

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20190131003

董雪纯, 魏海峰, 刘长发. 苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽对皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)早期发育的毒性研究[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(5): 212-218
Dong X C, Wei H F, Liu C F. Toxicity of benzo [a] pyrene and 9, 10-dimethylanthracene on early development of *Haliotis discus hannai* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(5): 212-218 (in Chinese)

苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽对皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)早期发育的毒性研究

董雪纯^{1,2}, 魏海峰^{1,2,*}, 刘长发^{1,2}

1. 辽宁省近岸海洋环境科学与技术重点实验室, 大连 116023

2. 大连海洋大学, 大连 116023

收稿日期: 2019-01-31 录用日期: 2019-05-21

摘要: 为探究海洋中多环芳烃(PAHs)对海洋生物的毒性作用,以皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)为受试生物,采用半静水式实验方式,探讨了2种多环芳烃苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽对皱纹盘鲍早期发育的毒性效应。在不同浓度的苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽作用下,观察皱纹盘鲍的卵子受精率、胚胎发育时间和幼体死亡率。结果表明,高浓度的多环芳烃处理组与对照组相比,卵子的受精率显著降低,胚胎发育时间和幼体死亡率显著增加,与处理浓度之间存在显著的剂量-效应关系($P < 0.05$)。3~12 d中,苯并[a]芘对皱纹盘鲍幼体的 LC_{10} 分别为11.6、8.18、7.67和7.66 $mg \cdot L^{-1}$,9,10-二甲基蒽对皱纹盘鲍幼体的 LC_{10} 分别为14.91、14.11、12.82和9.64 $mg \cdot L^{-1}$ 。苯并[a]芘毒性大于9,10-二甲基蒽。

关键词: 苯并[a]芘;9,10-二甲基蒽;皱纹盘鲍;毒性作用; LC_{10}

文章编号: 1673-5897(2019)5-212-07 中图分类号: X522 文献标识码: A

Toxicity of Benzo [a] pyrene and 9, 10-Dimethylanthracene on Early Development of *Haliotis discus hannai*

Dong Xuechun^{1,2}, Wei Haifeng^{1,2,*}, Liu Changfa^{1,2}

1. Key Laboratory of Nearshore Marine Environmental Research, Dalian 116023, China

2. Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

Received 31 January 2019 accepted 21 May 2019

Abstract: In order to study the ecotoxicological impact of marine polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollutants on *Haliotis discus hannai*, the toxic effects of benzo [a] pyrene and 9,10-dimethylanthracene on the early development of *Haliotis discus hannai* were investigated under semi-static conditions. The effects of benzo [a] pyrene and 9,10-dimethylanthracene on the ovum fertilization rate, embryo development time and infant mortality were observed in different concentrations. The results showed that, compared with the blank control group, the fertilization rate in the PAHs treatment groups with different concentrations were significantly reduced, and the embryonic de-

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201305002, 201305043); 国家海洋局海洋溢油鉴别与损害评估技术重点实验室开放课题(201309, 201809); 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室经费(201013); 辽宁省教育厅服务地方项目(2017); 大连海洋大学农业农村部北方海水增殖重点实验室基金项目(2018-KF-21); 国家重点研发计划项目“辽东湾污染防治与生态环境修复关键技术研究”(2019YFC1407700)

作者简介: 董雪纯(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋生态毒理学, E-mail: 1099107645@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: weihafeng@dlou.edu.cn

velopment time and infant mortality were significantly increased, showing a significant dose-effect relationship with the treatment concentration ($P < 0.05$). During the 3 ~ 12 d treatment, the LC_{10} of benzo [a] pyrene were 11.6, 8.18, 7.67 and 7.66 $mg \cdot L^{-1}$, while that of 9,10-dimethylanthracene were 14.91, 14.11, 12.82 and 9.64 $mg \cdot L^{-1}$. The toxicity of benzo [a] pyrene was higher than that of 9,10-dimethyl anthracene.

