

· 综述 ·

## 石油污染对海洋生物的影响

王晓伟<sup>1,2</sup>, 李纯厚<sup>1</sup>, 沈南南<sup>1,2</sup>

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300; 2. 广东海洋大学水产学院, 广东 湛江 524088)

**摘要:** 海洋环境中的石油污染源包括自然和人为2种类型, 人为污染是造成海洋污染的主要原因。石油由于物质组成、化学结构和分子量的差异对海洋生物造成的毒害也不尽相同。海洋中的各种生物对石油污染的耐受力也显示出明显差异, 研究表明, 底栖生物的耐受力最强, 一些植物也能在较短的时间内恢复到污染前的水平, 鱼类和浮游动物对这种毒害较为敏感, 但部分污染区渔场出现反常现象令人迷惑。

**关键词:** 石油污染; 毒性; 海洋生物; 危害

中图分类号: X55; X503.225

文献标识码: A

文章编号: 1673-2227-(2006)02-0076-05

## Effect of oil pollution on marine organism

WANG Xiaowei<sup>1,2</sup>, LI Chunhou<sup>1</sup>, SHEN Nannan<sup>1,2</sup>

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Guangzhou 510300, China;

2. Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

**Abstract:** The pollution sources of petroleum in the marine environment include natural and man-made ones, and man-made source is the major one which impact marine ecology and fishery. Crude and refined oil have different compositor, chemical instructor and molecular mass. So their toxicity to the marine creature is different. The endurance of marine organism to the petroleum pollution is also different. Benthic organism can endure much more high concentration of petroleum. Some plants can restore the level of pro-pollution in a short time. The fish and zooplanktons are sensitive to the oil pollution. But some abnormal phenomena were found in some fishing grounds that puzzled us.

**Key words:** petroleum pollution; toxicity; marine organism; hazard

石油及其产品的广泛使用, 导致大量石油进入环境, 就水环境而言, 由于海上石油开采和海上漏油事故的频繁发生, 因此海洋石油污染对海洋环境的影响也越来越受到广泛关注。

海洋环境中石油可分为2种来源: 一是自然源; 一是人为源。自然源主要是由于海洋中含油地层被抬升, 导致石油渗出覆盖层造成海洋污染; 人为源不仅包括海上石油开采、海上石油运输事故的漏油事故造成的污染还包括城市和工业产生的污水及海洋倾倒造成的污染。如果排放源离海岸较远, 那么海洋泄漏的石油可能存在着很多生物和

化学降解或物理去除途径, 大多数有毒组分在到达海岸之前可能已经被完全分解, 一般不会对海岸附近的生物产生显著的危害<sup>[1]</sup>。近岸发生的石油污染通常会严重破坏海洋生态系统。在这种情况下, 石油通常还未经风蚀去除有毒污染物, 就已经被冲刷到海滨了。潮间带和底栖生物迁移能力较差, 摄入毒性物质后会引发大面积死亡现象。一些迁徙生物如鱼类, 能够逃离石油泄漏点, 但是仅靠这一点防御机制是远远不够的。同时还会对近岸水域的娱乐休闲海滩景观造成破坏。这样的石油污染会给海洋生物造成怎样的影响? 首先需要对石油的性质有个大致了解。石油污

收稿日期: 2005-10-24; 修回日期: 2005-11-22

作者简介: 王晓伟 (1981-), 男, 硕士生, 从事海洋生态环境研究。E-mail: king0315@etang.com

通讯作者: 李纯厚, E-mail: scslch@163.com

染包括原油和提炼后的成品油。天然原油是由成千上万种不同的有机分子组成的一种复杂的混合物,世界上不同地方的石油其组成可能会不大相同,这主要取决于油龄、油的形成条件等。通过一系列稳定的升温过程加热原油并不断收集更高沸点的馏出物,可以将石油中不同分子量的碳氢化合物分离,这就是成品油提炼的基本工艺。在水污染方面必须注意原油和精炼油中不同组分对水生生物的毒性、积累性方面的巨大差异。

