

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20180321001

http://www.yykxjz.cn/

乔延龙, 殷小亚, 肖广侠, 王立平. 悬浮物胁迫中国对虾幼体的急性毒性研究. 渔业科学进展, 2019, 40(3): 50-56
Qiao YL, Yin XY, Xiao GX. Acute toxicity effects of suspended solids stress on *Fenneropenaeus chinensis* larvae. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(3): 50-56

悬浮物胁迫中国对虾幼体的急性毒性研究*

乔延龙^{1,2①} 殷小亚³ 肖广侠⁴ 王立平⁵

(1. 天津大学环境科学与工程学院 天津 300072; 2. 天津市海洋咨询评估中心 天津 300457;
3. 天津渤海水产研究所 中国水产科学研究院渤海水产研究中心 天津 300457;
4. 山东省临沂市罗庄区水务局 临沂 276017; 5. 天津市水产局 天津 300202)

摘要 随着沿海经济的迅速发展和海洋资源的大规模开发,海洋工程建设产生的悬浮物会对海洋生物生长发育产生影响。为研究悬浮物对中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)幼体的毒性效应,采用室内模拟半静态方法,研究了不同浓度悬浮物对中国对虾幼体的急性毒性效应。结果显示,随着时间的延长,高浓度的悬浮物可抑制中国对虾幼体的游泳能力,中国对虾幼体死亡率呈现出明显的剂量效应关系,悬浮物对中国对虾幼体48 h和96 h的半数致死浓度(48 h-LC₅₀和96 h-LC₅₀)分别为452.21 mg/L和183.74 mg/L,对应的安全浓度为18.37 mg/L。镜检观察结果显示,中国对虾幼体体表有底泥附着,鳃内有大量的悬浮物颗粒物。该研究为深入研究悬浮物对海洋生物的毒性效应提供了理论依据。

关键词 悬浮物;改良寇氏法;中国对虾幼体;急性毒性

中图分类号 S910 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2019)03-0050-07

在经济全球化的发展进程中,海洋资源逐渐呈现出过度开发与利用的状态。随着围海造地为主的海洋开发强度加大,海洋工程引起周边海域悬浮物浓度升高,致使近岸海洋生态系统功能减退。围绕悬浮物对海洋生态产生的问题已成为国内外研究热点(包瑛瑛, 2015; 李晓静等, 2017; 崔磊等, 2017)。研究表明,悬浮物对水体中生物的生理、行为、摄食、生长、繁殖等产生影响,高浓度的悬浮物可使水体生物死亡,从而影响生物种群组成和群落结构的稳定(李铁军等, 2017; 蔡丽萍等, 2011)。近岸海域是水生生物繁殖的重要场所,研究发现,水体环境质量和生物个体生长

和发育存在一定联系(刘广远等, 1998; 王广军等, 2007)。目前,悬浮物对水生生物毒性效应研究,主要集中于疏浚淤泥和滩涂悬浮物对游泳能力强的鱼类及生物成体的毒性效应(周勇等, 2010; 王云龙等, 1999; 陈永平等, 2015; 王娟娟等, 2016; 蔡萌等, 2007; 李广楼等, 2010; 李纯厚等, 1997),而有关大规模围填海区域滩涂悬浮物对游泳能力较弱的生物幼体毒害作用关注较少。围填海区域滩涂是生物幼体育肥栖息的场所,海洋工程产生的悬浮物对生物幼体毒性将直接影响海洋生物群体补充数量,因此,开展此项研究对于渔业资源和海洋生态系统平衡具有重要

* 海洋公益性行业科研专项(201505027; 201505018)、2010年度中央分成海域使用金支出项目(环保类)、天津市科技兴海项目(KJXH2012-32; KJXH2013-22)和广东省渔业生态环境重点实验室开放基金资助(GDKFL2012-10)共同资助 [This work was supported by the Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean (201505027; 201505018), the Specialized Fund for Sea Use of year 2011 (Environmental protection), the Marine Promotion Program from the Tianjin Oceanic Administration (KJXH2012-32; KJXH2013-22), and the Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment (GDKFL2012-10)].

