

大鹏湾的赤潮生态仿真模型*

夏综万 于斌 史键辉

(国家海洋局南海分局, 广州 510300)

王寿松

(中山大学数学系, 广州 510275)

提要 通过海洋动力学和赤潮生物动力学相结合的方法, 建立了一个赤潮发生的仿真模型。模型包括水动力、扩散和生物动力学三部分, 综合考虑了潮流、营养物质等环境要素的时空变化对赤潮过程的影响, 并以大鹏湾夜光藻赤潮为例进行了数值模拟。模型再现了赤潮发生前海水中营养物质浓度有一次明显的增高, 而在赤潮发育盛期营养物质浓度降至低谷的现象; 并反映了赤潮物质容易在海湾的角落等水交换不畅的地域聚集的情况。

关键词 赤潮 仿真模型 大鹏湾

生态数学模型是赤潮研究的重要方法之一, 采用不同形式的数学模型, 以定量化的方法, 促进了研究的开展, 并且有助于对赤潮趋势的预测。对基础的统计学模型进行研究方面的工作见齐雨藻等(1991, 1993)和黄伟健等(1992)。以微分方程为主要工具的赤潮生态动力学模型研究, 在我国尚处于起步阶段, 这方面的工作如王寿松(1994)和王寿松等(1997, 1997¹⁾)这种动态模型, 虽然目前还比较简单, 但由于它以种群生态学和营养动力学为依据, 在结构上考虑藻类对营养的摄食、自身的被食与死亡, 以及营养的再生等关系, 因此是很有发展前途的。以上几篇文章中的动力学模型, 对赤潮的生物动力学进行了较深入的探讨, 提出了赤潮生物动力学研究对象之间的一些基本关系。但文中还没有考虑环境要素的空间变化, 尤其是水动力环境的影响, 而研究对象也只出现时间变化而没有空间变化。在实际的海洋中, 赤潮的生消还受着环境变化很大的影响, 这就要求模型能反映这种因素。针对这个问题, 动力学生态模型中的一类, 除考虑以上生态动力学关系外, 还考虑海域环境的海水动力学。这时模型就能更接近真实地反映或再现特定海域赤潮现象的某些特征。这种模型人们也称之为仿真(Simulation)模型, 在国内尚没有人做过类似工作。在国外也未见有大量工作, 比较多的工作仅有日本学者, 如 Kishi 等(1986)。本文综合考虑了潮、流、营养物质对赤潮过程的影响, 建立了一个包含生物动力学和环境动力学的仿真模型, 并以大鹏湾夜光藻赤潮为例进行了数值模拟, 对赤潮发生的仿真模拟问题进行了

*国家自然科学基金资助项目, 9389008号。夏综万, 男, 出生于1937年6月, 研究员。

收稿日期1996年3月18日, 接受日期1996年11月5日。

1) 王寿松等, 1977, 封闭环境中赤潮发生过程的数学模拟, 海洋与湖沼, 待刊。

初步的探讨。

1 方法

本模型的方法是先建立海洋动力学的数学模型, 然后再加上赤潮生物动力学模型。

1.1 海洋动力学模型

海洋动力学模型采用常用的二维海洋动力学方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{HC^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{HC^2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, t 为时间; x 和 y 为东、北方向的空间坐标; u 和 v 为 x 和 y 方向的流速; ζ 为潮位; $H = \zeta + h$ 为水深, 其中 h 为相对于平均海平面的水深; g 为重力加速度; f 为科氏参量; $C = H^{1/6} / n$ 为 Chezy 系数, 其中 n 为表征海底粗糙度的 Manning 系数, 取为 0.03。

计算区域取整个大鹏湾(见图 2—4)。开边界值取湾口两端, 是由 4 个分潮 K_1, O_1, M_2, S_2 的调和常数合成的典型水位值; 两端连线中的值采用内插。调和常数取自广州海洋预报台的观测资料统计值。变化周期取 M_2 分潮的两倍, 即 24.84h。

计算采用海洋数值计算中常用的交替方向隐式法, 即 ADI 法; x 和 y 方向的空间步长为半分, 即约 900m, 计算时间步长为 400 s。关于流场计算的方法已经比较成熟, 可参看有关文献(陈时俊等, 1982; 窦振兴等, 1982)。

1.2 赤潮生物动力学模型

赤潮生物动力学方程为(模型的建立参看夏综万等, 1993);

$$\frac{\partial(HE)}{\partial t} + \frac{\partial(HuE)}{\partial x} + \frac{\partial(HvE)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HA_h \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HA_h \frac{\partial E}{\partial y} \right) + S_E \quad (2)$$

$$\frac{\partial(HN)}{\partial t} + \frac{\partial(HuN)}{\partial x} + \frac{\partial(HvN)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HA_h \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HA_h \frac{\partial N}{\partial y} \right) + S_N$$