## 1 石油污染对海洋生物的危害

### 1.1 窒息效应和毒性效应

石油对海洋生物的危害可分为以下2类<sup>[2]</sup>:第一类是石油对生物的涂敷或窒息效应。分子量较高的非水溶性焦油类物质能涂敷海鸟的羽毛,覆盖在螃蟹、牡蛎、藤壶等潮间带生物表面。有少量生物如管虫、藤壶受到的影响较小,然而水鸟等生物所受到的影响简直是灾难性的。因为它们绝大部分时间生活在海面上、飞行能力较差、受到干扰时会潜水,而不是飞走。鉴于此,这些鸟类不可能从浮油中逃脱,相反,每次潜水后又回到含有浮油的水面。当石油被这些鸟类的羽毛和绒毛吸收时,羽毛就会缠结成团,原先提供浮力和隔热的羽毛空隙就会吸满海水和石油,它们一部分会因为丧失浮力而淹死,还有一部分会因为其羽毛不够保暖而无法保持适合的体温,最终冻死。油涂敷过的海鸟会用嘴整理羽毛,这个过程会吞下50%的附着在羽毛上的石油<sup>[3]</sup>,摄入的油类会最终导致鸟类的死亡。原油中含有大量的高分子碳氢化合物,具有较高的黏度,因此原油泄漏的最大危害是高分子化合物的窒息效应。严重的原油泄漏事故可以导致上万只鸟甚至几十万只鸟的死亡。例如1967年英国海岸线上发生的托雷卡尼翁油轮事件共导致4~10万只海鸟的死亡(其中大多数是海雀),1955年在易北河口地区发生的Gerd Maesk号油轮触礁事件杀死了大约25~50万只海鸟(Nelson-Smith 1972)。而1989年阿拉斯加威廉王子湾发生的埃克森瓦尔笛兹号油轮触礁事故估计一共杀死了25万只海鸟和150只秃头鹰<sup>[4]</sup>。世界各地的刀嘴鸟和秋沙鸭的数量也在日趋减少,其首要原因也是石油污染<sup>[5]</sup>。第二类是指当生物体内脂肪或体液中油与其他碳氢化合物的摄入量达到一定浓度时,生物体内的代谢机制就会被破坏。就第二种毒性效应而言,通常认为毒性大小依次为轻质燃料油>重质燃料油>原油<sup>[6]</sup>。很多研究都证明了这一点。RICE等<sup>[7]</sup>试验了Cook Inlet原油和2号燃料油(类似于我国0号柴油)对39种海洋生物的毒性,发现2号燃料油对海洋鱼类、甲壳类、贝类和棘皮类的毒性均大于原油。ANDERSON等<sup>[8]</sup>和TATEM等<sup>[9]</sup>将仔虾曝于3种油类溶液中,发现这些油类的毒性大小顺序为:

2号燃料油>4号燃料油>原油,即:轻质燃料油>重质燃料油>原油。吴彰宽等<sup>[10]</sup>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。碳氢化合物的毒性与分子尺寸具有密切联系,由于高分子量化合物通常不溶于水,水生生物摄入油引起的毒性影响一般是由低分子量的烷烃( $C_{12} \sim C_{24}$ )和低分子量的芳烃造成的<sup>[5,11]</sup>。通过研究各种石油水溶性馏分的浓度,NRC<sup>[11]</sup>总结得出分子量大于烷基萘的大分子化合物的毒性效应较小,基本可以忽略。因此低分子量芳烃,如苯和甲苯,通常是研究油类摄入毒性效应的重要化学物质。毒性化合物与细胞内壁的脂肪层相结合,从而改变细胞活性,细胞内外的物质交换停止<sup>[3]</sup>。蛋白质和酶都会受到影响。而且,芳香族化合物的这种毒性影响比其他碳氢化合物更大。真鲷幼体在0号柴油暴油9d的实验中,幼体在抵抗由于外源污染物引起的内源代谢活性氧自由基时,SOD酶的生物合成量同时增加,产生诱导催化 $O_2 \cdot$ 生成 $H_2O_2$ 和 $O_2 \cdot$ Cat酶的活性升高不明显,可能说明Cat的合成量已饱和,不足以将 $H_2O_2$ 这类的活性氧予以清除。当延长暴污时间(15d),Cat酶略有下降,即轻度中毒反应<sup>[12]</sup>。石油污染能升高莫桑比克罗非鱼血清清草转氨酶、乳酸脱氢酶和血清碱性磷酸酶活性,其浓度阈值是 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[13]</sup>。