① 通讯作者: 乔延龙, 高级工程师, E-mail: tjmarine@163.com

收稿日期: 2018-03-21, 收修改稿日期: 2018-05-18

意义。

渤海湾是渤海西部的半封闭浅水海湾,近岸滩涂广阔,水下地势平缓,在季风、海流、波浪、潮汐等对悬浮物输移和分布的影响下,较细的沉积物颗粒易于再悬浮,同时,在黄河沉积物扩散的双重影响下,渤海湾西北部成为高悬浮物浓度区,水体表层和底层的悬浮物浓度有较大差异(周舟等, 2017; 曹祖德等, 1993; Jiang *et al.*, 1997; 江文胜等, 2002; 崔廷伟等, 2009)。随着沿海海洋经济快速发展,滨海地区海洋开发较为活跃,海上吹填、疏浚等海洋工程日趋频繁,海洋海岸工程扰动沉积物再悬浮,致使近岸海域悬浮物浓度急剧增加。中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)是黄、渤海地区的主要经济虾类,幼体阶段营浮游生活,以滤食浮游生物为主,变态发育为仔虾后营底栖生活,以底栖生物为主要饵料。环渤海围填海区域开发压缩了生物的栖息空间,海洋工程搅动产生悬浮物破坏了生物的生存环境,致使中国对虾资源急剧衰退,为了探究海洋生物幼体与滩涂悬浮物之间的关系,以渤海湾主要渔业经济物种和资源修复关键种——中国对虾仔虾期幼体为研究对象,利用实验生态学方法,研究了悬浮物对中国对虾幼体的毒性作用,可为探讨中国对虾幼体生态适应性提供参考,并对进一步研究近岸水体环境基准和生态环境容量具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用中国对虾幼体采自天津市滨海新区天津神育苗有限公司养殖场,幼体体长为0.8~1 cm。实验前,将中国对虾幼体放入8 L海水的整理箱中暂养2 d,暂养海水经48 h曝气处理,挑选体长为1 cm、大小均匀、活力较好的个体进行悬浮物毒性实验,实验开始后减少饵料投喂。实验水体为天津大神堂海域

经沉淀、砂滤的自然海水。经测定,盐度为 31 ± 1.0 , pH为 8.1 ± 0.1 ,水温为 $(22\pm 1)^\circ\text{C}$,24 h连续充气,每天换水1次,换水量为三分之一,每天早晚各投喂配合饲料1次。

实验用悬浮物泥样采自天津大神堂($117^\circ 55' 18''\text{E}$; $39^\circ 09' 01''\text{N}$)外海的表层底泥,经室内通风晾干,然后放在烘箱中(60°C)烘干至恒重,冷却,研磨后用200目筛绢过筛,置于干燥器中低温保存。泥样的主要指标(测定结果见表1)与国家标准进行比较,硫化物、重金属(Hg、Cu、Zn、Pb和Cd)和油类物质的检测值达到我国海洋沉积物质量标准(GB18668-2002)的一级标准。

1.2 实验方法

采用《水质物质对淡水鱼(斑马鱼)急性毒性测定方法(GB/T13267-1991)》。在实验开始前,进行急性毒性预实验,确定悬浮物浓度范围。根据预实验结果,本实验设置20、40、80、160、320、640 mg/L共6个悬浮物梯度,每个实验浓度设3组平行实验,同时设1个对照组,每组投放中国对虾幼体50尾。实验水温与暂养时保持一致,各组充气量相同,以气泡均匀、悬浮物不沉底为准。每天08:00换水,每隔2 h用玻璃棒进行搅拌,保持持续充气,使泥样始终处于悬浮状态。暴露后,每2 h观察1次中国对虾幼体的状态,连续8 h,之后每12 h观察1次,暴露48 h后,每24 h观察1次,统计各组中国对虾幼体的死亡情况,死亡标准为用细玻璃棒触动其腹部,5 s内没有任何反应,则视其为死亡,在显微镜下镜检观察、拍照。记录中国对虾幼体的死亡个数、死亡时间,统计死亡率,并将3个平行组的平均值作为每个浓度的实验结果。根据预实验结果,中国对虾幼体在悬浮物处理12 h后陆续出现中毒症状,实验周期设为12、24、48、72和96 h。

表1 悬浮物主要成分含量(mg/kg)
Tab.1 Main components of the suspended solids (mg/kg)

