

# 润滑油对蒙古裸腹蚤的急慢性毒性效应

王 珊, 郭 凯, 郑凯静, 赵 文

(大连海洋大学 辽宁省水生生物学重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 为了解石油烃污染对水生生物生长、繁殖和发育的影响, 采用实验生态学方法研究了润滑油对蒙古裸腹蚤 *Moina mongolica* 的急性毒性和慢性毒性。结果表明: 润滑油对蒙古裸腹蚤的 24 h  $LC_{50}$ 、48 h  $LC_{50}$ 、72 h  $LC_{50}$  和 96 h  $LC_{50}$  分别为 7.98 mg/L、5.81 mg/L、4.99 mg/L 和 3.04 mg/L, 安全浓度为 0.92 mg/L。润滑油浓度 18 mg/L 时, 蒙古裸腹蚤的存活时间最短、存活率最低, 但在其他试验浓度下没有明显的变化规律, 其种群增长参数也没有体现出明显的变化规律, 说明润滑油对蒙古裸腹蚤毒性相对较弱。

**关键词:** 润滑油; 蒙古裸腹蚤; 急性毒性; 慢性毒性

中图分类号: Q178.53

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2016)04-0545-06

## Acute and chronic toxicity of lubricating oil to water fleas *Moina mongolica*

WANG Shan, GUO Kai, ZHENG Kai-jing, ZHAO Wen

(Key Laboratory of Hydrobiology in Liaoning Province, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** To understand the effects of petroleum hydrocarbon pollution on growth, reproduction and development of aquatic organisms, the acute and chronic toxicities of lubricating oil to water fleas *Moina mongolica* were studied under conditions of lubricating oil pollution. The results showed that the  $LC_{50}$  was found to be 7.98 mg/L in 24 h, in 5.81 mg/L in 48 h, 4.99 mg/L in 72 h, and 3.04 mg/L in 96 h, with safe concentration of 0.92 mg/L. The chronic toxicity test revealed that the minimal survival time and survival rate were observed in the water fleas exposed to lubricating oil at a dose of 18 mg/L. However, there was no significant change in reproduction and population increase parameters of the water fleas in the test concentrations, indicating that the low concentration of lubricating oil has relatively weak toxicity to the water fleas.

**Key words:** lubricating oil; *Moina mongolica*; acute toxicity; chronic toxicity

润滑油是仅次于燃料油的第二大石油制品, 我国每天生产 6000 ~ 8000 kt 废润滑油, 大量的废油在使用一段时间后必须进行更换, 如果随意排放或泄露会对水域生态系统造成危害和影响<sup>[1]</sup>。蒙古裸腹蚤 (*Moina mongolica*) 是一种营养全面、生长周期短、易培养、对有机污染敏感的枝角类, 自然分布于内陆盐湖中, 可在海水中作为饵料生物进行驯化培养, 也可作为一种海洋污染的监测生物<sup>[2]</sup>。随着石油工业的不断发展, 石油污染已

经成为海洋主要污染源之一<sup>[3]</sup>, 国内外关于石油污染对水生生物影响的研究多集中于对鱼、虾、贝、藻、棘皮动物的急慢性毒性研究<sup>[4-10]</sup>, 对枝角类的研究较少<sup>[11-12]</sup>, 国内仅见路鸿雁等<sup>[13]</sup>对蒙古裸腹蚤进行了研究, 但只涉及了大庆原油和部分成品油的急性毒性效应, 而润滑油对蒙古裸腹蚤的研究未见报道。

本文以蒙古裸腹蚤为研究对象, 利用其对有机污染物高敏感的特点, 考察润滑油对蒙古裸腹

收稿日期: 2015-08-21, 修订日期: 2015-10-27

基金项目: 辽宁省教育厅一般项目 (L2012262)

作者简介: 王 珊 (1982-), 女, 吉林蛟河人, 助理研究员, 博士, 研究方向为海洋生态学, E-mail: wangshan@dlou.edu.cn

通讯作者: 赵 文 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhaowen@dlou.edu.cn

蚤的毒性效应,旨在为进一步确定石油产品对海洋环境的污染评价体系提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 受试生物

