

溢油对贝类的毒害效应以及生态风险评价

沈鑫绿,唐峰华,沈新强*

(中国水产科学研究院东海水产研究所,农业部海洋与河口渔业重点开放实验室,上海 200090)

摘要 通过磁力搅拌和超声波乳化等手段模拟海上溢油事故,采用常见的4种原油和4种燃料油开展对贝类的毒害效应以及生态风险评价。结果表明:根据8种油品对褶牡蛎的 96 h-LC_{50} 得出这8种油对褶牡蛎的整体上毒害作用的大小顺序是 $F120>F180>-20^\#>F380>TJ015>TJ014>TJ002>TJ016$;根据8种油品对缢蛏的 96 h-LC_{50} 得出这8种油对褶牡蛎缢蛏的整体上毒害作用的大小顺序是 $F180>F120>-20^\#>F380>TJ002>TJ015>TJ014>TJ016$;根据8种油品对褶牡蛎的 96 h-LC_{50} 得出TJ016和TJ002对褶牡蛎属于低毒中风险,TJ015和TJ014对褶牡蛎属于低毒高风险,F380和 $-20^\#$ 对褶牡蛎柴油属于中毒高风险,F180和F120对褶牡蛎属于高毒极高风险。根据8种油品对缢蛏的 96 h-LC_{50} 得出TJ016对缢蛏属于低毒中风险,TJ015、TJ014、TJ002和F380对缢蛏属于中毒高风险, $-20^\#$ 、F180和F120对缢蛏属于高毒极高风险。总之,对贝类而言,燃料油毒性比原油更大,缢蛏相对褶牡蛎对油品毒害作用更为敏感。

关键词 褶牡蛎;缢蛏;原油;燃料油;毒性分级;生态风险

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)07-1289-06

Toxic Effects and Ecological Risk Assessment of Oil Spillage on the Shellfish

SHEN Ang-lv, TANG Feng-hua, SHEN Xin-qiang*

(East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences; Key Lab of Marine and Estuary Fisheries, Ministry of Agriculture, Shanghai 200090, China)

Abstract The toxicity of oils to aquatic organisms has been widely investigated, but the effects and ecological risk assessment on shellfish of various oils have been ignored. The integrated effects and ecological risk assessment of four crude oils and four fuel oils on two shellfishes were investigated by magnetic stirrer and ultrasonic emulsification to simulate oil spillage. According to 96-LC_{50} values, the toxicity of oils on *Crassostrea plicatula* was as follows $F180>F120>-20^\#>F380>TJ015>TJ014>TJ002>TJ016$, TJ016 and TJ002 to *Crassostrea plicatula* belonged to low toxicity and medium risk, TJ015 and TJ014 to *Crassostrea plicatula* belonged to low toxicity and high risk, F380 and $-20^\#$ to *Crassostrea plicatula* belonged to medium toxicity and high risk, F180 and F120 to *Crassostrea plicatula* belonged to high toxicity and very high risk; the toxicity of oils on *Sinonovacula constricta* was as follows $F180>F120>-20^\#>F380>TJ002>TJ015>TJ014>TJ016$, TJ016 to *Sinonovacula constricta* belonged to low toxicity and medium risk, TJ015, TJ014, TJ002 and F380 to *Sinonovacula constricta* belonged to medium toxicity and high risk, $-20^\#$, F180 and F120 to *Sinonovacula constricta* belonged to high toxicity and very high risk. In general, the fuel oils were more toxic than crude oils on these two shellfishes, and *Sinonovacula constricta* was more sensitive than *Crassostrea plicatula* stressed by oils.

Keywords *Crassostrea plicatula*; *Sinonovacula constricta*; crude oil; fuel oil; toxicity classification; ecological risk

石油污染是当前世界各国普遍关注的污染问题

收稿日期 2010-12-16

基金项目 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-48);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(中国水产科学研究院东海水产研究所)项目(2007M19);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基金(201104)

作者简介:沈鑫绿(1980—)男,硕士,助理研究员,主要从事生态毒理学研究。

*通讯作者 沈新强 E-mail: xinqiang_shen@hotmail.com

之一,近年来,石油污染以及残留物的潜在危害已经对近海域生物资源、水生生态系统造成威胁。关于石油污染对水生生物的毒性效应的研究很多,目前主要集中在石油以及相关石油产品对水生生物急性毒性试验,比如原油和燃料油水溶性物质对水生生物胚胎、幼体的毒性响应研究^[1-4]、石油产品多环芳烃(PAHs)对水生生物的影响^[5]、更多的研究集中在石油污染对水生生物生理生化的影响方面^[6-19]。但是在不同油品对海洋生物的毒害效应系统研究方面鲜见报

