

# 长江口海域赤潮生态动力学模型及 赤潮控制因子研究\*

乔方利 袁业立 朱明远 赵伟  
季如宝 潘增弟 陈尚 万振文

(海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266003)

**摘要** 基于中日合作长江口海域生态围隔的试验数据,建立了长江口海域六分量赤潮生态动力学模型,并用海上实测数据进行了检验,进而详细讨论了营养盐及光照强度对赤潮形成的影响。结果表明,此次海洋生态围隔试验加入营养盐无机磷所达到的浓度对于诱发该赤潮过程是适宜的。随着初始N浓度的降低,P增加到一定程度便不再影响叶绿素浓度分布。当光照为原光照强度的50%时,叶绿素浓度最高可达 $35\mu\text{g/L}$ 。长江口海域发生赤潮无机氮和无机磷营养盐浓度阈值分别为 $4.5\mu\text{mol/L}$ 和 $1.0\mu\text{mol/L}$ 。该模型结合水动力学模型不仅可以对海洋赤潮现象进行预测及海洋水质环境的总量控制,也可直接应用于海水养殖,对施肥及养殖容量提供理论指导。

**关键词** 生态动力学模型 海洋生态围隔试验 赤潮

**学科分类号** Q141

海洋中经常发生以浮游藻类植物大量繁殖而后急剧死亡为特征的海洋赤潮现象(朱明远等,1996),特别是近20年来,随着工业化程度的提高,大量营养物质入海,致使中国近海每年发生赤潮50次左右。这往往对于局地海洋生态系统的平衡产生破坏性影响(林永水等,1997)。以往对于赤潮现象的研究手段主要是现场观测和定性描述(暨卫东,1996;陈慈美等,1996)。本文利用环境因子可控制的海上生态围隔试验所诱发的一个赤潮发生至消衰全过程资料,首次建立了该海域的赤潮生态动力学模型,模型后报过程曲线与实测数据进行了对比,并详细讨论了营养盐变化及光照强度对赤潮形成的影响,这将为大海域生态动力学模型的建立奠定部分基础。另外,若将海水养殖场视为一广义的生态围隔系统,本模型可对于海水养殖场的施肥量和生物养殖容量提供指导。

## 1 海上生态围隔试验过程及资料

### 1.1 生态围隔试验概况

由双边国际合作项目“中日东海特定海区河流入海环境负荷及其对海洋生态系统的影响合作研究”支持的海上生态围隔实验于1997年10月10日—17日在研究海区( $30^{\circ}50.460' \text{N}$ ,  $122^{\circ}36.665' \text{E}$ )进行(图1,其中L点为生态围隔实验站点,A1—C5为此次中日

\* 中日合作东海环境负荷及其对生态系统影响的调查研究项目,1997—1999。乔方利,男,出生于1966年5月,研究员, Fax: 0086-0532-2879562

收稿日期:1998-09-12,收修改稿日期:1999-09-05

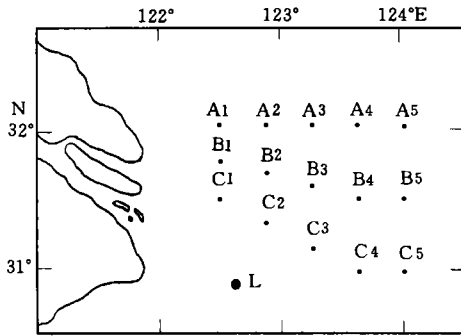


图1 1997年10月中日合作海洋生态围隔实验位置(L点)

Fig.1 The location of the China-Japan cooperation mesocosm experiment in October, 1997 (Point L)