蒙古裸腹蚤取自辽宁省水生生物学重点实验室,培养过程中投喂蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*),投喂密度为 $1 \times 10^7$  cells/mL,培养用水取自经过过滤的黑石礁近海,温度为 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ,盐度为 $30 \pm 1$ ,pH为 $8.1 \pm 0.5$ ,光照12 h,光强4000 lx。

### 1.2 石油分散液(WAF)和试验液的制备

试验用润滑油购于大连安瑞达润滑油批发中心,型号为20w-50(壳牌(天津)石油化工有限公司生产),适用于重负荷柴油机。将油样品与经过滤、消毒海水按照体积分数1:9混合于5 L的三角锥瓶中,用电动搅拌器搅拌24 h,静置1 h后用虹吸法取下层水,即为母液<sup>[14]</sup>,以润滑油为标准油,利用荧光分光光度法测定其质量浓度<sup>[15]</sup>,在试验期间采用现用现配的原则,以保证浓度的准确性。

### 1.3 试验设计

先通过预实验,确定大致致死浓度范围,即96 h全致死的最小质量浓度和24 h无死亡的最大质量浓度,并根据预试验结果设计急性试验的石油分散液浓度,即0、3.0、3.6、4.2、4.8和5.4 mg/L。随机挑取24 h内的幼蚤作为试验对象,放置于100 mL细口玻璃瓶中,每瓶10只,每个浓度梯度设3个重复,放置于光照培养箱内,光周期L:D=12 h:12 h,设置的温度、盐度等与培养时相同,急性试验期间不投饵,24 h更换一次新配试验液以消除由于挥发带来的误差,记录蚤类存活和死亡数,蚤类的死亡判断标准根据文献<sup>[16]</sup>进行。

根据急性试验结果计算出安全浓度后,设置慢性毒性试验浓度,即0、1、3、9和18 mg/L。随机挑取24 h内的幼蚤作为试验对象,放置于100 mL细口玻璃瓶中,每瓶1只,每个浓度梯度设15个重复,放置于光照培养箱内,试验设置的条件同前。试验期间每天投喂蛋白核小球藻,24 h更换新配试验液以保持试验浓度的准确性,每天观测蚤类的死亡数,并在试验期间记录新生幼蚤数量、母蚤第1次产幼时间、第1次产幼数、产幼总数等,试验时间持续到所有受试个体全部死亡。

## 1.4 数据计算

### 1.4.1 半致死浓度( $LC_{50}$ )

采用直线内插法获得<sup>[16]</sup>。

### 1.4.2 安全浓度( $S_C$ )<sup>[16]</sup>

$$S_C = \frac{48hLC_{50} \times 0.3}{(24hLC_{50}/48hLC_{50})^2} \quad (1)$$

式中: $S_C$ 为安全浓度(mg/L); $LC_{50}$ 为半致死浓度(mg/L)

### 1.4.3 内禀增长率( $r_m$ )、净生殖率( $R_0$ )、平均世代时间( $T$ )及周限增长率( $\lambda$ )<sup>[17]</sup>

$$\sum_{x=0}^{\infty} e^{-r_m x} l_x m_x = 1 \quad (2)$$

$$R_0 = \sum_{x=0}^{\infty} l_x m_x \quad (3)$$

$$T = \ln R_0 / r_m \quad (4)$$

$$\lambda = e^{r_m} \quad (5)$$

式中: $r_m$ 为内禀增长率( $d^{-1}$ ); $R_0$ 为净生殖率(ind.); $T$ 为平均世代时间(d); $\lambda$ 为周限增长率( $d^{-1}$ ); $x$ 为日龄(d); $l_x$ 为第 $x$ 天的存活率; $m_x$ 为每只母蚤每天的产仔数(ind.);

