

# 海洋生态系统模型研究的几个基本问题\*

## SEVERAL BASIC PROBLEMS OF MARINE ECOSYSTEM MODELLING

王辉 (WANG Hui)

(国家自然科学基金委员会地球科学部 北京 100083)

(*Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing, 100083*)

进入 90 年代以来,海洋生态系统的研究异常活跃,并进入了强调“动力学”研究的时期。自 1991 年起,在国际海洋研究科学委员会 (SCOR)、政府间海洋学委员会 (IOC)、国际海洋考察理事会 (ICES),以及北太平洋海洋科学组织 (PICES) 等国际组织的推动下,一个崭新的国际科学研究计划——全球海洋生态系统动力学 (GLOBal ocean ECosystem dynamics, GLOBEC) 逐步形成。这里,在传统的海洋生态系统的后面加上了“动力学”,旨在强调“动态”和“动力机制”的研究,强调物理与生物过程的相互作用研究,强调浮游动物在海洋生态系统中的作用以及海洋生态系统的变化与全球变化的关系等。1995 年 10 月国际地圈—生物圈计划 (IGBP) 科学委员会第四次会议正式把 GLOBEC 列为其又一核心研究计划。从此,这一研究领域进入了一个新的发展阶段。中国国家自然科学基金委员会为了不失时机地推动这一领域的发展,启动了一项跨科学部基金重大项目 (1997—2000)。预计海洋生态系统动力学研究将成为我国下世纪初乃至相当长一段时间内海洋科学的重要发展方向之一。海洋生态系统模型研究为该领域发展的一个重要方面。本文试图就海洋生态模型研究的几个基本问题作一些初步分析。并且作为模式举例,就欧洲新近发展起来的海洋三维初级生产力模型略作简要介绍,以期对中国的海洋生态系统模型研究提供参考。

### 1 海洋生态系统模型研究的几个基本问题

#### 1.1 模型的涵义

模型就是针对某个系统或过程的简化描述和抽象。模型是认识研究对象的一种工具,通过模型来模拟过去,还可以预测未来。模型也是进行定量分析的一种数学方法,它通常把要研究的问题归结为一个或一组方程来表示。当今的海洋科学研究建立模型已较为普遍,它对于深化人类对海洋的认识具有重要作用。在海洋生态系统研究中最先使用数学模型的是 Riley 等 (1949),通过建立数学模型描述欧洲北海的浮游生物的季节变化。但是,真正在生态系统水平上进行模拟的工作是 80 年代初以后才开展起来的。

#### 1.2 海洋生态系统模型研究的目的和作用

海洋生态系统模型研究的最终目的在于揭示其变化的机制,模拟和预测它的变化,为

\* 王辉,男,出生于 1962 年 8 月,博士, E-mail: Wanghui@rose.nsf.gov.cn

收稿日期: 1998-01-05, 收修改稿日期: 1998-03-08

维持海洋生态系统的健康水准及受损海洋生态系统的重建,提供科学和决策依据。

海洋生态系统是一个典型的物理过程、化学过程和生物过程相互作用的系统,在建模过程中,不同领域的科学家需相互配合与交流,于是学科交叉因此而产生;模型的结果有时可用来解释现场观测结果,有时也可反过来指导现场调查方案的确定;模型结果可以弥补现场调查结果的空白,给出时间和空间上的分布。对科学家来说,模型有时也可用来验证假说;对管理人员,模型提供进行决策的定量工具;而对一般公众来说,模型只不过是一种可以观察复杂系统变化的媒介(Gordon *et al.*, 1995)。

### 1.3 海洋生态系统中模型的分类

**1.3.1 海洋生态系统模型的几种基本类型** 一般有如下几种模型。

**1.3.1.1 收支模型** 收支模型,可解释为针对一个生态系统中某个特定变量(如水、沉积物、碳等)在一定的空间和时间范围内,进行物质平衡的计算。如对渤海这一区域,根据生态系统研究的需要再划分为若干个次级区域,计算海水一年当中在这些次级区域的输运,即是“水”收支模型。一般来说,收支模型是进一步建立系统模型的基础。

