

No.0 柴油水溶组分海洋浮游植物生态效应研究

李志强^{1,2,3}, 王修林^{1,2,3*}, 祝陈坚^{1,2,3}, 石晓勇^{1,2,3}, 胡海燕^{1,2,3}, 李瑞香⁴, 孙胜玉⁵

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 3. 中国海洋大学海洋污染生态化学实验室, 青岛 266100; 4. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 5. 胶州市环境保护局, 胶州 266300)

摘要:应用现场和实验室培养方法,研究了 No.0 柴油水溶组分海洋浮游植物生态效应,提出了摄食条件下的海洋浮游植物生长模型和不同浓度 No.0 柴油水溶组分下浮游植物生长效应模型,分析了不同浓度 No.0 柴油水溶组分下浮游植物生长效应。结果表明,摄食条件下的海洋浮游植物生长模型较传统 Logistic 模型能更好地反映海洋生态系统,同时应用非线性拟合技术得到了不同浓度 No.0 柴油水溶组分下海洋浮游植物终止生物量(B_f)。根据海洋浮游植物生长效应模型进一步分析表明,在现场和实验室条件下,低浓度 No.0 柴油水溶组分对浮游植物生长有明显促进作用,生长促进率最大分别约为 180% 和 120%,然而,在高浓度 No.0 柴油水溶组分条件下,石油烃对浮游植物生长效应不甚显著,甚至有明显抑制作用。

关键词:No.0 柴油水溶组分;浮游植物;生长效应;模型

中图分类号:X55 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2007)02-0304-05

Ecological Effect of No.0 Diesel Water Accommodated Fraction on Marine Algae

LI Ke-qiang^{1,2,3}, WANG Xiu-lin^{1,2,3}, ZHU Chen-jian^{1,2,3}, SHI Xiao-yong^{1,2,3}, HU Hai-yan^{1,2,3}, LI Rui-xiang⁴, SUN Sheng-yu⁵

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Marine Pollution Eco-Chemistry Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China; 5. Jiaozhou Environmental Protection Bureau, Jiaozhou 266300, China)

Abstract: With batch culture experiments in field and laboratory, the ecological effect of No.0 diesel water accommodated fraction on marine algae was studied. A growth model of marine algae under grazing pressure and a model of growth effect on marine algae with different doses No.0 diesel water accommodated fraction were proposed. Based on the model and experiments, the growth effect of No.0 diesel water accommodated fraction on marine algae was studied. The results show that, the growth model of marine algae under grazing pressure is more suited for the marine ecological system than Logistic model. And the final biomass (B_f) of marine algae with different doses No.0 diesel water accommodated fraction was calculated by the model with none-linear fitting software. The results also show that, under the field and laboratory conditions, lower doses No.0 diesel water accommodated fraction promotes the growth of marine algae, and the most promoting ratio are 180% and 120% respectively, however, higher doses hardly promotes but bates the growth of marine algae.

Key words: No.0 diesel water accommodated fraction; marine algae; growth effect; model

有关石油烃对浮游植物生长的影响和生物富集已经做了相当多的研究^[1-5],但石油烃对浮游植物生态效应及相关模型的研究却鲜见报道。而浮游植物是分布最广、数量最多、最为主要的海洋初级生产者^[6]。同时,海洋浮游植物通过生物富集作用成为石油烃、重金属等化学污染物在海洋生物链(网)迁移过程的起始环节,在污染物生物累积中起着关键作用^[7-9]。因此,选择海洋浮游植物作为海洋环境生态效应分析的“指示”生物,不仅具有样品和监测数据易得、实验简单、可控性强等优点,而且能够初步反映石油烃等污染物对海洋生态系统的结构、功能等的影响。研究表明,当海水、海底沉积物、生物等内边界海洋介质中石油烃等污染物浓度超过一定阈值

时,可对海洋生物,如浮游植物等的生长、繁殖,甚至其群落结构、功能等产生显著影响^[10]。特别严重的是,由于海洋生态系统自身固有的生态学特性,以及污染物在多介质海洋环境中迁移-转化过程特点等,如果某种内边界海洋介质中污染物浓度长期处于“超标”状态,则有可能对整个海洋生态系统的物质通量循环、群落结构、功能等产生显著影响。实际上,由于相对低浓度石油烃对海洋浮游植物生长的促进

