

生态数学模型及其在海洋生态学中的应用*

ECOLOGICAL MATHEMATICS MODEL AND ITS APPLICATION IN MARINE ECOLOGY

杨东方^{1,2} 詹滨秋¹ 陈 豫² 张 经^{2,3}

(¹ 中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

(² 青岛海洋大学 化学化工学院 266003)

(³ 华东师范大学 河口海岸国家重点实验室 上海 200062)

生态系统动态过程是全球性的研究热点,如国际地圈和生物圈计划(IGBP)。用于研究的模型方面,从早期的种间竞争、捕食的关系模型发展到生态过程、食物链模型。尤其在近代,全球的环境变化受到重视,随着计算机的普及,以及应用数学的理论与方法的不断完善,生态的动态数学模型展示了物理、化学、地质、环境、生物等学科的综合的生态过程,如 ERSEM MAST1 program report 1993 年和 Frost 1993 年的欧洲北海区域的海洋生态系统模型、美国和加拿大对东海岸的乔治浅滩生态系、西海岸的加利福尼亚上升流生态系、切萨皮克湾生态系、圣劳伦斯湾生态等工作,使得生态条件大为改善。我国的生态系统动态研究尚处在起步阶段,然而,最近几年,我国科学工作者追踪国际前沿的发展趋势,逐渐使我国在这一方面也得到了不断的发展。

目前人们正致力于研究复合海洋生态系统的持续发展,营养动力学机制、生态系统的生物过程等,于是已产生了一系列模型,如,物质输运和物质平衡模型,营养补充机制模型、营养吸收动力学模型、食物网结构模型和分室能流模型等等,使得全球海洋生态系统动态研究得以发展和完成,并对人类生存、资源利用和环境保护有着重大的意义。为此,生态数学模型在海洋生态学研究成为一种非常有价值的工具。

1 什么是生态数学模型

数学模型作用在于它对新的概念、新的观点以及一些生态现象给予清晰的描述。它的应用对于可能的基本原理提供有用的启发,而且有时会产生出乎意料的结果和对一个生态学问题的新理解。如,浮游植

物生长能量平衡模型、颗粒垂直通量模型等。

在讨论数学模型的一般概念时,一个模型提供了对一个系统的代表方式。假若这个系统是动态的,它对该系统的各种运动进行模拟,而使许多问题得以解决;例如河口动力学、海洋生物变化与环境的关系、种群生长、海洋的物质循环与海洋生物地球化学的关系等等。模型更重要特征是它应该比真实的系统更便于理解或叙述得更充分。因此模型一般是真实系统的简化,但是真实系统的实质性特点应该在模型中出现,以使得模型的行为与系统的行为是相同的或者相似的。

数学模型是由一个方程或者一个方程组组成,这些方程通过某些必要的假定和假设定性或定量地表达真实系统,给出所预料的数值,用真实系统所做的测定值进行检验。模型的数学方程并不能提供模型的生态学或科学的内容,而是以定量方式来表达或解释所做的假设,以便推演出它们的结论,告诉我们到何处寻求对这些结果的证实或否定。

2 模型的特点和类型

数学模型研究可以分为两大方面:定性的和定量的。要定性地研究,提出的问题是:“发生了什么?或者发生了没有?”;要定量地研究,提出的问题是“发生了多少?或者它如何发生的?”。前者是对问题的动态

* 国家自然科学基金资助项目 49636210 号,49736278 号,49576297 号;青岛海洋大学博士后项目;中国科学院海洋研究所调查研究报告第 3729 号。

收稿日期:1999-05-20;修回日期:2000-01-10

周期、特征和趋势进行了定性的描述,而后者是对问题的机制、原理、起因进行了定量化的解释。然而,生物学中有许多实验问题与建立模型并不是直接有关的。于是,通过分析、比较、计算和应用各种数学方法,建立反映实际的且具有意义的仿真模型。

生态数学模型的特点为:(1) 综合考虑各种生态因子的影响。(2) 量化描述生态过程,阐明生态机制和规律。(3) 能够动态地模拟和预测自然发展状况。

模型的功能为:(1) 建造模型的尝试常有助于精确判定所缺乏的知识和数据,对于生物和环境有进一步定量了解。(2) 模型的建立过程能产生新的想法和实验方法,并缩减实验的数量,对选择假设有所取

舍,完善实验设计。(3) 与传统的方法相比,模型常能更好地使用越来越精确的数据,从生态的不同方面所取得材料集中在一起,得出统一的概念^[1]。

从模型的特点,可知,要想知道动态的生态系统的基本过程和动力学机制,尽可从建立数学模型为出发点,以数学为工具,以生物为基础,以物理、化学、地质为辅助,对生态现象、生态环境、生态过程进行探讨。