根据前面的论述,可以略知各类石油的相关毒性。汽油、柴油等精炼石油中碳氢化合物的分子量一般较低,因此窒息或涂敷效应可以忽略不计。但是由于精炼油中低分子碳氢化合物的含量比原油高,所以在海洋生物摄入量相等的情况下,精炼油比原油的毒性效应更为显著。

### 1.2 致死效应和亚致死效应

油类物质的浓度达到多大时会对生物产生毒性影响呢?显然这主要取决于石油的类型和相关的碳氢化合物以及所涉及的生物种类。成鱼一般受油污染的影响较小,因为他们的体内,如嘴和腮室表面覆盖着一层浆状黏液,从而可以防止油浸润。原油浓度达到 $(100 \sim 500) \times 10^{-6}$ 和 $(1 \sim 50) \times 10^{-6}$ 时,分别会对长须鲸和长须鲸幼鲸产生毒性影响<sup>[14]</sup>。0号柴油的分散液对斑节对虾(*Penaeus monodon*)、日本对虾(*P. japonicus*)、刀额对虾(*Metapenaeus ensis*)3种虾仔和黄鳍鲷(*Sparus latus*)、黑鲷(*S. macrocephalus*)、前鳞鲷(*Mugil opuyseni*)和七星鲈(*Lateolabrax japonicus*)4种鱼仔的96h $LC_{50}$ 值范围分别为 $0.17 \sim 0.95$ 和 $0.28 \sim 3.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;20号柴油次之,为 $1.71 \sim 3.02$ 和 $3.16 \sim 8.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;南海原油则最低为 $2.40 \sim 4.09$ 和 $5.9 \sim 9.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。不同油类的毒性差异是由其所含组分差异而造成的,尤其与低分子量烷烃和芳香烃的组成及其绝对含量有密切关系<sup>[6]</sup>。原油浓度在 $10 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下时,通常不会产生毒性影响。但是也有少数几个特例。如煤油浓度达到 $1 \times 10^{-9} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 数量级时,蜗牛(*Nassarius obsoletus*)对

食物的趋化性感知能力下降<sup>[14]</sup>。油类物质浓度为  $0.1 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  数量级时, 微藻的生长会受到抑制<sup>[8]</sup>。苯并芘浓度达  $0.01 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  数量级时, 海胆卵的生长发育会受到明显影响<sup>[11]</sup>。绝大多数海域中油类物质的浓度一般不超过  $10 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 由毒理学研究可知, 生物在有毒物质浓度如此低的情况下, 通常不会受到显著的毒性影响。但是有些海岸区由于石油开采而带来的油污染、环境压力和破坏等确实严重影响了水生生态系统。例如, 受油污染的海岸沉积物中油类物质的含量竟高达  $1\,000 \times 10^{-9} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  数量级, 有些极其严重地区污染物的干污泥浓度为  $19\%$ <sup>[11]</sup>。未污染海洋沉积物中碳氢化合物的天然含量一般不超过  $250 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 深海沉积物中的碳氢化合物的浓度仅为  $(1 \sim 4) \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[11]</sup>。

