代毒性	4-甲基苯亚基樟脑 (4-MBC)	LC <sub>50</sub> (72 h) = 92.9 μg·L <sup>-1</sup> ,LOAEL 为 0.5 μg·L <sup>-1</sup> ; 长期暴露诱导氧化胁迫,导致发育毒性及生殖毒性,且高盐度增加 4-MBC 的毒性	[163,164]
多世代毒性	Hg <sup>2+</sup>	LOAEL 为 0.5 μg·L <sup>-1</sup> ; 主要致毒机制为抑制无节幼体数量和繁殖力,且汞毒性随着暴露世代增加而增强	[169,170]
多世代毒性	Cd <sup>2+</sup>	LOAEL 为 2.5 μg·L <sup>-1</sup> ; 长期暴露降低营养吸收,诱导氧化应激反应,影响细胞氧化还原稳态和代谢功能,延缓无节幼体阶段的发育和成熟,降低生殖力	[171]
世代毒性	聚苯乙烯 (PS)	LOAEL 为 0.2 mg·L <sup>-1</sup> ; 世代暴露导致存活率和生殖力降低,但受影响性状可在恢复世代中恢复	[172]
多世代毒性和联合毒性	海洋酸化和 Hg <sup>2+</sup>	Hg <sup>2+</sup> 单独暴露显著降低无节幼体数量; 海洋酸化单独暴露无明显影响,但海洋酸化可以减轻 Hg <sup>2+</sup> 毒性	[161,162]

1) NOAEL: 无明显损害剂量 (no observed adverse effect level)

测试中,已测试的污染物包括重金属、有机污染物、纳米材料和微塑料等,以及两种污染物间的联合效应和污染物与环境因子变化(如海洋酸化、盐度变化)的联合效应等.例如,有研究通过对日本虎斑猛水蚤进行海洋酸化和重金属汞的联合暴露试验<sup>[161,162]</sup>,发现在多世代暴露下,海洋酸化可以减轻汞的毒性效应,并结合蛋白质组学进行代谢途径影响分析.有研究发现多世代暴露于低浓度(0.5~5  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )的紫外吸收剂 4-甲基苄亚基樟脑(4-methylbenzylidene camphor, 4-MBC)加快了日本虎斑猛水蚤的发育速度<sup>[163,164]</sup>,但显著降低其繁殖力;且盐度影响 4-MBC 对日本虎斑猛水蚤的富集和毒性.

### 3.8 头索动物:文昌鱼

头索动物亚门的动物通常统称为文昌鱼,是由无脊椎动物进化到脊椎动物的祖先,是研究脊椎动物器官系统发育的理想模式生物.1923年,厦门大学教授 Sol Fely Light 在 Science 上发表文昌鱼论文,引起国际关注<sup>[173]</sup>.随后金德祥教授对厦门文昌鱼进行详尽考察,并于1953年,正式将厦门文昌鱼确定为 *Branchiostoma belcheri* Gray<sup>[174]</sup>,又称白氏文昌鱼.白氏文昌鱼作为我国特有的毒性测试物种,已被应用于进行硒、铜、锌、铬和镉等多种重金属毒性测试中.有研究发现文昌鱼对重金属的毒性反应敏感,即使是很低浓度的镉和锌都会对文昌鱼神经系统和抗氧化系统造成一定程度的损伤,且低剂量重金属可以一定程度地促进文昌鱼生长,而高剂量重金属则会造成文昌鱼中毒乃至死亡<sup>[58,59,175,176]</sup>.

### 3.9 海洋鱼类

鱼类是海洋生态系统的重要组成部分,在海洋食物网中占据多个营养级,对维持生态系统结构和功能的稳定具有重要作用,其中,海洋青鲮鱼、大弹涂鱼等被广泛应用于毒性测试中.

海洋青鲮鱼 (*Oryzias melastigma*),又名黑点青鲮,海洋硬骨鱼类,隶属于脊索动物门(Chordata)脊椎动物亚门(Vertebrata)辐鳍鱼纲(Actinopteri)颌针目(Beloniformes)异鲮科(Adrianichthyidae)青鲮属(*Oryzias*).体长形,侧扁,背部平直,腹部圆凸而窄,体背青灰色,腹部和各鳍灰白色.体侧上部有一条黑色条纹,从鳃盖后缘延伸至尾柄中部,源于巴基斯坦、缅甸、印度和泰国沿海.由于具有良好的模式生物特性,国际生命科学学会(International Life Sciences institute, ILSI)和健康和环境科学研究所(Health and Environmental Science Institute, HESI)将海洋青鲮鱼胚胎认定为毒理学研究的重要模式生物,此外,国内外均有学者认为海洋青鲮鱼

是一种理想的海水硬骨鱼模型<sup>[9,177,178]</sup>.该鱼类作为模式生物具有以下几点优势<sup>[9,179-181]</sup>:广温广盐性,环境耐受力强,可适应各种不同的测试环境;体型较小,产卵量大,易于进行实验室培养;胚胎体积大,且胚胎发育阶段性特征明显,易于观测;生长周期短,2~3个月可由胚胎发育为成鱼,且雌、雄鱼易辨别;胚胎及仔鱼透明易于观测,对污染物响应敏感,可快速反应环境的污染状况.此外,海洋青鲮与日本青鲮在系统发育上高度相似,目前日本青鲮的全基因组测序已完成,方便对海洋青鲮进行更为全面的基因及分子层面的探究,与此同时,性别由XX/XY染色体决定,与人类相同<sup>[178]</sup>,有助于将污染物对海洋青鲮鱼的致毒机制推导至人体.

目前,海洋青鲮鱼胚胎已被广泛应用于毒性测试.Chen等<sup>[182]</sup>通过全套原位杂交和免疫染色技术,对海洋青鲮鱼的大脑、眼睛、心脏、胸鳍、胰腺、肝脏、肌肉和神经元系统进行了广泛的荧光分子标记,描述了海洋青鲮鱼胚胎发展各阶段特征,为海洋青鲮鱼在生态毒理学的应用提供基础参考数据.海洋青鲮鱼急性毒性、胚胎毒性、全世代或多世代慢性毒性测试方法已被用于测试多种海洋重金属、持久性有机污染物和新型污染物的毒性,并对其致毒机制进行了一系列微观水平的探究(表7).例如,3种溴代阻燃剂HBCDs异构体, $\alpha$ -、 $\beta$ -和 $\gamma$ -HBCD对海洋青鲮鱼胚胎的存活及孵化率没有显著影响,但均导致一定的氧化胁迫,影响发育,造成幼体畸变并提高胚胎心率<sup>[183]</sup>.新型有机磷酸酯阻燃剂磷酸三(1,3-二氯异丙基)酯[tris(1,3-dichloro-2-propyl)phosphate, TDCIPP]和磷酸三苯酯(triphenyl, TPhP)长期暴露则通过影响海洋青鲮鱼骨骼发育基因的表达,缩短其体长和胸鳍长度,并造成脊柱弯曲<sup>[184]</sup>.对海洋青鲮鱼进行世代暴露发现BaP导致其昼夜节律紊乱进而干扰子代遗传,产生遗传毒性效应<sup>[185]</sup>.

大弹涂鱼(*Boleophthalmus pectinirostris*)已被用于重金属和有机污染物毒性测试.例如镉和铅暴露会对大弹涂鱼的肝细胞造成不可逆的结构损伤<sup>[186,187]</sup>;BaP会显著抑制大弹涂鱼肝脏的谷胱甘肽过氧化物酶的活性<sup>[66]</sup>;而大弹涂鱼的肝脏和白肌在对二甲苯暴露下表现出不同的抗氧化机制<sup>[188]</sup>.Bo等<sup>[62,189]</sup>利用真鲷(*Pagrus major*)先后探究了BaP暴露下鱼类的急性免疫调节响应和生物转化与免疫调节之间的相互作用.此外,褐菖鲈(*Sebastes marmoratus*)在三丁基锡(tributyltin, TBT)暴露下,毒性诱导脑细胞凋亡,选择、感官和运动功能受到影响<sup>[63]</sup>.