合作的现场调查站位)。10日 17:20 生态围隔实验装置布放(图版 I: 1 为 11 日晨的照片), 并开始采集第一批样品, 此后每天早上 9:00 采集样品一次, 11 日下午, 由于风水浪高, 船摇晃达  $10^\circ$  左右, 造成对比生态围隔桶进水(图版 I: 2)。至 14 日夜, 船摇晃最大达  $40^\circ$ , 15 日下午将生物围隔装置在 2 节船速下拖至绿华山锚地避风, 由于生态围隔桶下端固定绳索断裂, 整个围隔桶随海流晃动(图版 I: 3—4)。在整个生态围隔试验过程中, 桶内混合充分, 在垂直方向上可视为一层。围隔桶内水色与桶外水色明显不同, 通过加入无机磷, 成功诱发了一个典型的赤潮过程, 赤潮优势种为中华骨肋条藻。

## 1.2 本模式中利用的资料及处理方法

表1 实测海面光照强度

Tab.1 Observed light intensity at sea surface

时间 (h)	日期(d)											
	13		14		15		16		17		19	
	光强	资料个数	光强	资料个数	光强	资料个数	光强	资料个数	光强	资料个数	光强	资料个数
5											18.0	617
6					151.7	354	552.1	1225	1173.0	591	269.8	3600
7					167.1	3600	1170.8	3600	1283.2	3600	788.9	3600
8					1234.5	3588	1487.2	3600	1457.7	3600	1552.2	3600
9					1815.5	3600	1996.9	3600	2096.3	3588	2234.1	3589
10					1001.3	3600	2629.8	3589	2591.5	3600	2580.7	3600
11	2768.0	524			1218.5	3600	2700.5	3600	2933.8	3589	2657.8	3589
12	2660.6	2980			1721.5	217	2898.3	3600	2921.4	3373	2485.0	3600
13	2285.4	3600	1266.8	3523	913.8	3600	2835.9	2588	2658.9	2929	2604.5	3139
14	1780.3	3600	864.4	3600	448.7	3600	2635.0	3600	2407.3	3600	2303.1	3038
15	1160.1	2863	581.0	3587	227.8	3588	2102.3	3600	1807.6	3600	1775.6	3600
16	418.5	3600	131.6	3600	147.3	3600	893.8	3588	693.1	3589	608.1	3589
17	36.4	1931	12.1	2390	62.6	455	85.0	894	23.7	3600	9.9	3587
18									1.9	3600	0.6	1831
19									1.9	1491		

**1.2.1 营养盐资料** 中方由青岛海洋大学王修林和石晓勇测得, 包括  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ , 每天采样一次; 日方由日本国立环境研究所水土壤圈环境部村上正吾提供, 包括  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ , 每天采样一次, 双方资料用于对比较验。

**1.2.2 光照强度资料** 光照强度资料中方由国家海洋局第一海洋研究所朱明远和陈尚利用光量子仪测量得出。由于水下探头故障, 本文仅获取了海表面的光强资料, 每秒采样

一次。文中将光强资料进行平均,若 1h 内无任何观测时参考 10 月 19 日同一时间内的光照强度,见表 1。

取光照强度随水深指数衰减。

$$I_z = PAR \cdot I_0 \cdot e^{-\kappa z} \quad (1)$$

其中  $PAR$  是光照强度中可被利用进行光合作用的百分比,  $\kappa = 0.043 + 0.0545 \cdot TPM$  (2)  $TPM(\mu\text{g} / \text{L})$  是水中悬浮体浓度,其量值由国家海洋局第一海洋研究所陈尚和朱明远测得。

本模型中对硅藻取水下 1m 处的光照强度;考虑到鞭毛藻会向上游动采光的特性 (Parsons *et al*, 1977),本模型对鞭毛藻取水下 0.25m 处的光照强度。

**1.2.3 藻类数量及叶绿素  $a$  浓度** 硅藻和鞭毛藻数量数据由国家海洋局第一海洋研究所李瑞香和陈尚测定,叶绿素  $a$  浓度由国家海洋局第一海洋研究所李宝华和朱明远提供。本文假定单个硅藻与单个鞭毛藻重量相同,那么总叶绿素  $a$  浓度可用两类藻数量作为权重进行分配,得到的硅藻和鞭毛藻浓度作为实测值。