## 2 对海洋生物的影响

### 2.1 对鱼类的影响

**2.1.1 对神经系统的影响** 由于大多数油类物质具有很强的亲脂性, 因此其对生物的神经毒害作用是十分明显的。柴油曝油后的仔鱼急躁不安, 并有狂游、冲撞现象, 尤其以高浓度曝油仔鱼的症状最为明显, 经过一段时间后, 曝油仔鱼游动趋于缓慢, 身体失去平衡, 翻转打旋, 抽搐痉挛, 逐渐麻痹昏迷致死。仔虾曝油 24 h 后, 活动能力和摄食能力明显下降, 此后, 身体逐渐失去平衡, 不停地翻转打旋, 逐渐昏迷而死亡<sup>[6]</sup>。油污染地区存活的螃蟹会出现运动器官衰退、挖穴能力降低、逃难反应迟钝、脱皮次数增加、在非交配季节展示交配色泽等异常行为, 污染区沉积物中石油烃的浓度超过  $200 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 幼蟹一般熬不过冬季, 这主要是由于这些地区中螃蟹挖穴深度没有正常情况时候那么深, 幼蟹呆在浅穴中通常会被冻死。螃蟹摄入有机物时, 会导致神经器官中毒, 这样挖穴就出现了异常<sup>[15]</sup>。

**2.1.2 对呼吸系统的影响** 鱼鳃是鱼类进行气体交换的重要器官, 而且具有吸收外源污染物质的作用, 作为正常的生理过程, 大量的水通过鱼鳃, 毒物聚集在鳃中, 导致鱼类的窒息死亡<sup>[16]</sup>。贾晓平等<sup>[17]</sup>通过镜检发现, 不同浓度组曝油仔鱼的鳃部不同程度的分布着散性油滴, 阻碍了仔鱼的正常呼吸。成鱼鳃室表面的粘液虽然能防止油的浸润, 但同时也能吸附大量的油类物质在其表面造成鱼的鳃部发炎和呼吸障碍。在油污染的后期很多鱼类虽然能在污染区正常生存, 但患烂鳃病的概率很高。这与鱼类鳃室表面的碳氢化合物对覆盖在表面的粘液的溶解作用有很大关系。因为这层黏液对动物的具有重要的环境阻尼, 渗透压调节和疾病寄生虫的防护作用<sup>[16]</sup>。

**2.1.3 对生殖系统的影响** 目前的一些研究显示了相抵触的结果, TOMAS 和 BUDIANTARA<sup>[18]</sup>报导了在萘 (naph-

thalene) 和燃油中暴露后的细须石首鱼血浆中雌二醇和睾酮浓度降低, 且这一结果与卵巢组织对激素刺激的应激性降低有关, 遂提出一些多环芳烃能干扰目标组织的激素膜受体。然而 MELISSA 等<sup>[19]</sup>的研究发现, 在萘、 $\beta$ -萘黄酮 ( $\beta$ -naphthoflavone) 和蒽烯 (retene) 中暴露后的鲫 (*Carrasius auratus*) 的睾酮生成却得到促进。PACHECO 和 SANTOS<sup>[20]</sup>的研究表明, 暴露在柴油水溶性成分中 3 h 的欧洲鳗鲡 (*Anguilla*) 的血浆皮质醇浓度显著升高。目前的研究尚不能就有机物污染对鱼类生殖过程的影响达成一致<sup>[21]</sup>。石油烃确能导致鱼类的雌雄比例失调, 对幼体有致畸作用, 并降低其成活率。