表 7 海洋青鳉鱼 (*Oryzias melastigma*) 在中国海洋生态毒理学研究中的应用  
Table 7 Application of *Oryzias melastigma* in marine ecotoxicological studies in China

研究类型	污染物名称	毒性效应及致毒机制	文献
急性毒性	Cd <sup>2+</sup> 、Hg <sup>2+</sup> 、Cr(VI) 和 Pb <sup>2+</sup>	主要致毒机制为显著降低胚胎孵化能力和心率,并导致初孵仔鱼的发育畸形;急性致死毒性强弱为: Hg <sup>2+</sup> > Cd <sup>2+</sup> > Cr(VI) > Pb <sup>2+</sup> , LC <sub>50</sub> (96 h) 分别为 0.1、1.1、1.5 和大于 20.0 mg·L <sup>-1</sup> ;影响胚胎孵化和致畸毒性的毒性强弱为: Hg <sup>2+</sup> > Cd <sup>2+</sup> > Pb <sup>2+</sup> > Cr(VI), LOAEL 分别为 24.0、147.0、200.0 和 235.0 μg·L <sup>-1</sup>	[71]
急性毒性	苯并(a)芘(BaP)	BaP 影响 JAK-STAT 和 NF-κB 信号通路	[190,191]
急性毒性	120#燃料油分散液(WAFs)	主要致毒机制为导致胚胎死亡,造成胚胎发育畸形、孵化率和心率下降;胚胎期 LC <sub>50</sub> (96h) 为 3.4~4.0 mg·L <sup>-1</sup>	[74]
急性毒性	双酚 S(BPS)	通过对比 LC <sub>50</sub> ,海洋青鳉鱼对于 BPS 的敏感性高于其他水生生物; LC <sub>50</sub> (24 h) = 16.8 mg·L <sup>-1</sup> ;当浓度为 100.0 μg·L <sup>-1</sup> 时,BPS 表现出类似的促炎功能,上调自由基的产生和细胞因子的表达	[192]
急性毒性	17α-乙炔雌二醇(EE2)	EE2 对鱼类的内分泌系统和免疫系统均有毒性作用	[193]
亚慢性毒性	聚氯乙烯(PVC)	初生和次生聚氯乙烯(10 <sup>6</sup> 个·L <sup>-1</sup> )暴露 25 d,胚胎畸形、仔鱼畸形,其心率和孵化时间显著变化;与初生聚氯乙烯相比,次生聚氯乙烯表面粗糙,形状不规则与鱼卵紧密接触会产生机械磨损,导致其毒性效应更为显著	[194]
慢性毒性	Hg <sup>2+</sup>	主要致毒机制为诱导氧化应激、细胞骨架组装功能障碍和代谢紊乱,进而引起神经毒性,且造成结构损伤;LOAEL 为 1.0 μg·L <sup>-1</sup> ,暴露 60 d,汞在大脑内大量积累	[184]
多世代毒性	苯并(a)芘(BaP)	BaP (0.5 μg·L <sup>-1</sup> ) 暴露,后代与节律相关的基因被显著调控,而出现昼夜节律紊乱;同时造成 DNA 损伤,父系暴露的后代比母系暴露的后代损伤情况更为严重,且甲基化程度更高;亲代经过暴露后的子代幼虫对 BaP 的毒性敏感性更高	[183]
多世代毒性	3种六溴环十二烷异构体 α-、β-和 γ-HBCD	主要致毒机制为 HBCDs 诱导海洋青鳉鱼胚胎的氧化胁迫,造成畸形率升高,影响心率,并导致心脏凋亡;影响胚胎发育的 LOAEL 为 5.0 μg·L <sup>-1</sup>	[61,185]
多世代毒性	磷酸三(1,3-二氯异丙基)酯(TDCIPP)和磷酸三苯酯(TPhP)	影响海洋青鳉鱼骨骼发育,缩短其体长和胸鳍长度,并造成脊柱弯曲	[195]

#### 4 展望

近年来中国海洋生态毒理学不断蓬勃发展,先进的现代组学技术及大数据模型构建不但为学科研究提供了前沿技术手段,还为污染物致毒机制探究带来了突破.与此同时,当前中国海洋生态环境问题也处在动态变化之中,涉及海洋环境的自身变化、外源污染物的干扰、生态系统内在结构的改变和突发的污染或灾害等多个方面,各因素间相互影响,相互叠加,相互制约,而且伴随着全球气候变化,海洋中复杂的生物过程也在不断变化.因此,当前海洋生态毒理学研究在检测污染物毒性效应的同时应结合全球变化对于生物体及环境的影响,探究多因子之间的相互作用(如协同、加成或拮抗效应).此外,真实的海洋生态环境处于动态变化中,而毒理学毒性测试的开展往往是在可控的实验室环境下,那么可控的实验室测试环境与原位不可控的海洋生态环境存在哪些未知的差异,又要如何填补其中的差别,也将成为海洋生态毒理学未来发展的新挑战.由此,研究者们应当深入了解并及时关注不同海域的区域特征和海洋生态环境的变化,除进行实验室毒性测试

和致毒机制探究外,需监测和预测实际海洋生态环境中的环境因子变化和污染物在实际环境中的迁移转化.同时还需要了解不同海域海洋生态系统的结构和功能特征及其变化趋势,确定各生态系统的关键物种,选择合适的受试物种进行毒性测试和研究,以期更全面更科学地评估污染物对海洋生态系统的生态风险,更好地保护海洋生态环境.

#### 参考文献:

- [1] 孟紫强. 生态毒理学 [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [2] Walker C H. Ecotoxicity testing of chemicals with particular reference to pesticides [J]. Pest Management Science, 2006, 62 (7): 571-583.
- [3] 孟紫强. 环境毒理学 [M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [4] 周召江, 颜天. 我国海洋生态毒理学的研究进展 [J]. 环境科学研究, 1996, 9(1): 28.
- [5] 周名江, 颜天. 中国海洋生态毒理学的研究进展 [J]. 环境科学研究, 1997, 10(3): 1-6.  
Zhou M J, Yan T. Progress in marine eco-toxicology study in China [J]. Research of Environmental Sciences, 1997, 10(3): 1-6.
- [6] 赵慰苓, 宋福, 姜宏, 等. 三种原油对淡水鱼类毒性影响的试验研究 [A]. 见: 环境科学论文集 [C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [7] Dong S J, Kang M, Wu X L, et al. Development of a promising