道^[20],特别是对贝类的毒性效应研究更是缺乏。本研究选择国内外常见的 4 种原油和 4 种燃料油,开展对东海水域常见经济种褶牡蛎(*Crassostrea plicatula*)和缢蛏(*Sinonovacula constricta*)的急性毒性试验,同时在此基础上就 8 种油品对贝类的毒性大小和生态风险程度进行综合评价,以期科学评价溢油污染对底栖性生物资源的影响和水上溢油应急处理提供一定依据。

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 受试生物

褶牡蛎取自浙江省象山港滩涂,试验前受试生物暂养 1 周,选择足够数量、个体差异不大的牡蛎供试验用,平均壳长(2.06±0.70)cm,平均壳宽(1.48±0.42)cm,体重(1.66±0.21)g。

缢蛏取自浙江省象山港滩涂,试验前受试生物暂养 1 周,选择足够数量、个体差异不大的缢蛏供试验用,平均壳长(2.34±0.29)cm,体重(0.67±0.04)g。

1.1.2 油品

试验用 8 种油品分别是印度尼西亚原油(TJ016)、沙特原油(TJ015)、伊朗原油(TJ014)、俄罗斯原油(TJ002);燃料油-20#柴油(-20#)、F380、F120、F180,由交通部水运科学研究所提供。试验用油品母液(即最大浓度组,其他浓度依次稀释),先用磁力搅拌器搅拌 0.5 h,搅拌速度以使油柱刚好达到瓶底为准,再用超声波清洗器(型号为 DL-720A)乳化 8 h,以此模拟海上溢油现状。油品母液中总石油烃含量(TPH)采用紫外分光光度法测定^[20],具体含量见表 1。

1.2 方法

1.2.1 试验设计

牡蛎急性毒性试验浓度组设计如下:TJ016 设置为 20 000、10 000、2 000 mg·L⁻¹和 200 mg·L⁻¹;TJ015、TJ014、TJ002 分别为 20 000、10 000、2 000、1 000 mg·L⁻¹和 200 mg·L⁻¹; -20#、F380 分别为 20 000、10 000、2 000、1 000、500 mg·L⁻¹和 200 mg·L⁻¹。F120、F180 分别为 2 000、200、100、50 mg·L⁻¹和 20 mg·L⁻¹,所有浓度组用沙虑后干净海水作为对照组。

缢蛏急性毒性试验浓度组设计如下:TJ016 设置为 20 000、2 000、1 000、500、200 mg·L⁻¹;TJ015、TJ014、TJ002、-20#、F380 分别为 20 000、10 000、2 000、1 000、500、200 mg·L⁻¹;F120、F180 分别为 2 000、200、100、50、20、2 mg·L⁻¹。

试验在 500 mL 烧杯中进行,其中油品处理液 400 mL,每组投入 10 ind.贝类,采用半静态试验,进行 96 h 急性毒性试验。试验用水采用沙虑后干净海水,水温 28℃±2℃,pH=7.43~8.34。在试验过程中每隔 2 h 记录一次受试生物的死亡数,并最后计算其 24、48、72 h 和 96 h 的死亡率。

1.2.2 溢油对贝类的生态风险评价

运用概率-对数法^[22]计算 LC_{50} ;不同油品对贝类的毒性大小分级参照生物监测技术规范^[23]。根据不同油品的处理浓度,为便于统一比较确定一个各处理组均设置的油类暴露浓度(EEC)即 200 mg·L⁻¹,计算风险指数(Q)= EEC/LC_{50} ,然后确定油类对牡蛎的风险程度^[23]。