样品号 Sample No.	重金属 Heavy metals						石油类 Petroleum	硫化物 Sulfide	有机质 Organic matter(%)
	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As			
1	22.30	66.30	18.70	0.04	0.028	4.45	20.50	0.139	1.90
2	22.70	66.10	18.70	0.05	0.023	4.65	22.40	0.144	1.72
3	23.50	66.20	18.90	0.05	0.026	4.53	21.80	0.135	1.85
平均值 Average	22.80	66.02	18.80	0.05	0.026	4.54	21.60	0.139	1.83
标准差 SD	0.60	0.10	0.10	0.01	0.003	0.10	0.97	0.005	0.09
一类标准 First Standard*	35	150	60	0.50	0.20	20	500	300	2.00

*为《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)标准第一类(国家技术监督局, 2002)

*Marine sediment quality, (GB 18668-2002) First Standard (State Bureau of Technology Supervision, 2002)

1.3 镜检观察

将取出的中国对虾幼体死亡个体进行去脱水处理后,置于光学显微镜下观察,经连接相机(Olympus SZX7)进行拍照。

1.4 数据处理

实验中所有数据均采用改良寇式法进行统计分析(黄瑞等, 2017; 孙瑞元, 1963), 计算各实验悬浮物浓度组对中国对虾幼体的半致死浓度 LC_{50} 和 LC_{50} 时的 95% 置信区间, 计算公式如下:

$$LC_{50} = \log^{-1} \left[X_m - i \left(\sum p - 0.5 \right) \right]$$

$$S_{x50} = i \sqrt{\frac{pq}{n}}$$

$$LC_{50} (95\%) = \log^{-1} (\log LC_{50} \pm 1.96 \times S_{x50})$$

式中, i 为组距, 即相邻 2 组对数剂量之差; X_m 为最大剂量对数; p 为各剂量组死亡率(死亡率均用小数值表示); q 为各剂量组存活率(存活率均用小数值表示); $\sum p$ 为各剂量组死亡率之和; n 为各组实验动物数; S_{x50} 为 $\log LC_{50}$ 的标准误。

安全浓度公式:

$$SC = 0.1 \times 96h LC_{50}$$

2 结果与分析

2.1 中国对虾幼体的中毒症状

在放入悬浮液中的前几小时, 中国对虾幼体比较活跃, 上下游动, 游动速度较快。但随着受试时间的增加, 游动速度逐渐变缓, 最后潜伏于实验容器下部, 静止不动。随实验时间增加, 受试中国对虾幼体逐渐昏迷, 直至死去。在此实验过程中, 实验中国对虾幼体体色也发生了变化, 由最初健康的青色, 逐渐蜕变为粉色, 继而变为灰白色。

2.2 中国对虾幼体死亡率

在急性毒性实验中, 随着暴露时间延长, 中国对虾幼体死亡个体数量呈现增加趋势(表 1)。暴露 12 h 时, 20~80 mg/L 组中国对虾幼体没有出现死亡, 160~640 mg/L 组开始出现死亡情况; 暴露 24 h 时, 20~40 mg/L 组没有死亡个体, 80 mg/L 组开始出现死亡; 暴露 36 h 时, 20~40 mg/L 组开始出现死亡个体; 48~96 h 时, 随着悬浮物浓度增加, 中国对虾幼体的死亡率逐渐增加, 并呈现出明显的剂量效应关系。

在不同浓度悬浮物实验组, 随着时间推移, 中国对虾幼体出现死亡个体时间节点呈现延后现象。实验

对照组在 12~36 h 内未发现死亡个体, 在 72 h 时出现死亡个体。实验浓度为 20、40 mg/L 时, 在 12~24 h 内未发现死亡个体, 在 48 h 出现死亡个体; 实验浓度为 80 mg/L 时, 在 12 h 内未发现死亡个体, 在 24 h 出现死亡个体; 实验浓度为 320 mg/L 和 640 mg/L, 12 h 就出现死亡个体; 640 mg/L 在 60 h 时的死亡率达到 64%。

表 2 中国对虾幼体悬浮物急性毒性实验结果
Tab.2 Results of acute toxicity experiment of *Fenneropenaeus chinensis* larve

悬浮物浓度 Concentration of suspended solids (mg/L)	幼体个数 No. of larve (ind.)	死亡率 Mortality (%)					
		12 h	24 h	36 h	48 h	72 h	96 h
0	50	0	0	0	0	5	10
20	50	0	0	2	5	21	29
40	50	0	0	4	9	22	37
80	50	0	2	5	13	28	31
160	50	2	5	8	14	29	37
320	50	2	8	12	18	30	34
640	50	18	30	40	42	80	90