## 1.5 数据处理

试验数据用Excel 2010软件进行处理,采用SPSS 22.0对数据进行方差分析和Duncan多重比较。

## 2 结果与讨论

### 2.1 润滑油对蒙古裸腹蚤的急性毒性

在24 h的急性试验期间,对照组中的蚤类全部存活,而试验组中蚤类的死亡率随着石油烃浓度的不断升高而增大;48~96 h的急性试验期间,对照组中的蚤类平均死亡1~2只,试验组中蚤类的死亡率同样随石油烃浓度的不断提高而增大。方差分析表明,24 h的急性试验期间,最高浓度(6 mg/L)试验组的死亡率与其他组呈显著差异( $P < 0.05$ );48 h和72 h的急性试验期间,浓度大于4.2 mg/L的试验组死亡率对照组之间差异显著( $P < 0.05$ );96 h的急性试验期间,对照组与其他各试验组之间差异均显著( $P < 0.05$ )。经计算润滑油对蒙古裸腹蚤的24 h  $LC_{50}$ 、48 h  $LC_{50}$ 、72 h  $LC_{50}$ 和96 h  $LC_{50}$ 分别为7.98、5.81、4.99和3.04 mg/L,安全浓度为0.92 mg/L(表1)。

表1 润滑油对蒙古裸腹蚤的急性毒性

Tab. 1 Acute toxicity of lubricating oil to *Moinamongolica*

时间/h	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	样本数/ind.	死亡数/ind.	死亡率/(%)	回归方程	相关系数	$LC_{50}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	95% 置信区间 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
24	0	30	0.00	0.00 <sup>a</sup>	$y=2.0667x+2.7244$	0.7303	7.98	6.539 ~ 13.539
	3.0	30	1.33	13.33 <sup>ab</sup>				
	3.6	30	1.00	10.00 <sup>ab</sup>				
	4.2	30	1.33	13.33 <sup>ab</sup>				
	4.8	30	2.00	20.00 <sup>ab</sup>				
	5.4	30	2.00	20.00 <sup>ab</sup>				
48	0	30	0.67	6.67 <sup>a</sup>	$y=4.3263x+1.7651$	0.8651	5.81	5.14 ~ 7.09
	3.0	30	1.33	13.33 <sup>ab</sup>				
	3.6	30	1.67	16.67 <sup>ab</sup>				
	4.2	30	3.67	36.67 <sup>b</sup>				
	4.8	30	3.67	36.67 <sup>b</sup>				
	5.4	30	3.67	36.67 <sup>b</sup>				
72	0	30	1.00	10.00 <sup>a</sup>	$y=5.5112x+1.2367$	0.9356	4.99	4.30 ~ 6.10
	3.0	30	1.33	13.33 <sup>ab</sup>				
	3.6	30	2.33	23.33 <sup>abc</sup>				
	4.2	30	4.33	43.33 <sup>bc</sup>				
	4.8	30	4.33	43.33 <sup>bc</sup>				
	5.4	30	5.33	53.33 <sup>cd</sup>				
96	0	30	1.33	13.33 <sup>a</sup>	$y=4.2528x+2.8472$	0.8195	3.04	2.37 ~ 3.54
	3.0	30	5.33	53.33 <sup>b</sup>				
	3.6	30	5.67	56.67 <sup>bc</sup>				
	4.2	30	6.33	63.33 <sup>bc</sup>				
	4.8	30	7.00	70.00 <sup>bcd</sup>				
	5.4	30	8.00	80.00 <sup>cd</sup>				
	6.0	30	9.33	93.33 <sup>d</sup>				

注:不同字母之间表示差异显著,  $P < 0.05$

由于石油烃成分复杂,往往不同种类的石油烃对同一种浮游动物的毒性效应是不同的。对于蒙古裸腹蚤而言,不同种类石油烃的毒性为:航空煤油>蒸发汽油>润滑油>直馏柴油>大庆原油;对于中华哲水蚤而言,航空煤油>70<sup>#</sup>汽油>直馏柴油>大港原油(表2),两者有一定的相似性,都是以航空煤油毒性相对较高,而原油的毒性最低,产生这种现象的主要原因是因为石油烃主要由芳香烃及烷烃类等物质组成,而相比之下,芳香烃的毒性要大于烷烃类,因此,石油烃的毒性往往取决于芳香烃的含量。据测定0<sup>#</sup>柴油中芳烃类物质含量相对较高;而原油中芳香烃含量相对较低<sup>[8]</sup>。同一种石油烃类对不同生物的毒性效应也是不同的,例如,同样是原油,中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)对原油污染的耐受性较飞马哲水蚤(*Calanus*