收稿日期:2006-02-27;修订日期:2006-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(40136020,40376033);教育部重点项目(01110)

作者简介:李志强(1975~),男,博士研究生,主要研究方向为海洋环境负荷物的迁移、转化过程及环境容量, E-mail: likeqiang@ouc.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xlwang@ouc.edu.cn

作用,有可能成为某些海域,如日本近海、英吉利海峡、渤海诱发赤潮发生的辅助因素^[11,12]。目前,石油烃海洋环境生态效应分析主要是浮游植物生长效应分析。本文采用 1 次培养实验方法,于 2003 年夏末分别在胶州湾和中国海洋大学海洋污染生态化学实验室进行了不同浓度 No.0 柴油水溶组分(No.0 diesel water accommodated fraction, No.0 diesel WAF)条件下现场培养和实验室培养实验,提出了摄食条件下的海洋浮游植物生长模型和生长效应模型,并分析了不同浓度 No.0 柴油 WAF 下浮游植物生长效应。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 实验藻种和实验海水

实验用浮游植物及海水均取自胶州湾,过 80 目筛网后分 2 份置于玻璃水槽内,1 份在现场,另 1 份在实验室,添加营养盐($\text{NaNO}_3:\text{KH}_2\text{PO}_4:\text{NaSiO}_3=32:2:32$)混合均匀静置 24 h。经分析 2 次实验海水中浮游植物均以旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)为主,实验藻种见表 1。

1.1.2 No.0 柴油水溶解组分(WAF)母液制备

根据文献[13]方法制备 No.0 柴油水溶解组分(WAF)母液,测量其浓度后保存于棕色玻璃瓶中^[14]。

表 2 不同 No.0 柴油 WAF 浓度(c)下现场培养实验中浮游植物终止生物量 B_f 、终止生物量平均值 $B_{f,a}$ 及其相应生长效应因子(Γ)

Table 2 Values of final biomass (B_f), average values of final biomass ($B_{f,a}$) and the growth effect factor (Γ) of marine algae with different doses No.0 diesel water accommodated fraction (c) in field culture														
指标	1	2	3	4	5	6	7	8 ¹⁾	9	10	11	12	13	14 ¹⁾
$c/\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$	Control		10		20		50		100		600		1 250	
$B_f/\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$	65.2	64.2	92.3	83.0	167.7	163.9	181.7	—	84.5	74.3	59.1	64.7	66.5	—
R^2	0.93	0.88	0.86	0.86	0.91	0.88	0.98	—	0.91	0.96	0.93	0.94	0.86	—
$B_{f,a}/\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$	64.7		87.7		165.8		181.7		79.4		61.9		66.5	
$\Gamma/\%$	0		-40		-160		-180		-20		4		-3	

1) 8 号和 14 号实验由于海上风浪造成实验瓶破碎而缺少最后 3d 的数据

表 3 不同 No.0 柴油 WAF 浓度(c)下实验室培养实验中浮游植物终止生物量 B_f 、终止生物量平均值 $B_{f,a}$ 及其相应生长效应因子(Γ)

Table 3 Values of final biomass (B_f), average values of final biomass ($B_{f,a}$) and the growth effect factor (Γ) of marine algae with different doses No.0 diesel water accommodated fraction (c) in laboratory culture																				
指标	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16				
$c/\mu\text{g}\bullet\text{dm}^{-3}$	Control		20		70		150		200		400		900		1 500		5 000		9 000	
$B_f/\mu\text{g}\bullet\text{dm}^{-3}$	38.2	37.6	79.1	80.5	39.7	39.2	42.4	82.0	58.5	49.3	47.0	79.5	80.8	6.3	7.0	7.1				
R^2	0.90	0.91	0.96	0.92	0.95	0.82	0.86	0.96	0.91	0.88	0.96	0.97	0.96	0.99	0.95	0.99				
$B_{f,a}/\mu\text{g}\bullet\text{dm}^{-3}$	37.9		79.8		39.7		40.8		82.0		53.9		47.0		80.2		6.7		7.1	
$\Gamma/\%$	0		-110		-5		-8		-120		-40		-20		-110		80		80	