Keywords: benzo [a] pyrene; 9,10-dimethylanthracene; *Haliotis discus hannai*; toxic effect; LC_{10}

多环芳烃(PAHs)作为化工溶剂广泛应用于化工行业中,是石油及其副产品的重要组成成分,近年来,由于工业活动日益频繁,导致水生生态系统中多环芳烃的含量日益增加^[1]。随着海洋石油运输、石油开发、海洋溢油和沿海石油化工业的快速发展,多环芳烃易进入水体,进而破坏海洋生态系统的平衡,威胁水生生物和人类的健康^[2]。多环芳烃致畸、致癌和致突变的特性显著^[3],生物毒性极强,由此引发的近岸海洋生态环境危害引起社会和学者广泛关注。各国都将其列为水环境优先控制的污染物之一^[4],我国的《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)、《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)、《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)都将其列为环境调查项目和污染参数。目前,国内外关于多环芳烃的研究主要集中在大气、土壤、淡水和沉积物中,对于海洋中多环芳烃的研究主要集中在水生动植物多环芳烃的检测等方面,因此,在多环芳烃对水生生物生态毒性方面开展更深层次的探讨,对研究多环芳烃对我国海洋环境危害方面具有重大意义^[5-6]。

皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*),属于原始腹足目,腹足纲。在我国鲍类养殖的总产量中占有主导地位,是我国北方海域一种重要的海洋养殖经济种类。作为海洋中的珍品,皱纹盘鲍肉质鲜美,营养丰富,有多种医用功效和抗癌作用,食用和药用价值极高^[7]。目前,关于皱纹盘鲍的研究集中在有害藻华对鲍的急性毒性影响^[8],温度变化对鲍的生理活动影响机制^[9],不同光照对皱纹盘鲍生长和存活的影响^[10],分析鲍自身的免疫相关基因对鲍死亡的影响,研究相关病害的治疗和防护关系等方面^[11]。本实验以皱纹盘鲍为研究对象,采用半静水式实验方式,研究不同浓度苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽作用下皱纹盘鲍的卵子受精率、胚胎发育时间和幼体死亡率的差异。为探究皱纹盘鲍对多环芳烃污染的耐受能力,保护海洋生态环境和海洋养殖业以及科学制定多环芳烃的水环境质量标准,评估多环芳烃对海洋环境和水生生物质量安全的风险提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 实验材料

实验皱纹盘鲍购自大连海宝渔业有限公司,挑选健康的个体,壳长8~9 cm,实验海水为大连黑石礁海域的砂滤海水,每24 h定时换水,投喂鲍鱼体重30%的海带,24 h持续微充气。实验过程中水体控制在水温(20 ± 1) $^{\circ}C$,盐度30~31, pH 8.1~8.2,溶解氧保持在6 $mg \cdot L^{-1}$ 以上。从中挑选性腺饱满的个体,进行阴干、紫外线照射、海水刺激,获得精子、卵子用于后续实验。

苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽,纯度大于96%,购自Sigma公司;丙酮(纯度99.5%)、过氧化氢(体积分数为30%)和三羟甲基氨基甲烷购自国药集团化学试剂有限公司。

苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽用丙酮作助溶剂配制成高浓度的储备液,实验时根据需要,向实验海水中添加不同体积的储备液稀释至实验所需的不同多环芳烃浓度。

1.2 实验方法

1.2.1 2种多环芳烃对鲍鱼受精率的影响

受精率毒性实验在1 L玻璃烧杯中进行,根据预实验的结果,分别确定苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽的实验浓度范围,设置为0.1、0.5、1、5、10和20 $\mu g \cdot L^{-1}$ 处理组,并设置空白对照组和丙酮助溶剂对照组,其中丙酮浓度为1‰,每组设置3个平行样,实验条件与培养条件相同。卵子的密度约为50个 $\cdot mL^{-1}$,精子密度约为50万个 $\cdot mL^{-1}$,每个实验组的溶液共加入500 mL。持续搅拌均匀,镜检空白对照组的卵子受精率大于90%时,取样观察并计算各处理组的卵子的受精率。