式中, E 代表海水中的营养物质; N 代表赤潮生物量(ind / m³)。为简化公式, 仅选取这两个变量进入方程组。式中 A_h 是水平涡动扩散系数, 取为 10⁶(cm² / s)。

方程(2)除了生物项 S_E 和 S_N 外, 就是通常的二维扩散方程。生物项 S_E 和 S_N 的结构如下(王寿松等; 1997)¹⁾:

$$S_E = H \left[C_1(E_0 - E) - a \frac{E}{E_m + E} N \right] E \quad (3)$$

$$S_N = H \left[-C_2 + b \frac{E}{E_m + E} \right] N$$

1) 见本刊第468页脚注1)。

式中的营养物质 E , 可指不同的营养物, 由于日前尚不确定是什么营养物质引起赤潮, 为简化, 本文取 E 的量纲用抽象的单位营养浓度表示。赤潮生物量(藻类) N 的模拟生物对象假定为夜光藻, 按照安达六郎(1973)¹⁾ 的定义, N 为 3×10^7 (ind / m³) 即认为达到了赤潮的密度。式中其它各参数的意义和量值是: C_1 为营养物的环境损耗率 [单位为 1 / (单位营养浓度 · s), 量值为 0.24×10^{-5}]; C_2 为藻类的死亡率 (单位为 1 / s, 量值为 24×10^{-4}); a 为藻类的最大吸收率 [单位为 1 / (单位藻类密度 · s), 量值为 3×10^{-6}]; b 为藻类营养转换率 (单位为 1 / s, 量值为 31×10^{-4}); E_0 为营养物输入 (单位同营养物质浓度, 量值为 13); E_m 为营养物质半饱和常数 (为 0.15 单位营养物质浓度)。藻类的计算初值, $N(x, y, 0) = 0.1$ 。以上的参数取值, 主要源于王寿松等(1997)²⁾ 的反复计算调试取值, 也参考了 Kishi 等(1986) 的取值。

方程(2)的计算, 采用了常用的交替方向隐式(ADI)方法。

2 结果

2.1 海洋动力学 由于海洋潮汐是经常变化的, 一般只能列出一些典型情况。根据典

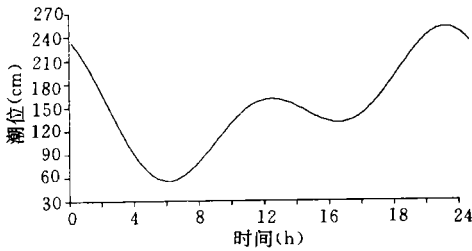


图1 盐田附近的潮位过程(计算结果)

Fig.1 Tidal variation in the Yantuan Station (calculating result)

型水位边界值计算出的盐田附近的潮位过程图(图1), 反映了大鹏湾不正规半日潮的特点。从图1曲线可看出退潮、低低潮、涨潮、低高潮、退潮、高低潮、涨潮、高高潮的过程。计算同时得出了各时刻的流场。为简单起见, 只将比较典型的退潮、低低潮、涨潮、高高潮时的流场绘出(见图2)。从图2看出, 在涨潮和退潮时, 大鹏湾内基本是往复流, 近岸潮流受岸线限制, 基本上顺岸流动。在大鹏湾内典型最大潮流量级约 20 cm / s 左右。图2还表明, 在转流期间, 大鹏

湾的潮流流速很小。以上流速和流态的计算, 和以往关于大鹏湾的一些研究工作(詹小涌, 1989)符合得较好。

2.2 赤潮生物动力学 营养物质的初始浓度如图3所示, 它的取值参考有关的实测资料³⁾, 大体反映了大鹏湾营养物浓度的趋势。对方程(2)进行5个周日的计算, 结果显示营养物质 E 和赤潮生物量有明显的时间和空间变化(图4, 5)。取盐田港处赤潮生物量 N 值最大时(参看图5a 曲线 N 的峰值)的大鹏湾内 N 值分布绘于图4, 可以看出, 图4和图3的趋势比较接近, 这说明赤潮的发生与海洋中的营养物质的数量有着密切的关系。此外还可看出, 在盐田、沙头角一带营养物质和赤潮生物量都容易出现高值。这也说明在这些地方潮流量级小, 扩散能力差, 营养物质容易聚集, 一旦产生了赤潮, 也不容易分散。这种趋势和这一带经常容易产生赤潮的情况相符合的(谢健等, 1993)。