2.3 急性毒性实验结果

在悬浮物条件下胁迫 12 h 后, 中国对虾幼体的死亡率开始增加, 随着暴露时间延长, 累积死亡率快速增加, 悬浮浓度达到 640 mg/L 以上, 中国对虾幼体累积死亡率超过 50%, 同时, 20、40、80、160、320 mg/L 的累积死亡率分别为 13%、19%、20%、21%、22%, 而对照组的累积死亡率仅有 4% (图 1)。

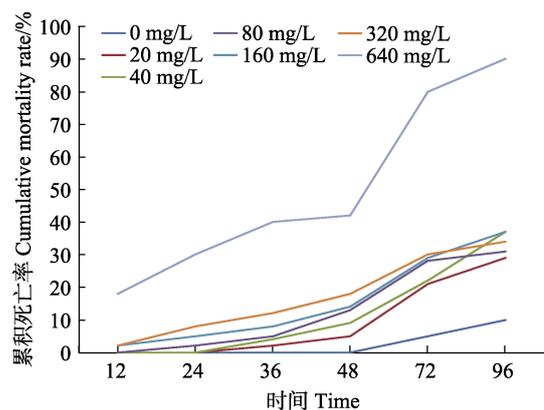


图 1 悬浮物对中国对虾幼体的累积死亡率
Fig 1 Cumulative mortality rate of *Fenneropenaeus chinensis* larve under the suspended solids

经计算得到悬浮物对中国对虾幼体 12、24、36、48、72、96 h 的 LC_{50} 和 LC_{50} 的 95% 置信区间, 96 h- LC_{50} 安全浓度为 1.83 mg/L (表 3)。

表3 悬浮物对中国对虾的急性毒理实验
Tab.3 Acute toxicity of suspended solids to *Fenneropenaeus chinensis* larve

实验时间 Experimental time (h)	LC ₅₀ (mg/L)	95%置信区间 95% confidence interval	安全浓度 Safe concentration (mg/L)
12	787.97	856.21±725.17	
24	640.00	717.14±571.16	
36	554.60	637.44±482.53	
48	452.51	534.70±382.96	18.37
72	211.07	258.56±172.30	
96	183.74	223.66±150.94	

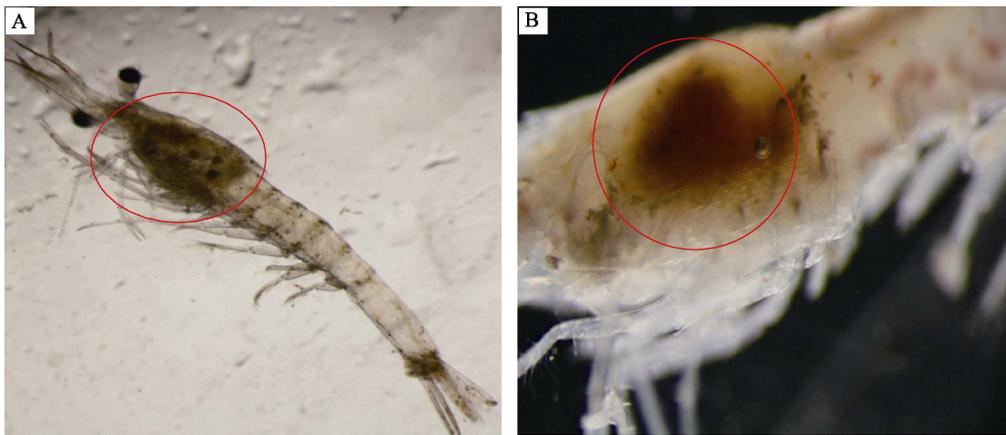


图2 悬浮物对中国对虾幼体的中毒症状
Fig.2 Symptoms of *Fenneropenaeus chinensis* larve under the suspended solids