1.2.2 2种多环芳烃对鲍鱼胚胎幼体的影响

实验过程中水体控制在与培养条件相同的条件下,在胚胎生长发育阶段进行避光培养,不曝气,不投饵。经预实验,分别确定苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽的实验浓度范围,按等对数间距法设置4个质量浓度梯度组,并设一个空白对照组和一个助溶剂对照组(丙酮),每个处理组设立3个平行实验。苯并

[a]芘和 9,10-二甲基蒽浓度设置为 0.1、0.5、1 和 5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,持续处理 5 d,空白对照组胚胎发育至匍匐幼体期,取样进行镜检,记录各处理组皱纹盘鲍从担轮幼体期到匍匐幼体期的各个发育时期胚胎所需时间的差异。

根据预实验结果,遵循相关的养殖以及毒性试验方法标准,苯并[a]芘实验组浓度设置为 1、5、10 和 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;9,10-二甲基蒽实验组浓度设置为 1、5、10 和 50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。各处理组持续处理 12 d,3~12 d 中每天下午 3 点对各处理组进行检查,记录各处理组中鲍鱼幼体的死亡数,计算幼体死亡率,及时清除死亡个体(死亡判定标准为在显微镜下观察心跳停止为死亡^[12])。

1.3 数据统计与分析

采用 Excel 2010 软件对实验数据进行处理,求出死亡率和 2 种多环芳烃浓度对数的回归方程,分别计算每组的 LC_{10} 。

实验结果采用 SPSS 19.0 分析软件进行单因素

方差分析,分析处理组和对对照组之间的差异,在数据处理中,采用 T-test 检验, $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 时表示差异显著,以“*”、“**”表示。

2 结果(results)

2.1 多环芳烃对种鲍受精的影响

苯并[a]芘和 9,10-二甲基蒽对皱纹盘鲍卵子受精率的影响结果如图 1 和图 2 所示,浓度为 0.5、1、5、10 和 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的苯并[a]芘处理组中受精率显著下降($P<0.05$),其他处理组与空白对照组相比无显著差异变化;浓度为 0.1、0.5、1、5、10 和 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 9,10-二甲基蒽处理组与空白对照组相比受精率显著下降($P<0.05$)。这表明,苯并[a]芘和 9,10-二甲基蒽高浓度处理组对皱纹盘鲍卵子的受精有显著抑制作用,浓度越高抑制作用越显著,呈明显的剂量-效应关系。丙酮对照组与空白对照组的受精率无显著变化($P=0.225>0.05$),表明丙酮助溶剂对照组可代替空白对照组。

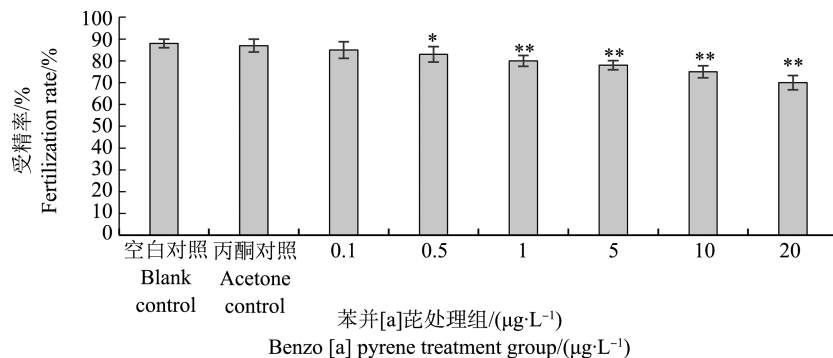


图1 不同浓度苯并[a]芘作用下皱纹盘鲍的受精率

注: * $P<0.05$ 、** $P<0.01$ 表示与对照组相比,差异显著;下同。

Fig. 1 Fertilization rate of abalone under the treatment of benzo [a] pyrene at different concentrations

Note: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ mean significant difference compared with the control; the same below.