模型建立的方法可分为两种:“机理的”和“经验的”。从实验系统、系统的模型以及数学之间的关系,可以看出在机理模型和经验模型的制定时有些过程是共同的(见图1)。

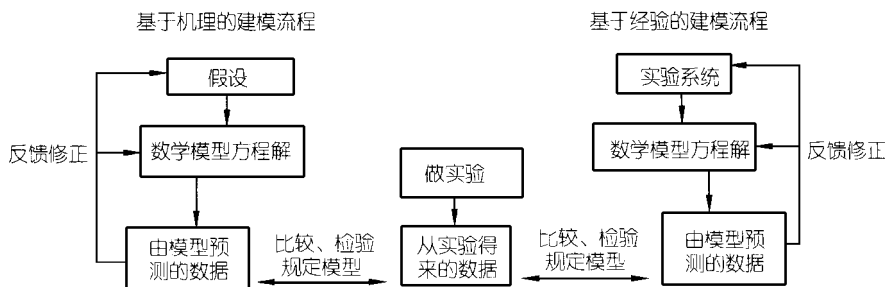


图1 机理的建模流程与经验的建模流程比较

3 数学模型在海洋生态学上的应用

3.1 DENT(Daylength, Irradiance, Nutrients, Temperature) 模型

浮游植物生长对海洋生物地球化学循环是至关重要的。其过程模型将描述碳、氮、磷、硅及其他元素在海洋中的通量和浮游植物对通量过程的影响。这些模型强调了浮游植物细胞的化学结构(叶绿素a, C, N, P和Si)和单位叶绿素a的光合作用作为光强度的函数(P^f vs. E),浮游植物的增长率(μ ; d^{-1})的变化与光照时间(D)、光照强度(E)、限制营养盐(N)和水温(T)的关系。为了描述这个变化,对这些未知的相关性进行预测和这些预测与海洋生物地球化学过程的动态模拟结合起来。

DENT模型是稳定状态,其表示式如下:

$$\mu + r = P^f / C$$

毛增长率(净增长率 μ 和呼吸 r ; d^{-1})等于毛光合作用速率 P^f , $gC\ cell^{-1}\ d^{-1}$ 与单位细胞 C 即 $gC\ cell^{-1}$ 的比值。

$$\text{或者 } \mu + r = D E a_{chl} \phi Chl / C$$

这里 D 是光照时间(h/d), E 是在光照期间的平均光照强度($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$), a_{chl} 是叶绿素比吸收系数($m^2\ gChl^{-1}$), ϕ 是光合量子值($mol\ C\ (mol\ photons)^{-1}$)和 Chl 是细胞叶绿素a($gChl\ cell^{-1}$)。这个值 $D E a_{chl} \phi Chl$ 是毛细胞光合作用 P^f 。这是由 Kiefer & Mitchell 1983年, Sakshaug 1989年, Nelsen 1992年根据碳的能量预算而建立的。

参数化呼吸:为了进一步限制能量平衡, Shuter 1979年把呼吸假设为生物维持的呼吸, r 独立于生长率和生物合成,于是有

$$r = \alpha + \beta \mu$$

其中, β 是生物合成值。

温度函数: 温度函数描述水温对生物合成的过程, $g^*_{\tau} = f(T)$ 。这个函数是用于营养盐和光的饱和的生长率, 展示了水温的独立性。Eppley 1977 年所采用的分析来预测浮游植物的最大的增长率。

营养盐函数: 和水温函数一样, 描述营养盐供给影响和决定生长率的过程, Monod 方程将毛生长率和营养盐供给相联系:

$$g^*_N = N^* / (1 + N^*)$$

N^* 是有效的营养盐浓度, 定义为 $[N] / K_m$, $[N]$ 为营养盐浓度, K_m 是生长的半饱和系数, 单位 $\mu\text{mol/L}$ 。Morel 1978 年所建立的在非替代的限制营养盐的吸收时单一转换的机制模式, 使得营养盐独立于增长率。这样可展现了 P, N, Si 对生长的限制的情况。

3.2 颗粒垂直通量模型

海洋颗粒在物质的海洋生物地球化学过程中起着重要的作用, 它们不仅提供了物质的来源、沉降、再分布和归宿, 而且由于它们处在相对于海水的运动状态。因此, 颗粒的垂直通量过程是由生物、物理和化学的过程所共同控制。

海洋颗粒的沉降是垂直转移的主要机制。对于小的 Reynolds 数 ($Re < 1$) 的颗粒, 其沉降速率 w 相对于周围水的运动) 由摩擦力和重力之间的平衡所决定, 并根据 Melave 1975 年提出的 Stokes 的法则来定义, 其方程为:

$$w = \frac{2}{9} \pi \Delta \rho g r^2 \frac{1}{\mu}$$

$\Delta \rho$ 是粒子密度和流体密度的差; g 为重力加速度; π 为 3.1416, r 是粒子半径; μ 是流体黏度。

从以上可见, 数学模型在海洋生态学上应用广泛, 并解决了一系列的实际问题和生态现象。从浮游植物生长的能量平衡、水温对生物合成、营养盐对浮游植物生长的限制、全球物质循环到种群所在海区生态系统的容纳能力下的持续产量, 以及鱼类种群个体随年龄的增长等的生态过程进行了定量化的深刻揭示。