选择湾内几个典型格点 A, B, C 和 D 点, 它们分别位于盐田附近、大鹏湾北部岸边、香

1) 安达六郎, 1973, 昭和48年度日本海洋学会秋季大会讲演旨集。

2) 见本刊第468页脚注1)。

3) 中国科学院南海海洋研究所, 1992, 大鹏湾炼油厂海洋环境影响评价。

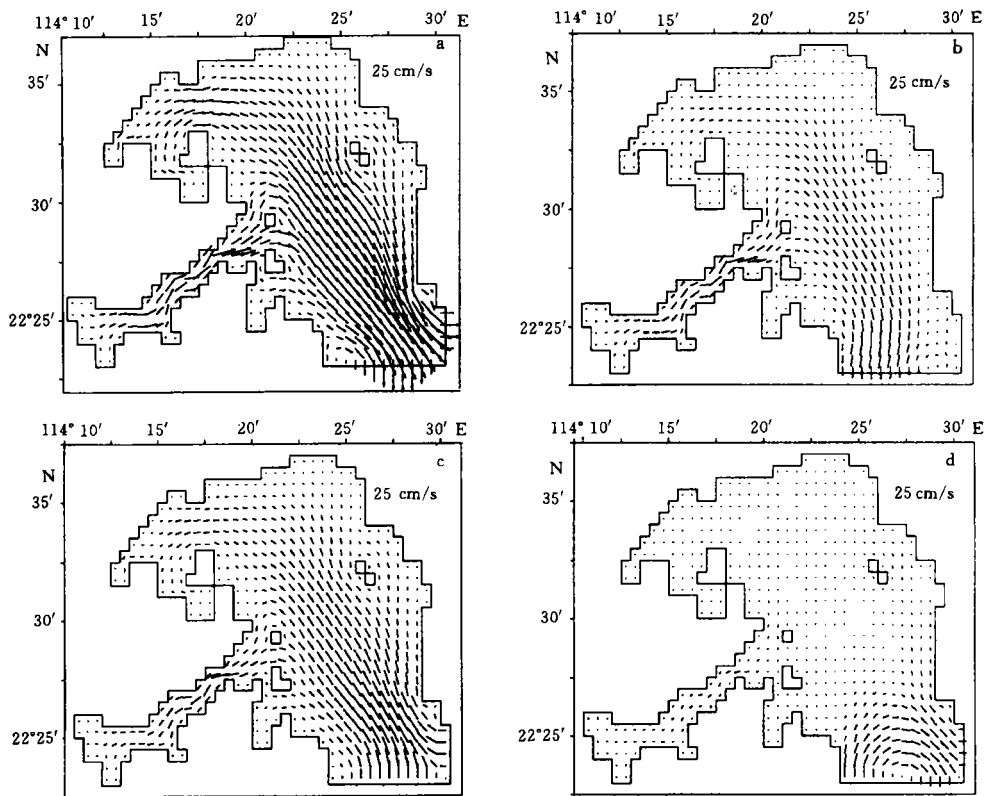


图2 大鹏湾的潮流计算结果

Fig.2 Calculating results of tidal current in the Dapeng Bay

a.退潮; b.低低潮; c.涨潮; d.高高潮.

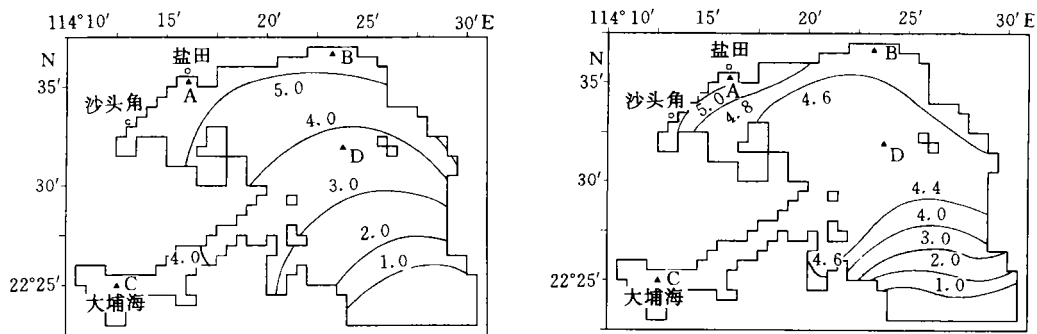


图3 开始生物动力学计算时的营养物浓度分布

Fig.3 Nutrient concentration distribution when biological dynamic calculation starts.