- fish model (*Oryzias melastigma*) for assessing multiple responses to stresses in the marine environment [J]. *BioMed Research International*, 2014, **2014**, doi: 10.1155/2014/563131.
- [ 8 ] 孟紫强. 生态毒理学原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [ 9 ] 伍辛泷, 黄乾生, 方超, 等. 新兴海洋生态毒理学模式生物——海洋青鳉鱼 (*Oryzias melastigma*) [J]. *生态毒理学报*, 2012, **7**(4): 345-353.  
Wu X L, Huang Q S, Fang C, et al. *Oryzias melastigma*: A new promising model organism for marine ecotoxicology [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, **7**(4): 345-353.
- [ 10 ] 吴玉霖, 崔可铎, 刘玉梅, 等. 毛蚶对汞积累和排出的室内试验 [J]. *海洋与湖沼*, 1983, **14**(1): 30-34.  
Wu Y L, Cui K D, Liu Y M, et al. Laboratory experiment on the accumulation and depuration of mercury by *ARCA* (*Anadara*) *subcrenata* lischke [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1983, **14**(1): 30-34.
- [ 11 ] 吴志辉, 聂湘平, 杨宇峰. 邻苯二甲酸二甲酯 (DMP) 对海洋微藻的生态毒理研究 [J]. *生态科学*, 2006, **25**(2): 168-170.  
Wu Z H, Nie X P, Yang Y F. Ecological toxicology of dimethyl phthalate (DMP) to marine microalgae [J]. *Ecologic Science*, 2006, **25**(2): 168-170.
- [ 12 ] 李卓娜, 孟范平, 赵顺顺, 等. 2, 2', 4, 4'-四溴联苯醚 (BDE-47) 对 4 种海洋微藻的急性毒性 [J]. *生态毒理学报*, 2009, **4**(3): 435-439.  
Li Z N, Meng F P, Zhao S S, et al. Acute toxic effects of 2, 2', 4, 4'-tetrabromodiphenyl ether (BDE-47) on four marine microalgae [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, **4**(3): 435-439.
- [ 13 ] 王丽平, 郑丙辉, 孟伟. 多环芳烃对海洋硅藻中肋骨条藻的光毒性效应 [J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(3): 128-132.  
Wang L P, Zheng B H, Meng W. Phototoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons to marine diatom *Skeletonema costatum* [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(3): 128-132.
- [ 14 ] 黄士林, 王翠华, 唐峰华, 等. 6 种硝基苯化合物对海洋生物的急性毒性研究 [J]. *生态毒理学报*, 2010, **5**(3): 388-393.  
Huang S L, Wang C H, Tang F H, et al. Study on the acute toxicity of six nitrobenzenes to marine organisms [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2010, **5**(3): 388-393.
- [ 15 ] Wang X H, Wang W X. Uptake, absorption efficiency and elimination of DDT in marine phytoplankton, copepods and fish [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **136**(3): 453-464.
- [ 16 ] 王摆, 高士博, 董颖, 等. 6 种苯系物对球等鞭金藻和新月菱形藻的生长抑制 [J]. *生态毒理学报*, 2014, **9**(2): 233-238.  
Wang B, Gao S B, Dong Y, et al. Inhibitory effect of six kinds of BTEXs on growth of the Chrysophyceae *Isochrysis galbana* and the Diatom *Nitzschia closterium* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, **9**(2): 233-238.
- [ 17 ] Pan Y B, Zhang W J, Lin S J. Transcriptomic and microRNAomic profiling reveals molecular mechanisms to cope with silver nanoparticle exposure in the ciliate *Euplotes vannus* [J]. *Environmental Science: Nano*, 2018, **5**(12): 2921-2935.
- [ 18 ] Wang H, Tang X X, Sha J J, et al. The reproductive toxicity on the rotifer *Brachionus plicatilis* induced by BDE-47 and studies on the effective mechanism based on antioxidant defense system changes [J]. *Chemosphere*, 2015, **135**: 129-137.
- [ 19 ] 高焕, 徐静, 陈建华, 等. 褶皱臂尾轮虫耐受 Cd<sup>2+</sup> 毒性时间研究 [A]. 见: 2012 年环境污染与大众健康学术会议 [C]. 上海: 美国科研出版社, 2012. 234-237.
- [ 20 ] Chen X X, Lu C Y, Ye Y. Effects of Cd and Zn on oxygen consumption and ammonia excretion in sipuncula (*Phascolosoma esculenta*) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, **72**(2): 507-515.
- [ 21 ] 李俊辉, 王忠维, 杜晓东, 等. 重金属离子对裸体方格星虫的急性毒性试验 [J]. *安徽农业科学*, 2011, **39**(3): 1482-1483.  
Li J H, Wang Z W, Du X D, et al. Experimental evaluation of acute toxicity of heavy metal ions on *Sipunculus nudus* [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, **39**(3): 1482-1483.
- [ 22 ] 钱培元, 贾福相, 吴宝铃. 镉、三价铬和六价铬对小头虫 *Capitella capitata* 幼虫的效应 [J]. *黄渤海海洋*, 1990, **8**(1): 31-35.  
Qian P Y, Jia F X, Wu B L. Mortality (LC<sub>50</sub>) of *Capitella Capitata* larvae as induced by cadmium, trivalent chromium and hexavalent chromium [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1990, **8**(1): 31-35.
- [ 23 ] 张涛, 刘凯, 孙一鑫, 等. 微塑料对双齿围沙蚕生理代谢的影响研究 [J]. *生态毒理学报*, 2021, **16**(4): 271-279.  
Zhang T, Liu K, Sun Y X, et al. Effects of microplastics on physiological metabolism of *Perinereis aibuhitensis* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, **16**(4): 271-279.
- [ 24 ] Huang X, Ke C H, Wang W X. Bioaccumulation of silver, cadmium and mercury in the abalone *Haliotis diversicolor* from water and food sources [J]. *Aquaculture*, 2008, **283**(1-4): 194-202.
- [ 25 ] 马胜伟, 林钦, 陈海刚, 等. 混合重金属对翡翠贻贝的积累与排放规律研究 [J]. *南方水产*, 2008, **4**(6): 78-82.  
Ma S W, Lin Q, Chen H G, et al. Accumulation and elimination of mixed heavy metals in green mussel *Mytilus edulis* [J]. *South China Fisheries Science*, 2008, **4**(6): 78-82.
- [ 26 ] 杜俊俏, 刁晓平, 郑鹏飞, 等. 砷暴露对马氏珠母贝鳃和肝胰腺抗氧化酶活性的影响 [J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(10): 1711-1716.  
Du J Q, Diao X P, Zheng P F, et al. The effects of pyrene exposure on antioxidant enzymes activity in the gill and hepatopancreas of pearl oyster *Pinctada martensi* [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(10): 1711-1716.
- [ 27 ] Wang X H, Fang C, Hong H S, et al. Gender differences in TBT accumulation and transformation in *Thais clavigera* after aqueous and dietary exposure [J]. *Aquatic Toxicology*, 2010, **99**(3): 413-422.
- [ 28 ] 张林宝, 吴惠丰, 孙伟, 等. 菲律宾蛤仔对镉、铜暴露的蓄积作用及其抗氧化酶系统的响应研究 [J]. *南方水产科学*, 2013, **9**(5): 64-70.  
Zhang L B, Wu H F, Sun W, et al. Bioaccumulation and antioxidant responses in Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) under cadmium and copper exposure [J]. *South China Fisheries Science*, 2013, **9**(5): 64-70.
- [ 29 ] Hu F X, Pan L Q, Xiu M, et al. Bioaccumulation and detoxification responses in the scallop *Chlamys farreri* exposed to tetrabromobisphenol A (TBBPA) [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2015, **39**(3): 997-1007.
- [ 30 ] Lin Z, Fan X T, Huang J L, et al. Intertidal mussels do not stop metal bioaccumulation even when out of water: cadmium toxicokinetics in *Xenostrobus atratus* under influences of simulated tidal exposure [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114192.