2 结果与讨论

2.1 摄食条件下海洋浮游植物生长模型

表 1 实验藻种	
Table 1 Algae species	
旋链角毛藻	<i>Chaetoceros curvisetus</i>
窄隙角毛藻	<i>Chaetoceros affinis</i>
角毛藻	<i>Chaetoceros</i> sp.
浮动弯角藻	<i>Eucampia zoodiacus</i>
尖刺拟菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>
圆筛藻	<i>Coscinodiscus</i> sp.
三角褐指藻	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>
三角角藻	<i>Ceratium tripos</i>

1.2 实验方法

实验容器为 5 dm³ 玻璃瓶,首先,按比例将 No.0 柴油 WAF 母液加入到富加营养盐静置平衡 24 h 的实验海水介质中,各双样,选择典型浓度设置重复组(表 2,表 3),分别在现场和实验室条件下培养,然后,以加入石油烃的时间为 0 时刻,定时从培养瓶中取样,1 份采用荧光法测定 Chl-a 含量^[14],1 份用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤,采用紫外分光光度法测定石油烃浓度^[15]。其中,以不加石油烃的培养液为对照,现场培养实验起始浮游植物生物量(以 Chl-a 表示,下同)为 0.7 $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$,温度为 29℃ $\pm$ 1℃、光照强度为 15 000 lx $\pm$ 10 000lx,实验室培养实验起始浮游植物生物量为 3.4 $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$,温度为 20℃ $\pm$ 1℃,光照强度约为 2 000 lx。

海洋浮游植物生长一般符合 Logistic 生长模型^[16~18],然而在封闭实验体系中,由于浮游动物的摄食,浮游植物生长往往偏离 Logistic 生长曲线,这

样,如果同时考虑浮游植物和浮游动物生长过程,浮游植物生物量时间变化($B_{t,PPT}-t$)可表示为:

$$B_{t,PPT} = \frac{B_{f,PPT}}{1 + \frac{B_{f,PPT} - B_{0,PPT}}{B_{0,PPT}} \times e^{(-K_{PPT,G} \times t)}} - \frac{B_{f,ZPT}}{1 + e^{\frac{[-K_{ZPT,G} \times (t-t_0)]}} \quad (1)$$

式(1)中前、后项分别表示浮游植物生长项和浮游动物摄食项, $B_{0,PPT}$ 、 $B_{t,PPT}$ 、 $B_{f,PPT}$ 和 $K_{PPT,G}$ 分别为浮游植

物起始生物量、 t 时刻生物量、终止生物量和生长速率常数, $B_{f,ZPT}$ 、 $K_{ZPT,G}$ 和 t_0 分别为浮游动物终止生物量、生长速率常数和生长滞后时间.

根据方程(1)应用非线性拟合技术,可得到在不同实验条件下海洋浮游植物的生长曲线(图 1),与实验数据存在较好的线性相关性($R^2 = 0.92 \pm 0.05$, $p < 0.05$),进而可得到相应终止生物量(表 2,表 3).结果表明,在封闭实验体系中,摄食条件下的海洋浮游植物生长模型(方程 1)较传统 Logistic 模型能更好