图4 盐田港处N值最大时大鹏湾N值分布 (计算结果) (10^7 ind/m^3)

Fig.4 Distribution of N in the Dapeng Bay (calculating result, when the value of N in Yantian reaches its maximum) (10^7 ind/m^3)

港水域的大埔海(吐露港)和大鹏湾的中部(见图3)。将这几个点处的 E 和 N 值的时间序列绘于图5。图5反映, A—D 4个点处的营养物质 E 和赤潮生物量 N 都出现了振荡过程, 又分别都在第一天稍后出现了大于 $3 \times 10^7 \text{ ind} / \text{m}^3$ 的赤潮生物量。后来, 营养物质和生物量又随后在第三天后形成了另一次小高峰。从这几个点处的情况来讲, 处于盐田、大鹏湾北端及大埔海这些地方, 似乎比大鹏湾中开阔区域的部分, 如 D 点更容易聚集营养物质和浮游生物, 因而更容易形成赤潮。据了解, 香港控制水域中的大埔海, 也是赤潮频繁发生的海域之一。从图5看出, E 和 N 的量值(图5c)低于大鹏湾北部(图5b), 这很可能与计算中采用该处的营养物质的初值稍低有关。

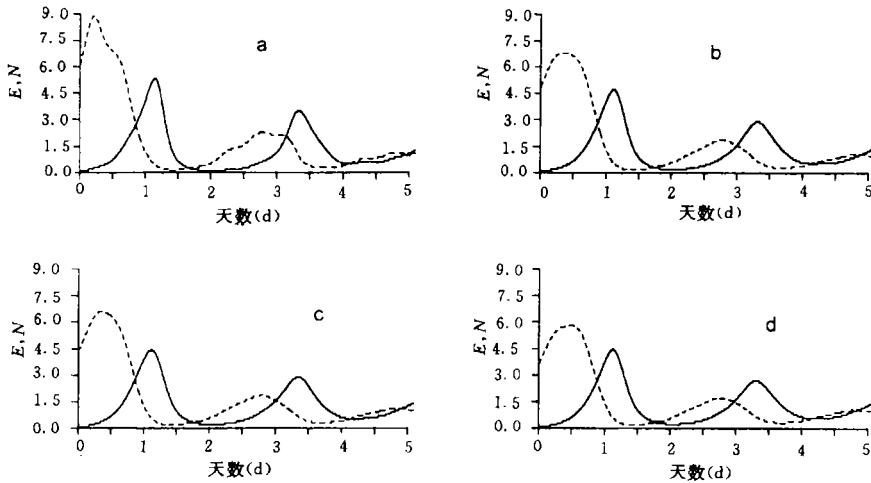


图5 模式计算出的大鹏湾内不同地点的营养物质 E 和赤潮生物量 N 的时间变化序列

Fig.5 Time Series of calculating results of nutrient E and red tide biomass N in different places in the Dapeng Bay

a. A 点, 盐田; b. B 点, 大鹏湾北部; c. C 点, 大埔海; d. D 点, 大鹏湾中部。

--- E (1 营养单位); —— N ($10^7 \text{ ind} / \text{m}^3$)。

3 讨论与结语

本文建立了一个大鹏湾夜光藻赤潮的仿真模型, 在赤潮发生机理还未十分明确的条件下, 可认为是描述宏观过程的一种有益尝试。

3.1 模型将赤潮生物动力学和以海水动力学为主的环境动力学有机地结合, 再现了大鹏湾夜光藻赤潮发生的某些特点。

3.2 模型显示, 夜光藻赤潮发生前, 海水营养物质浓度有一次明显的增高, 而在赤潮发育盛期, 营养物质的浓度降至低谷。这和赤潮生物的大量繁殖需要消耗营养有关, 也和多次观测结果一致(洪君超等, 1994; 齐雨藻等, 1993)。

3.3 模型显示赤潮物质容易在海湾的角落等水交换不畅的地域聚集。

3.4 要构建好一个仿真模型并在实际中应用, 需要很多条件, 如足够的观测资料及模型参数等, 本文还不甚具备, 因此, 本文的主要内容, 仍带有机制研究性质, 所用的参数, 也带有试验的性质。因此有必要加强时间、空间分布的有关资料收集和有关参数积累和试验研究。