**1.2.4 有机碎屑浓度** 本模型将颗粒有机氮 (PN) 浓度减去叶绿素  $a$  的氮当量浓度作为有机碎屑的氮摩尔浓度。其中 PN 由国家海洋局第一海洋研究所陈尚和朱明远提供。

## 2 赤潮生态动力学模型

### 2.1 生态动力学模型的控制方程

本模型中无机营养盐分为  $N$ 、 $P$  和  $Si$  三类,浮游植物分为硅藻和鞭毛藻,并在生态动力学模型中考虑有机碎屑和光照强度 (Skogen, 1995),从而可建立如下模型。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN}{dt} = \text{diff}(N) + R_{\text{Dia}} + R_{\text{Fla}} + C_4 \text{Det} - (P_{\text{Dia}} + P_{\text{Fla}}) + \varphi(N) \\ \frac{dP}{dt} = \text{diff}(P) + C_1 [R_{\text{Dia}} + R_{\text{Fla}} + C_4 \text{Det} - (P_{\text{Dia}} + P_{\text{Fla}})] + \varphi(P) \\ \frac{dSi}{dt} = \text{diff}(Si) - C_2 P_{\text{Dia}} + \varphi(Si) \\ \frac{dDia}{dt} = \text{diff}(Dia) + P_{\text{Dia}} - R_{\text{Dia}} - C_3 \text{Dia} \\ \frac{dFla}{dt} = \text{diff}(Fla) + P_{\text{Fla}} - R_{\text{Fla}} - C_3 \text{Fla} \\ \frac{dDet}{dt} = \text{diff}(Det) + C_3 (\text{Dia} + \text{Fla}) - C_4 \text{Det} \end{array} \right. \quad (3)$$

其中

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + u \frac{\partial A}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial y} + w \frac{\partial A}{\partial z}$$

$$\text{diff}(A) = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_z \frac{\partial A}{\partial z} \right)$$

$A$  表示  $N$ 、 $P$ 、 $Si$ 、 $Dia$ 、 $Fla$  或  $Det$  中任意一个。

硅藻呼吸率:  $R_{\text{Dia}} = a_5 \cdot \text{Dia} \cdot e^{a_5 T}$ ;

鞭毛藻呼吸率:  $R_{Fla} = a_5 \cdot Fla \cdot e^{a_5 T}$ ;

硅藻成长率:  $P_{Dia} = P_{Dia-max} \cdot V_{1,Dia} \cdot N_{Lim,Dia} \cdot Dia$ ;

鞭毛藻成长率:  $P_{Fla} = P_{Fla-max} \cdot V_{1,Fla} \cdot N_{Lim,Fla} \cdot Fla$ ;

海温  $T^\circ\text{C}$  时硅藻最大生长率 (Kremer *et al*, 1978):  $P_{Dia-max} = a_1 e^{a_2 T}$ ;

海温  $T^\circ\text{C}$  时鞭毛藻最大生长率 (Kremer *et al*, 1978):  $P_{Fla-max} = a_3 e^{a_4 T}$ ;

$$V_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_{ij} + kKh_{ij}} \quad i = 1(\text{光照}), 2(\text{N 营养盐}), 3(\text{P 营养盐}), 4(\text{Si 营养盐}), j = 1(\text{硅藻}), 2(\text{鞭毛藻});$$

硅藻的营养盐限制:  $N_{Lim,Dia} = \min(V_{21}, V_{31}, V_{41})$ ;

鞭毛藻的营养盐限制:  $N_{Lim,Fla} = \min(V_{22}, V_{32})$

$\varphi(N)$ ,  $\varphi(P)$  和  $\varphi(Si)$  分别为  $N$ 、 $P$  和  $Si$  的源项 (如河口输入等)。