*finmarchicus*)和太平洋纺锤水蚤(*Acartia pacifica*)高(表2);除了不同种类生物之间耐受力的差异外,同一类生物个体的大小差异也是影响耐受力的主要因素之一,如黄逸君等研究了原油对10种常见桡足类的毒性效应,结果表明在同一种原油的影响下,个体较小的针刺拟哲水蚤(*Paracalanus aculeatus*)和小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)的耐受力明显低于个体相对较大的真刺唇角水蚤(*Labidooera enchaeta*)和中华哲水蚤<sup>[18]</sup>。与中华哲水蚤相比,蒙古裸腹蚤对石油烃的耐受力相对较弱,或者说蒙古裸腹蚤对石油烃类的污染物更为敏感。另外,同一种生物暴露在同一种石油烃下,随暴露时间的延长,其 $LC_{50}$ 会逐渐降低(表2),这与很多学者的研究结果是相同的<sup>[18-19]</sup>。

表2 不同种类的石油烃对蒙古裸腹蚤和中华哲水蚤的  $LC_{50}$ Tab.2 The  $LC_{50}$  of different kind petroleum hydrocarbon on *M. mongolica* and *C. sinicus*

受试生物	石油烃	$LC_{50}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$				参考文献
		24 h	48 h	72 h	96 h	
蒙古裸腹蚤	大庆原油	14.69	9.89			[13]
	直馏柴油	12.94	7.17			[13]
	蒸发汽油	6.55	3.52			[13]
	航空煤油	4.55	3.48			[13]
	润滑油	7.98	5.81	4.99	3.04	本文
中华哲水蚤	大港原油		19.8	16.3	14.7	[19]
	直馏柴油	19.7	15.6	6.70	4.30	[19]
	70#汽油	7.30	6.10	5.00	4.70	[19]
	航空煤油	6.60	3.50	2.20	1.80	[19]
飞马哲水蚤	环烷基原油				801.4 $\mu\text{g}/\text{L}$	[20]
太平洋纺锤水蚤	涠洲岛原油	-	4.88	-	-	[21]

## 2.2 润滑油对蒙古裸腹蚤的慢性毒性

慢性毒性试验结果表明,浓度为3 mg/L中的蒙古裸腹蚤存活时间最长(14 d),其次是1 mg/L和9 mg/L(13 d),存活时间最短的一组为18 mg/L(7 d)。试验开始前3 d对照组的存活率为100%,而其他试验组从开始试验第2 d就开始有死亡现象出现(图1)。

在不同润滑油浓度下,蒙古裸腹蚤的存活时间整体上呈现出随浓度升高而减少的趋势,第1次产幼时间及数量呈现出随浓度升高波动变化、单个母蚤的产幼总数及总胎数整体上呈现出随浓度升高先升高再减少的趋势。当润滑油浓度为18 mg/L时,蒙古裸腹蚤的存活时间与对照组相比显著减少( $P < 0.05$ );各试验组蒙古裸腹蚤的第1次产幼时间、第1次产幼数和单个母蚤产幼

总数与对照组之间差异均不显著( $P > 0.05$ );当浓度为3 mg/L时,单个母蚤的产幼总胎数与对照组之间比显著增多( $P < 0.05$ )(表3)。

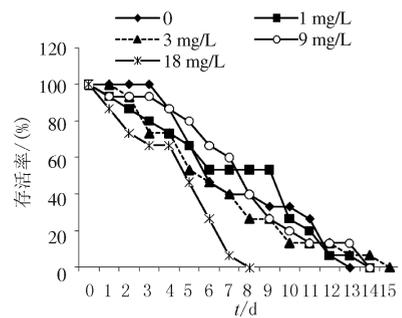


图1 润滑油浓度对蒙古裸腹蚤的存活率的影响  
Fig.1 The effect of lubricating oil concentration on the survival rate of *Moina mongolica*

表3 润滑油对蒙古裸腹蚤存活和繁殖的影响

Tab.3 Effect of lubricating oil on survivorship and reproduction of *Moina mongolica*