**1.3.1.2 过程模型** 过程研究,是海洋生态系统研究的重要内容。如认识生态系统中的物理过程(如锋面、层化、湍流等)、化学过程和生物过程等,是进一步认识生态系统的关键。过程模型一般就是描述特定过程的模型,通常在过程研究(通过室内实验、围隔生态和现场实验等)的基础上建立,一般变量数不多,它也是建立系统模型的基础。

**1.3.1.3 系统模型** 针对整个生态系统,在一定的时空尺度内所建立的模型,着眼于模拟整个生态系统的行为,即是所谓的系统模型。系统模型的变量一般较多,涉及物理、化学和生物等多个因素,该模型可以研究生物、物理和化学之间的相互作用,其结果能显示海洋生态系统整体空间变化和时间演变特征及其机制,是一种较高层次的模型。

**1.3.1.4 预报模型** 这是那些具备预报模式中生态环境变量随外界条件变化而变化能力的模型。上述模式一般多少具备这一功能。但真正意义上的预报模型,现时还不多见。

**1.3.2 海洋生态系统模型的几种其它类型** 如从所研究生态系统的空间处理来划分,有如下几种模型。

**1.3.2.1 箱式模型** 把所研究的区域按照一定的水文及生态特性,在空间上划分为一个或多个子空间,构成所谓的箱子。在箱子内部所有生态变量是均匀的,箱子之间及箱子与外界通过物质交换量来联结,以此方式建立起来的模型就是所谓箱式模型。欧洲近年来发展起来的欧洲区域海生态模型(European Regional Sea Ecosystem Model, ERSEM)(Baretta *et al.*, 1995)就是典型的箱式模型的例子。箱式模型的优点是简便易行,便于对区域海洋生态系统进行管理提供科学依据。缺点是不便于进行动力机制研究,且一般空间分辨率缺失或较低。这一方法一般适用于半封闭海湾或区域海等。

**1.3.2.2 一维模型** 一般指对于海洋生态系统某点的垂向建立模式,进行生态特征的模拟。这一方法特别适宜于生态系统的变量水平方向变化不甚明显的海区或开阔的大洋区域;有时对揭示某一区域生态主要变量的年变化的主要控制因素非常有用,它也是建立三维模式的基础。前面提到最早的数学模型 Riley 等(1949)的工作就是一维模型。一维模型可展示生态系统的垂向结构随时间的演变。

**1.3.2.3 二维模型** 通常指在水平二维空间内所建立的模型(如 van den Berg *et al.*,

1996),也可包括象河口宽度平均的模型。海洋生态系统通常有显著的水平变化特征,如浮游植物的斑块分布就是一例。使用二维模型对此类问题非常有效。

**1.3.2.4 三维模型** 三维模型是生态系统建模的高级阶段,可以模拟生态系统在三维空间的分布特征(Aksnes *et al*, 1995; Skogen *et al*, 1995)。该模型的建立及进行成功的模拟,由于所需基础资料和对过程的认识较多,因此一般比较复杂,现时三维模型仍处在刚开始发展阶段。从建模的过程来看,往往还需在开始建立概念模式,确立需要解决的问题,然后才能开始定量模式的研制,模拟的结果当然还需实测资料的验证等。此外,由于模型中包含许多参数,通常还需进行模型对参数的敏感性实验和分析(Eigenheer *et al*, 1996)。

**1.4 海洋生态系统模型研究的原则**

**1.4.1 提出问题的原则** 作为建模的首要问题是明确要解决的问题是什么,任何一个模型都不是万能的,都有它特定的问题。

**1.4.2 从简单到复杂的原则** 建模的初期,不要过分追求变量的个数和空间的维数等,应以越简明且能说明问题为前提,逐步向复杂模型逼近。如垂向一维模型是进行海洋生态模拟的最好开端。

**1.4.3 对系统的认识与资料的相平衡原则** 这一原则通过图 1 可直观地帮助我们进行理解。水平方向表示对系统的科学认识的水平,而垂直方向表示可以利用的资料量。拥有相当数量的资料和对系统的比较深入的了解,是进行模型研究的基础。图 1 中的 1, 2, 3 和 4 分别表示认识水平和资料量的多少的 4 个不同的区域(Gorden *et al*, 1995)。