## 2.2 生态动力学模型控制方程的简化

由于围隔桶与外界无交换, 且垂直方向可将围隔桶视为单层, 围隔效应可认为营养盐源函数恒为零, 因此得出

表2 生态动力学模型参量

Tab.2 Parameters used in the HAB dynamical model

参数	定 义	取值
$a_1$	硅藻 $0^\circ\text{C}$ 时的最大生长速率常数 ( $\text{s}^{-1}$ )	$1.22 \times 10^{-5}$
$a_2$	硅藻成长率随水温变化系数 ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )	0.063
$a_3$	鞭毛藻 $0^\circ\text{C}$ 时的最大生长速率常数 ( $\text{s}^{-1}$ )	$1.12 \times 10^{-5}$
$a_4$	鞭毛藻成长率随水温变化系数 ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )	0.063
$a_5$	浮游植物 $0^\circ\text{C}$ 时的呼吸率 ( $\text{s}^{-1}$ )	$12.07 \times 10^{-7}$
$a_6$	浮游植物呼吸率随水温变化系数 ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )	0.07
$C_1$	浮游植物细胞内磷与氮的重量比	0.3
$C_2$	浮游植物细胞内硅与氮的重量比	1.75
$C_3$	浮游植物死亡率 ( $\text{s}^{-1}$ )	$1.6 \times 10^{-6}$
$C_4$	有机颗粒的分解率 ( $\text{s}^{-1}$ )	$1.52 \times 10^{-8}$
$kh_{11}$	硅藻光照强度半饱和和常数 ( $\mu\text{E}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )	96
$kh_{21}$	硅藻DIN半饱和和常数 ( $\mu\text{mol}/\text{L}$ )	1.3
$kh_{31}$	硅藻DIP半饱和和常数 ( $\mu\text{mol}/\text{L}$ )	0.125
$kh_{41}$	硅藻DISi半饱和和常数 ( $\mu\text{mol}/\text{L}$ )	1.0
$kh_{12}$	鞭毛藻光照强度半饱和和常数 ( $\mu\text{E}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )	150
$kh_{22}$	鞭毛藻DIN半饱和和常数 ( $\mu\text{mol}/\text{L}$ )	0.25
$kh_{32}$	鞭毛藻DIP半饱和和常数 ( $\mu\text{mol}/\text{L}$ )	0.094
$PAR$	浮游植物可利用光照强度 (%)	50

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} &= R_{Dia} + R_{Fla} + C_4 Det - (P_{Dia} + P_{Fla}) \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= C_1 [R_{Dia} + R_{Fla} + C_4 Det - (P_{Dia} + P_{Fla})] \\ \frac{\partial Si}{\partial t} &= -C_2 P_{Dia} \\ \frac{\partial Dia}{\partial t} &= P_{Dia} - R_{Dia} - C_3 Dia \\ \frac{\partial Fla}{\partial t} &= P_{Fla} - R_{Fla} - C_3 Fla \\ \frac{\partial Det}{\partial t} &= C_3 (Dia + Fla) - C_4 Det \end{aligned} \right. \quad (4)$$

(4) 式为本文所得到的生态动力学模型。海洋生态动力学模型参数取值见表 2, 生态动力学模型概念框图见图 2。

### 3 模型结果与讨论

#### 3.1 生态围隔试验过程的模拟

图 3 是模拟结果与实测结果的比较, 误差值见表 3 (误差比较自 1997 年 10 月 12 日开始), 当实测值很小时, 相对误差意义不大, 故本文只给出绝对误差分析。图 4 给出了硅藻和鞭毛藻的成长率、呼吸率和限制因子。由于假定在短时间内营养盐 Si 不能从有机碎屑分解出来, 因此模拟的无机态 Si 浓度一直降低。Si 在最后两次的实际观测中浓度升高 (中、日双方测得结果均如此), 是否是围隔桶进水还是细菌分解产生出了无机 Si, 原因还不清楚。在赤潮衰亡过程中, 伴随着大量浮游植物的死亡, 有机碎屑会产生沉降, 由于暂时没有考虑沉降因素, 最后一次的模拟值比实测值高得多。模拟曲线的波状起伏是由于光照的昼夜变化所引起。图 4 的限制因子可明显看出, 光照具