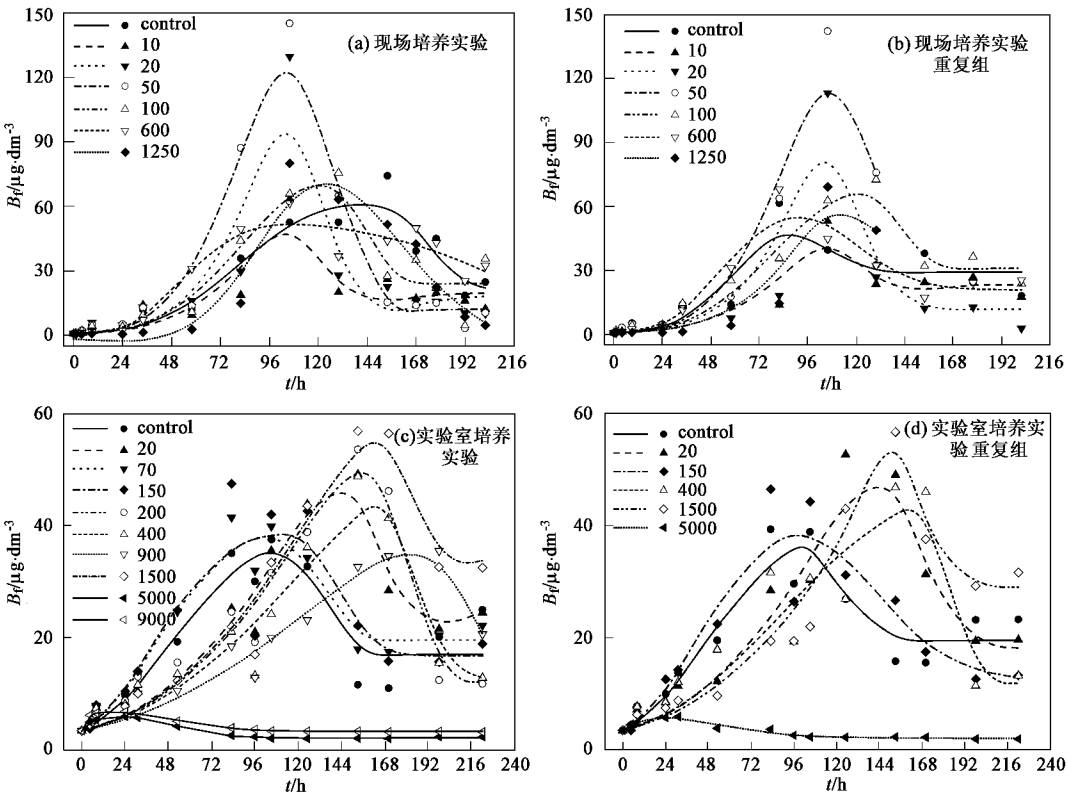


图 1 不同 No.0 柴油 WAF 浓度下海洋浮游植物生长曲线

Fig. 1 Growth curve of marine algae with different doses No.0 diesel water accommodated fraction

地反映海洋生态系统.

2.2 No.0 柴油 WAF 存在条件下海洋浮游植物的生长效应模型

如表 2,表 3 所示,随 No.0 柴油 WAF 浓度的不同,海洋浮游植物终止生物量(B_f)发生变化,减少或增加.这样,根据 B_f 的相对变化:

$$\Gamma = \frac{B_f^c - B_f}{B_f^c} \times 100\% \quad (2)$$

上式可以表征石油烃对浮游植物生长的影响程度,其中 c 表示未污染状况.为方便表述,可将 Γ 称作石油烃浮游植物生长效应因子, Γ 越大表示生物生长效应越大,其中 $\Gamma > 0$ 表示石油烃对浮游植物

生长有抑制作用,而 $\Gamma < 0$ 时则表示促进作用.实验进一步表明,可应用 GaussAmp 方程(图 2)描述 B_f 与 No.0 柴油 WAF 浓度($c, \mu g \cdot dm^{-3}$)之间的关系:

$$B_f = B_{f(\min)} + (B_{f(\max)} - B_{f(\min)}) \times e^{-\frac{(c - c_{\max})^2}{2\omega^2}} \quad (3)$$

式中, $c_{\max}$ 表示对应最大终止生物量 $B_{f(\max)}$ 的污染物浓度, $B_{f(\min)}$ 表示最小终止生物量, ω 为常数.

