

# 实际海域的赤潮生消过程数值模拟\*

许卫忆<sup>1</sup> 朱德弟<sup>1</sup> 张 经<sup>2</sup> 董礼先<sup>1</sup> 陈耕心<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室 杭州 310012)

<sup>2</sup>(华东师范大学河口海岸国家重点实验室 上海 200062)

**提要** 目前所了解的众多与发生赤潮有关的因素均非赤潮发生的充分必要条件,而且不存在稳定的赤潮诱发因子。赤潮的发生是富营养化、适合的光合作用条件和赤潮藻本身的死亡率三方面的综合结果。这 3 个因素以及与这 3 个因素有关的其他因素都可能成为赤潮发生的激发因子。根据此概念建立了赤潮生消过程的动力-营养盐-赤潮藻间的耦合数值模式,成功地数值模拟了 1998 年 3—4 月在香港沿海实际发生的赤潮生消的全过程。该模式对于研究赤潮的发展过程及预报是有益的探索。

**关键词** 赤潮,耦合数值模式,赤潮生消过程

**学科分类号** Q141

赤潮的危害已引起广泛重视,越来越多的学者开展赤潮研究(齐雨藻, 1994, 1997; 王寿松等, 1994; 吕颂辉等, 1994; 林昱等, 1994; 夏综万等, 1997; 霍文毅等, 1997; 乔方利等, 2000; 万振文等, 2000; 黄长江等, 2000), 以求尽早解除其危害。但至今的赤潮研究主要还是集中在赤潮的生理、生态方面的研究, 由此要达到预报赤潮的发生还有漫长道路。赤潮之所以带来危害就是因为它借助动力(海洋环境)蔓延至其他海区, 对赤潮的成灾起了决定性的作用。因此开展以海洋动力学为重要内容的赤潮种群动力学的研究, 对于掌握赤潮的发生、发展规律有着重要意义。(GEOHAB, 1998) 数值模拟就是赤潮种群动力学研究的一个重要手段。

本文研究提出赤潮的发生是由多种因素的综合结果的新观点, 认为在实际海洋中不存在稳定的、单一的赤潮激发因子。以此认识为基础, 以 1998 年香港海域发生的赤潮为例, 数值模拟了该次赤潮发生的全过程。该模式对于研究赤潮的发展过程及预报是有益的。

## 1 赤潮生消过程数值模型建立的基础

### 1.1 赤潮发生的机制问题

目前的赤潮研究中对赤潮发生的机制有争议。一般认为生存机制和暴发机制是不同的。对赤潮藻的生存机制是很明确的, 都是以营养盐为生存基础, 光合作用为必要条件来维持其生存, 可以说如果缺乏营养盐, 或缺乏光合作用的条件赤潮藻是无法生存的。不同种的赤潮藻的生存的机制应该是相同的。它们的生存与发育所需条件可能有的差别仅是数量的差别而非质的差别, 例如对温度、对营养盐及其他条件的要求等。

\* 国家自然科学基金会重大项目, 39790110 号。许卫忆, 男, 出生于 1945 年 3 月, 研究员, E-mail: wyxu2001021cn.com

收稿日期: 2000-01-06, 收修改稿日期: 2000-12-10

而赤潮藻的暴发与生存在机制上应该是相同的,赤潮藻暴发对于其他物种是灾害,而对于其本身赤潮藻而言是正常的,它的发展不是灾害,它的机制也应该是明确的。所谓暴发就是生存条件适合大量赤潮藻的迅速成熟,分裂繁殖并能生存下去,如果条件不适合赤潮藻就将停止分裂,或形成孢囊或死亡。

## 1.2 赤潮暴发的条件

与赤潮藻暴发有关的诸因素分为基本条件和辅助条件。正面的基本条件就是营养盐和光合作用。而浮游动物的摄食压力和赤潮藻自身的死亡率是赤潮暴发的负面的基本条件。正、负两方面构成了赤潮发生的必要条件。而其他的条件例如:盐度、维生素、铁等只是起强化或抑制作用的辅助条件,他们不能决定赤潮的暴发与否。