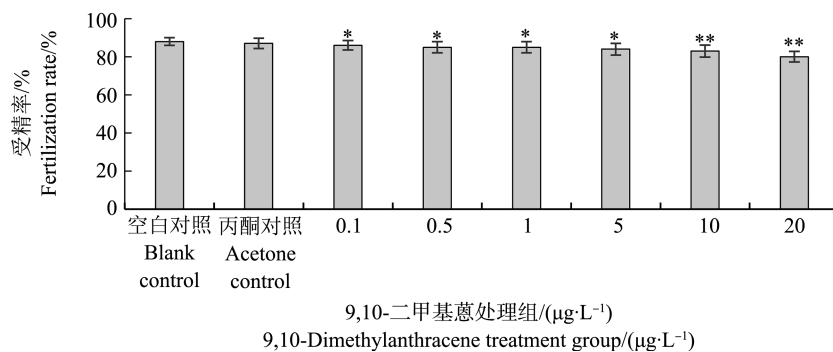


图2 不同浓度 9,10-二甲基蒽作用下皱纹盘鲍的受精率

Fig. 2 Fertilization rate of abalone under the treatment of 9,10-dimethylanthracene at different concentrations

2.2 多环芳烃对皱纹盘鲍胚胎发育的影响

多环芳烃对皱纹盘鲍胚胎的毒性作用主要表现为,胚胎发育时间延迟,胚胎的生长受到抑制作用。如图3和图4所示,经0.1、0.5、1和5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽处理后皱纹盘鲍的胚胎发育时间延长。对比于空白对照组,0.1、0.5、1和5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的苯并[a]芘和0.5、1和5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的9,10-二甲基蒽组的皱纹盘鲍胚胎发育时间显著增加($P<0.05$)。并且随着处理浓度的升高,皱纹盘鲍胚胎发育时间延长,呈明显的剂量-效应关系。

2.3 2种多环芳烃对皱纹盘鲍幼体的慢性毒性

由图5和图6可知,不同浓度的苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽对皱纹盘鲍作用3~12 d后的死亡率。随着苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽处理浓度的升高,皱纹盘鲍幼体死亡率升高,呈剂量-效应关系。10、20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的苯并[a]芘处理组与对照组相比,死亡率在6 d之后达到最高(此时死亡率接近100%),苯并[a]芘5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组与对照组相比,死亡率在8 d之后达到最高(此时死亡率接近100%)。9,10-二甲基蒽各浓度组的死亡率明显低于苯并[a]芘各浓度组。可推测苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽对皱纹盘鲍幼体的毒性影响存在差异,实验进行6 d后,苯并[a]芘的高浓度处理组大多数鲍鱼幼体全部死亡,说明苯并[a]芘对皱纹盘鲍的毒性作用高于9,10-二甲基蒽,长时间作用下对皱纹盘鲍的影响更大。

丙酮对照组和空白对照组的 T-test 检验参数 $P=0.3>0.05$,可知丙酮对照组和空白对照组死亡率没有显著差异。与空白对照做 T-test 分析,1、5、10 和

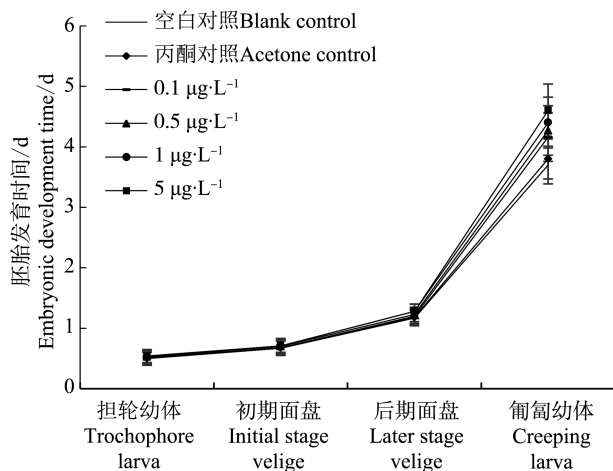


图3 苯并[a]芘作用下皱纹盘鲍胚胎发育时间

Fig. 3 Development time of abalone embryos under the treatment of benzo [a] pyrene