这样,结合方程(3),方程(2)转变为:

$$\Gamma = \frac{(B_f^c - B_{f(\min)}) - (B_{f(\max)} - B_{f(\min)}) \times e^{-\frac{(c - c_{\max})^2}{2\omega^2}}}{B_f^c} \times 100\% \quad (4)$$

如果 $B_{f(\min)}$ 趋近于 0, 则方程简化为:

$$\Gamma = \left(1 - \frac{B_{f(\max)} \times e^{-\frac{(c-c_{\max})^2}{2\omega^2}}}{B_f^c} \right) \times 100\% \quad (5)$$

实际上, 当石油烃浓度增加到一定阈值时, 浮游植物生长、繁殖几乎完全停止(图 1), 则相对于未污染甚至低浓度石油烃条件下的 B_f , $B_{f(\min)}$ 可忽略不计. 如果化学污染物对浮游植物生长只存在抑制作用, 则 $c_{\max} = 0$, 因此方程(5)可简化为:

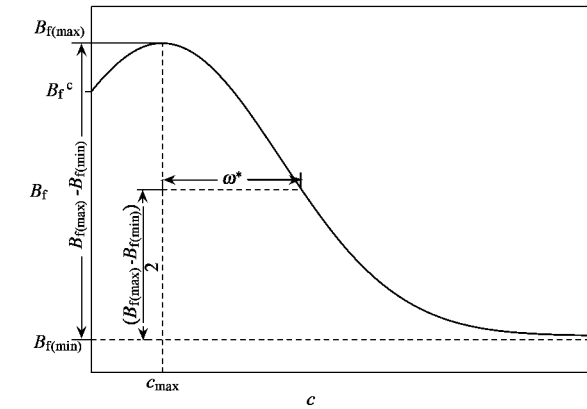
$$\Gamma = \left(1 - e^{-\frac{c^2}{2\omega^2}} \right) \times 100\% \quad (6)$$


图 2 GaussAmp 模型
Fig.2 GaussAmp model

2.3 No.0 柴油 WAF 存在条件下海洋浮游植物的生长效应分析

对比现场培养、实验室培养实验组和重复组实验结果表明, 无论从生长曲线变化趋势(图 1), 还是从拟合结果(表 2, 表 3)都基本一致. 在现场培养实验条件下, No.0 柴油 WAF $50 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ 浓度组浮游植物终止生物量最大, 其次是 $20 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ 浓度组, 而 $600 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ 浓度组最小. 而在实验室条件下, 200

$\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ 浓度组浮游植物终止生物量最大, 其次是 $20 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ 和 $1500 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ 浓度组, 而 $9000 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ 浓度组最小.

进一步分析表明, 在现场培养实验条件下, 低浓度 No.0 柴油 WAF ($< 100 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$) 对浮游植物生长有明显促进作用, 生长促进率最大约为 180% [图 3(a)]. 同样, 在实验室条件下, 低浓度 No.0 柴油 WAF ($< 1500 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$) 对浮游植物生长也有明显促进作用, 生长促进率最大约为 120% [图 3(b)], 这可能与石油烃等污染物间接生态效应影响有关^[19]. 研究表明, 在海洋或淡水生态环境中, 由于石油烃等污染物生态(毒性)效应影响, 浮游动物死亡或摄食速率降低, 从而致使浮游植物大量生长^[20-22]. 然而, 在高浓度 No.0 柴油 WAF 条件下, 石油烃对浮游植物生长效应不甚显著, 甚至有明显抑制作用 [图 3(b)], 这可能与石油烃等污染物直接毒性效应影响有关^[19]. 多环芳烃急性生物毒性研究表明, 针对不同藻类, 其半效抑制浓度 72h-EC₅₀ 多在 $1500 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ 以上^[23-26], 高浓度下会抑制浮游植物生长. 对比现场和实验室培养实验结果分析表明, 现场培养实验生长促进率最大值大于实验室培养实验, 而实验室培养实验中对海洋浮游植物生长促进的石油烃浓度范围比现场培养实验的宽, 这可能与 2 组实验外界条件(如光照和温度等)不同有关. 事实上, 光照和温度都是限制浮游植物生长的重要因子^[27]. 但是, 就现场培养和实验室培养而言, 其每 1 组实验中营养盐和外界条件都是相同的, 浮游植物生长效应的差别应主要是由石油烃浓度的不同引起.