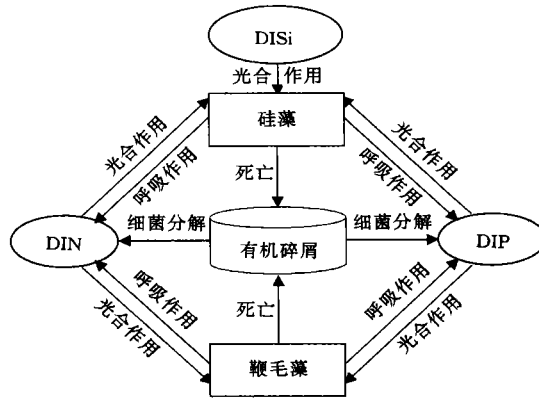


图2 生态动力学概念模型

Fig.2 The concept model of ecosystem dynamics

表3 模拟值与实测值之差

Tab.3 Simulation errors compared with data

日期 (d)	N ( $\mu\text{mol/L}$ )	P ( $\mu\text{mol/L}$ )	Si ( $\mu\text{mol/L}$ )	鞭毛藻 ( $\times 10^{-2} \mu\text{g/L}$ )	硅藻 ( $\mu\text{g/L}$ )
12	1.94	0.37	-0.25	0.11	-1.17
13	4.78	0.52	-0.24	0.86	5.01
14	5.88	0.21	-1.55	1.51	3.89
15	3.43	0.21	2.17	3.97	-5.63
16	5.36	0.49	-1.20	-1.54	4.91
17	5.23	0.43	-3.08	1.36	0.15