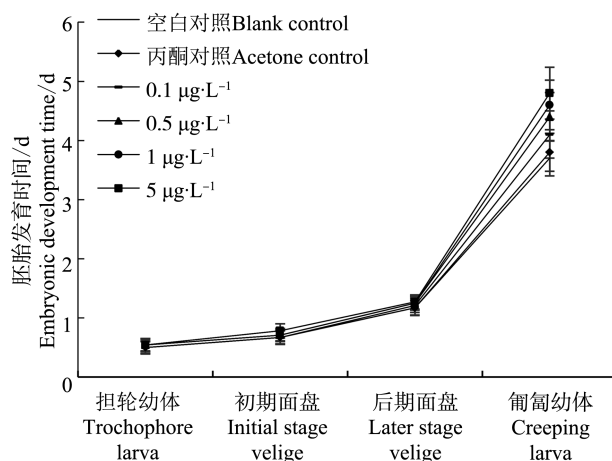


图4 9,10-二甲基蒽作用下皱纹盘鲍胚胎的发育时间

Fig. 4 Development time of abalone embryos under the treatment of 9,10-dimethylanthracene

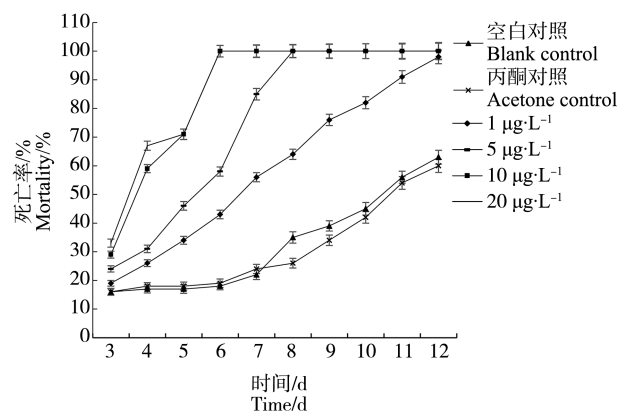


图5 不同浓度苯并[a]芘作用下皱纹盘鲍的死亡率

Fig. 5 Mortality of abalone under the treatment of different concentrations of benzo [a] pyrene

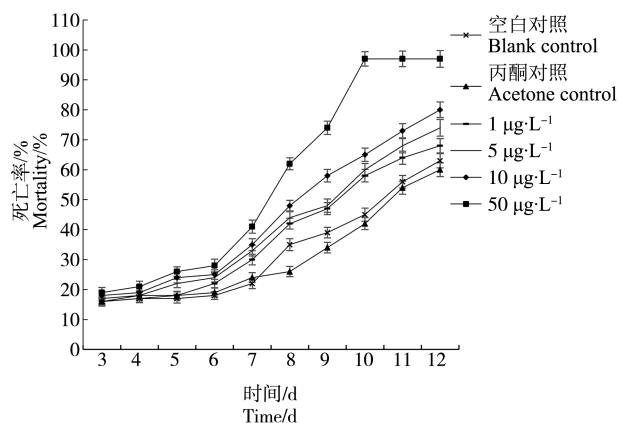


图6 不同浓度9,10-二甲基蒽作用下皱纹盘鲍的死亡率

Fig. 6 Mortality of abalone under the treatment of different concentrations of 9,10-dimethylanthracene

20 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的苯并[a]芘和 1、5、10 和 50 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 9,10-二甲基蒽处理组均表现为 $P<0.05$, 可知各组与空白对照组均有显著差异。