2 结果与分析

2.1 溢油污染对褶牡蛎的毒害效应以及半致死浓度

试验进行 24 h 时,所有油类处理组中牡蛎均没有出现死亡,但是只有 TJ016 组中牡蛎双壳微微张开进行活动,对照组中牡蛎双壳张开的幅度要明显大于 TJ016 组中牡蛎,剩下的各种油类处理组中牡蛎均双壳紧闭,说明牡蛎感受到外界环境对它正常生活产生影响。当实验进行 48 h 时,除了 TJ016 和 TJ002,其他处理组最高浓度组中牡蛎均全部死亡,毒性最大的 F120 和 F180 组 200 mg·L⁻¹ 浓度组中牡蛎也全部死亡,其他较低浓度组中牡蛎也出现死亡个体。当实验进行 72 h 时,除了 TJ016 组中牡蛎死亡现象较少,其他各组最高浓度组中牡蛎全部死亡,较高浓度组中牡蛎死亡个体也较多。当试验结束时,发现燃料油处理组中牡蛎的死亡现象比原油处理组严重,同样在燃料油处理组中 F120 和 F180 对牡蛎的影响最为严重,原油中 TJ016 对牡蛎的影响最轻。8 种油各个时间段对褶牡蛎幼体的半致死浓度数据如表 2 所示。从试验过程中观察到的现象以及半致死浓度的比较均可得

表 1 8 种油品处理母液中 TPH 含量(mg·L⁻¹)

Table 1 The concentrations of TPH of crude oils and fuel oils(mg·L⁻¹)

油品(Oil)	TJ016	TJ015	TJ014	TJ002	-20#	F380	F180	F120
TPH	4.0	19.9	11.7	28.4	2.1	57.0	59.8	51.7

表 2 8 种油对褶牡蛎不同时间段的半致死浓度

Table 2 LC_{50} of *Crassostrea plicatula* stressed by crude oils and fuel oils

油品 Oil	不同时间段的半致死浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ LC_{50} of <i>Crassostrea plicatula</i> at different time			
	24 h LC_{50}	48 h LC_{50}	72 h LC_{50}	96 h LC_{50}
TJ016	—	83 573.1	63 716.2	6 866.1
TJ015	—	25 370.2	6 138.7	1 176.3
TJ014	—	21 394.5	4 724.2	1 695.5
TJ002	—	11 347.3	6 747.3	2 729.8
F380	—	18 162.4	1 093.9	840.2
-20 [#]	—	2 549.5	565.2	239.1
F180	—	131.5	111.5	79.5
F120	—	121.3	107.6	79.5

注 试验进行 24 h 时,大部分处理组没有出现死亡个数因而个别组 24 h LC_{50} 值不计算。

Note :There are no death of the individual in the most of the treatment group at 24 h, so 24 h LC_{50} is not calculated.

出 燃料油普遍比原油的毒害效应要大,以 96 h- LC_{50} 为试验终点,结果表明这 8 种油对褶牡蛎的整体上毒害作用的大小顺序是:F120=F180>-20[#]>F380>TJ015>TJ014>TJ002>TJ016。

2.2 溢油污染对缢蛏的毒害效应以及半致死浓度

试验进行 12 h 时,TJ002、-20[#]、F120 和 F180 处理组中缢蛏死亡率就超过半数,其他没有出现死亡个体的组别中缢蛏的活动与对照组相比也有所差异,缢蛏的进出水管呈萎缩状,而且缢蛏绝大部分静止不动,对照组则进出水管活动自如,缢蛏在烧杯中经常来回运动。当试验进行 24 h 时,所有油类处理最高浓度组中缢蛏均全部死亡,毒性最大的 F120 和 F180 组 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组中缢蛏也全部死亡,其他较低浓度组中缢蛏也出现死亡个体。当试验进行 72 h 时,除了 TJ016 组中缢蛏死亡现象较少,其他各组较高浓度组中缢蛏全部死亡,相对较低浓度组中缢蛏死亡个体也增多。当试验结束时,发现燃料油处理组中缢蛏的死亡现象比原油处理组严重,同样在燃料油处理组中-20[#]、F120 和 F180 对缢蛏的影响最为严重,原油中 TJ016 对缢蛏的影响最轻,8 种油类对缢蛏的毒害效应趋势基本与牡蛎一致,但是缢蛏对油类污染更为敏感。8 种油各个时间段对缢蛏的半致死浓度数据如表 3 所示。成品油普遍比原油的毒害效应要大,以 96 h LC_{50} 为试验终点,结果表明这 8 种油对缢蛏的整体上毒害作用的大小顺序是:F180>F120>-20[#]>F380>TJ002>TJ015>TJ014>TJ016。