- [31] Shi D L, Wang W X. Modification of trace metal accumulation in the green mussel *Perna viridis* by exposure to Ag, Cu, and Zn [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **132**(2): 265-277.
- [32] Gu H X, Shang Y Y, Clements J, et al. Hypoxia aggravates the effects of ocean acidification on the physiological energetics of the blue mussel *Mytilus edulis* [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **149**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110538.
- [33] 曹瑞文. 海水酸化和痕量金属 ( $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$ ) 对经济贝类的复合毒性效应研究 [D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2019.
- [34] Meng J, Wang W X, Li L, et al. Cadmium effects on DNA and protein metabolism in oyster (*Crassostrea gigas*) revealed by proteomic analyses [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 11716.
- [35] 李诗逸, 孙继鹏, 洪专, 等.  $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{Se}^{4+}$  对褶牡蛎急性毒性效应研究 [J]. *海洋环境科学*, 2015, **34**(6): 813-818.
- Li S Y, Sun J P, Hong Z, et al. Acute toxic effects of zinc, cadmium, copper, chromium, selenium on *Crassostrea plicatula* [J]. *Marine Environmental Science*, 2015, **34**(6): 813-818.
- [36] Ke C H, Wang W X. Bioaccumulation of Cd, Se, and Zn in an estuarine oyster (*Crassostrea rivularis*) and a coastal oyster (*Saccostrea glomerata*) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2001, **56**(1): 33-51.
- [37] Luo L Z, Zhang Q H, Kong X, et al. Differential effects of bisphenol A toxicity on oyster (*Crassostrea angulata*) gonads as revealed by label-free quantitative proteomics [J]. *Chemosphere*, 2017, **176**: 305-314.
- [38] Tan Q G, Zhou W T, Wang W X. Modeling the toxicokinetics of multiple metals in the oyster *Crassostrea hongkongensis* in a dynamic estuarine environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(2): 484-492.
- [39] Chen W Q, Wang W X, Tan Q G. Revealing the complex effects of salinity on copper toxicity in an estuarine clam *Potamocorbula laevis* with a toxicokinetic-toxicodynamic model [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **222**: 323-330.
- [40] 施华宏, 黄长江, 陈善文. 方斑东风螺和波部东风螺的性畸变及其对生殖的影响 [J]. *中国水产科学*, 2003, **10**(4): 293-296.
- Shi H H, Huang C J, Chen S W. Imposex in *Babylonia areolata* and *B. formosae habei* as well as the effects of imposex on their reproduction [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2003, **10**(4): 293-296.
- [41] 施华宏, 黄长江, 雷瓚. 利用波部东风螺 (*Babylonia formosae habei*) 性畸变现象监测海洋有机锡污染 [J]. *海洋技术*, 2003, **22**(1): 82-86.
- Shi H H, Huang C J, Lei Z. Organotin compound pollution in coastal water as indicated by imposex in *Babylonia formosae habei* [J]. *Ocean Technology*, 2003, **22**(1): 82-86.
- [42] 魏爱泓, 矫新明, 毛成贵, 等. 重金属汞对海洋底栖动物毛蚶和紫贻贝毒性效应研究 [J]. *生态毒理学报*, 2018, **13**(6): 352-359.
- Wei A H, Jiao X M, Mao C Z, et al. Toxic effects of mercury on marine benthic *Scapharca subcrenata* and *Mytilus edulis* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, **13**(6): 352-359.
- [43] 张启华. 海湾扇贝软体组织中汞与硒的形态分析及硒对汞的拮抗作用研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [44] 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.
- Xia Z D, Wang Y, Cha X J, et al. Acute toxicity of tributyltin chloride and triphenyltin chloride on sea urchin [J]. *Hebei Fisheries*, 2014, (6): 6-9.
- [45] 张晓娜, 李妹嫒, 王翠翠, 等. 久效磷农药对马粪海胆胆碱能和多巴胺能神经递质系统发育的影响 [A]. 见: 2016 年中国水产学会学术年会论文摘要集 [C]. 成都: 中国水产学会, 2016.
- [46] 汝少国, 许磊. 海胆早期神经发育及有机磷农药对其神经毒性作用的研究进展 [J]. *科技导报*, 2012, **30**(15): 75-79.
- Ru S G, Xu L. Early Neurodevelopment of sea urchin and neurotoxic effects of organophosphate pesticides on it [J]. *Science & Technology Review*, 2012, **30**(15): 75-79.
- [47] 王摆, 于喆, 吕涵, 等. 5 种重金属对光棘球海胆胚胎的毒性作用 [J]. *水产科学*, 2012, **31**(5): 255-258.
- Wang B, Yu Z, Lv H, et al. Toxic effects of five heavy metals on embryo development of sea urchin (*Strongylocentrotus nudus*) [J]. *Fisheries Science*, 2012, **31**(5): 255-258.
- [48] 白雪. 沉底油暴露对海胆子代发育毒性效应机制的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- [49] 许磊. 久效磷农药扰乱马粪海胆 (*Hemicentrotus pulcherrimus*) 5-羟色胺能神经系统发育的机制研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [50] Shi D L, Lv D M, Liu W X, et al. Accumulation and developmental toxicity of hexabromocyclododecanes (HBCDs) on the marine copepod *Tigriopus japonicus* [J]. *Chemosphere*, 2017, **167**: 155-162.
- [51] Bai Z A, Wang M H. Warmer temperature increases mercury toxicity in a marine copepod [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **201**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110861.
- [52] 薛泽, 朱丽岩, 王博渊, 等. 温度和盐度对两种海洋桡足类动物摄食和代谢的影响 [J]. *海洋与湖沼*, 2020, **51**(1): 95-102.
- Xue Z, Zhu L Y, Wang B Y, et al. Effects of temperature and salinity on feeding and metabolism of two marine copepods [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, **51**(1): 95-102.
- [53] 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 J J, Yang X B, Huang R, et al. Acute toxicity test of five heavy metal ions to *Neomysis awatschensis* [J]. *Marine Environmental Science*, 2006, **25**(2): 51-53.
- [54] 徐东晖, 刘光兴. 多环芳烃 (萘) 对火腿许水蚤 (*Schmackeria poplesia*) 急性和慢性毒性效应的研究 [J]. *生态毒理学报*, 2010, **5**(4): 543-548.
- Xu D H, Liu G X. A study on the acute and chronic effects of NAPH on *Schmackeria poplesia* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2010, **5**(4): 543-548.
- [55] 张涛, 史会来, 平洪领, 等. 盐度和漂白粉对东方新糠虾的急性胁迫影响 [J]. *水产养殖*, 2019, **40**(1): 18-22.
- Zhang T, Shi H L, Ping H L, et al. Studies of salinity and bleaching powder on the acute stress of *Neomysis orientalis* [J]. *Journal of Aquaculture*, 2019, **40**(1): 18-22.
- [56] Wang Z S, Yan C Z, Zhang X. Acute and chronic cadmium toxicity to a saltwater cladoceran *Moina monogolica* Daday and its relative importance [J]. *Ecotoxicology*, 2009, **18**(1): 47-54.
- [57] Wang M X, Wang X, Luo X X, et al. Short-term toxicity of polystyrene microplastics on mysid shrimps *Neomysis japonica* [A]. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science [C]. Bangkok: IOP Publishing, 2017.
- [58] 吴贤汉, 江新霁, 张宝录, 等. 几种重金属对青岛文昌鱼毒性及生长的影响 [J]. *海洋与湖沼*, 1999, **30**(6): 604-608.
- Wu X H, Jiang X J, Zhang B L, et al. Toxic effects of several heavy metal on amphioxus and living activity of *Branchiostoma*