润滑油浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	存活时间/d	第1次产幼时间/d	第1次产幼数/ind.	1个母蚤的产幼总数/ind.	1个母蚤的产幼总胎数/次
0	7.80 $\pm$ 3.32 <sup>a</sup>	5.00 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	4.60 $\pm$ 1.51 <sup>ab</sup>	5.40 $\pm$ 1.71 <sup>ab</sup>	1.40 $\pm$ 0.70 <sup>a</sup>
1	7.73 $\pm$ 4.10 <sup>a</sup>	4.67 $\pm$ 0.50 <sup>a</sup>	4.89 $\pm$ 1.05 <sup>ab</sup>	6.67 $\pm$ 2.00 <sup>ab</sup>	2.11 $\pm$ 0.93 <sup>ab</sup>
3	7.00 $\pm$ 4.05 <sup>ab</sup>	5.33 $\pm$ 0.58 <sup>a</sup>	3.33 $\pm$ 2.52 <sup>a</sup>	7.67 $\pm$ 4.04 <sup>ab</sup>	3.00 $\pm$ 1.73 <sup>b</sup>
9	7.93 $\pm$ 3.53 <sup>a</sup>	4.60 $\pm$ 0.52 <sup>a</sup>	5.70 $\pm$ 1.70 <sup>b</sup>	8.20 $\pm$ 3.61 <sup>b</sup>	2.10 $\pm$ 1.10 <sup>ab</sup>
18	4.73 $\pm$ 2.34 <sup>b</sup>	4.75 $\pm$ 1.65 <sup>a</sup>	4.38 $\pm$ 1.19 <sup>ab</sup>	5.00 $\pm$ 1.20 <sup>a</sup>	1.38 $\pm$ 0.52 <sup>a</sup>

注:不同字母之间表示差异显著,  $P < 0.05$

当润滑油浓度为3 mg/L时,蒙古裸腹蚤的内禀增长率( $r_m$ )和周限增长率( $\lambda$ )最低,平均世代时间( $T$ )则最高;当润滑油浓度为9 mg/L时,蒙古裸腹蚤的内禀增长率( $r_m$ )、周限增长率( $\lambda$ )和

净生殖率( $R_0$ )最高;当润滑油浓度为18 mg/L时,净生殖率( $R_0$ )平均世代时间( $T$ )则最低(表4)。

表4 润滑油对蒙古裸腹蚤种群增长参数的影响

Tab. 4 Effect of lubricating oil on population increase parameters of *Moina mongolica*

浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	内禀增长率 $r_m/\text{d}^{-1}$	周限增长率 $\lambda/\text{d}^{-1}$	平均世代时间 $T/\text{d}$	净生殖率 $R_0/\text{ind.}$
0	0.22	1.25	5.80	3.60
1	0.24	1.27	5.78	4.00
3	0.15	1.16	7.31	3.00
9	0.31	1.36	5.54	5.47
18	0.20	1.22	4.88	2.67

已有研究表明,石油烃对枝角类的生存、生长和繁殖具有明显的影响,但不同种类的石油烃对其影响的程度是不同的<sup>[11-13]</sup>。一般情况下,浮游动物的存活时间往往随着石油烃浓度的升高而缩短,如根据 Hansen 的研究,飞马哲水蚤的存活率会随环烷基原油水溶液浓度提高而显著减低<sup>[20]</sup>。本文的研究结果整体上符合这一规律,在润滑油浓度最高时(18 mg/L),蚤的存活时间最短、存活率最低,但在其他试验浓度下没有明显的变化规律,这与试验用石油烃种类有关。另外,在高浓度润滑油条件下蒙古裸腹蚤的死亡,主要原因之一是润滑油本身具有一定的粘度,浓度加大引起蒙古裸腹蚤“挂脏”现象严重,阻碍其运动和生长。路鸿雁等利用4种石油烃对蒙古裸腹蚤繁殖的毒性效应进行了研究,结果表明内禀增长率( $r_m$ )是石油烃类慢性中毒的最敏感指标<sup>[13]</sup>,本文也对这些蒙古裸腹蚤的种群增长参数进行了研究,结果表明,不同润滑油浓度下蒙古裸腹蚤的种群增长参数没有明显的变化规律,产生这种现象的主要原因与润滑油本身的组成成分有关。润滑油往往是由基础油和添加剂两部分组成,其中基础油是润滑油的主要成分,占70%~95%,主要包括矿物油和合成油两大类;添加剂则占5%~30%,是指各种极性化合物、高分子聚合物和含硫、磷、氯等活性元素的化合物<sup>[22-23]</sup>。根据居荫诚的研究可知,润滑油的生物毒性主要取决于其添加剂的生物毒性<sup>[24]</sup>,但润滑油中添加剂的成分所占比例相对较小,同时,根据部分研究结果可看出润滑油对生物的毒性较燃料油低<sup>[5-6,25]</sup>,且含一定浓度的石油对植物会产生促进其生长的效果<sup>[4,6]</sup>,从而间接促进了枝角类的增殖,而本研究的结果也与这一结果相一致。