表 3 8 种油对缢蛏不同时间段的半致死浓度

Table 3 LC_{50} of *Sinonovacula constricta* stressed by crude oils and fuel oils

油品 Oil	不同时间段的半致死浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ LC_{50} of <i>Crassostrea plicatula</i> at different time			
	24 h LC_{50}	48 h LC_{50}	72 h LC_{50}	96 h LC_{50}
TJ016	—	17 326.9	13 247.2	2 517.1
TJ015	12 337.3	2 918.6	1 034.1	821.1
TJ014	33 596.6	3 125.3	1 096.2	862.2
TJ002	24 299.1	3 125.3	971.5	750.8
F380	4 039.8	6 033.9	908.8	558.1
-20 [#]	21 394.5	122.9	101.5	88.2
F180	97.8	92.6	48.0	35.9
F120	109.8	98.0	83.5	43.8

注:试验进行 24 h 时,TJ016 没有出现死亡个数因而 24 h LC_{50} 无法计算。

Note :There are no death of the individual in the TJ016 group at 24 h, so 24 h LC_{50} is not calculated.

2.3 溢油污染对贝类的毒性分级以及生态风险程度

根据国家环境保护局于 1986 制订的《生物技术检测规范(水环境部分)》中将化学物质对水生生物的毒性划分为 5 个等级: $LC_{50}<1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为剧毒; $LC_{50}=1\sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为高毒; $LC_{50}=100\sim 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为中等; $LC_{50}=1\,000\sim 10\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为低毒; $LC_{50}>10\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为微毒或无毒。参照此标准,可以推算 8 种油品对贝类的毒性大小,不同时间段 8 种油品对褶牡蛎和缢蛏的毒性分级分别见表 4 和表 5。

周启星等^[24]根据风险指数(Q)的大小将环境污染物对水生生物的风险程度分为 3 个等级: $Q>0.1$ 为高风险; $0.001<Q\leq 0.1$ 为中等风险; $Q\leq 0.001$ 为低风险。结合本次试验结果,如果 $Q\geq 0.1$ 为极高风险。从表 4 表 5 中可以发现,大多数情况下不同油品对生物的毒性大小和生态风险程度存在明显的相关性,毒性为高毒的油品对生态风险的程度均为极高风险,毒性为微毒的油品对生态风险的程度均为中等风险,毒性为中毒的油品对生态风险的程度至少为高等风险。但是毒性大小为低毒的油品对生态风险的程度有中等风险和高风险,两种评价方式对油品的危害各有侧重点,因此两种方式结合了解不同油品对贝类的影响程度比较合理。总的来说,F120 和 F180 这两种燃料油对两种贝类的影响都是非常严重的,因此要严格控制这两种油类的污染事故,4 种原油在 96 h 内对褶牡蛎的影响相对较小,毒性大小均是低毒,但是从风险程度来看,部分原油(TJ015 和 TJ014)对褶牡蛎的风险程度为高风险,其对牡蛎的影响还是比较显著的(表 4),燃料油对

表 4 8 种油品对褶牡蛎的毒性分级以及生态风险程度(96 h)

Table 4 Toxicity classification and ecological risk degree of oils on

Crassostrea plicatula(96 h)

油品	96 h LC_{50}	Q 值	风险程度	毒性分级
TJ016	6 866.1	0.029	中风险	低毒
TJ015	1 176.3	0.170	高风险	低毒
TJ014	1 695.5	0.118	高风险	低毒
TJ002	2 729.8	0.073	中风险	低毒
F380	840.2	0.238	高风险	中毒
-20 [#]	239.1	0.836	高风险	中毒
F180	79.5	2.516	极高风险	高毒
F120	79.5	2.516	极高风险	高毒

表 5 8 种油品对缢蛏的毒性分级以及生态风险程度(96 h)

Table 5 Toxicity classification and ecological risk degree of oils on

Sinonovacula constricta(96 h)

油品	96 h LC_{50}	Q 值	风险程度	毒性分级
TJ016	2 517.1	0.079	中风险	低毒
TJ015	821.1	0.244	高风险	中毒
TJ014	862.2	0.232	高风险	中毒
TJ002	750.8	0.266	高风险	中毒
F380	558.1	0.358	高风险	中毒
-20 [#]	88.2	2.267	极高风险	高毒
F180	35.9	5.578	极高风险	高毒
F120	43.8	4.562	极高风险	高毒