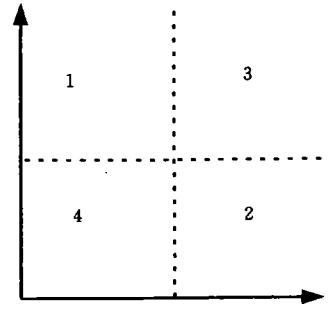


图1 模型对认识和资料的需求  
Fig.1 Data and understanding requirements for modelling

从图 1 所分的 4 个区域可以看出,区域 3 是认识足够深入且资料量也较大的,如全球的潮汐研究就属这种情况。现有的模型可以准确地对全球潮汐进行业务预报;但大多数海洋现象不属此区域。而区域 1 是说某系统存在大量资料,但缺乏认识;这种情况对海洋生态系统来说也存在,如通过各种途径进行的同一个区域的调查资料分散在各个部门或科学家手中,没有进行系统地分析,因此,认识水平较低,这种情况一般可通过建立基础资料数据库并进行统计分析来部分解决,建模的迫切性并不明显。模型最有用的是区域 2 和 4,应该说海洋学及海洋生态系统多数属这种情况,通过建模可以弥补区域 2 的资料缺乏状况,提高区域 4 的认识水平和弥补其资料不足。但是,就建模来说,对于过程的认识和基础资料的积累有一定的要求,否则,建模也是相当困难的。

**2 模型举例——汉堡欧洲北海生态模型**

汉堡欧洲北海生态模型(ECOHAM),是一个三维的欧洲北海初级生产力模型(图 2),它是由汉堡大学海洋研究所的海洋生态数值模拟小组于近年来发展起来的(Moll, 1995),并已成功地进行了欧洲北海生态系统一年的初级生产力的模拟。现把此模式做一简要介绍,以此说明前面提到的问题。

在这个模型中磷、浮游植物、底栖碎屑为预报变量,矩形表示过程,双边圆代表中间变量,其基本方程为:

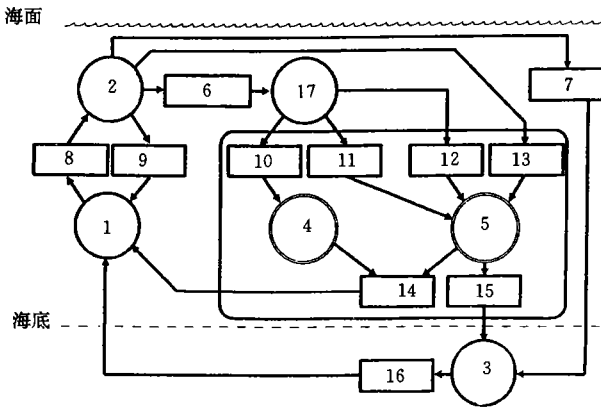


图2 汉堡欧洲北海生态模型中的磷循环模型 (Radach *et al.* 1993)

Fig.2 Phosphorus cycle modelling in the ECOHAM

- 1. 磷酸盐; 2. 浮游植物; 3. 底栖碎屑; 4. 溶解有机磷; 5. 悬浮碎屑;
- 6. 摄食过程; 7. 浮游植物沉降过程; 8. 吸收过程; 9. 呼吸释放过程;
- 10. 可溶性排泄过程; 11. 粪粒排泄过程; 12. 浮游动物死亡过程;
- 13. 浮游植物死亡过程; 14. 水体中再生过程; 15. 悬浮碎屑沉降过程;
- 16. 底栖中再生过程; 17. 桡足类动物

$$\frac{dI}{dt} = K(A)I \quad \left( K(A) = K_0 + K_1 \text{CHL} + K_2 \sqrt[3]{\text{CHL}^2} \right) \quad (4)$$

式中,  $A$  为浮游植物含量;  $P$  为磷含量;  $D$  为底栖碎屑含量;  $I$  为水下光强;  $w_s$  为浮游植物沉降速度;  $(A_x, A_y, A_z)$  为湍流扩散系数;  $\text{PROD}$  为初级生产力;  $\text{RESP}$  为呼吸作用;  $\text{DEAD}$  为死亡率;  $\text{GRAZ}$  为摄食率;  $\text{UPTA}$  为营养盐吸收;  $\text{RELE}$  为营养盐释放;  $\text{REMW}$  为再矿化作用;  $\text{EXCR}$  为排泄作用;  $\text{QUEL}$  为河流输入;  $\text{REMB}$  为底部再矿化作用;  $\text{DETR}$  为碎屑物质沉降;  $\text{CHL}$  为叶绿素;  $K$  为消光函数。其计算框图见图3。