A: 整虾; B: 鳃部
A: Whole shrimp; B: Gill

2.4 急性毒性实验镜检

采用解剖镜对中国对虾死亡幼体鳃和体表进行观察。从镜检情况来看,死亡个体体表附着一层薄薄底泥,死亡对虾个体的鳃内存在颗粒物,解剖镜观察下为底泥颗粒。

3 讨论

水生生物对环境质量的变化有一定耐受性,但对摄食、运动、生理生化等功能将产生影响(沈建忠, 2004; 钟硕良等, 2017; 冯政夫等, 2016)。本研究结果表明,中国对虾幼体在悬浮物胁迫下出现急性毒性效应,随着悬浮物暴露时间的延长和悬浮物浓度的升高,实验组中国对虾幼体的死亡率不断上升,当悬浮物溶度低于 320 mg/L 时,中国对虾幼体死亡率较稳定,剂量效应不明显,悬浮物浓度高于 640 mg/L 时,中国对虾幼体死亡个体增加,呈现明显的剂量效应,出现悬浮物对中国对虾幼体致死效应。由于悬浮物的

主要有害物质低于《海洋沉积物质量》一类要求,实验海水各项水质指标的含量均符合《海水水质标准》二类要求,不会对实验动物产生毒害作用,造成中国幼体死亡。通过镜检,中国对虾幼体鳃部有大量悬浮物颗粒,可能由于中国对虾幼体呼吸作用下,悬浮物中的微小颗粒随水流到达鳃的表面,吸附在鳃丝表面,造成生物体呼吸障碍,致使生物体出现死亡。同时,随着中国对虾幼体中毒程度加深,悬浮物颗粒粘附在个体的体表和附肢上,减弱了游泳能力(McLeay *et al*, 1987),致使摄食行为受到影响,加剧中国对虾幼体死亡。

将本研究悬浮物对中国对虾幼体的 LC₅₀ 与已报道悬浮物对其他水生生物的 LC₅₀ 进行比较(表 4),可以得出,近岸海域悬浮物毒性大小排序为,鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)幼体>梭鱼(*Sphyraenus*)幼体>半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis*)幼体>中国对虾幼体。基于生物生态位分析,中国对虾是一种广温广盐底层甲壳类,半滑舌鳎是一种广温广盐底层鱼类,

表4 悬浮物对几种水生生物的急性毒性
Tab.4 Acute toxicity of suspended solids to several aquatic species

实验动物 Test species	悬浮物 Suspended solids			参考文献 References
	来源 Source	72h-LC ₅₀ (mg/L)	96h-LC ₅₀ (mg/L)	
中国对虾幼体 <i>F. chinensis</i> larvae	疏浚淤泥(天津近岸)	226.5	52.4	李广楼等(2010)
中国对虾幼体 <i>F. chinensis</i> larvae	滩涂底泥(天津近岸)	211.1	183.7	本研究
半滑舌鳎幼体 <i>Cynoglossus semilaevis</i> Gunther larvae	滩涂底泥(山东海阳)	/	202.9	周勇(2000)
梭鱼幼鱼 <i>Sphyraenus</i> larvae	疏浚淤泥(天津近岸)	794.3	168.1	王娟娟等(2016)
鲈鱼幼鱼 <i>Lateolabrax japonicus</i> larvae	疏浚淤泥(天津近岸)	2722.8	1052.8	王娟娟等(2016)

鲈鱼和梭鱼是一种广温广盐中上层鱼类。通过对比发现,生态位较高的水生生物游泳能力强,对悬浮物的耐受性强,能及时产生回避反应,迁移至安全水域。Henley等(2000)研究发现,悬浮物较多的浑浊水体,迫使浮游生物和鱼类同时发生迁移活动。由此可见,悬浮物对迁移能力弱的水生生物幼体、胚胎等具有较强的急性毒性。通过与王娟娟等(2016)研究对比发现,滩涂底泥悬浮物对中国对虾幼体的 LC₅₀ 小于疏浚悬浮物,原因可能是受双向的沿岸环流影响,本研究所取渤海湾西部天津海域滩涂底泥表层以砂、粉砂质砂、砂纸粉砂和粘土质粉砂 4 种沉积物为主,而在天津港航道取样的疏浚悬浮物颗粒直径小于滩涂底泥,更容易堵塞生物幼体鳃腔,同时,疏浚物悬浮物可溶出硝基苯类、DMS、卤代酚类等有机物和重金属物质(季晓等, 2013),在疏浚淤泥的悬浮物和溶出化学污染物联合作用下,随着时间延长,可能致使疏浚悬浮物产生较强的毒性,且致毒机理也可能不同。