### 3 结论

(1)对于蒙古裸腹蚤而言,不同种类石油烃

的毒性为:航空煤油>蒸发汽油>润滑油>直馏柴油>大庆原油,这与石油烃种类有关;与中华哲水蚤等其他浮游动物比较而言,蒙古裸腹蚤对石油烃类污染物更为敏感,较适宜作为海洋溢油的监测生物。

(2)随润滑油浓度提高,蒙古裸腹蚤的存活时间整体上呈现减少的趋势,但在不同的润滑油浓度下各试验组间蒙古裸腹蚤的种群增长参数并没有体现出明显的变化规律,说明与燃料油相比,润滑油对蒙古裸腹蚤的毒性相对较低。

### 参考文献:

- [1] 任学鹏. 废润滑油的回收利用[J]. 轮胎工业, 2010, 30(4): 246-248.
- [2] 赵文,何志辉,殷守仁. 盐水枝角类的生物学及海水培养利用[M]. 北京:科学出版社, 2008:12-139.
- [3] 国家海洋局. 2001年中国海洋环境质量公报[R]. 北京:国家海洋局, 2002:10-28.
- [4] 刘娜,熊德琪,高会,等. 柴油和燃料油对小球藻的急性毒性试验研究[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(增刊1):29-32.
- [5] GULEC I, HOLDWAY D A. Toxicity of crude oil and dispersed crude oil to ghost shrimp *Palaemon serenus* and larvae of Australian bass *Macquaria novemaculeata* [J]. Environmental Toxicology, 2000, 15(2):91-98.
- [6] 王珊,刘瑀,张松. 石油烃对孔石莼生长及光合作用的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(5):432-436.
- [7] ANDERSON J W, NEFF J M, COX B A, et al. Characteristics of dispersions and water-soluble extracts of crude and refined oils and their toxicity to estuarine crustaceans and fish [J]. Marine Biology, 1974, 27(1):75-88.
- [8] 陈荣,郑微云,郁昂. 0#柴油水溶性成分对僧帽牡蛎(*Ostrea cucullata*)谷胱甘肽硫转移酶活性的影响[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2005, 44(增刊):219-221.
- [9] 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.
- [10] DELSHAD N, EMTYAZJOO M, KHEZRI M. Toxicity effect of oil spill dispersants on *Litopenaeus Vannamei* [J]. International Journal of Environmental Research, 2014, 8(4):1027-1030.