- Belcheri Tsingtaoensis* tchang et koo [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, **30**(6): 604-608.
- [59] 梁萍, 方永强, 洪桂英, 等. 硒对文昌鱼的毒性效应和生长的影响 [J]. *台湾海峡*, 1989, **8**(2): 156-161.  
Liang P, Fang Y Q, Hong G Y, *et al.* Toxic effects of selenium on *Amphioxus* and its living activity [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1989, **8**(2): 156-161.
- [60] Lu B, Ke C H, Wang W X. Importance of waterborne cadmium and zinc accumulation in the suspension-feeding amphioxus *Branchiostoma belcheri* [J]. *Aquatic Biology*, 2012, **16**(2): 137-147.
- [61] Hong H Z, Li D M, Shen R, *et al.* Mechanisms of hexabromocyclododecanes induced developmental toxicity in marine medaka (*Oryzias melastigma*) embryos [J]. *Aquatic Toxicology*, 2014, **152**: 173-185.
- [62] Bo J, Gopalakrishnan S, Chen F Y, *et al.* Benzo[a]pyrene modulates the biotransformation, DNA damage and cortisol level of red sea bream challenged with lipopolysaccharide [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **85**(2): 463-470.
- [63] Zhang J L, Zuo Z H, Chen R, *et al.* Tributyltin exposure causes brain damage in *Sebastes marmoratus* [J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(3): 337-343.
- [64] 路珍. 镉和砷对褐牙鲆幼鱼线粒体的毒性效应及其作用机制 [D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2020.
- [65] 郭建波. 重金属(铬、镍、砷)对大黄鱼幼鱼的毒性和毒理学研究 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017.
- [66] 冯涛, 郑微云, 洪万树, 等. 苯并(a)芘对大弹涂鱼肝脏DNA的损伤 [J]. *水产学报*, 2000, **24**(4): 359-363.  
Feng T, Zheng W Y, Hong W S, *et al.* DNA damage in the liver of *Boleophthalmus pectinirostris* with benzo(a) pyrene exposure [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2000, **24**(4): 359-363.
- [67] Wang Y X, Liu M J, Geng X H, *et al.* The combined effects of microplastics and the heavy metal cadmium on the marine periphytic ciliate *Euploates vannus* [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **308**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119663.
- [68] 陈金堤, 王文雄. 重金属对褶牡蛎胚胎及幼体发育的毒性效应 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1985, **24**(1): 96-101.  
Chen J D, Wang W X. The toxic effects of the heavy metals on the embryonic and larvae developments of the Oyster [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1985, **24**(1): 96-101.
- [69] 刘伟, 鞠青, 刘星辰. 重金属 Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 对太平洋牡蛎的急性毒性效应 [J]. *河北渔业*, 2021, (10): 1-4.  
Liu W, Ju Q, Liu X C. Acute toxic effects of copper, lead and cadmium on *Crassostrea gigas* [J]. *Hebei Fisheries*, 2021, (10): 1-4.
- [70] 韦晓慧, 慕芳红, 孙艳桃, 等. 海洋酸化条件下铜、镉对日本虎斑水蚤的急性毒性效应 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(14): 3879-3884.  
Wei X H, Mu F H, Sun Y T, *et al.* Effect of simulated ocean acidification on the acute toxicity of Cu and Cd to *Tigriopus japonicus* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(14): 3879-3884.
- [71] 穆景利, 王莹, 王新红, 等. Cd<sup>2+</sup>、Hg<sup>2+</sup>、Cr<sup>6+</sup> 和 Pb<sup>2+</sup> 对黑点青鳉 (*Oryzias melastigma*) 早期生活阶段的毒性效应研究 [J]. *生态毒理学报*, 2011, **6**(4): 352-360.  
Mu J L, Wang Y, Wang X H, *et al.* Toxic effects of cadmium, mercury, chromium and lead on the early life stage of marine medaka (*Oryzias melastigma*) [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, **6**(4): 352-360.
- [72] 杨柏林, 吕昕璐, 高翔, 等. 消油剂和 120#船舶燃料油对海胆胚胎发育的复合毒性影响 [J]. *海洋环境科学*, 2013, **32**(6): 814-817.  
Yang B L, Lv X L, Gao X, *et al.* The influence of dispersants and 120# fuel oil on sea urchin embryos developments [J]. *Marine Environmental Science*, 2013, **32**(6): 814-817.
- [73] 高祥, 石晓勇, 韩秀荣, 等. 石油烃类污染物对中肋骨条藻和微型原甲藻的毒性效应研究 [J]. *海洋环境科学*, 2017, **36**(6): 918-923.  
Gao X, Shi X Y, Han X R, *et al.* Toxicity of petroleum hydrocarbon pollutants on *Skeletonema costatum* and *Prorocentrum minimum* [J]. *Marine Environmental Science*, 2017, **36**(6): 918-923.
- [74] 高翔, 丁光辉, 李西山, 等. 海洋青鳉胚胎不同发育阶段对 120#燃料油毒性敏感性的比较 [J]. *海洋环境科学*, 2019, **38**(1): 16-21.  
Gao X, Ding G H, Li X S, *et al.* Comparison of sensitivity of marine medaka (*Oryzias melastigma*) embryo on different developmental stages to 120# fuel oil [J]. *Marine Environmental Science*, 2019, **38**(1): 16-21.
- [75] Zhang C, Wang J T, Tan L J, *et al.* Toxic effects of nano-ZnO on marine microalgae *Skeletonema costatum*: attention to the accumulation of intracellular Zn [J]. *Aquatic Toxicology*, 2016, **178**: 158-164.
- [76] Yi X L, Zhang K K, Han G R, *et al.* Toxic effect of triphenyltin in the presence of nano zinc oxide to marine copepod *Tigriopus japonicus* [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **243**: 687-692.
- [77] Huang J, Cheng J P, Yi J. Impact of silver nanoparticles on marine diatom *Skeletonema costatum* [J]. *Journal of Applied Toxicology*, 2016, **36**(10): 1343-1354.
- [78] 章哲超, 胡倩, 刘淑霞, 等. 纳米二氧化硅与汞 (Hg<sup>2+</sup>) 对中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 的联合毒性效应 [J]. *环境化学*, 2018, **37**(4): 661-669.  
Zhang Z C, Hu J, Liu S X, *et al.* Effect of nano-SiO<sub>2</sub> on the toxicity of Hg<sup>2+</sup> to *Skeletonema costatum* [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(4): 661-669.
- [79] Zhu Z L, Wang S C, Zhao F F, *et al.* Joint toxicity of microplastics with triclosan to marine microalgae *Skeletonema costatum* [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **246**: 509-517.
- [80] Zhang C, Chen X H, Wang J T, *et al.* Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: interactions between microplastic and algae [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 1282-1288.
- [81] Zhang L, Jiang F H, Kong X F, *et al.* Toxic effect of BDE-47 on the marine alga *Skeletonema costatum*: population dynamics, photosynthesis, antioxidation and morphological changes [J]. *Chemosphere*, 2022, **286**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131674.
- [82] Deng X Y, Hu X L, Cheng J, *et al.* Growth inhibition and oxidative stress induced by 1-octyl-3-methylimidazolium bromide on the marine diatom *Skeletonema costatum* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **132**: 170-177.
- [83] 张偲, 陈晓华, 谭丽菊, 等. 纳米 TiO<sub>2</sub> 对中肋骨条藻和杜氏盐藻的毒性效应研究 [J]. *海洋环境科学*, 2018, **37**(2): 215-220, 227.  
Zhang C, Chen X H, Tan L J, *et al.* Research on toxic effects of nano-TiO<sub>2</sub> on *Skeletonema costatum* and *Dunaliella salina* [J]. *Marine Environmental Science*, 2018, **37**(2): 215-220, 227.
- [84] Zhu Z J, Wu Y P, Xu J T, *et al.* High copper and UVR synergistically reduce the photochemical activity in the marine diatom *Skeletonema costatum* [J]. *Journal of Photochemistry and*