随着渤海湾沿海海洋经济快速发展,在过度捕捞、海洋环境污染、海洋海岸工程等影响下,天津海洋生物资源呈现急剧衰退趋势,渔业生物群体小型化、低龄化,渔获种类组成低质化、低值化现象日趋严重。为了养护近岸海洋生物资源,利用海洋海岸工程生态补偿资金,近几年,在海岸生态环境受损区域开展了生物增殖放流,以期恢复近岸生物资源。但是,在水生生物苗种增殖放流选址方面,主要依据温度、盐度等常规水环境指标,为了提高放流苗种成活率,需综合考虑放流区域悬浮物浓度变化情况,优化水生生物苗种增殖放流地点。同时,渤海湾作为海洋生物资源的三场一通道,对黄海、渤海渔业资源和生态环境意义重大,在每年 5~6 月海洋渔业生物产卵期,建议海洋和渔业行政主管部门限制近岸海域清淤和围填海工程审批,严格控制海洋海岸工程扰动强度,降低近岸海域悬浮物浓度,减少对海洋渔业生物幼体伤害。该研究结果可为渤海及其他海区近岸滩涂海洋生物资源恢复和养护管理提供参考依据。

参 考 文 献

- Bao YY. Study on the impact assessment method of reclamation activities on marine resources. *Resources Economization & Environment Protection*, 2015(2): 81 [包瑛瑛. 研究围填海开发活动对海洋资源影响评价方法. *资源节约与环保*, 2015(2): 81]
- Bian XD, Wan RJ, Jin XS, *et al.* Ichthyoplankton succession and assemblage structure in the Bohai Sea during the past 30 years since the 1980s. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(2): 1-19 [卞晓东, 万瑞景, 金显仕, 等. 近 30 年渤海鱼类种群早期补充群体群聚特性和结构更替. *渔业科学进展*, 2018, 39(2): 1-19]
- Cai LP, Jin JL, Hu YF, *et al.* Investigation of the present situation and discussion of the protection measures about the reclamation in Zhoushan. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2011, 30(6): 552-555 [蔡丽萍, 金敬林, 胡益峰, 等. 舟山围填海现状调查与保护措施探讨. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2011, 30(6): 552-555]
- Cai M, Shen AL, Xu ZL, *et al.* The toxic effect of the dredged materials on the halobios. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(B10): 519-523 [蔡萌, 沈盎绿, 徐兆礼, 等. 疏浚物海洋倾倒对海洋生物的毒害效应. *农业环境科学学报*, 2007, 26(B10): 519-523]
- Cao ZD, Wang GF. Numerical simulation of flow and sediment transport. *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 15(1): 107-118 [曹祖德, 王桂芬. 波浪掀沙、潮流输沙的数值模拟. *海洋学报*, 1993, 15(1): 107-118]
- Chen YP, Wang JJ, Li ZQ, *et al.* Influence of the suspended substances on marine organisms in the port Tianjin. *Hebei Fisheries*, 2015(1): 8-12 [陈永平, 王娟娟, 李兆千, 等. 天津港口疏浚淤泥悬浮物对海洋动物的急性毒性效应. *河北渔业*, 2015(1): 8-12]
- Cui L, Lü SH, Dong YL, *et al.* Influence on the biological community and environmental factors around Qi'ao Island caused by reclamation project. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(2): 96-105 [崔磊, 吕颂辉, 董悦镭, 等. 围填海工程对淇澳岛附近水域环境因子与生物群落的影响. *热带海洋学报*, 2017, 36(2): 96-105]