褶牡蛎的影响均较大,毒性大小为中毒或高毒,对褶牡蛎的风险程度为高风险或极高风险。相比较褶牡蛎而言,缢蛏对不同油品污染的响应更为灵敏,当试验进行 96 h 时,不同油品(TJ016 除外)对缢蛏的毒性大小为中等以上,-20[#]、F180 和 F120 这 3 种燃料油对缢蛏的生态风险程度更是达到极高风险,不同油品对缢蛏的影响规律跟褶牡蛎类似(表 5)。

结合两种方法,就不同油品对贝类的毒害效应而言,微毒和低毒相当于中风险,中毒相当于高风险,高毒相当于极高风险,从最大可能保护生态环境的原则上,衡量综合毒性大小宜就高不就低。

3 讨论

3.1 不同油品对贝类的影响比较

每种油的密度及沸点是不同的,特别是水溶性、芳香烃含量、不同时间的蒸发量都是不一样的,造成其生物累积性和持续性都是有差异的,最终致使不同油品对生物和环境的毒害都具有差异性,而且芳香烃含量越高对生物的毒性越大^[25]。因此,不同油品对同种海洋生物的毒害效应是不一样的,例如 8 种油

(TJ016、TJ015、TJ014、TJ002、-20[#]、F380、F120、F180)对褶牡蛎和缢蛏半致死浓度都有较大的差异,原油和燃料油的差异则更大,TJ016 对褶牡蛎的 96 h LC_{50} 为 6 866.1 mg·L⁻¹,F180 对褶牡蛎的 96 h LC_{50} 为 79.5 mg·L⁻¹,两者相差达 86 倍多,缢蛏的情况也类似,这两种油对缢蛏的半致死浓度相差也达 70 多倍。Anderson 等^[26]将仔虾曝于 3 种油类溶液中,发现油类的毒性大小顺序为:轻质燃料油>重质燃料油>原油。Hedtke 等^[1]在研究 4 种油类(废油、1[#] 燃料油、2[#] 燃料油和一种混合原油)对 4 种鱼类的急性毒性试验时发现,不同油品对鱼类毒性的大小分别是:2[#] 燃料油>1[#] 燃料油>废油>原油。吴彰宽等^[27]的试验结果表明,油类对中国对虾仔虾的毒性大小顺序为:汽油和煤油>轻柴油>原油。贾晓平等^[25]测定了南海原油、0[#] 柴油和 20[#] 柴油对斑节对虾(*Penaeus monodon*)、日本囊对虾(*Marsupenaeus japonicus*)、刀额新对虾(*Metapenaeus ensis*)的仔虾和黄鳍鲷(*Sparus lauts*)、黑棘鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)、前鳞鲷(*Mugiophuyseni*)和七星鲈(*Lateotabrax japonicus*)的仔鱼的急性毒性,结果表明油类对仔虾和仔鱼的毒性大小顺序均为:0 号柴油>20 号柴油>南海原油。由表 2、表 3 可以看出,本研究中也发现类似的结果,即燃料油的毒性比原油大,而且其中原油 TJ016 对贝类的毒性效应最不明显,而燃料油 F120 和 F180 对贝类的毒性效应最明显,其毒害作用是所有油里面最强的。

不同油品对水生生物毒性机理有多种因素,类似溢油产生水体缺氧、油珠粘附生物鳃丝导致其呼吸发生困难等物理因素,还有溢油事故发生时由于海浪等各种因素使油品乳化导致诸如多环芳烃(PAHs)等有毒化学物质作用使水生生物受到影响。就本文选择的 8 种油品 TPH 而言,原油是 4.0~28.4 mg·L⁻¹,燃料油从 2.1~59.8 mg·L⁻¹ 不等,特别是-20[#] 柴油的 TPH 最低,但随着处理时间延长至 48 h,其毒性就明显比原油要大(表 2、表 3),这可能是不同油品的性质所决定,因为-20[#] 柴油外观非常透明,而其他油品则相对颜色很黑而且粘稠。一般来说燃料油比原油的芳香烃(PAHs 是其中重要成分之一)含量更高^[24],所以燃料油对贝类的毒性比原油要大。在今后的研究中可以测定每种油品的 PAHs 成分及其含量,从而深入探讨不同油品对水生生物毒性大小的差异性。另外,即便同种油品对两种贝类的影响程度也有较大差异,其中最主要的原因是不同贝类的身体构造所决定的,褶牡蛎是一种贝壳可以紧闭的种类,而缢蛏双壳闭合程度有限,进出水管直接跟水体进行交换。在试验中发现,当急性毒性试验