- [11] RATUSHNYAK A A, ANDREEVA M G, LATYPOVA V Z, et al. Toxicity of oil and products of its refinement to *Daphnia magna*: time and temperature dependences [J]. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science, 2009, 5 (4): 545-549.
- [12] MATÍNEZ-JERÓNIMO F, VILLASEÑOR R, RÍOS G, et al. Toxicity of the crude oil water-soluble fraction and kaolin-adsorbed crude oil on *Daphnia magna* (Crustacea; Anomopoda) [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2005, 48 (4): 444-449.
- [13] 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.
- [14] SINGER M M, AURAND D, BRAGIN G E, et al. Standardization of the preparation and quantitation of water-accommodated fractions of petroleum for toxicity testing [J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, 40 (11): 1007-1016.
- [15] GB/T 12763-2007, 海洋调查规范 [S].
- [16] 周永欣, 章宗涉. 水生生物毒性试验方法 [M]. 北京: 农业出版社, 1989: 82-90.
- [17] 赵文. 养殖水域生态学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 51-55.
- [18] 黄逸君, 陈全震, 曾江宁, 等. 原油和消油剂对海洋桡足类的急性毒性效应 [J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16 (4): 566-571.
- [19] 徐汉光, 杨波, 王真良, 等. 原油和成品油对浮游桡足类中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 存活的影响 [J]. 海洋环境科学, 1983, 2 (2): 55-59.
- [20] HANSEN B H, ALTIN D, OLSEN A J, et al. Acute toxicity of naturally and chemically dispersed oil on the filter-feeding copepod *Calanus finmarchicus* [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2012, 86 (6): 38-46.
- [21] 张继伟, 王伟莉, 蔡靳, 等. 北部湾涠洲岛原油污染物的海水环境质量基准研究 [J]. 中国环境科学, 2014, 34 (5): 1310-1315.
- [22] 陆诗建, 李清方, 张建, 等. 润滑油概述及其废液回收进展 [J]. 化学工程与装备, 2009 (5): 132-136.
- [23] 曹讯, 张征寰. 浅析车辆润滑油及其应用 [J]. 叉车技术, 2014 (2): 32-34.
- [24] 居荫诚, 解世文, 张长林, 等. 润滑油添加剂生物毒性的研究 [J]. 润滑与密封, 2005 (6): 21-23.
- [25] 孙玉德, 吉学东, 宫玉英, 等. 利用发光菌测量汽油发动机润滑油生物毒性的试验研究 [J]. 润滑与密封, 2007, 32 (7): 82-86.

(上接第 544 页)

- [5] 颜利, 蒋金龙, 詹兴旺, 等. 泉州湾表层水主要化学要素含量和富营养化指数的时空变化特征 [J]. 台湾海峡, 2012 (04): 459-465.
- [6] 张思冲, 张雪萍, 廖永丰. 营养度指数法在寒地湖泊富营养化评价中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003 (04): 416-419.
- [7] FERTIG B, KENNISH M J, SAKOWICZ G P, et al. Mind the data gap: identifying and assessing drivers of changing eutrophication condition [J]. Estuaries and coasts, 2014, 37 (1): 198-221.
- [8] LAI J X, JIANG F J, KE K, et al. Nutrients distribution and trophic status assessment in the northern Beibu Gulf, China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 32: 1128-1144.
- [9] MOZUMDER C, TRIPATHI N K, TIPDECHO T. Ecosystem evaluation (1989-2012) of Ramsar wetland Deepor Beel using satellite-derived indices [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186 (11): 7909-7927.
- [10] ZHAO M S, ROSSITER D G, LI D C, et al. Mapping soil organic matter in low-relief areas based on land surface diurnal temperature difference and a vegetation index [J]. Ecological Indicators, 2014, 39: 120-133.
- [11] FAN Y, CHEN J S, MA D G. Enhancement of light extraction of green top-emitting organic light-emitting diodes with refractive index gradually changed coupling layers [J]. Organic Electronics, 2013, 14 (12): 3234-3239.
- [12] WANG G H, WANG C Z, RUI X H. Interdecadal Variability of the Eastward Current in the South China Sea Associated with the Summer Asian Monsoon [J]. Journal of Climate, 2010, 23 (22): 6115-6123.
- [13] 张子鹏. 辽东湾北部现代沉积作用研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [14] 周艳荣, 唐伟, 赵蓓, 等. 山东威海双岛湾海域营养状态及有机污染状况分析 [J]. 海洋通报, 2008 (03): 115-120.
- [15] 龙晓红, 蒋清华, 邓琰. 广西钦州湾近岸海域“十一五”期间营养盐变化趋势分析及污染控制重点 [J]. 环境科学与管理, 2011, 36 (8): 65-68.
- [16] GB3097-1997, 海水水质标准 [S].