- Cui YW, Zhang J, Ma Y, *et al.* The study on the distribution of suspended particulate matter in the Bohai Sea by remote sensing. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(5): 10–18 [崔廷伟, 张杰, 马毅, 等. 渤海悬浮物分布的遥感研究. *海洋学报*, 2009, 31(5): 10–18]
- Feng ZF, Lin XF, Ge LL, *et al.* Differentiation and development of external sex characteristics of shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*). *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(6): 68–73 [冯政夫, 林晓菲, 葛蕾蕾, 等. 中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*) 外部性征的分化及发育. *渔业科学进展*, 2016, 37(6): 68–73]
- Henley WF, Patterson MA, Neves RJ, *et al.* Effects of sedimentation and turbidity on lotic food webs: A concise review for natural resource managers. *Fisheries Science*, 2000, 8(2): 125–139
- Huang R, Xu FK. Study on the acute toxicity of rotenone to *Lateolabrax japonicus* and *Chaeturichthys stigmatias* Richardson. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2017(1): 96–101 [黄瑞, 徐丰恺. 鱼藤酮对花鲈、矛尾虾虎鱼的急性毒性研究. *海洋湖沼通报*, 2017(1): 96–101]
- Ji X, Xu R, Liu Y, *et al.* Effects of clean dredging materials bury on *Ruditapes philippinaru*. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(6): 704–709 [季晓, 徐韧, 刘玉, 等. 清洁疏浚物掩埋对菲律宾蛤仔成体的存活影响. *海洋通报*, 2013, 32(6): 704–709]
- Jiang W, Mayer B. A study on the transportation of suspended particulate matter from Yellow River by using a 3D particle model. *Periodical of Ocean University of Qingdao*, 1997, 27(4): 439–445
- Jiang WS, Su J, Yang H, *et al.* The relationship between SPM concentration and hydrodynamic condition in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002(Z1): 212–217 [江文胜, 苏健, 杨华, 等. 渤海悬浮物浓度分布和水动力特征的关系. *海洋学报*, 2002(Z1): 212–217]
- Li CH, Lin YT, Yang ML, *et al.* The acute toxicity of the sludge suspended solution from a port of South China Sea to marine animals. *China Environmental Science*, 1997, 17(6): 71–74 [李纯厚, 林燕棠, 杨美兰, 等. 南海海港疏浚淤泥悬浮物对海洋动物的急性毒性效应. *中国环境科学*, 1997, 17(6): 71–74]
- Li GL, Zhang GY, Mao TY, *et al.* Study on the influence of the suspended dredging sediment on two kinds of marine organisms from the Port. *Shandong Fisheries*, 2010, 27(2): 1–4 [李广楼, 张光玉, 毛天宇, 等. 港口疏浚淤泥悬浮物对 2 种海洋生物的急性毒性试验研究. *齐鲁渔业*, 2010, 27(2): 1–4]
- Li TJ, Xu D, Xu HX, *et al.* Influence analysis of coastal reclamation on fishery resource and marine ecological environment in Zhejiang Province. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2017(18): 213–214 [李铁军, 徐丹, 徐汉祥, 等. 浙江省围填海工程对海洋生态环境和渔业资源的影响分析. *现代农业科技*, 2017(18): 213–214]
- Li XJ, Zhou ZQ, Chen LL, *et al.* Effect of coastal reclamation on benthic macrofauna in coastal area of Caofeidian, Bohai Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(3): 617–627 [李晓静, 周政权, 陈琳琳, 等. 渤海湾曹妃甸围填海工程对大型底栖动物群落的影响. *海洋与湖沼*, 2017, 48(3): 617–627]
- Liu GY, He W, Shao MH, *et al.* Study on the dredged matter lead to acute lethality for *Chlamys fazzeri* in the laboratory. *Marine Environmental Science*, 1998, 17(3): 19–23 [刘广远, 贺伟, 邵秘华, 等. 疏浚物对栉孔扇贝急性致死量的实验研究. *海洋环境科学*, 1998, 17(3): 19–23]
- McLeay DJ, Birtwell IK, Hartman GF, *et al.* Responses of Arctic grayling (*Thymallus arcticus*) to acute and prolonged exposure to yukon placer mining sediment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1987, 44(3): 658–673
- Shen JZ. *Animal toxicology*. Beijing: China Agriculture Press, 2004, 83–87 [沈建忠. *动物毒理学*. 北京: 中国农业出版社, 2004, 83–87]
- Sun RY. A practical combined method for computing the median lethal dose (LD₅₀). *Acta Pharmaceutica Sinica*, 1963, 10(2): 65–74 [孙瑞元. 简捷实用的半数致死量综合计算法. *药学学报*, 1963, 10(2): 65–74]
- Wang GJ, Xie J, Yu DG, *et al.* Physiological responses of abalone *Haliotis divericolor* to suspended sediment stress. *Journal of Dalian Ocean University*, 2007, 22(5): 352–356 [王广军, 谢俊, 余德光, 等. 杂色鲍对底泥悬浮物胁迫的生理响应. *大连水产学院学报*, 2007, 22(5): 352–356]
- Wang JJ, Jiao JH, Ma D, *et al.* Acute toxic effects of reclaimed silt and suspended solids on marine organism resources in Tianjin. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(2): 16–24 [王娟娟, 缴建华, 马丹, 等. 围填海吹填淤泥及悬浮物对天津海域海洋生物资源的急性毒性效应. *渔业科学进展*, 2016, 37(2): 16–24]
- Wang YL, Cheng YX, Xu ZL, *et al.* Effects of suspended dredging sediment and its dissolved Zn²⁺ on the spawn and early development of Chinese crab *Eriocheir sinensis* in the Changjiang estuary. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1999, 6(5): 24–28 [王云龙, 成永旭, 徐兆礼, 等. 长江口疏浚土悬浮物及其溶出 Zn²⁺ 对中华绒螯蟹产卵率和早期发育的影响. *中国水产科学*, 1999, 6(5): 24–28]
- Zhang Y, Zheng B, Xie HB, *et al.* Acute toxicological effects of suspended solids on larvae of Chinese shrimp *Fenneropenaeus chinensis*. *Fisheries Science*, 2017, 36(1): 42–47 [张艳, 郑琳, 谢寒冰, 等. 悬浮物对中国明对虾幼体急性毒性效应研究. *水产科学*, 2017, 36(1): 42–47]
- Zhong SL, Zheng HD, Chen YF, *et al.* The acute toxicity and bioaccumulation of deltamethrin in four species of mariculture organisms. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(6): 139–147 [钟硕良, 郑惠东, 陈宇锋, 等. 溴氰菊酯对 4 种海水养殖生物的毒性及其积累. *渔业科学进展*, 2017, 38(6): 139–147]