## 1.3 赤潮暴发的激发因子

在实际海洋中可能不存在稳定、单一的赤潮发生的激发因子。如上所述赤潮发生是3个或4个因素的综合结果,这3个因素以及影响这3个因素的辅助因素都可能在某时、某地成为某种赤潮的激发因子。从这个意义上可以说赤潮暴发的激发因子是随机的。也可以说所谓激发因子就是当综合结果处于临界状态时的作用,如果没有临界状态的基础,此作用也无法激发赤潮的发生。

## 2 赤潮生消过程的数值模型

采用动力模式与 N (nutrient)-P (phytoplankton)-Z (zooplankton) 模式的耦合来建立模拟赤潮生消过程的数值模型。1998年在广东和香港海域发生的是裸甲藻赤潮(细胞直径约为25 $\mu$ m,质量为400ngC)。定义赤潮藻浓度为 $10^6$  cells/L为暴发值(即通常所说发生赤潮)。在本模拟中规定超过10个网格点(每个网格点包括面积为460m $\times$ 460m),即面积约2.1km<sup>2</sup>以上,赤潮藻浓度达 $10^6$  cells/L以上,时间维持3h以上,才认定发生赤潮。

### 2.1 控制方程

2.1.1 动力部分 POM 模式(Blumberg *et al.*, 1987)(该模式 Blumberg 有介绍,在此从略)。

2.1.2 赤潮生态部分 N-P-Z 模式(Andrew *et al.*, 1996),该模式包括了以下因素。

$N(\text{gC/m}^3)$ : 赤潮藻的吸收,浮游动物的排泄及死亡后的分解,高级动物的排泄及死亡后的分解。

$P(\text{gC/m}^3)$ : 赤潮藻吸收营养盐生长,自然死亡,浮游动物的摄食,死亡沉降。

$Z(\text{gC/m}^3)$ : 浮游动物的成长及高级动物的捕食。

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N}{e+N} \frac{a}{b+cP} P + rP + \frac{\beta NP^2}{\mu^2 + P^2} Z^2 + \gamma Z^2$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{N}{e+N} \frac{a}{b+cP} P - rP - \frac{NP^2}{\mu^2 + P^2} Z - (s+k)P$$

本模式是根据营养盐的时空分布变化模拟赤潮藻的浓度的时空分布变化,方程中, $a$ 为赤潮藻的生长率(0.2/(m $\cdot$ d)); $b$ 为光在水中的衰变率(0.1/m); $c$ 为赤潮藻的自屏蔽作用(0.3m<sup>2</sup>/g); $e$ 为吸收营养盐的半饱和和常数(0.1gm<sup>3</sup>); $f$ 为对浮游动物的捕食率[m<sup>3</sup>/(g $\cdot$ d)]; $r$ 为赤潮藻的自然死亡率(0.1/d); $s$ 为赤潮藻沉降率(0.03/d); $k$ 为通过跃层的交换率(0.0/d); $\mu$ 为浮游动物摄食半饱和系数(0.035g/m<sup>3</sup>); $\beta$ 为浮游动物排泄率(0.33); $\lambda$ 为浮游动物最大摄食率(0.6/d)。未列单位的是无量纲参数。

本模拟中未包括浮游动物的模拟(即取  $Z=0$ ),这是因为浮游动物对赤潮的发生是负效应。在模拟已发生的赤潮时,浮游动物的作用必然已被克服因而将其忽略,但在预测时就不能忽略该效应。 $N$ 、 $P$  间当量关系取  $\lg C=20\text{mgChl}=10\text{mg N}$ ,这里,  $N$  是无机氮;  $C$  是碳;  $\text{Chl}$  是叶绿素。模拟结果  $P$  的输出单位原是  $\text{gC/m}^3$ 。考虑到习惯的需要,根据不同的赤潮藻的细胞质量换算成细胞密度( $\text{cell/L}$ )。

## 2.2 求解条件

**2.2.1 动力条件** 在各开边界上给定  $M_2$  和  $S_2$  分潮的潮位。在珠江口东面 4 个口门给定径流量。潮位、潮流初值均为零。网格尺度为  $460\text{m} \times 460\text{m}$ ,时间步长为  $120\text{s}$ 。