2.4 2 种多环芳烃对皱纹盘鲍幼体的 LC_{10} 值

不同剂量的苯并[a]芘和 9,10-二甲基蒽对皱纹盘鲍幼体 LC_{10} 结果详见表 1。苯并[a]芘对皱纹盘鲍幼体在 1、5、10 和 20 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 LC_{10} 分别为 11.6、8.18、7.67 和 7.66 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 9,10-二甲基蒽对皱纹盘鲍幼体在 1、5、10 和 50 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 LC_{10} 分别为 14.91、14.11、12.82 和 9.64 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。苯并[a]芘毒性大于 9,10-二甲基蒽。

3 讨论 (Discussion)

海洋环境中多环芳烃有机污染物主要来源于海洋溢油事故和沿海石油化工业的废水排放,对海洋生物生存和自然资源造成了严重破坏,已被列为我国环境优先控制污染物名单^[13-14]。根据原国家环保局 1986 制订的《生物技术检测规范(水环境部分)》标准(剧毒: $\text{LC}_{50} \leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 高毒: $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \text{LC}_{50} \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 中毒: $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \text{LC}_{50} \leq 10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 低毒: $\text{LC}_{50} > 10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 苯并[a]芘和 9,10-二甲基蒽均具有致毒性, 苯并[a]芘毒性较大。本实验研究表明, 各处理组的皱纹盘鲍随苯并[a]芘和 9,10-二甲基蒽处理组浓度的增加和暴露时间的延长, 卵子的受精率显著降低, 胚胎发育时间和幼体死亡率显著增加, 与处理浓度之间存在显著的剂量-效应关系, 多环芳烃浓度越高, 作用时间越长, 对皱纹

盘鲍的早期发育影响越大。在对于多环芳烃对条纹锯鲷(*Centropristis striata*)胚胎发育及早期仔鱼的毒性研究中发现, 随着多环芳烃浓度的增加, 受精卵的孵化率降低, 畸形指数和仔鱼死亡率增加, 表现出的剂量-效应关系, 这与本研究的结果相一致^[15]。通常对照组死亡率不应该超过 10%, 但在本实验中对对照组幼体死亡率偏高, 推测可能是因为皱纹盘鲍幼体对环境的适应能力较差, 也有可能是因为在培养过程中, 皱纹盘鲍幼体对于海水中营养物质产生相互竞争, 亦或由于天气原因或环境温度过高等造成皱纹盘鲍死亡^[16-17]。

我国有关多环芳烃对海洋鲍类的生殖毒性作用的研究表明, 胚胎和幼体是海洋生物对环境污染最为敏感的时期, 关于胚胎和幼体的研究将更直观地反映海洋受污染的现状^[18], 因此, 本实验选择皱纹盘鲍的早期发育阶段。前人研究发现, 苯并[a]芘、菲和蒽对鱼类胚胎不同发育阶段的生理学和形态学的损伤作用不同^[19]; 选取苯并[a]芘对双齿围沙蚕(*Pernereis aibuhitensis*)的 3 刚节疣足幼体进行急性毒性实验, 发现苯并[a]芘会引起虫体的畸形, 影响沙蚕幼体的发育^[20]; 苯使太平洋鲱鱼(*Clupea harengus pallasii*)胚胎和幼虫胚胎组织生长减缓, 胚胎耗氧量增加, 影响后期代谢作用^[21]。高浓度的二甲苯导致斑马鱼(*Brachydanio rerio*)胚胎孵化率降低, 胚胎死亡率升高, 发育畸形, 幼鱼的运动速度减慢^[22]。在本实验浓度范围内, 苯并[a]芘和 9,10-二甲基蒽对皱纹盘鲍幼体有毒性损伤作用, 幼体甚至发生死亡。

表 1 苯并[a]芘和 9,10-二甲基蒽对鲍鱼幼体发育的回归方程和 LC_{10} 浓度
Table 1 Regression equation and 10% lethal concentration of benzo [a] pyrene and 9,10-dimethylanthracene on the development of abalone larvae