- Photobiology B: Biology, 2019, **192**: 97-102.
- [85] Zhang C, Chen X H, Tan L J, *et al.* Combined toxicities of copper nanoparticles with carbon nanotubes on marine microalgae *Skeletonema costatum* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(13): 13127-13133.
- [86] Yi X L, Wang J F, Li Z C, *et al.* The effect of polystyrene plastics on the toxicity of triphenyltin to the marine diatom *Skeletonema costatum*—influence of plastic particle size [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(25): 25445-25451.
- [87] Dong F, Wang P, Qian W, *et al.* Mitigation effects of CO<sub>2</sub>-driven ocean acidification on Cd toxicity to the marine diatom *Skeletonema costatum* [J]. Environmental Pollution, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113850.
- [88] Li F T, Jiang L L, Zhang T Z, *et al.* Combined effects of seawater acidification and benzo(a) pyrene on the physiological performance of the marine bloom-forming diatom *Skeletonema costatum* [J]. Marine Environmental Research, 2021, **169**, doi: 10.1016/j.marenvres.2021.105396.
- [89] 宋微波, 徐奎栋, 施心路, 等. 原生动物的科研价值 [M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1999.
- [90] Yan Q Y, Yu Y H, Feng W S, *et al.* Genetic diversity of plankton community as depicted by PCR-DGGE fingerprinting and its relation to morphological composition and environmental factors in Lake Donghu [J]. Microbial Ecology, 2007, **54**(2): 290-297.
- [91] Tang D X, Wang X Y, Dong J Y, *et al.* Morpholino-mediated knockdown of ciliary genes in *Euplotes vannus*, a novel marine ciliated model organism [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, **11**, doi: 10.3389/fmicb.2020.549781.
- [92] 王鑫, 王慧. 原生动物的科研价值及应用探究 [J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2013, **29**(1): 79-82.  
Wang X, Wang H. Scientific research value and application of the Protozoa [J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2013, **29**(1): 79-82.
- [93] Twagilimana L, Bohatier J, Groliere C A, *et al.* A new low-cost microbiotest with the protozoan *Spirostomum teres*: culture conditions and assessment of sensitivity of the ciliate to 14 pure chemicals [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1998, **41**(3): 231-244.
- [94] Sauvant N P, Pepin D, Piccinni E. *Tetrahymena pyriformis*: a tool for toxicological studies. A review [J]. Chemosphere, 1999, **38**(7): 1631-1669.
- [95] 赵晓欢. 纳米铜、纳米氧化铜对两种游仆虫的毒性效应研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [96] Ruan Y Y, Dou Y F, Chen J Y, *et al.* Evaluation of phenol-induced ecotoxicity in two model ciliate species: population growth dynamics and antioxidant enzyme activity [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **166**: 176-185.
- [97] Xu H L, Song W B, Warren A. An investigation of the tolerance to ammonia of the marine ciliate *Euplotes vannus* (Protozoa, Ciliophora) [J]. Hydrobiologia, 2004, **519**(1): 189-195.
- [98] Zhou L, Li J Q, Lin X F, *et al.* Use of RAPD to detect DNA damage induced by nitrofurazone in marine ciliate, *Euplotes vannus* (Protozoa, Ciliophora) [J]. Aquatic Toxicology, 2011, **103**(3-4): 225-232.
- [99] Li J Q, Zhou L, Lin X F, *et al.* Characterizing dose-responses of catalase to nitrofurazone exposure in model ciliated protozoan *Euplotes vannus* for ecotoxicity assessment: enzyme activity and mRNA expression [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **100**: 294-302.
- [100] Hong Y Z, Tan Y L, Meng Y, *et al.* Evaluation of biomarkers for ecotoxicity assessment by dose-response dynamic models: Effects of nitrofurazone on antioxidant enzymes in the model ciliated protozoan *Euplotes vannus* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **144**: 552-559.
- [101] 周文礼, 肖慧, 王悠, 等. 3种赤潮藻对褶皱臂尾轮虫的急性毒性效应 [J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3148-3152.  
Zhou W L, Xiao H, Wang Y, *et al.* Acute toxicity effects of three red tide algae on *Brachionus plicatilis* [J]. Environmental Science, 2008, **29**(11): 3148-3152.
- [102] 谢志浩, 肖慧, 蔡恒江, 等. 赤潮藻塔玛亚历山大藻对褶皱臂尾轮虫生活史特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2007, **18**(12): 2865-2869.  
Xie Z H, Xiao H, Cai H J, *et al.* Effects of red tide microalgae *Alexandrium tamarensis* on the life history of rotifer *Brachionus plicatilis* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, **18**(12): 2865-2869.
- [103] 沙婧婧, 王悠, 王鸿, 等. 2种多溴联苯醚 (BDE-47、BDE-209) 对褶皱臂尾轮虫单一和联合毒性效应研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2015, **45**(9): 69-77.  
Sha J J, Wang Y, Wang H, *et al.* Study on single and joint toxic effects of two PBDEs (BDE-47、BDE-209) on rotifer *Brachionus plicatilis* [J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, **45**(9): 69-77.
- [104] 王鸿. BDE-47 胁迫对褶皱臂尾轮虫的生殖毒性效应及基于抗氧化防御系统的机理的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [105] 马会娟. 两种环境激素和聚苯乙烯微 (纳) 塑料对褶皱臂尾轮虫主要生活史参数的影响 [D]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- [106] Arias A, Paxton H, Budaeva N. Redescription and biology of *Diopatra neapolitana* (Annelida: Onuphidae), a protandric hermaphrodite with external spermaducal papillae [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, **174**: 1-17.
- [107] Catalano B, Moltedo G, Martuccio G, *et al.* Can *Hediste diversicolor* (Nereidae, Polychaete) be considered a good candidate in evaluating PAH contamination? A multimarker approach [J]. Chemosphere, 2012, **86**(9): 875-882.
- [108] 刘凌云, 郑光美. 普通动物学 [M]. (第四版). 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [109] 周进, 李新正. 中国海多毛纲动物研究现状及展望 [J]. 海洋科学, 2011, **35**(6): 82-89.  
Zhou J, Li X Z. Analysis and outlook for polychaete studies from China's seas [J]. Marine Sciences, 2011, **35**(6): 82-89.
- [110] 陈斌. 海洋环境微塑料生态效应影响研究 [J]. 环境与发展, 2018, **30**(3): 33, 37.  
Chen B. Study on the ecological effect of marine micro plastics [J]. Environment and Development, 2018, **30**(3): 33, 37.
- [111] 赵美静, 夏斌, 朱琳, 等. 微塑料与有毒污染物相互作用及联合毒性作用研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2021, **16**(5): 168-185.  
Zhao M J, Xia B, Zhu L, *et al.* Research progress on interaction and joint toxicity of microplastics with toxic pollutants [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, **16**(5): 168-185.
- [112] Barboza L G A, Vieira L R, Branco V, *et al.* Microplastics increase mercury bioconcentration in gills and bioaccumulation in the liver, and cause oxidative stress and damage in *Dicentrarchus labrax juveniles* [J]. Scientific Reports, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-34125-z.
- [113] Xia B, Zhang J, Zhao X G, *et al.* Polystyrene microplastics increase uptake, elimination and cytotoxicity of

- decabromodiphenyl ether (BDE-209) in the marine scallop *Chlamys farreri* [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **258**: 113657.
- [114] Li P H, Zou X Y, Wang X D, *et al.* A preliminary study of the interactions between microplastics and citrate-coated silver nanoparticles in aquatic environments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **385**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121601.
- [115] 边林鑫. 微塑料和多环芳烃联合胁迫对双齿围沙蚕的毒性效应研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2022.
- [116] 陈细香, 卢昌义, 叶勇. 重金属 Zn、Pb 和 Cd 对可口革囊星虫的急性毒性作用[J]. *海洋环境科学*, 2007, **26**(5): 455-457.
- Chen X X, Lu C Y, Ye Y. Acute toxicity of zinc, lead and cadmium to *Phascolosoma esculenta*[J]. *Marine Environmental Science*, 2007, **26**(5): 455-457.
- [117] 曾海祥, 竺俊全, 丁理法. 重金属镉和锌对可口革囊星虫的毒性试验[J]. *水利渔业*, 2006, **26**(2): 96-98.
- [118] O'Connor T P. Recent trends in coastal environmental quality: Results from the Mussel Watch Project[M]. Silver Spring: UO Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Office of Ocean Resources Conservation and Assessment, Coastal Monitoring and Bioeffects Assessment Division, 1995.
- [119] O'Connor T P. Trends in chemical concentrations in mussels and oysters collected along the US coast from 1986 to 1993[J]. *Marine Environmental Research*, 1996, **41**(2): 183-200.
- [120] 陈细珍. 基于牡蛎研究厦门湾重金属分布特征、影响因素及相应机制[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [121] 王蕾. 受污染牡蛎对重金属的吸收和排出研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [122] Fagotti A, Di Rosa I, Simoncelli F, *et al.* The effects of copper on actin and fibronectin organization in *Mytilus galloprovincialis* haemocytes[J]. *Developmental & Comparative Immunology*, 1996, **20**(6): 383-391.
- [123] 刘锡尧, 袁东星, 刘丽华, 等. 梯度方法研究燃煤电厂脱硫海水对褶牡蛎 (*Plicatula Gmelin*) 的汞富集及毒性效应[A]. 见: 第六届全国环境化学大会暨环境科学仪器与分析仪器展览会摘要集[C]. 上海: 中国化学会, 2011.
- [124] 施华宏, 黄长江. 有机锡污染与海产腹足类性别畸变[J]. *生态学报*, 2001, **21**(10): 1711-1717.
- Shi H H, Huang C J. Tributyltin (TBT) pollution and imposex in marine gastropod[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(10): 1711-1717.
- [125] 施华宏, 黄长江, 谢文勇. 用疣荔枝螺性畸变监测海洋有机锡污染的方法初探[J]. *海洋环境科学*, 2002, **21**(4): 37-41.
- Shi H H, Huang C J, Xie W Y. Application of imposex in *Thais clavigera* to monitoring of marine organotin compound pollution[J]. *Marine Environmental Science*, 2002, **21**(4): 37-41.
- [126] 江天久, 牛涛. 重金属 Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 和 Zn<sup>2+</sup> 胁迫对近江牡蛎 (*Crassostrea rivularis*) SOD 活性影响研究[J]. *生态环境*, 2006, **15**(2): 289-294.
- Jiang T J, Niu T. Effects of heavy metals on superoxide dismutase (SOD) of *Crassostrea rivularis* [J]. *Ecology and Environment*, 2006, **15**(2): 289-294.
- [127] 刘向东, 王清印, 李永祺, 等. 有机磷农药和多环芳烃对太平洋牡蛎毒性效应的初步研究[J]. *海洋通报*, 2000, **19**(6): 88-90.
- Liu X D, Wang Q Y, Li Y Q, *et al.* Preliminary study of the toxic effects of organic phosphorus pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbons on *Crassostrea gigas*[J]. *Marine Science Bulletin*, 2000, **19**(6): 88-90.
- [128] 杨占宁, 丁光辉, 于源志, 等. 单壁碳纳米管对太平洋牡蛎 (*Crassostrea gigas*) 的毒性效应及生物体防御机制研究[J]. *生态毒理学报*, 2019, **14**(1): 90-98.
- Yang Z N, Ding G H, Yu Y Z, *et al.* Study on Toxicity of single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) to Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) and the defense mechanism involved[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, **14**(1): 90-98.
- [129] 张爱君, 邹洁, 马兆党, 等. 石油污染对牡蛎超显微结构毒性效应的研究[J]. *海洋环境科学*, 2006, **25**(S1): 6-10.
- Zhang A J, Zou J, Ma Z D, *et al.* Research on the toxic effect of petroleum pollution on ultramicroscopic structures of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) [J]. *Marine Environmental Science*, 2006, **25**(S1): 6-10.
- [130] Teng J, Zhao J M, Zhu X P, *et al.* Oxidative stress biomarkers, physiological responses and proteomic profiling in oyster (*Crassostrea gigas*) exposed to microplastics with irregular-shaped PE and PET microplastic[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **786**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147425.
- [131] Cao R W, Liu Y L, Wang Q, *et al.* Seawater acidification aggravated cadmium toxicity in the oyster *Crassostrea gigas*: metal bioaccumulation, subcellular distribution and multiple physiological responses[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 809-823.
- [132] Paredes E. Biobanking of a marine invertebrate model organism: the sea urchin[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2016, **4**(1), doi: 10.3390/jmse4010007.
- [133] Boudouresque C F, Verlaque M. Ecology of *Paracentrotus lividus* [J]. *Developments in Aquaculture and Fisheries Science*, 2001, **32**: 177-216.
- [134] 廖玉麟. 海胆生物学概况[J]. *水产科学*, 1982, (3): 1-8.
- [135] 宋俊, 余树培. 模式生物的研究[J]. *科技创新导报*, 2012, (30): 13-14.
- [136] Nacci D, Jackin E, Walsh R. Comparative evaluation of three rapid marine toxicity tests: sea urchin early embryo growth test, sea urchin sperm cell toxicity test and Microtox [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1986, **5**(6): 521-525.
- [137] Dinnel P A, Link J M, Stober Q J, *et al.* Comparative sensitivity of sea urchin sperm bioassays to metals and pesticides [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1989, **18**(5): 748-755.
- [138] Beiras R, Fernández N, Bellas J, *et al.* Integrative assessment of marine pollution in Galician estuaries using sediment chemistry, mussel bioaccumulation, and embryo-larval toxicity bioassays[J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(7): 1209-1224.
- [139] Paredes E, Bellas J. The use of cryopreserved sea urchin embryos (*Paracentrotus lividus*) in marine quality assessment [J]. *Chemosphere*, 2015, **128**: 278-283.
- [140] Berdyshev E V, Vaskovsky V E, Vaschenko M A. Sea urchins—a new model for PAF research in embryology [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 1995, **110**(3): 629-632.
- [141] Chapman G A, Denton D L, Lazorchak J M. Short-term methods for estimating the chronic toxicity of effluents and receiving waters to west coast marine and estuarine organisms [R]. Cincinnati: National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, 1995.
- [142] Hibino T, Loza-Coll M, Messier C, *et al.* The immune gene