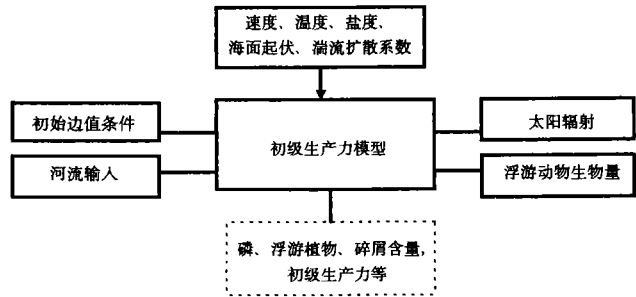


图3 欧洲北海生态模型结构 (Moll, 1995)

Fig.3 The structure of the ECOHAM

ECOHAM 是一个三维的初级生产力模型, 其变量相对不多, 并且该模型是由一个垂直一维浮游植物-磷动力模型 (Radach *et al.*, 1993) 和一个三维的水运输模型的结合形成的。这个一维磷循环的生物模型, 当时是用来模拟北海中部初级生产力的逐月变化, 这充分说明发展较为简单模型的重要性。

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} = & -u \frac{\partial A}{\partial x} - v \frac{\partial A}{\partial y} - (w - w_s) \\ & \times \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_y \right. \\ & \left. \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_z \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \text{PROD} \\ & - \text{RESP} - \text{DEAD} - \text{GRAZ} \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} = & -u \frac{\partial P}{\partial x} - v \frac{\partial P}{\partial y} - w \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \\ & \times \left( A_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \\ & \times \left( A_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) - \text{UPTA} + \text{RELE} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \text{REMW} + \text{EXCR} + \text{QUEL} \quad (2) \\ \frac{dD}{dt} = & -\text{REMB} + \text{DETR} \quad (3) \end{aligned}$$

### 3 关于中国海洋生态系统模型研究的几点建议

自从 80 年以来,中国海洋生态学研究才开始从生态系统水平上发展,且对生态系统的研究主要以现场调查为主,海洋生态系统模型研究应该说刚刚起步,现正在胶州湾、莱州湾、渤海及台湾海峡等区域开展此类工作。有的箱式模型已有了初步结果,过程模型也已开始有些涉及,三维模式的研制也已提上日程。作者根据这一现状,对发展的海洋生态系统模型研究提出一些初步看法,以供建模时参考。

#### 3.1 加强历史资料整理与分析

加强中国主要海洋生态系统的历史资料整理与分析,揭示其基本特征和演变。作者认为这是一项非常重要的基础性工作,对于要建什么样的模型也大有帮助。

#### 3.2 重视过程研究与模拟

过程研究是生态系统动力学研究的重要组成部分,进行过程研究并建立与此相对应的过程模型,是建立复杂生态系统模型的基础。

#### 3.3 坚持引进模式与发展符合中国海实际模型并重的原则

显然,在当前缺乏经验的情况下,有必要引进并剖析某些国外先进的海洋生态模型,但是,完全依靠引进模式是不能完全解决中国海的海洋生态系统的模拟问题的,应强调有机结合,最后走出既与国际先进水平接轨又符合中国国情的海洋生态系统模型研究路子。

#### 3.4 集中各方面优势,联合进行模型研制工作

海洋生态系统模型的研制需要各个不同学科的人员相互配合,各自分工明确,共同发展系统模型。建议在目前的情况下,先研制一些较为简单的模型,然后逐步深入。

#### 3.5 对模型的作用应该有正确的认识

任何模型都必然有一定的局限性,模型的发展应有一个过程。另外,不经过实测资料检验的模型是缺乏说服力的。为此,作者认为应重视现场调查,尤其是应从生态系统的角度设计实验方案,重视取样和分析手段的先进性,只有在现场观测和模型研究相互协调的基础上,海洋生态系统才有可能取得较大发展。