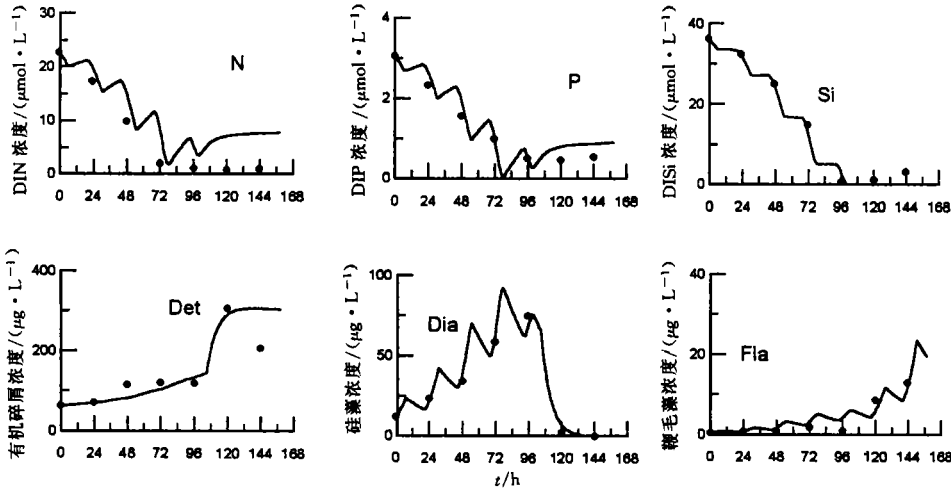


图3 数值模拟结果与实测结果比较

Fig.3 Comparison of model results with observations

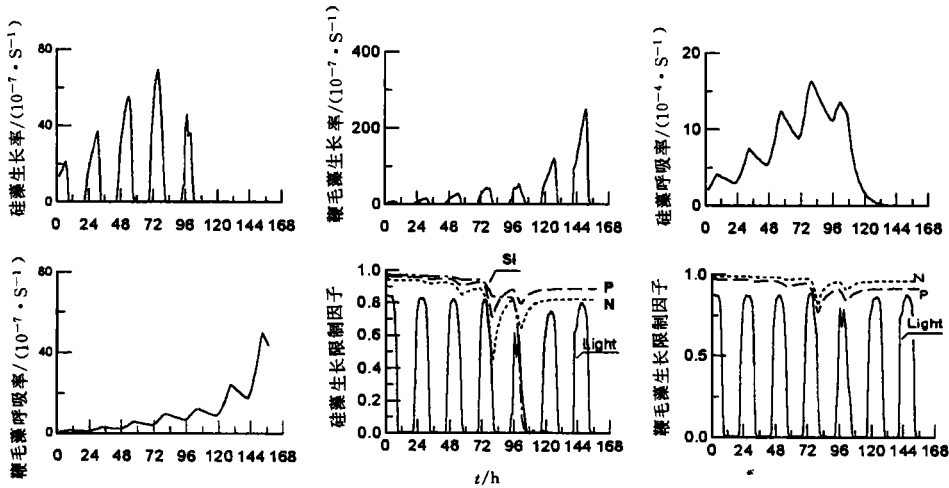


图4 硅藻和鞭毛藻的成长率、呼吸率和生长限制因子

Fig.4 Growth rates, respiration rates and limitation factors of diatom and flagellate

有明显的日内变化,且10月15日的光照强度明显偏低(见表1)。由于围隔桶内大量P的加入,N变成了限制因子。对于鞭毛藻而言,除10月14日(72h至96h段)外,受营养盐限制很小。

### 3.2 赤潮生态过程数值模拟实验

分析赤潮在各种条件下发生的可能性,本文进行了多次数值实验。目前对于赤潮发生的判据还缺乏统一的认识,有以单位体积内细胞数量为判据,也有以叶绿素浓度为赤潮发生阈值的。本文作者结合此次围隔现场实验认为20 $\mu\text{g/L}$ 叶绿素浓度可作为赤潮发生的阈值,而且这种状态下从水色可以明显看出赤潮现象。

取初值N为18 $\mu\text{mol/L}$ (版图I:5),分析不同营养盐P浓度下叶绿素a浓度(硅藻浓度

与鞭毛藻浓度之和)分布,随 P 浓度升度,最大叶绿素浓度变高。从图可以看出,此次围隔生态试验将营养盐 P 浓度增加到  $3.25\mu\text{mol/L}$  可以诱发较强的赤潮过程,当无机磷浓度值低于  $0.5\mu\text{mol/L}$  时,一周时间浮游生物浓度还不足以达到峰值。取初值 N 浓度为  $9\mu\text{mol/L}$  (版图 I: 6), 此时仍有大片区域可发生赤潮。当 P 浓度超过  $1.6\mu\text{mol/L}$  后, P 浓度的增加不影响浮游植物的成长,因为此时 N 已成为浮游植物的限制因子。取初始 N 浓度为  $4.5\mu\text{mol/L}$  (版图 I: 7), 此时 P 浓度超过  $1\mu\text{mol/L}$  后, P 增加与否已对系统无影响。最大叶绿素浓度仅可达  $22\mu\text{g/L}$ , 因此,可以认为长江口海域发生赤潮无机氮浓度阈值为  $4.5\mu\text{mol/L}$ , 无机磷浓度阈值为  $1.0\mu\text{mol/L}$ 。版图 I: 8 分析了不同光照条件下叶绿素浓度的分布,当光照强度降为 50% 时,浮游植物总量已受到很大限制,当光照降至 35% 以下时,不会有明显赤潮现象发生。

## 4 结语

4.1 本文基于中日合作海洋生态围隔试验资料,建立了长江口海域赤潮生态动力学模型,并对观测过程进行了模拟。结果表明,本模型可以模拟赤潮的发生发展至衰亡过程。

4.2 长江口海域发生赤潮的无机氮和无机磷营养盐浓度阈值分别为  $4.5\mu\text{mol/L}$  和  $1.0\mu\text{mol/L}$ 。

4.3 进行的数值实验结果表明,随着初始 N 浓度的降低, P 浓度的增加不影响叶绿素浓度的分布。当光照降至 35% 以下时,不会发生明显的赤潮现象,当光照为原光照强度的 50% 时,叶绿素浓度最高仅为  $35\mu\text{g/L}$ 。