多环芳烃 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)	浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$ Concentration/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	回归方程 Regression equation	r^2	$\text{LC}_{10}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
苯并[a]芘 Benzo [a] pyrene	1	$Y=0.0917x+0.0847$	0.9957	9.98
	5	$Y=0.0956x+0.218$	0.8489	8.18
	10	$Y=0.0649x+0.502$	0.6235	7.67
	20	$Y=0.0584x+0.5527$	0.6035	7.66
9,10-二甲基蒽 9,10-Dimethylanthracene	1	$Y=0.0657x+0.0207$	0.9578	14.91
	5	$Y=0.0688x+0.0293$	0.9642	14.11
	10	$Y=0.0759x+0.0273$	0.9649	12.82
	50	$Y=0.1059x-0.0207$	0.9347	9.64

注: r 为相关系数; Y 为死亡率; X 为多环芳烃浓度对数。
Note: r is the correlation coefficient; Y is the mortality rate; X is the logarithm of PAHs concentration.

本实验皱纹盘鲍胚胎和幼体在暴露于苯并[a]芘和9,10-二甲基蒽后,随暴露时间的延长和暴露浓度的升高受精率显著降低,胚胎发育时间和幼体死亡率显著增加,存在显著的剂量-效应关系。关于PAHs对皱纹盘鲍胚胎和幼体产生毒性作用的机理是否与鱼类胚胎或者其他海洋无脊椎动物的致毒机理一致,有必要进一步深入研究。

通讯作者简介:魏海峰(1978—),男,硕士,副教授,研究方向为海洋环境毒理学。

参考文献(References):

- [1] Engraff M, Solere C, Smith K E C, et al. Aquatic toxicity of PAHs and PAH mixtures at saturation to benthic amphipods: Linking toxic effects to chemical activity [J]. *Aquatic Toxicology*, 2011, 102(3-4): 142-149
- [2] 孙闰霞, 林钦, 柯常亮, 等. 海洋生物体多环芳烃污染残留及其健康风险评估研究[J]. *南方水产科学*, 2012, 8(3): 71-78
- Sun R X, Lin Q, Ke C L, et al. Review of assessment on residual contamination and health risk of PAHs in marine organisms [J]. *South China Fisheries Science*, 2012, 8(3): 71-78 (in Chinese)
- [3] Niño L R, Torres R J, Mozeto A A, et al. Using urban streams as drinking water: The potential risk in respect to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) content in sediments [J]. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2014, 34(5): 518-531
- [4] 李晓静, 于玉玲, 马莉, 等. 太湖胥口湾表层水和沉积物中多环芳烃的浓度水平及生态风险[J]. *生态毒理学报*, 2016, 11(2): 547-555
- Li X J, Yu Y L, Ma L, et al. The contamination levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water and sediments in Xukou Bay of Taihu Lake and the associated ecological risk [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, 11(2): 547-555 (in Chinese)
- [5] Li J, Shang X, Zhao Z, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in water, sediment, soil, and plants of the Aojiang River waterway in Wenzhou, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1-3): 75-81
- [6] 王萌, 雷忻, 田鹏飞, 等. 多环芳烃对水生生物生殖毒性的研究进展[J]. *延安大学学报: 自然科学版*, 2017, 36(2): 98-101
- Wang M, Lei X, Tian P F, et al. The research progress of reproductive toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons on aquatic organisms [J]. *Journal of Yanan University: Natural Science Edition*, 2017, 36(2): 98-101 (in Chinese)
- [7] 石军, 李俊婷, 陈安国. 皱纹盘鲍稚鲍养殖研究进展[J]. *中国饲料*, 2004(2): 27-29
- [8] Wang C, Yu R, Zhou M. Acute toxicity of live and decomposing green alga *Ulva (Enteromorpha) prolifera* to abalone *Haliotis discus hannai* [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 29(3): 541-546 (in Chinese)
- [9] 姜妮妮, 方建光, 李加琦, 等. 温度胁迫对皱纹盘鲍生理和生化活动的影响[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(2): 220-223
- Jiang W W, Fang J G, Li J Q, et al. Effects of temperature change on physiological and biochemical activities of *Haliotis discus hannai* Ino [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(2): 220-223 (in Chinese)
- [10] 王珊珊, 张瑞标, 刘振华, 等. 不同光照强度对皱纹盘鲍稚鲍生长和存活的影响[J]. *齐鲁渔业*, 2016(10): 11-13
- [11] 柳增善, 王克坚. 鲍免疫相关基因和蛋白的研究进展[J]. *遗传*, 2009, 31(4): 348-358
- Liu Z S, Wang K J. Progresses on immune-related genes and proteins of abalones [J]. *Hereditas(Beijing)*, 2009, 31(4): 348-358 (in Chinese)
- [12] 赵玉明, 田相利. 底栖硅藻种类组成对皱纹盘鲍匍匐幼体和稚鲍生长、存活的影响[J]. *水产科学*, 2016, 30(3): 144-147
- Zhao Y M, Tian X L. Effects of species composition of benthic diatoms on growth and survival of postlarval and juvenile abalone *Haliotis discus hannai* [J]. *Fisheries Science*, 2016, 30(3): 144-147 (in Chinese)
- [13] 吴健, 谭娟, 王敏, 等. 某石油污染滩涂沉积物中总石油烃和多环芳烃组成分布特征及源解析[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(1): 282-287
- Wu J, Tan J, Wang M, et al. Analysis for the composition, distribution and sedimental apportionment of a certain oil-polluted tidal marsh source area in terms of TPH and PAH [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(1): 282-287 (in Chinese)
- [14] 张彤, 宋春诤, 高一楠, 等. 海上溢油事故对海洋生态系统的影响——以“河北精神”号溢油事件为例[J]. *海洋信息*, 2015(3): 45-49
- [15] 孔祥迪, 刘莉, 李炎璐, 等. 3种多环芳烃对条纹锯鲷胚胎发育及早期仔鱼的毒性效应[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(1): 241-249
- Kong X D, Liu L, Li Y L, et al. Toxic effects of three polycyclic aromatic hydrocarbons on early embryonic and larval development of *Centropristis striata* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(1): 241-249 (in Chinese)