### 参 考 文 献

- Aksnes D L, Ulvestad K B, Balino B M *et al*, 1995. Ecological modelling in coastal waters: towards predictive physical-chemical-biological simulation models. *Ophelia*, 41:6—35
- Baretta J W, Ebenhoh W, Ruardaj P, 1995. The European Regional Seas Ecosystem Model (ERSEM): a complex marine ecosystem model. *Neth J Sea Res*, 33:233—246
- Eigenheer A, Kuhn W, Radach G, 1996. On the sensitivity, of ecosystem box model simulations on mixed-layer depth estimates. *Deep-Sea Res*, 43(7):1 011—1 027
- Gordon D C Jr, Boudreau P R, Mann K H *et al*, 1995. LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines. Texel, The Netherlands: LOICZR&S. 7—16
- Moll A, 1995. Regionale Differenzierung der Primärproduktion in der Nordsee: Untersuchungen mit Einem drei-dimensionalen Modell. Hamburg: Zentrum für meeresund Klimaforschung der Universität Hamburg. 1—151
- Radach G, Moll A, 1993. Estimation of the variability of production by simulating annual cycles of phytoplankton in the central North Sea. *Prog Oceanogr*, 31:339—419
- Riley G A, Stommel H Bumpus, 1949. Quantitative ecology of the plankton of the western North Atlantic. *Bull Bingham Oceanogr Coll*, 12:1—169

Skogen M D, Svendsen E, Berntsen J *et al*, 1995. Modelling the primary production in the North Sea using a coupled three-dimensional physical-chemical-biological ocean model. *Estuar Coast Shelf Sci*, 41:545-565

Van den Berg A J, Ridderinkhof H, Riegman R *et al*, 1996. Influence of variability in transport on phytoplankton biomass and composition in the southern North Sea: a modelling approach. *Continent Shelf Res*, 10(7):907-931

---

## A BRIEF INTRODUCTION TO OCEANOLOGIA ET LIMNOLOGIA SINICA

OCEANOLOGIA ET LIMNOLOGIA SINICA is sponsored by the Chinese Society for Oceanology and Limnology and published by Science Press (Beijing). Its publication commenced in 1957. It is one of the leading academic journals in China; it is also internationally influential.

OCEANOLOGIA ET LIMNOLOGIA SINICA is a multi-disciplinary academic journal in the field of oceanology and limnology. The first Chief Editor was Professor ZENG Cheng-kui (C K Tseng), a famous marine algologist who is a Member of the Chinese Academy of Sciences (CAS) and a Fellow of the Third World Academy of Sciences. The second Chief Editor was Professor LIU Rui-yu (J Y Liu), a famous marine biologist who is a Member of CAS and a member of the National Committee of China Association for Science and Technology. Professor QIN Yun-shan, a famous marine geologist and Member of the CAS, and President of the Council of Chinese Society for Oceanology and Limnology, is the present Chief Editor. The present Associate Editors are well-known scientists among whom are Professors LIU Jian-kang (C K Liu) and WEN Sheng-chang (S C Wen), both Members of CAS; Professor ZHOU Ming-jiang, Director of the Institute of Oceanology of CAS, Professor QI Yu-zao, Director of the Institute of Hydrobiology of Jinan University and Professor WANG Ying, Director of State Pilot Laboratory of Coast & Island Exploitation, and the Dean, School of Geoscience, Nanjing University.

Subject topics of the journal cover hydrology, meteorology, physics, chemistry, geology, geophysics, aquatic environmental science, biology and their branches applied to the earth's hydrosphere and instrumentation. The journal consists of a number of sections including Research Papers, Notes, Reviews, Discussion, New Techniques, Book Reviews, Scientific News, and Scientists's Profile.

Papers on the achievements which have a close relationship with the national economic growth, or present new academic viewpoints, will have a priority to be published. Papers of foreign scientists will be welcome. It is published bimonthly, and is distributed by the China International Book Trading Corporation (GUOJI SHUDIAN, P. O. Box 399, Beijing, China). Its journal number is: 2-421(home), BM69 (abroad).

Address of the Editorial Office: 7, Nanhai Road, Qingdao, 266071, China. Tel: 0086-0532-2879062-2528, E-mail: bsun@ms.qdio.ac.cn

**Editorial Office, Oceanologia et Limnologia Sinica**