- repertoire encoded in the purple sea urchin genome [J]. *Developmental Biology*, 2006, **300**(1): 349-365.
- [143] Pederson T. The sea urchin's siren[J]. *Developmental Biology*, 2006, **300**(1): 9-14.
- [144] Rial D, Radović J R, Bayona J M, *et al.* Effects of simulated weathering on the toxicity of selected crude oils and their components to sea urchin embryos[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **260**: 67-73.
- [145] Rial D, Vázquez J A, Murado M A. Toxicity of spill-treating agents and oil to sea urchin embryos[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 302-308.
- [146] Sodergren E, Weinstock G M, Davidson E H, *et al.* The genome of the sea urchin *Strongylocentrotus purpuratus* [J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 941-952.
- [147] Borges J C S, Branco P C, Pressinotti L N, *et al.* Intranuclear crystalloids of Antarctic sea urchins as a biomarker for oil contamination[J]. *Polar Biology*, 2010, **33**(6): 843-849.
- [148] 刚猛. 石油烃污染对海洋模式生物海胆的分子毒理效应及机制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [149] 段美娜. 沉底重燃油污染对底栖生物海胆的跨代毒性效应及机制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- [150] 段美娜, 刘泳江, 白雪, 等. 海底重燃油对海胆繁殖及其子代发育的影响[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(12): 4720-4729.
- Duan M N, Liu Y J, Bai X, *et al.* Exposure of adult sea urchins to sunken heavy fuel oil affects the reproductive status and the development of their offspring[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(12): 4720-4729.
- [151] 王翠翠. 久效磷农药对马粪海胆 (*Hemicentrotus pulcherrimus*) 多巴胺能神经系统发育的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [152] 李娇, 王姮, 韩昭衡, 等. 8 种常见农药对海胆胚胎各发育期的急性毒性[J]. *生态毒理学报*, 2010, **5**(2): 255-261.
- Li J, Wang H, Han Z H, *et al.* Acute toxicity of eight pesticides on the development of sea urchin embryos[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2010, **5**(2): 255-261.
- [153] Huys R, Boxshall G A. *Copepod evolution*[M]. London: Ray Society, 1991.
- [154] Wells P G. Marine ecotoxicological tests with zooplankton[A]. In: *Proceedings of the International Symposium on Ecotoxicological Testing for the Marine Environment* [C]. Ghent: University Gent, 1984. 215-256.
- [155] Hicks G R F, Coull B C. The ecology of marine meiobenthic harpacticoid copepods[J]. *Oceanography and Marine Biology*, 1983, **21**: 67-175.
- [156] Takeda N. Sex determination and sex differentiation in the marine copepod, *Tigriopus japonicus* Mori. I. The influence of potassium chlorate. (A preliminary note) [J]. *Zoological Society of Japan*, 1939, **51**: 1-13.
- [157] Gusmão L F M, McKinnon A D. Sex ratios, intersexuality and sex change in copepods [J]. *Journal of Plankton Research*, 2009, **31**(9): 1101-1117.
- [158] 曾艳艺, 黄小平. 日本虎斑猛水蚤的重金属急性毒性及其作为标准测试生物的潜在意义[J]. *生态毒理学报*, 2011, **6**(2): 182-188.
- Zeng Y Y, Huang X P. Acute toxicity of heavy metals to *Tigriopus japonicus* and its implication as a standard test animal [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, **6**(2): 182-188.
- [159] Raisuddin S, Kwok K W H, Leung K M Y, *et al.* The copepod *Tigriopus*: a promising marine model organism for ecotoxicology and environmental genomics[J]. *Aquatic Toxicology*, 2007, **83**(3): 161-173.
- [160] 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 [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **51**(8-12): 830-837.
- [161] Li Y, Wang W X, Wang M H. Alleviation of mercury toxicity to a marine copepod under multigenerational exposure by ocean acidification[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-00423-1.
- [162] Wang M H, Lee J S, Li Y. Global proteome profiling of a marine copepod and the mitigating effect of ocean acidification on mercury toxicity after multigenerational exposure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(10): 5820-5831.
- [163] Chen L Y, Li X L, Hong H Z, *et al.* Multigenerational effects of 4-methylbenzylidene camphor (4-MBC) on the survival, development and reproduction of the marine copepod *Tigriopus japonicus*[J]. *Aquatic Toxicology*, 2018, **194**: 94-102.
- [164] Hong H Z, Wang J X, Shi D L. Effects of salinity on the chronic toxicity of 4-methylbenzylidene camphor (4-MBC) in the marine copepod *Tigriopus japonicus* [J]. *Aquatic Toxicology*, 2021, **232**, doi: 10.1016/j.aquatox.2021.105742.
- [165] 王晶, 庄昉筠, 陈洪举, 等. 甲氨基阿维菌素苯甲酸酯对海洋桡足类日本虎斑猛水蚤的急性毒性效应[J]. *生态毒理学报*, 2019, **14**(5): 202-211.
- Wang J, Zhuang J Y, Chen H J, *et al.* Acute and chronic toxicity of emamectin benzoate on marine copepod *Tigriopus japonicus* Mori[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, **14**(5): 202-211.
- [166] 田冰心, 吴荔生, 王桂忠. nTiO<sub>2</sub> 与非、苊对日本虎斑猛水蚤联合毒性的研究[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2013, **18**(4): 241-245.
- Tian B X, Wu L S, Wang G Z. The joint toxicity of nTiO<sub>2</sub> nanoparticles with phenanthrene and pyrene to *Tigriopus japonicus*[J]. *Journal of Jimei University (Natural Science)*, 2013, **18**(4): 241-245.
- [167] Yi X L, Chi T T, Liu B, *et al.* Effect of nano zinc oxide on the acute and reproductive toxicity of cadmium and lead to the marine copepod *Tigriopus japonicus* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2019, **222**: 118-124.
- [168] Hong H Z, Lv D M, Liu W X, *et al.* Toxicity and bioaccumulation of three hexabromocyclododecane diastereoisomers in the marine copepod *Tigriopus japonicus*[J]. *Aquatic Toxicology*, 2017, **188**: 1-9.
- [169] Li H Y, Shi L, Wang D Z, *et al.* Impacts of mercury exposure on life history traits of *Tigriopus japonicus*: multigeneration effects and recovery from pollution[J]. *Aquatic Toxicology*, 2015, **166**: 42-49.
- [170] Xu X Q, Shi L, Wang M H. Comparative quantitative proteomics unveils putative mechanisms involved into mercury toxicity and tolerance in *Tigriopus japonicus* under multigenerational exposure scenario [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 1287-1297.
- [171] Wang M H, Zhang C, Lee J S. Quantitative shotgun proteomics associates molecular-level cadmium toxicity responses with compromised growth and reproduction in a marine copepod under multigenerational exposure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(3): 1612-1623.
- [172] Zhang C, Jeong C B, Lee J S, *et al.* Transgenerational