4.4 本模型结合水动力模型不仅可对海洋赤潮现象提供预测及应用于海洋水质环境的总量控制,也可直接应用于海水养殖场中对施肥及养殖容量提供宏观指导。

**致谢** 青岛海洋大学徐冠国教授对本文提出了很多宝贵意见;与国家海洋局第一海洋研究所丁永耀研究员和李瑞香副研究员进行的海洋光学及赤潮现象的多次讨论使作者受益良多,谨致谢忱。

## 参 考 文 献

- 朱明远,李瑞香,1996. 赤潮研究中的生态学问题,见:朱明远,李瑞香,王 飞编. 中国赤潮研究. 青岛:青岛出版社,1—5
- 暨卫东,1996. 马銮湾养殖海域富营养化与赤潮关系研究. 见:朱明远,李瑞香,王 飞编. 中国赤潮研究. 青岛:青岛出版社,99—107
- 陈慈美,张彩云,吴瑜端,1996. 养殖污水对厦门西港富营养化/赤潮诱发效应,见:朱明远,李瑞香,王 飞编,中国赤潮研究. 青岛出版社,108—115
- 林永水,周贤沛,邱德全等,1997. 多样性指数法在赤潮预测中的应用,见:林永水编. 近海富营养化与赤潮研究. 北京:科学出版社,25—29
- Kremer J N, Nixon S W, 1978. A coastal marine ecosystem. Springer-verlag Berlin Heidelberg, 37—39
- Parsons T R, Takahashi M, Hargrave B, 1977. Biological oceanographic processes (2nd Ed). Pergamon Press, 37—38, 332
- Skogen M D, 1995. Modelling the primary production in the North Sea using a coupled 3 dimensional physical-chemical-biological ocean model. Estuarine, coastal and shelf science, 41:545—565
- Wilfried K, Gunther R, 1997. A one-dimensional physical-biological model study of the pelagic nitrogen

cycling during the spring bloom in the northern North Sea (FLEX'76). *J. Mar. Res.*, 55(4):687—734

## STUDY ON HAB DYNAMICAL MODEL AND HAB LIMITATION FACTORS FOR THE SEA AREA ADJACENT TO CHANGJIANG RIVER ESTUARY

QIAO Fang-li, YUAN Ye-li, ZHU Ming-yuan, ZHAO Wei, JI Ru-bao,  
PAN Zeng-di, CHEN Shang, WAN Zhen-wen

(*Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, First Institute of Oceanography, Qingdao, 266003*)

**Abstract** From October 10 to 17, 1997, a marine ecosystem enclosed experiment (i.e. mesocosm experiment) was carried out in the Changjiang River estuary area as a part of Sino-Japan cooperation. 25m<sup>3</sup> sea water was filled and the initial nutrient concentrations of total dissolved nitrogen, dissolved phosphate and silicon are 24.8μmol/L, 0.65μmol/L, 40.2μmol/L, respectively. By adding dissolved phosphate concentration to 3.25μmol/L, a Harmful Algal Bloom (HAB or red tide) was successfully induced. Based on the experiment data, a marine HAB dynamical model is developed.

The model includes six variables, including three different nutrients, nitrogen, phosphorus and silicon, two groups of photoplanktons, flagellate and diatom, and detritus. Nitrogen and phosphorus are uptake by phytoplankton and added by phytoplankton respiration and regeneration of detritus. Silicon is absorbed by diatom and not added. Phytoplanktons increase by uptake nutrients and decrease by respiration and death. The dead photoplankton are changed to detritus and the later can regenerate nitrogen and phosphate through decomposition.

The model results are consistent with available data. The present work analyses the influence of nutrient concentration and light intensity to the formation of HAB. The main results are as follows. (1) The created HAB dynamical model successfully simulates the whole process. The added dissolved phosphorus is enough for strengthening the HAB process. (2) The threshold values of nitrogen and phosphorus concentration for HAB occurrence are 4.5μmol/L and 1.0μmol/L, respectively, for this area. (3) When surface light intensity is half of measured sea surface light intensity, the maximum chlorophyll concentration is 35μg/L. When the light intensity is 35% or below, HAB will not occur.

**Key words** HAB dynamical model Marine ecosystem enclosed experiment Red tide

**Subject classification number** Q141