进行24 h时,各个处理组中褶牡蛎均无死亡个体,在毒性较大的燃料油处理组中的牡蛎贝壳始终紧闭,在毒性相对较小的原油处理组中牡蛎贝壳微微张开。而在相同的处理时间内,除了毒性最小的TJ016组,其余处理组中的缢蛏均出现死亡,而且很多高浓度组中缢蛏甚至全部死亡。在随后的试验过程中也出现了类似的情况,缢蛏的死亡率明显大于褶牡蛎。从表2、表3中可以看出,牡蛎各个时间段的半致死浓度显著大于缢蛏,因此褶牡蛎表现出对环境的适应能力要高于缢蛏,同为底栖贝类,缢蛏相比较而言对环境变化的响应更灵敏,更适合作为生物指示种监测水环境。

3.2 油品的毒性分级以及对贝类的生态风险评价

当今经济社会的发展对原油和成品油的依赖程度很高,需要相对较为经济实惠的船运方式将各类油品送到世界各地,因此遇到某些突发事故发生溢油事故在所难免,这将给整个生态环境造成很大的破坏,为了更准确地了解某种油品的毒性大小及其对水生生物的风险程度,需要进行多方面的评价体系研究。目前,溢油污染对海洋生物的毒性评价研究较少,唐峰华等^[19]采用毒性分级的方法,评价了8种油类对日本囊对虾(*Marsupenaeus japonicus*)、中国明对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)、锯缘青蟹(*Scylla serrata*)和三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)的毒性大小,结果表明,以48 h为评价时间段,F120和F180对两种虾类的毒性都属于剧毒,对两种蟹类属于中等毒性,是毒害性最大的油品,TJ016对两种虾类毒性属于中毒,对两种蟹类的毒性属于微毒,是毒害性最小的油品(具体的内容本文不详细描述)。单一进行油品的毒性分级或者对生物风险程度评价都有所欠缺,每种方法的评价分级阈值都是人为设置,而且不同方法得出的结论虽然大体规律上类似,但会有细节上的差异,有几种油品按照毒性分级都是低毒,但是按照风险程度评价却同时存在中风险和高风险,如从表4可以看出,属于低毒的有TJ015、TJ014和TJ002,但是前两者属于高风险种类,TJ002则为中风险种类,这样不易最终确定油品的综合毒性。本研究将两种方法结合是一种尝试,如果出现类似的情况就采用综合毒性大小就高不就低的原则。

4 结论

(1)溢油污染对贝类的毒害作用比较明显,TJ016、TJ015、TJ014、TJ002、F380、-20[#]、F180和F120对褶牡蛎的96 h- LC_{50} 分别为6 866.1、1 176.3、1 695.5、2 729.8、840.2、239.1、79.5 $mg \cdot L^{-1}$ 和79.5 $mg \cdot L^{-1}$,根据8种油

品对褶牡蛎的96 h- LC_{50} 可以得出这8种油对褶牡蛎的整体上毒害作用的大小顺序是:F120=F180>-20[#]>F380>TJ015>TJ014>TJ002>TJ016。TJ016、TJ015、TJ014、TJ002、F380、-20[#]、F180和F120对缢蛏的96 h- LC_{50} 分别为2 517.1、821.1、862.2、750.8、558.1、88.2、35.9 $mg \cdot L^{-1}$ 和43.8 $mg \cdot L^{-1}$,根据8种油品对缢蛏的96 h- LC_{50} 可以得出这8种油对褶牡蛎缢蛏的整体上毒害作用的大小顺序是:F180>F120>-20[#]>F380>TJ002>TJ015>TJ014>TJ016。

(2)溢油污染对这两种贝类的毒性分级以及生态风险程度如下:TJ016和TJ002对褶牡蛎属于低毒中风险,TJ015和TJ014对褶牡蛎属于低毒高风险,F380和-20[#]对褶牡蛎柴油属于中毒高风险,F180和F120对褶牡蛎属于高毒极高风险。TJ016对缢蛏属于低毒中风险,TJ015、TJ014、TJ002和F380对缢蛏属于中毒高风险,-20[#]、F180和F120对缢蛏属于高毒极高风险。对这两种贝类而言,燃料油毒性比原油更大,缢蛏比褶牡蛎对油品反应更为敏感。