- [16] Cox D R, Oakes D. Analysis of Survival Data [M]. New York: Chapman and Hall/CRC, 1984: 593
- [17] Wu F C, Liu X, Zhang G F, et al. Effects of the initial size, stocking density and sorting on the growth of juvenile Pacific abalone, *Haliotis discus hannai* Ino [J]. Aquaculture Research, 2010, 40(10): 1103-1110
- [18] 陈漪, 王晓杰, 冉皓宇, 等. 海水模式种青鳉鱼(*Oryzias melastigma*)的胚胎发育观察[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(1): 71-82
- Chen Y, Wang X J, Ran H Y, et al. Developmental stages of a marine model fish—Medaka *Oryzias melastigma* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(1): 71-82 (in Chinese)
- [19] 丛伟. 多环芳烃(PAHs)对海洋鱼类胚胎发育的毒性效应研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007: 50
- [20] 宋莹莹, 袁秀堂, 张升利, 等. 苯并(a)芘、镉单一及复合污染对双齿围沙蚕 3 刚节疣足幼体发育的影响[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(3): 333-336
- Song Y Y, Yuan X T, Zhang S L, et al. Single and joint toxic effects of benzo(a)pyrene and cadmium on development of three-setiger juvenile of polychaete *Pernereis aibuhitensis* Grube [J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(3): 333-336 (in Chinese)
- [21] Eldridge M B, Echeverria T, Whipple J A. Energetics of Pacific herring (*Clupea harengus pallasii*) embryos and larvae exposed to low concentrations of benzene, a monoaromatic component of crude oil [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1977, 106(5): 10
- [22] 黄树辉, 马建腾, 章尼娜, 等. 微囊藻毒素-LR 和二甲苯对斑马鱼胚胎的毒性作用[J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(4): 308-311
- Huang S H, Ma J T, Zhang N N, et al. Toxic effects of xylene and microcystin-LR on zebrafish embryos [J]. Journal of Environmental Health, 2013, 30(4): 308-311 (in Chinese) ◆