4 用数学模型所解决的生态问题

4.1 海洋中悬浮物质再悬比率计算模式^[3]

海洋中颗粒物质 (SPM) 沉积通量的研究对了解全球物质循环和确定它们的海洋生物地球化学过程具有重要的意义, 但是直接测定悬浮物质的再悬浮比率技术上仍然还不可能, 以致于真实的物质的垂直通

量无法计算。作者根据物质通量和特征化学组成在浮游生物、悬浮颗粒物质与底质中含量的关系, 建立了再悬浮比率方程, 从而使上述的问题得到初步的解决。

模式的建立首先要进行基本概念的建立和条件假设: (1) 海洋中的悬浮颗粒物质由浮游生物生成的颗粒物质和再悬浮的沉积物组成, 它们在混合时, 其化学组分不发生变化; (2) 底质物再悬浮后, 其化学组分不发生变化; (3) 化学组分在悬浮颗粒物质中分布均匀。海洋中悬浮物质再悬比率计算模式为:

$$\alpha = (\bar{C}_A - C_A) / (\bar{C}_A - C) \times 100\%$$

α 为再悬浮沉积物在悬浮物质中占的比率; $\bar{C}_A$, C_A 和 C 分别为悬浮颗粒物质, 海洋自身生成的颗粒物质和再悬浮沉积物中化学组分 A 的含量。

方程运用颗粒有机碳 (POC) 和有机氮 (PON) 作为特征化学组成两种方法计算 α , 其标准偏差最小为 0.5%, 最大为 2.1%, 平均为 1.1%。

4.2 胶州湾初级生产力的限制因子^①

根据胶州湾 1991 年 5 月至 1994 年 2 月的观测数据, 采用统计学和微分方程分析比较研究该水域主要理化因子 (温、光、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{SiO}_4 - \text{Si}$, $\text{PO}_4 - \text{P}$) 与浮游植物、初级生产力时空分布变化之间的关系。结果表明, 硅酸盐对初级生产力的特征分布、动态周期和变化趋势有着重要影响; 为此, 作者建立了相应的初级生产力-硅酸盐的动态模型和模拟曲线; 又从胶州湾的硅酸盐成因, 生态环境和生态现象分析探讨, 认为胶州湾的硅酸盐是初级生产力的限制因子。并对具有明显的高营养盐浓度和浮游植物低生物量的海域进行了合理解释。

4.3 胶州湾的光照时间、水温对浮游植物生长的影响^②

根据 1991 年 5 月至 1994 年 2 月的观测数据, 采用统计学和微分方程, 对胶州湾的光照时间、水温进行分析, 确定了光照时间的变化和周期控制着水温的变化和周期, 并建立了相应的光照时间时滞-水温的动态模型。又通过叶绿素 a 和初级生产力提出了新概

① 杨东方, 1998, 胶州湾的浮游植物生长的限制因子。海洋与湖沼 (待发表)。

② 杨东方, 1998, 胶州湾的光照时间、水温对浮游植物生长的影响。海洋与湖沼 (待发表)。

念:浮游植物的增殖能力(既不同于初级生产力,也不同于碳同化数)。它对浮游植物的生长过程进行了定量化的深刻揭示;对胶州湾浮游植物增殖能力的时空分布特征和季节变化特点进行分析研究,使我们大体知道浮游植物生长的动态周期、特征和区域。建立了相应的水温-增殖能力的动态模型和模拟曲线。结果表明胶州湾的水温控制着浮游植物增殖能力的周期性和起伏性,阐述了浮游植物在夏季有单峰型(1回)增殖和在春、秋季有双峰型(2回)增殖的机制,并解释了光照时间、水温对初级生产力的影响。

上面例子中也体现了在定性描述与定量处理之间的关系,使研究进入更深的层次,开创了新的领域。

模型研究要特别注意:(1)模型的适用范围:时间尺度、空间距离、海域大小、参数范围。例如,不能用每月的个别发生的生态现象来检测1 a跨度的调查数据所做的模型。又如用不常发生的赤潮的赤潮模型来解释经常发生的一般生态现象。因此,模型的适用

范围一定要清楚;(2)模型的形式是非常重要的,它揭示内在的性质、本质的规律,来解释生态现象的机制、生态环境的内在联系。因此,重要的是要研究模型的形式,而不是参数,参数是说明尺度、大小、范围而已;(3)模型的可靠性,由于模型的参数一般是从实测数据得到的,它的可靠性非常重要,这是通过统计学来检测。只有可靠性得到保证,才能用模型说明实际的生态问题;(4)解决生态问题时,所提出的观点,不仅从数学模型支持这一观点,还要从生态现象、生态环境等各方面的事实来支持这一观点。

参考文献

- 1 (英) J. H. M. Thornley 著,王天铎等译.植物生理的数学模型。北京:科学出版社。1983。1~32
- 2 沈国英、施并章编著.海洋生态学。厦门:厦门大学出版社,1990。152~220
- 3 詹滨秋、宋金明.东海悬浮物质再悬比率的初步研究,海洋科学集刊,1997,38,99~101

(本文编辑:张培新)