**2.2.2 水质模拟条件** 共设置 5 个排污口:3 个位于大鹏湾(分别为赤门海峡东口、塔门洲东南、大鹏湾东侧);1 个位于赤柱湾西;1 个位于大屿山西。出口处两种营养盐初始浓度分别为:总无机氮  $1300\mu\text{g/L}$ ,总无机磷  $500\mu\text{g/L}$ 。由于水流的对流扩散在其周围形成总氮浓度达到  $500\mu\text{g/L}$  左右的高值区,表明该海区已处于富营养化状态。赤潮藻细胞的初始浓度在大鹏湾内为  $1.0 \times 10^7\text{L}$ (此意味着  $10^7\text{L}$  才有 1 个赤潮藻细胞),而其他海域无赤潮藻细胞。潮流模拟时间为  $120\text{h}$ (5 天)后,排污口开始排污,营养盐(污染物)扩散数值模拟与赤潮藻数值模拟同步进行。在 10 天内保持大鹏湾内污染物有足够的来源。10 天后大鹏湾内的 3 个排污口停止排污,即停止大鹏湾内(赤门海峡东口、塔门洲东南、大鹏湾东侧)陆上营养盐的输入。13 天(从开始排污起算)后另外两个排污口(赤柱湾西、大屿湾西)也停止排污。赤潮生消过程数值模拟共进行 15 天止。

本模拟中是假定以上 5 个排污口排污,其目的是为了再现该区域营养盐分布状况,实际上该海域富营养化的来源并非由排污而造成的,而主要是养殖业发达的结果。

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 模拟的香港海域赤潮的生消全过程

1998 年香港海域的赤潮发展的全过程见香港“明报”1998.04.14 图示(图 1)。图 1 是根据沿海各养殖场的报告绘出的,它和生消过程有些区别,但它仍然可以大体反映赤潮的扩散途径。由于天气原因,无法得到同期的卫星图片,因而无法得到海上的赤潮分布情况。根据数值模拟结果(图 2),当大鹏湾内 3 个排污口开始排污后,在排污口附近一天内就可能产生赤潮藻的旺发。由于其范围较小,很容易由于流场的扩散作用而不稳定,因而

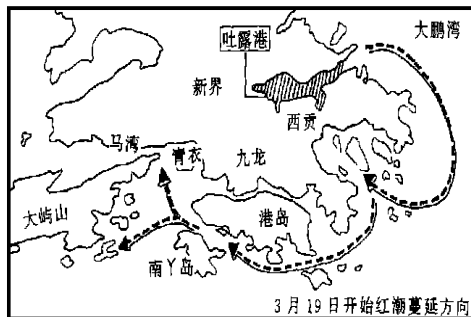


图 1 实际赤潮蔓延的途径(香港“明报”,1998.04.14)

Fig. 1 The spread path of real red tide (Hongkong "Bright Daily", 04.14.1998)

此情况不在本文研究之列。大约在 7 天后将出现较稳定的赤潮暴发区, 并开始对周围海区产生影响。10 天后影响到担杆海峡。13 天后影响到大屿山西南。在此期间也影响到大屿山东侧。当大鹏湾内排污口于 10 天后停止排污, 湾内赤潮藻密度将较迅速下降, 12h 后  $30\text{gC/L}$  线(图 2 内粗线包围区域)就由  $5\text{km}^2$  缩至  $1\text{km}^2$ , 1 天后就基本消失。14 天后大鹏湾外的排污口也停止排污, 1 天内  $30\text{gC/L}$  线就消失。15.5 天后赤潮区域全部消失。