参 考 文 献

- 王寿松, 1994, 中国工业与应用数学学会第三次大会论文集, 清华大学出版社(北京), 370—374。
 王寿松, 冯国灿, 段美元等, 1997, 热带海洋, 16(1): 1—6。
 齐雨藻, 黄伟建, 邱璇鸿, 1991, 暨南大学学报, 12(3): 96—103。
 齐雨藻, 楚建华, 黄奕华, 1993, 海洋通报, 12(2): 30—34。
 夏综万, 王寿松, 1993, 海洋通报, 12(2): 67—72。
 陈时俊等, 1982, 山东海洋学院学报, 12(4): 1—12。
 洪君超, 黄秀清, 蒋晓山等, 1994, 海洋与湖沼, 25(2): 179—184。
 黄伟建, 齐雨藻, 邱璇鸿, 1992, 生态学报, 12(3): 206—212。
 谢 健、李锦蓉、吕颂辉等, 1993, 海洋通报, 12(2): 1—6。
 窦振兴, 罗远诠, 黄克兴, 1982, 海洋学报, 4(6): 667—678。
 詹小涌, 1989, 海洋与湖沼, 20(2): 149—155。
 Kishi M., Ikeda S., 1986, *Ecological Modeling*, 31: 145—174。

AN ECOLOGICAL SIMULATION MODEL OF RED TIDE IN DAPENG BAY

Xia Zongwan, Yu Bin, Shi Jianhui

(South China Sea Branch, SOA, Guangzhou 510300)

Wang Shousong

(Mathematics Department, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

Abstract This ecological simulation model of red tide includes water and biological dynamics, and takes into consideration environmental factors such as tide, tidal current and nutrition. The model is a typical water dynamics equations coupled with diffusion and biology equations as follows:

$$\frac{\partial(HE)}{\partial t} + \frac{\partial(HuE)}{\partial x} + \frac{\partial(HvE)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HA_h \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HA_h \frac{\partial E}{\partial y} \right) + S_E$$

$$\frac{\partial(HN)}{\partial t} + \frac{\partial(HuN)}{\partial x} + \frac{\partial(HvN)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HA_h \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HA_h \frac{\partial N}{\partial y} \right) + S_N$$

and

$$S_E = H \left[C_1(E_0 - E) - a \frac{E}{E_m + E} N \right] E$$

$$S_N = H \left[-C_2 + b \frac{E}{E_m + E} \right] N$$

where E and N is the nutrient content and red tide biomass in the sea water

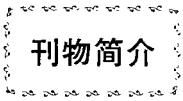
respectively.

Numerical simulation is carried out using the *Noctiluca scientillans* red tide in Dapeng Bay as an example. The model reproduces some characteristics of the *Noctiluca scientillans* red tide phenomenon in Dapeng Bay, in an attempt to clarify the mechanism and describe the macroscopic process of the red tide occurrence.

The model shows that the sea water nutrient content rises obviously before the red tide appears, and falls to the minimum in the period of red tide peaks. This relates to the fact that large propagation of the red tide organisms needs a great amount of nutrients.

The model also shows that the red tide organisms tend to congregate in the area (such as the corner of the bay) where the water exchange is not strong.

Key words Red tide Simulation model Dapeng Bay



《海洋与湖沼》学报简介

BRIEF INTRODUCTION OF THE OCEANOLOGIA ET LIMNOLOGIA SINICA

《海洋与湖沼》学报遵循科学技术要面向经济建设的宗旨, 倡导不同学术观点的争鸣, 开展国内外学术交流, 以繁荣学术、提高研究水平; 报道最新科研成果, 为促进科学技术的发展和加速社会主义现代化建设服务; 发挥老科学家的指导作用、中年科技人员的骨干作用, 热情扶植青年学者, 以利于科技人才的尽快成长, 从而不断壮大科技力量。《海洋与湖沼》学报, 系海洋湖沼科技领域综合性的学术刊物, 以报道基础研究、应用基础研究论文为主, 同时重视应用研究、开发研究成果的发表; 论文涉及水圈范围内的物理学、化学、地质学、环境学、生物学等学科及其分支学科的研究报告、简报、综述、学术争鸣、学术简讯、科学家简介。书评等栏目。对于发明创造和同国计民生有重大关系的研究成果、带有崭新学术观点的论文和学术争鸣, 特别是青年学者的优秀论文, 将予以优先刊登。

《海洋与湖沼》学报于1957年创刊, 第一任主编为中科院院士、第三世界科学院院士曾呈奎教授, 第二任主编为著名海洋生物学家刘瑞玉教授, 现任主编为中科院院士秦蕴珊教授。由于刊物一向注重高水平、高质量, 为学术交流、国家建设、人才成长作出引人注目的贡献, 因而在国内外均享有较高声誉。1988—1993年获省部级以上优秀科技期刊奖7项, 最高为国家二等奖。

本刊编辑部

Editorial Office, Oceanologia et Limnologia Sinica