- Zhou Y, Ma SS, Qu KM, *et al.* Acute toxic effects of suspended substances on juvenile of *Cynoglossus semilaevis* Gunther. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(2): 229–232 [周勇, 马绍赛, 曲克明, 等. 悬浮物对半滑舌鲷稚鱼的急性毒性效应. *海洋环境科学*, 2010, 29(2): 229–232]
- Zhou Y, Ma SS, Qu KM, *et al.* Toxic effects of suspended substances (SS) on the embryos and newly-hatched larvae of *Cynoglossus semilaevis* Günther. *Progress in Fishery Sciences*, 2009, 30(3): 32–37 [周勇, 马绍赛, 曲克明, 等. 悬浮物对半滑舌鲷胚胎和初孵仔鱼的毒性效应. *渔业科学进展*, 2009, 30(3): 32–37]
- Zhou Z, Zhang WL, Jiang WS, *et al.* Long-term variation of suspended sediment concentration in the Bohai Sea based on retrieved satellite data. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2017, 47(3): 10–18 [周舟, 张万磊, 江文胜, 等. 渤海表层悬浮物浓度长期变化(2003–2014年)的卫星反演研究. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(3): 10–18]

(编辑 冯小花)

Acute Toxicity Effects of Suspended Solids Stress on *Fenneropenaeus chinensis* Larvae

QIAO Yanlong^{1,2①}, YIN Xiaoya³, XIAO Guangxia⁴, WANG Liping⁵

(1. College of Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072; 2. Tianjin Marine Research and Consulting Centre, Tianjin 300457; 3. Tianjin Bohai Sea Fisheries Research Institute, Bohai Sea Fisheries Research Center of Chinese Academy of Fishery Sciences, Tianjin 300457; 4. Water Bureau of Luozhuang District of Linyi City, Shandong Province, Linyi 276017; 5. Bureau of Aquatic Products, Tianjin 300202)

Abstract With the development of marine resources in coastal areas, marine engineering affects the growth and development of marine animals. Acute toxicity of suspended solids with different concentrations on *Fenneropenaeus chinensis* larvae was evaluated by the semi-static method. The results showed that high concentrations of suspended solids inhibited the swimming ability of *Fenneropenaeus chinensis* larvae. The 48 h-LC₅₀ and 96 h-LC₅₀ values of suspended solids to suspension was 452.21 mg/L and 183.7 mg/L, respectively, and the safe concentration was 18.37 mg/L. The microscopic examination showed that the *Fenneropenaeus chinensis* larvae body surface sediment had a large quantity of suspended particulate matter in the gills. This study provides a theoretical foundation for an understanding of the toxic effects of suspended solids on marine animals.

Key words Suspended solids; Karber's method; *Fenneropenaeus chinensis* larvae; Acute toxicity

① Corresponding author: QIAO Yanlong, E-mail: tjmarine@163.com