### 2.2 对海洋植物的影响

植物抵抗油污的能力是相当惊人的, 即使在高度损害的情况下它们的恢复速度要比其他的生物快的多。坦皮港口发生的日本商船漏油事件严重影响了大型藻类的数量, 但是在很短时间内大型海藻就出现了增殖<sup>[3]</sup>。研究表明,  $0.1 \sim 10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  浓度石油烃对旋链角毛藻生长皆表现为促进作用, 而且促进作用随石油烃浓度的增加先增加, 然后降低。这说明无论是低浓度 (如  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 还是高浓度 (如  $5.0, 10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 石油烃对其生长都表现为促进作用<sup>[22]</sup>。高浓度石油烃污染物 ( $\text{CPH} > 1.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 对裸甲藻、新月菱形藻、三角褐指藻、小球藻和亚心形扁藻的生长有抑制作用, 对于中肋骨条藻, 石油烃污染物浓度在高于  $1.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时抑制其生长。但低浓度石油烃污染物则易促进赤潮藻类 (裸甲藻、新月菱形藻、中肋骨条藻) 的生长<sup>[23]</sup>。这并不能说明植物适于在油污海域生长, 它们的耐受能力可能与它们对石油烃的生物富集能力有关, 当超过其耐受能力的时候, 对藻类的生长仍然是负面的。硅藻 (*Melosira moniformis*, *Grammatophora marina*) 可以耐受  $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的燃料油, 但是同属于硅藻植物的 *Ditylum brightwelli*、*Coscinodiscus grani* 和 *Chaetoceros curvisetus* 都在 24 h 内死于含  $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  燃料油的海水中<sup>[24]</sup>。油污对大型植物的影响至今还不太清楚, 大多数观察报告都是通过调查石油泄漏事故得出的, 目前还没有这方面的实验室研究。

### 2.3 对底栖生物的影响

许多研究已证明, 海洋软体双壳类 (如牡蛎、贻贝等) 从环境中富集石油烃能力要大于鱼类, 而其代谢、释放石油烃的能力却远小于鱼类<sup>[25]</sup>。牡蛎、贻贝能吸收大量的石油在它们的鳃部和肠子内, 对油污有极强的抵抗力, 许多细小油珠可被它们吸收而从海面上消失。但是扇贝幼贝在摄食饵料时, 几乎无选择地也同时摄食海水中的悬油油分, 进入胃中的油滴破乳后互相结合成大油滴, 最终由于充满胃中不能排泄体外而导致幼贝死亡。在受污染的水域, 鱼类和甲壳类石油烃含量水平大多在  $10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

间,少数超过  $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 贝类的一般较高,大多在  $50 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  间。重污染水域中,贝类曾有超过  $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的记录。鱼类和甲壳类的富集系数一般在  $n \times 10^2$  范围,而贝类的一般在  $n \times 10^3 \sim n \times 10^4$  范围<sup>[26]</sup>。但是当海水中油含量达  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,就会导致牡蛎组织部分坏死;当煤油浓度为  $0.001 \sim 0.004 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,纺织螺 (*Nassarius obsoletus*) 对食物的趋化能力降低<sup>[27]</sup>。虽然底栖生物能在油污染中存活,可是它们将长时间不能食用,因为有机物已经储存在它们的脂肪层,其中有些化合物有很强的抗生物分解、排泄能力,即使将它们在清水中放置6个月,也不能除尽体内的油类物质。

## 2.4 对浮游动物的影响

路鸿燕等<sup>[28]</sup>的试验显示在低浓度试液中,裸腹蚤大多趋向于光亮一侧,在短期内其跳动未见异常,行为与对照组没有太大的差异。但在高浓度试液中,大部分裸腹蚤有向液面或杯壁冲撞的行为,趋光性也不明显。随着测试时间的延长,裸腹蚤跳动强度逐渐减弱,最后呈昏迷状态,沉入玻璃杯底部。与徐汉光等<sup>[29]</sup>的研究对照显示,蒙古裸腹蚤对油的敏感性大于中华哲水蚤。路鸿燕等<sup>[28]</sup>的实验表明,石油可导致蚤的产前发育期延长,每胎产幼数减少,产幼间隔也稍有延长(有的甚至不能第二次产卵),且产出的幼体一般不能正常生长。