3 结论

(1) 应用富氮、磷、硅营养盐现场和实验室培养方法, 提出了摄食条件下的海洋浮游植物生长模

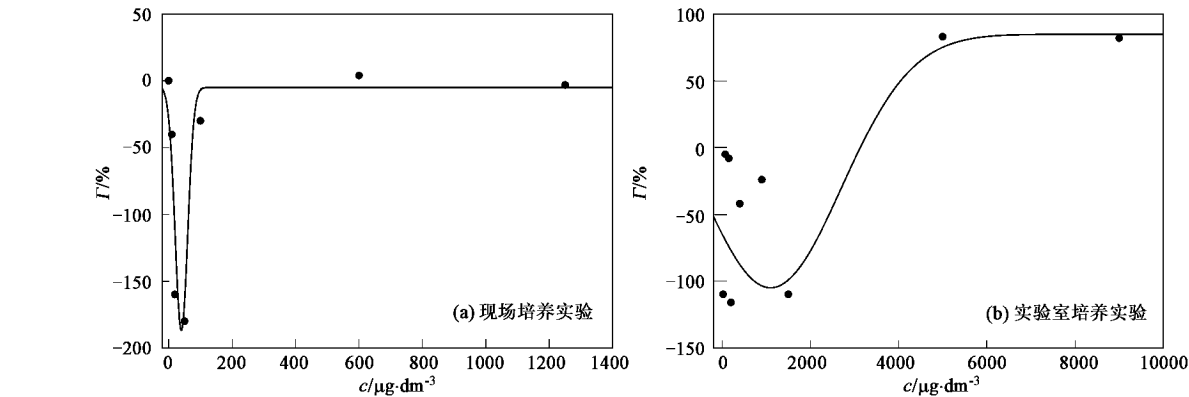


图 3 不同 No.0 柴油 WAF 浓度下海洋浮游植物生长效应因子(Γ)变化曲线
Fig.3 Variation of growth effect factor (Γ) of marine algae with different doses No.0 diesel water accommodated fraction

型,据此模型得到了不同浓度 No.0 柴油水溶组分下浮游植物终止生物量,进而提出了不同浓度 No.0 柴油水溶组分下浮游植物生长效应模型.在此基础上,研究了不同浓度 No.0 柴油水溶组分下浮游植物生长效应.结果表明,在现场和实验室条件下,低浓度 No.0 柴油水溶组分对浮游植物生长有明显促进作用,生长促进率最大分别约为 180% 和 120%,然而,在高浓度 No.0 柴油水溶组分条件下,石油烃对浮游植物生长效应不甚显著,甚至有明显抑制作用.

(2)文中提出的摄食条件下的海洋浮游植物生长模型适用于浮游动物存在时,实验室和现场条件下浮游植物的生长过程描述,而不同浓度 No.0 柴油水溶组分下浮游植物生长效应模型则可用于污染物存在情况下海洋浮游植物生长效应分析,也可用于我国近海海洋生态效应评价,乃至生态系统健康预警指标体系的建立.