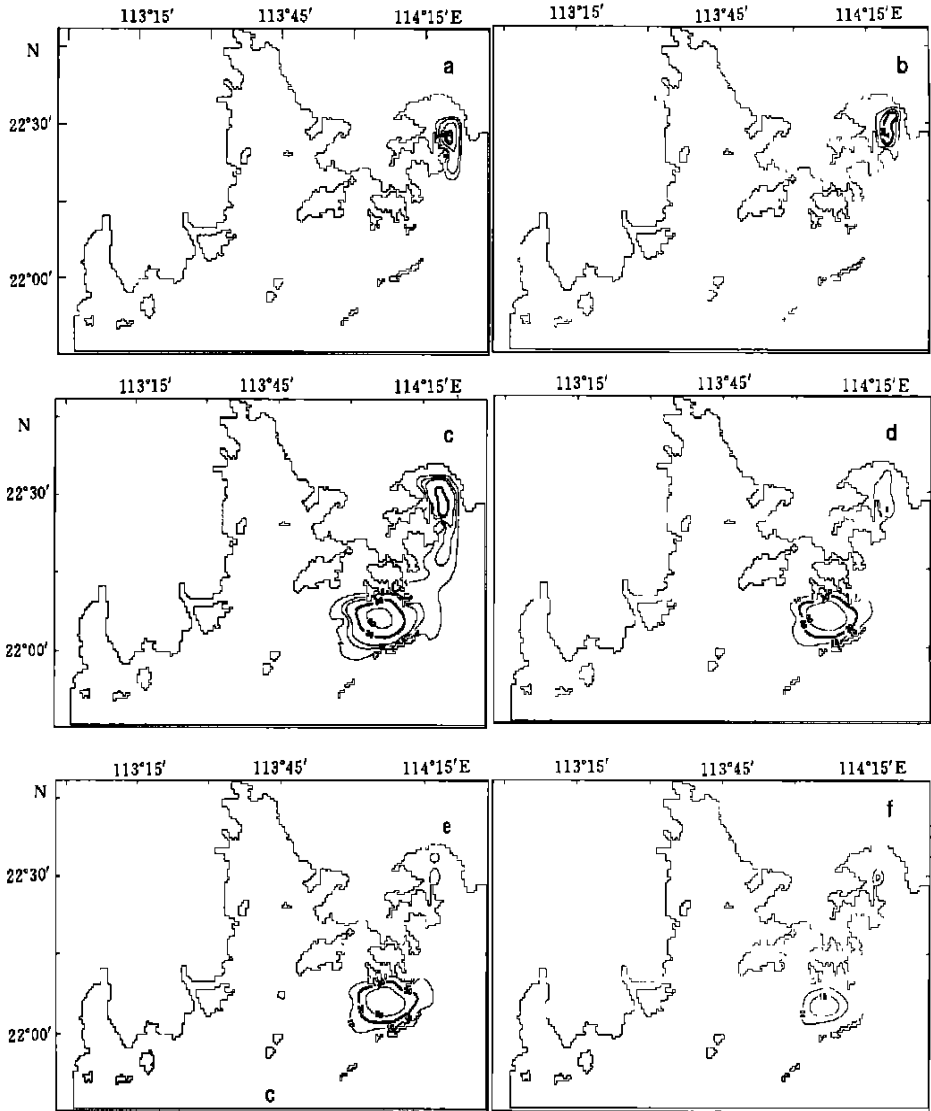


图 2 赤潮生消过程数值模拟

7 天后(a), 10 天后(b), 11 天后(c), 12 天后(d), 14 天后(e), 15 天后(f)

Fig. 2 The numerical simulation of the process of the development of red tide

(等值线单位:  $\text{gC/m}$ ; 粗线条为  $30\text{gC/m}$ )

(unit of isoline is  $\text{gC/m}$ , thick line represents  $30\text{gC/m}$ )

7days(a), 10days(b), 11days(c), 12days(d), 14days(e), 15days(f)

本数值模拟的赤潮生消过程的途径与实际情况基本符合, 惟一的差别出现在较窄的区域, 由于本模拟的网格尺度为  $460\text{m} \times 460\text{m}$ , 因而无法准确模拟小尺度海区的情况。

### 3.2 赤潮生消过程中无机氮浓度的变化过程

在此赤潮生消过程中大鹏湾内无机氮的浓度变化过程见图 3。在停止排污前(即开始排污 10 天后)赤潮云团中心无机氮浓度保持在  $1.1\text{--}1.5\text{mg/L}$ , 当大鹏湾内 3 个排污口停止排污后, 湾内的无机氮浓度的最大值在 6h 内就降至  $0.1\text{mg/L}$  以下。同样的在担杆水