参考文献:

- [1] Hedtke S F, Puglisi F A. Short-term toxicity of five oils to four freshwater species[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1982, 11: 425-430.
- [2] Heintz R A, Short J W, Rice S D. Sensitivity of fish embryos to weathered crude oil: Part I. Increased mortality of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) embryos incubating downstream from weathered Exxon Valdez crude oil [J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 1999, 18: 494-503.
- [3] Kennedy C J, Farrell A P. Ion homeostasis and interregional stress responses in juvenile Pacific herring, *Clupea pallasii*, exposed to the water-soluble fraction of crude oil[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, 323: 43-56.
- [4] Middaugh D P, Chapman P J, Shelton M E. Responses of embryonic and larval inland silversides, *Menidia beryllina*, to a water-soluble fraction formed during biodegradation of artificially weathered Alaska North Slope crude oil[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1996, 31: 410-419.
- [5] González-Doncel M, González L, Fernández-Torija C, et al. Toxic effects of an oil spill on fish early life stages may not be exclusively associated to PAHs: Studies with Prestige oil and medaka (*Oryzias latipes*) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2008, 87: 280-288.
- [6] 张景飞, 王晓蓉. 20号柴油低浓度长期暴露对鲫鱼肝脏抗氧化防御系统的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(3): 345-348. ZHANG Jing-fei, WANG Xiao-rong. Effects of No. 20 diesel on antioxidant defenses in liver of *Carassius auratus* under a long-term exposure and low-concentration [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(3): 345-348.