- proteome plasticity in resilience of a marine copepod in response to environmentally relevant concentrations of microplastics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(14): 8426-8436.
- [173] Light S F. Amphioxus fisheries near the University of Amoy, China[J]. *Science*, 1923, **58**(1491): 57-60.
- [174] 金德祥, 郭仁强. 厦门的文昌鱼[J]. *动物学报*, 1953, **5**(1): 65-78.
- [175] 黄展胜, 郁建拴, 苏循荣, 等. 铬对文昌鱼的毒性效应和生长的影响[J]. *海洋环境科学*, 1990, **9**(3): 22-26.
- [176] 白秀娟, 卢伙胜, 冯波. 3种重金属离子对文昌鱼幼体的急性毒性[J]. *水生态学杂志*, 2013, **34**(3): 81-84.
- Bai X J, Lu H S, Feng B. Acute toxicity of three heavy metal ions on larva of *Branchiostoma belcheri* [J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, **34**(3): 81-84.
- [177] Kong R Y C, Giesy J P, Wu R S S, *et al.* Development of a marine fish model for studying in vivo molecular responses in ecotoxicology[J]. *Aquatic Toxicology*, 2008, **86**(2): 131-141.
- [178] Ishikawa Y. Medakafish as a model system for vertebrate developmental genetics[J]. *BioEssays*, 2000, **22**(5): 487-495.
- [179] Inoue K, Takei Y. Diverse adaptability in *Oryzias* species to high environmental salinity[J]. *Zoological Science*, 2002, **19**(7): 727-734.
- [180] Chen X P, Li L, Wong C K C, *et al.* Rapid adaptation of molecular resources from zebrafish and medaka to develop an estuarine/marine model[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2009, **149**(4): 647-655.
- [181] Kinoshita M, Murata K, Naruse K, *et al.* Medaka: biology, management, and experimental protocols[M]. Ames: John Wiley & Sons, 2009.
- [182] Chen X P, Li L, Cheng J P, *et al.* Molecular staging of marine medaka: a model organism for marine ecotoxicity study[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **63**(5-12): 309-317.
- [183] Hong H Z, Shen R, Liu W X, *et al.* Developmental toxicity of three hexabromocyclododecane diastereoisomers in embryos of the marine medaka *Oryzias melastigma* [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **101**(1): 110-118.
- [184] Hong H Z, Zhao Y C, Huang L M, *et al.* Bone developmental toxicity of organophosphorus flame retardants TDCIPP and TPHP in marine medaka *Oryzias melastigma* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **223**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112605.
- [185] Yin X H, Liu Y, Zeb R, *et al.* The intergenerational toxic effects on offspring of medaka fish *Oryzias melastigma* from parental benzo[a]pyrene exposure via interference of the circadian rhythm [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115437.
- [186] 景丹丹, 龚一富, 张燕, 等. 铅暴露对大弹涂鱼 (*Boleophthalmus pectinirostris*) 组织形态的影响[J]. *生物学杂志*, 2017, **34**(4): 29-32.
- Jing D D, Gong Y F, Zhang Y, *et al.* Effects of  $Pb^{2+}$  on tissue structure of liver, intestines and spleen in mudskipper *Boleophthalmus pectinirostris*[J]. *Journal of Biology*, 2017, **34**(4): 29-32.
- [187] 刘冰, 周忠良. 镉对弹涂鱼肝细胞超微结构影响的初步观察[J]. *水产学报*, 2007, **31**(S1): 29-33.
- Liu B, Zhou Z L. Effects of cadmium on the ultrastructure of hepatic cells of *Periophthalmus modestus* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2007, **31**(S1): 29-33.
- [188] 上官旖旎, 赵金龙, 陈婷, 等. 对二甲苯对大弹涂鱼肝脏和白肌抗氧化酶活性的影响[J]. *水产科学*, 2011, **30**(1): 6-10.
- Shangguan Y N, Zhao J L, Chen T, *et al.* Effects of p-Xylene on antioxidant enzymes in liver and white muscle of *Boleophthalmus pectinirostris*[J]. *Fisheries Science*, 2011, **30**(1): 6-10.
- [189] Bo J, Gopalakrishnan S, Fan D Q, *et al.* Benzo[a]pyrene modulation of acute immunologic responses in red sea bream pretreated with lipopolysaccharide [J]. *Environmental Toxicology*, 2014, **29**(5): 517-525.
- [190] Cui Q, Chen F Y, Zhang M, *et al.* Transcriptomic analysis revealing hepcidin expression in *Oryzias melastigma* regulated through the JAK-STAT signaling pathway upon exposure to BaP [J]. *Aquatic Toxicology*, 2019, **206**: 134-141.
- [191] Cui Q, Chen F Y, Chen H Y, *et al.* Benzo[a]pyrene (BaP) exposure generates persistent reactive oxygen species (ROS) to inhibit the NF- $\kappa$ B pathway in medaka (*Oryzias melastigma*) [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **251**: 502-509.
- [192] Qiu W H, Yang M, Liu S, *et al.* Toxic effects of bisphenol S showing immunomodulation in fish macrophages [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(2): 831-838.
- [193] Zhang M, Zhang M F, Chen F Y, *et al.* The transcriptional regulation of an antimicrobial peptide hepcidin1 in *Oryzias melastigma* upon EE2 exposure involved in a new pathway with a novel transcriptional regulatory element HepERE [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018, **82**: 421-431.
- [194] 杜雨珊. 聚氯乙烯微塑料对海水青鲮胚胎的毒性效应[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- [195] Wang Y Y, Wang D Z, Lin L, *et al.* Quantitative proteomic analysis reveals proteins involved in the neurotoxicity of marine medaka *Oryzias melastigma* chronically exposed to inorganic mercury[J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1126-1133.

## CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management .....	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment .....	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters .....	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring .....	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water .....	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University .....	..... HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review .....	..... LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils .....	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China .....	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China .....	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH <sub>3</sub> Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020 .....	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary .....	..... CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach .....	..... YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay .....	..... QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province .....	..... YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen .....	..... PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn <sup>2+</sup> by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters .....	..... ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS .....	..... XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes .....	..... XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019 .....	..... FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley .....	..... CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM <sub>2.5</sub> Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas .....	..... QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China .....	..... SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed .....	..... CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season .....	..... LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau .....	..... LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope .....	..... ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir .....	..... HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation .....	..... WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems .....	..... ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions .....	..... DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis .....	..... TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis .....	..... LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China .....	..... SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N <sub>2</sub> O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions .....	..... TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis .....	..... LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model .....	..... GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS .....	..... ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd <sup>2+</sup> Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area .....	..... WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils .....	..... LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil .....	..... ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L. ....	..... SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing .....	..... FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios .....	..... HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region .....	..... XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity .....	..... CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes .....	..... SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction .....	..... LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China .....	..... HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2+26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings .....	..... YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China .....	..... LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)