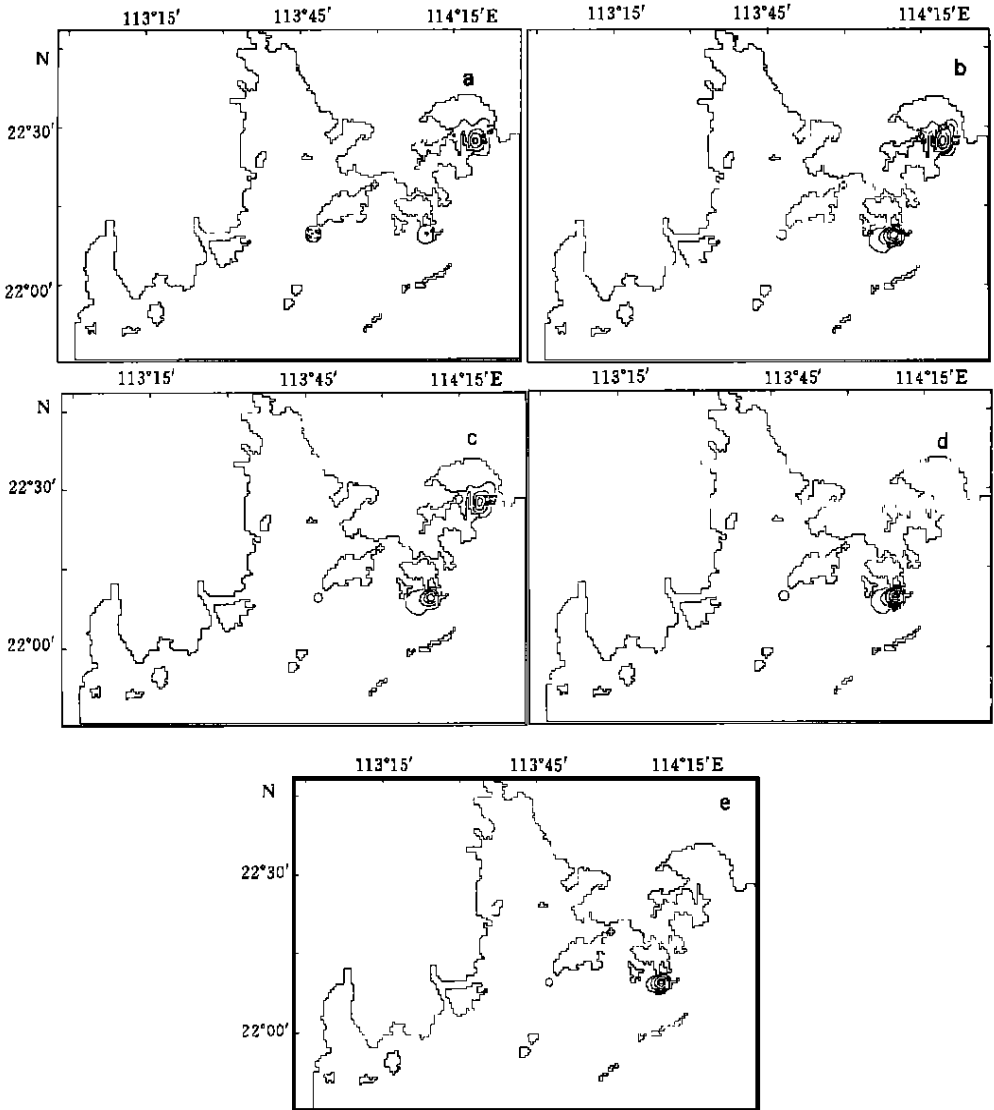


图 3 无机氮浓度在赤潮生消过程中的变化(等值线单位:  $\text{mg/L}$ )  
7 天后(a), 10 天后(b), 11 天后(c), 12 天后(d), 14 天后(e)

Fig. 3 The variation of the concentration of inorganic nitrogen during the process of the development of red tide (unit of isoline is  $\text{mg/L}$ )

7days(a), 10days(b), 11days(c), 12days(d), 14days(e)

道内,当排污口停止排污后6h,赤潮云团中心的无机氮浓度由1.6mg/L降至0.1mg/L以下,无机氮浓度下降速度快于赤潮藻密度的下降速度。此情况说明当无机氮浓度下降后,在没有足够营养盐供应下赤潮云团尚可以维持一定的时间。以上就是从大鹏湾发生赤潮并影响到担杆海峡,及大屿山南侧的生消过程。