致谢:实验中部分藻种由中国海洋大学东方红 2 号科学考察船杨世民工程师鉴定,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] Ansari Z A, Saldanha M C, Rajkumar R. Effects of petroleum hydrocarbons on the growth of a microalga, *Isochrysis* sp. (Chrysophyta)[J]. Indian Journal of Marine Sciences, 1997, 26 (4): 372 ~ 376.
- [2] Bhadauria S, Sengar R M S, Mittal S, et al. Effect of petroleum hydrocarbons on algae [J]. Journal of Phycology, 1992, 28 (3suppl.): 16 ~ 21.
- [3] Kouichi O, Masahiko N, Minoru W, et al. Study of the effect of water-soluble fractions of heavy-oil on coastal marine organisms using enclosed ecosystems, mesocosms [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 47: 78 ~ 84.
- [4] Shi X Y, Wang X L, Jiang Y, et al. Influence and bioconcentration of petroleum hydrocarbon associated with oil on and by plankton in a mesocosm experiment of East China Sea[A]. In: Watanabe M, Zhu M Y. Proceedings of the Japan-China joint workshop on the cooperative study of the marine environment-Environmental Capacity and Effects of Pollutants on Marine Ecosystem in the East China Sea-海洋環境保全に関する日中専門家ワークショップ(1999 年 3 月)の講演論文集[C]. Tsukuba: National Institute for Environmental Studies, 2000. 89 ~ 96.
- [5] 唐森铭,陈孝麟,庄栋法. 石油分散剂 BP-1100X 对海洋围隔生态系的影响研究[J]. 生态学报, 1992, 12(4): 361 ~ 367.
- [6] Lalli C M, Parsons T R. Biological oceanography: An Introduction [M]. New York: Pergamon Press, 1993. 45 ~ 79.
- [7] Swackhamer D L, Skoglund R S. Bioaccumulation of PCBs by algae: kinetics versus equilibrium[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1993, 12(5): 831 ~ 838.
- [8] Skoglund R S, Swackhamer D L. Fate of hydrophobic organic contaminants: processes affecting uptake by phytoplankton[A]. In: Baker L A. Environmental Chemistry of Lakes and Reservoirs [C]. Washington, D C: American Chemical Society, 1994. 559 ~ 573.
- [9] Wolfe M F, Schwartz G J B, Singaram S, et al. Influence of dispersants on the bioavailability of naphthalene from the water-accommodated fraction crude oil to the golden-brown algae, *Isochrysis galbana*[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1998, 35: 274 ~ 280.
- [10] 李永祺,丁美丽. 海洋污染生物学[M]. 北京: 海洋出版社, 1991. 244 ~ 268.
- [11] 程振波. 黄骅市沿海赤潮发生机制及危害[J]. 海洋通报, 1992, 11(1): 100 ~ 102.
- [12] 王伟洁,吴长江. 我国海洋石油污染对渔业的危害及其防治[J]. 海洋信息, 1993, (3): 25 ~ 27.
- [13] Siron R, Pelletier E, Delille D, et al. Fate and effects of dispersed crude oil under icy conditions simulated in mesocosms[J]. Marine Environmental Research, 1993, 35(3): 273 ~ 302.
- [14] GB 12763. 6-91, 海洋调查规范[S].
- [15] GB 12763. 4-91, 海洋调查规范[S].
- [16] 马知恩. 种群生态学的数学建模与研究[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2000. 5 ~ 18.
- [17] 邢黎峰,刘贤喜,法永乐. Richards 生长模型描述弹性分析[J]. 山东农业大学学报, 1997, 28(4): 460 ~ 464.
- [18] 邢黎峰,孙明高,王元军. 生物生长的 Richards 模型[J]. 生物数学学报, 1998, 13(3): 348 ~ 353.
- [19] Fleeger J W, Carman K R, Nisbet R M. Indirect effects of contaminants in aquatic ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2003, 317: 207 ~ 233.
- [20] Elmgren R, Vargo G A, Grassle J F, et al. Trophic interactions in experimental marine ecosystems perturbed by oil[A]. In: Giesy J P. Microcosms In Ecological Research, Symposium Series 52 (CONF-781101)[C]. Washington, D C: Technical Information Center, US Department of Energy, 1980. 779 ~ 800.
- [21] Lay J P, Schauerte W, Klein W. Effects of trichloroethylene on the population dynamics of phyto- and zoo-plankton in compartments of a natural pond[J]. Environmental Pollution (Series A), 1984, 33: 75 ~ 91.
- [22] Lay J P, Schauerte W, Peichl L, et al. Influence of benzene on the phytoplankton and on *Daphnia pulex* in compartments of an experimental pond [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1985, 10(2): 218 ~ 227.
- [23] Calamari D, Galassi S, Setti F, et al. Toxicity of selected chlorobenzenes to aquatic organisms[J]. Chemosphere, 1983, 12 (2): 253 ~ 262.
- [24] Ma Y J, Wang X L, Yu W J, et al. Toxicity of chlorinated benzenes to marine algae[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1997, 15(4): 308 ~ 313.
- [25] Wong P T S, Chau Y K, Rhamey J S, et al. Relationship between water solubility of chlorobenzenes and their effects on a freshwater green alga[J]. Chemosphere, 1984, 13(9): 991 ~ 996.
- [26] 江玉,吴志宏,韩秀荣,等. 多环芳烃对海洋浮游植物的生物毒性研究[J]. 海洋科学, 2002, 26(1): 46 ~ 50.
- [27] De Baar H J W. Von Liebig's law of the minimum and plankton ecology (1899 ~ 1991)[J]. Progress in Oceanography, 1994, 33: 347 ~ 386.