- [7] 陈慈美, 黄金龙, 吴晓峰. 0[#]、20[#] 柴油对潮间带海域浮游植物生长的影响[J]. 海洋通报, 1992, 11(2) : 32-38.
CHEN Ci-mei, HUANG Jin-long, WU Xiao-feng. Effects of low concentration of fuel oil No. 0 and 20 accommodated in intertidal water on growth of marine phytoplankton[J]. *Marine Science Bulletin*, 1992, 11(2) : 32-38.
- [8] 沈 竑, 张 勤, 徐 韧, 等. 石油污染对莫桑比克罗非鱼血清酶活性的影响[J]. 海洋学报, 1998, 20(4) : 60-64.
SHEN Hong, ZHANG Qin, XU Ren, et al. Effects of petroleum pollution on the activities of serum enzymes of *Tilapia mossambica*[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(4) : 60-64.
- [9] 沈 竑, 张 勤, 徐 韧, 等. 石油污染对非洲鲫鱼血清蛋白的影响[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(1) : 1-5.
SHEN Hong, ZHANG Qin, XU Ren, et al. Effects of petroleum on the Sero-proteins of *Tilapia mossambica*[J]. *Marine Environmental Science*, 1997, 16(1) : 1-5.
- [10] 沈 竑, 张 勤, 王桂兰, 等. 石油污染对非洲鲫鱼血清电解质和胆固醇的影响[J]. 海洋通报, 1997, 16(1) : 35-38.
SHEN Hong, ZHANG Qin, WANG Gui-lan, et al. Effects of petroleum of the electrolyte and cholesterol in serum of *Tilapia mossambica*[J]. *Maine Science Bullet*, 1997, 16(1) : 35-38.
- [11] Marty G C, Short J W, Dambach D M, et al. Ascites, premature emergence, increased gonadal cell apoptosis, and cytochrome P4501A induction in pink salmon larvae continuously exposed to oil-contaminated gravel during development [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1997, 75 : 989-1007.
- [12] 余 群, 郑微云, 翁 妍, 等. 石油污染对真鲷幼体中超氧化物歧化酶和过氧化物酶的毒理效应[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1999, 38(3) : 429-434.
YU Qun, ZHENG Wei-yun, WENG Yan, et al. Effect of petroleum pollutant on SOD and cat enzyme in viscera tissue of *Pagrosomus major*[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 1999, 38(3) : 429-434.
- [13] 翁 妍, 郑微云, 余 群. 石油污染对真鲷幼体谷胱甘肽过氧化物酶影响的研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(1) : 91-94.
WENG Yan, ZHENG Wei-yun, YU Qun. Effects of fuel oil exposure on the activity of sodium-dependent glutathione peroxidase in viscera mass of *Pagrosomus major* larvae[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(1) : 91-94.
- [14] 郁 昂, 陈 荣, 王重刚, 等. 0[#] 柴油水溶性成分对僧帽牡蛎 DNA 损伤的初步研究[J]. 海洋科学, 2004, 28(11) : 10-14.
YU Ang, CHEN Rong, WANG Chong-gang, et al. DNA damage in oyster (*Ostrea cucullata*) exposed to water soluble fraction of 0[#] diesel fuel[J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(11) : 10-14.
- [15] Zhang J F, Wang X R, Guo H Y, et al. Effects of water-soluble fraction of diesel oil on the antioxidant defenses of the goldfish, *Carassius auratus*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, 58 : 110-116.
- [16] 沈盎绿, 沈新强. 柴油对斑马鱼超氧化物歧化酶和过氧化氢酶的影响[J]. 海洋渔业, 2005, 27(4) : 314-318.
SHEN Ang-lv, SHEN Xin-qiang. Effects on the superoxide dismutase and catalase of zebra fish stressed by diesel fuel[J]. *Marine Fisheries*, 2005, 27(4) : 314-318.
- [17] Kennedy C J, Farrell A P. Ion homeostasis and interregal stress responses in juvenile Pacific herring, *Clupea pallasii*, exposed to the water-soluble fraction of crude oil[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, 323 : 43-56.
- [18] Marigómez I, Soto M, Cancio I, et al. Cell and tissue biomarkers in mussel, and histopathology in hake and anchovy from bay of Biscay after the Prestige oil spill(Monitoring Campaign 2003)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 53 : 287-304.
- [19] Simonato J D, Guedes C L B, Martinez C B R. Biochemical, physiological, and histological changes in the neotropical fish *Prochilodus lineatus* exposed to diesel oil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 69 : 112-120.
- [20] 唐峰华, 沈盎绿, 樊 伟, 等. 不同油类对虾蟹类幼体的胁迫效应[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1) : 63-68.
TANG Feng-hua, SHEN Ang-lv, FAN Wei, et al. On toxic effect of different oils upon crab and shrimp larvae[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(1) : 63-68.
- [21] 尚龙生, 孙 茜, 徐恒振, 等. 紫外分光光度法测定贻贝体内石油烃的方法研究[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(1) : 62-65.
SHANG Long-sheng, SUN Qian, XU Heng-zhen, et al. Study on the determination of petroleum hydrocarbon in mussels by UV-spectrophotometry[J]. *Marine Environmental Science*, 1998, 17(1) : 62-65.
- [22] 黄玉瑶. 内陆水域污染生态学——原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001 : 112-113.
HUANG Yu-yao. Inland water pollution ecology—principles and applications[M]. Beijing: Science Press, 2001 : 112-113.
- [23] 国家环境保护局. 生物监测技术规范(水环境部分)[S]. National Environmental Protection Agency. Biological monitoring technical specifications[S].
- [24] 周启星, 孔繁翔, 朱 琳. 生态毒理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004 : 412-422.
ZHOU Qi-xing, KONG Fan-xiang, ZHU Lin. *Ecotoxicology Principles and Methods*[M]. Beijing: Science Press, 2004 : 412-422.
- [25] 贾晓平, 林 钦. 南海原油和燃料油对仔虾和仔鱼的急性毒性试验[J]. 热带海洋, 1998, 17(1) : 93-97.
JIA Xiao-ping, LING Qin. Toxicity of nanhai crude oil and fuel oils to larval shrimps and larval fishes[J]. *Tropic Oceanology*, 1998, 17(1) : 93-97.
- [26] Anderson J W, Neff J M, Cox B A, et al. Characteristics of dispersions and water soluble extracts of crude oil and refined oil and their toxicity to estuarine crustaceans and fish[J]. *Marine Biology*, 1974, 27(1) : 75-88.
- [27] 吴乾宽, 陈国江. 二十三种有害物质对对虾的急性致毒试验[J]. 海洋科学, 1988(4) : 36-40.
WU Zhang-kuan, CHEN Guo-jiang. Studies of intoxication by some harmful substances on *Penaeus orientalis* [J]. *Marine Science*, 1998(4) : 36-40.