## 3 反常现象

1989年3月,埃克森瓦尔笛兹号超级油轮撞到阿拉斯加威廉王子湾附近的布莱暗礁,造成了原油的泄漏,污染了大面积的海域。导致了大量海鸟的死亡,海鸟尸体的实际数量为3.6万只。大多数海洋哺乳动物如海獭和海豹死亡。但是在研究此次事故对渔场的影响时发现:1990年返回威廉王子湾近岸产卵的细鳞大麻哈成鱼的数量却创了历史记录。路易斯安那海岸线上有2.5万多个油井,同时还有一个大型的渔场,据估计1945~1975年间,共向路易斯安那海岸排放了16万吨石油,但是渔场的总产量却一直很高。THOMPSON等<sup>[30]</sup>曾做过一组对照实验,发现阿拉伯西北海岸线附近油污沉积物中大红对虾的数量是无污染对照地区的3倍多。在对迄今为止最大的漏油事故Ixtoc I号油井爆炸事故对水生生物造成的影响研究中发现,后几年中油污地区的小虾的产量与事故发生前基本相同,甚至略高于事故发生前的产量<sup>[31]</sup>。所有这些现象都不能用石油的一般毒害原理来解释。新近兴起的海洋化学生态的研究,也许可以给我们提供一些思路。像陆地生态系统一样,海洋环境中的化学成分调节着许多关键的生态过程。生物对化学信号的感知,深刻地影响到捕食、求偶和交配、种群的形成、栖息地的选择等生态行为<sup>[32]</sup>。是否由于这些石油

烃类在水中的分散、转移对水生生物的化学信号传递造成干扰,使生物做出一些反常的行为有待进一步研究。

## 4 小结

可以看出,石油污染中,成品油对海洋生物的毒害效应要远远大于等量的原油,主要是因为后者所含的毒性低分子化合物较少。油污对海洋植物的影响相对比较复杂,但不能就个别植物种类的耐受力就推而广之,并且一些植物恢复较快可能与以这些植物为食的生物的减少有关。油污对鱼类的影响是十分明显的,但是对鱼类神经和生殖系统的具体影响机理是怎样的,还需要对鱼类的生理加强研究,不仅对一种还要对多种鱼或鱼群进行研究。底栖生物靠其耐受力在油污中能够存活,但是大量的石油烃聚集在体内对它们的生理和生化过程的影响研究还不是很充分。石油烃在这些底栖生物中是怎样转化的,以怎样的形式存在,结合或是游离态?对这些生物的组织造成了怎样的伤害?还知之甚少。浮游动物具有繁殖快,生活史短的优点,海水毒性试验中比较理想的受试生物。

## 参考文献:

- [1] 李若钝,译. 世界海洋石油污染的地理分布及其消亡规律的研究 [J]. 海岸工程, 1995, 14 (1): 27-30.
- [2] EDWARD A L. 水污染导论 [M]. 余刚, 张祖麟, 等译. 北京: 科学出版社, 2004: 431-474.
- [3] NELSON-SMITH A. Oil pollution and marine ecology [M]. London: Elek Science, 1972: 260.
- [4] HODGSON B. Alasaka's big spill can the wilderness heal? [J]. National Geographic, 1990, 177 (1): 5-43.
- [5] 刘爱菊, 李若钝, 译. 石油污染对海洋生态系统的影响 [J]. 海岸工程, 1995, 14 (4): 61-65.
- [6] 贾晓平, 林钦. 南海原油和燃料油对仔虾和仔鱼的急性毒性实验 [J]. 热带海洋, 1998, 17 (1): 93-97.
- [7] RICE S D, SHORT J N, KARINEN G F, et al. Comparative oil toxicity and comparative animal sensitivity [M] // Fate and effects of petroleum hydrocarbons in marine organisms and ecosystem. New York: Pergamon Press, 1974: 79-94.
- [8] ANDERSON J W, NEFF J M, COX B A, et al. Characteristics of dispersions an water soluble extracts of crude oil and refined oil and their toxicity to estuarine crustaceans and fish [J]. Mar Biol, 1974, 27 (1): 75-88.
- [9] TATEM H E, COX B A, ANDERSON J N, et al. The toxicity of oil and petroleum hydrocarbons to estuarine crustaceans [J]. Est Coastal Mar Sci, 1978, 6 (3): 365-373.
- [10] 吴漳宽, 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, 1998, 22 (4): 36-40.
- [11] NRC. Oil in the sea-input, fates, and effects [M]. Washington:

- National Academy Press, 1985: 335.
- [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氢的毒理效应 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1999, 38 (3): 429-434.
- [13] 沈弘, 张勤, 徐韧. 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.
- [14] EPA quality criteria for water [S]. Washington: [s. n.], 1976: 256.
- [15] KREBS C T, BURNS K A. long-term effects of and oil spill on populations of the salt-marsh crab *Uca pugnax* [J]. Sci, 1977, 197: 484-487.
- [16] 孟紫强. 环境毒理学 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2003: 162.
- [17] 贾晓平, 林钦, 蔡文贵, 等. 原油和燃油对南海重要海水增殖生物的急性毒性试验 [J]. 水产学报, 2000, 24 (1): 33-37.
- [18] CASILLAS E, MISITANO D, JOHNSON L L, et al. Inducibility of spawning and reproductive success of female English sole (*Parophrys vetulus*) from urban and no urban areas of Puget Sound, Washington [J]. Mar Environ Res, 1991, 31 (3): 99-122.
- [19] MELISSA E, GLEN J, VAN DER KRAAK. Stimulatory effects of selected PAHs on testosterone production in goldfish and rainbow trout and possible mechanisms of action [J]. Comp Biochem Physiol, 2001, 130 (7): 249-258.
- [20] PACHECO M, SANTOS M A. Tissue distribution and temperature-dependence of *Anguilla anguilla* L. EROD activity following exposure to model inducers and relationship with plasma cortisol, lactate and glucose levels [J]. Environ Int, 2001, 26 (5): 149-155.
- [21] 郑榕辉, 王重刚. 多环芳烃对鱼类生殖机能的影响 [J]. 台湾海峡, 2004, 5 (2): 245-251.
- [22] 王修林, 杨茹君, 祝陈坚. 石油烃污染物存在下旋链角毛藻生长的粒度效应初步研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34 (5): 849-853.
- [23] 张蕾, 王修林, 韩秀荣, 等. 石油烃污染物对海洋浮游植物生长的影响——实验与模型 [J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32 (5): 804-810.
- [24] 倪朝辉, 翟良安. 石油对鱼类等水生生物的毒性 [J]. 淡水渔业, 1997, 27 (6): 38-40.
- [25] 林钦, 贾晓平. 南海东北部红海湾海洋动物体内的石油烃 [J]. 海洋通报, 1991, 10 (1): 33-38.
- [26] 贾晓平, 林钦, 蔡文贵, 等. 海洋动物体石油烃污染评价标准参考值的探讨 [J]. 湛江海洋大学学报, 1999, 19 (3): 33-37.
- [27] 倪朝辉, 翟良安. 石油对鱼类等水生生物的毒性 [J]. 淡水渔业, 1997, 27 (6): 38-40.
- [28] 路鸿燕, 何志辉. 大庆原油及成品油对蒙古裸腹蚤的毒性 [J]. 大连水产学院学报, 2000, 15 (3): 169-174.
- [29] 徐汉光, 杨波. 原油和成品油对浮游桡足类中华哲水蚤存活的影响 [J]. 海洋环境科学, 1983, 2 (2): 55-59.
- [30] THOMPSON H E, FARRAGUT R N, Jr., THOMPSON M H. Relationship of scarlet prawns to a benthic oil deposit off the north-west coast of Arabia, Dutch West Indies [J]. Environ Poll, 1977, 13 (4): 239-253.
- [31] MIELKE J E. Oil in the ocean: The short-and long-term impacts of a spill. Congressional research service report for congress [R]. Washington: [s. n.], 1990: 195-203.
- [32] 阎凤鸣. 化学生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 117-126.