### 3.3 赤潮影响其他区域的3种情况

从数值模拟结果来看某海区的赤潮对其他海区的影响有3种情况:(1)整个赤潮云团(本模拟中,30gC/L等值线即裸甲藻密度达到 $10^8$  cell/L,所围区域)随流进入其他海区。(2)尽管赤潮云团未进入其他海区,但其外围,即赤潮藻密度小于30gC/L,只有1.0gC/L,甚至只有0.5gC/L(即 $10^6$  cell/L)等值线进入高营养盐区域,就能激发该区域的赤潮暴发。(3)本海区有赤潮藻较快生长,但由于条件限制,赤潮暴发程度较弱,即该海区赤潮藻密度未达到30gC/L,但其外围也可能影响到其他海区,如果该海区的条件更适于赤潮藻的生长,就可能激发该区域赤潮藻的旺发,其旺发程度可能超过原产地而先被监测到。因此不能以发现的时间先后确定赤潮的原发地。

## 4 结语

上述结果表明,本文研究的模式能够基本反映发生在该海区的赤潮生消过程,模式表明赤潮的生消过程是几个因素的综合结果。而要再现多个因素的综合效果,只能通过耦合数值模拟来实现。

数值模拟的结果也表示了发生在实际海域的赤潮的数值预测的可能性,即在掌握实际海域的水动力条件的基础上,加强对该海域的水质监测(包括浮游动植物的监测),并通过必要的生化实验进行参数的测定,就完全能实现赤潮发生的预警和预测。

## 参 考 文 献

- 万振文,袁业立,乔方利,2000. 海洋赤潮生态模型参数优化研究. 海洋与湖沼, 31(2): 205—209
- 王寿松,冯国灿,夏综万,1994. 大鹏湾夜光藻赤潮发生要素的结构分析. 海洋与湖沼, 25(2): 46—152
- 齐雨藻,洪英,吕颂辉等,1994. 南海大鹏湾海洋褐胞藻赤潮及其成因. 海洋与湖沼, 25(2): 132—138
- 齐雨藻,黄长江,1997. 南海大鹏湾海洋卡盾藻赤潮发生的环境背景. 海洋与湖沼, 28(4): 337—342
- 乔方利,袁业立,朱明远等,2000. 长江口海域赤潮生态动力学模型及赤潮控制因子研究. 海洋与湖沼, 31(1): 93—100
- 吕颂辉,齐雨藻,钱宏林等,1994. 湛江港浮游植物与赤潮植物的初步研究. 海洋与湖沼, 25(2): 190—196
- 林昱,庄栋法,陈孝麟等,1994. 初析赤潮成因研究的围隔实验结果——几个理化因子与硅藻赤潮的关系. 海洋与湖沼, 25(2): 139—145
- 黄长江,董巧香,2000. 1998年春季珠江口海域大规模赤潮原因生物的形态分类和生物学特征II. 海洋与湖沼, 31(3): 233—238
- 夏综万,于斌,史键辉,1997. 大鹏湾的赤潮生态仿真模型. 海洋与湖沼, 28(5): 468—474
- 霍文毅,郝建华,俞志明等,1999. 有害赤潮分析研究进展. 海洋与湖沼, 30(5): 568—574
- Andrew M E, John B, 1996. Oscillatory behavior in a three-component plankton population model. Dynamics & Stability of System, 11(4): 347—370
- Blumberg A F, Meller G L, 1987. A description of a three dimensional coastal ocean circulation model. Three-dimensional coastal ocean model, Vol. 4. Washington: American Geophysical Union, 1—16
- GEOHAB, 1998. The Global ecology and oceanography of harmful algae bloom, A plan for coordinated scientific research and cooperation to develop international capabilities for assessment, prediction and mitigation. Denmark: Joint SCOR-IOC Workshop

## SIMULATION OF THE PROCESS OF RED TIDE DEVELOPMENT IN A REAL SEA

XU Wei-Yi<sup>1</sup>, ZHU De-Di<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>2</sup>, DONG Li-Xian<sup>1</sup>, CHEN Geng-Xin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Key Laboratory of Dynamic Process and Satellite Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, 310012)

<sup>2</sup>(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, 200062)

**Abstract** Based on the idea that the presently known factors related to red tide algal bloom are not a sufficient and necessary condition, there is no definite trigger to the bloom. It is a comprehensive result of eutrophication, suitable photosynthesis condition and algal natural mortality. These factors are the basis and other factors are auxiliary factors. Each of these basic and auxiliary factors can be a trigger depended on the environment, which is indicated in the numerical simulation of red tide appeared at the sea off Hongkong from March to April of 1998 using a coupled model of dynamics, nutrient and red tide algae.

**Key words** Red tide, Couple model, Process of development of red tide