

水环境生态模型国内外研究进展

吴建强, 黄沈发, 王 敏, 吴 健

(上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要 阐述了国内外有关生物生长和河流、湖泊、海洋等不同类别水体的生态模型研究进展, 指出了国内今后水环境生态模型应该着重研究的方向: 模型的全局灵敏度分析, 生物生长模型和水质、水动力模型的动态耦合, 模型与 GIS 等现代科学技术结合。

关键词 水环境; 生态模型; 河流; 湖泊; 海洋; 综述

中图分类号 X171; P333.9

文献标识码 B

文章编号 1004-693X(2008)S1-0001-04

自从英国生态学家 Tansley 在 1935 年提出了“生态系统”的概念之后, 它就逐渐为世界普遍采用^[1]。全球环境变化、污染程度加剧及其可能对生态系统产生的严重影响, 已经引起了科学家、各国政府和社会各界的极大关注^[2]。在几十年的不断探索中, 生态模型已被证明是预测生态环境变化的一种很好、很有前途的工具, 其发展备受人们关注^[3]。丹麦理论生态学家扬戈迦^[4]说: “要想了解复杂生态系统的功能, 在生态学中应用模型几乎是必不可少的”。虽然生态学的概念和研究由来已久, 但生态建模只是在最近 10 年中才得到迅速发展, 主要由于下述两方面的原因^[5]: ① 计算机技术的发展使得能处理非常复杂的数学问题; ② 对污染问题的认识, 认为需要认真考虑污染对生态系统的影响, 虽然污染的完全消除是不现实的(“零排放”), 但是利用有限的经济资源适当控制污染是可能的。

生态模型是指对生态现象和生态过程进行模拟的计算机程序或数学方程, 是一种真实生态系统的简化, 这种简化决定于生态系统的特征和主要的环境问题, 它在生态学、生态预测中扮演着非常重要的角色^[6]。生态模型包括物理交换、生态过程、生物个体生长、种群动态等模块, 模型的强迫因子有光照、水温、人类活动、无机氮、浮游植物和悬浮颗粒物等^[5]。近几十年来, 人类水环境的严重恶化、生物生境的丧失和生态系统的破坏, 使得水环境污染控制、治理以及生态修复成为各国政府和环境保护者新的关注和研究热点, 与此有关的水环境生态模型作为

管理和研究工具也逐渐被人们所开发和利用^[7]。水环境生态模型主要研究水生态系统中生物个体或种群间的内在变化机制及其与水文、水质、气象等因素之间的相互影响和关联, 旨在通过模型模拟和预测, 为构建稳定的水生态系统, 形成水环境-生态的良性循环提供科学的决策依据和技术支持。本文以生物生长模型为基础, 以不同类别水体为研究对象, 对水环境生态模型进行综述, 旨在阐明目前国内外此类生态系统模型的研究现状和应用效果, 为进一步的模型研究和生态系统管理提供参考。

1 河流水质生态模型

水质生态模型是一个含有诸多因素的综合性的水质评价、预测模型, 主要是通过水质模型和生物生态模型的耦合, 来研究湖泊、水库、河流等水体生物与水质之间的相互关系和动态变化, 它多应用于水体水质的预测和管理中^[8-9]。由于湖泊、水库发生富营养化问题较多, 因而用于湖泊、水库的生态模型——富营养化模型研究较为成熟。河流因其自身特点, 发生富营养化现象很少见, 所以研究河流水质问题时很少考虑生态因素。1981 年, Patteron 提出了适用于类似河流等动态水体中的藻类生长、溶解氧和营养物质变化的生态模型, Riley、Stefan、Hamiton、和 Schladow 等人对此模型进行了发展和完善^[8]。Monzur 等^[10]采用人为方法使湖水缓慢运动, 分析这种缓慢运动对藻华的影响。Liu 等^[11]经对台湾的 Keelung 潮汐河流的研究, 建立了适于 Keelung 河流

的 8 变量河流生态模型(浮游植物、氨氮、硝氮、有机氮、有机磷、无机磷、BOD、溶解氧)。

国内对河流等动态水体的水质生态模型的研究、应用较少,20 世纪 90 年代末才开始有真正的开发和应用。左其亭等^[12]在 1999 年提出了“多箱模型方法”(Multi-Box Modeling),建立基于流域水体为载体的水量-水质-生态耦合系统模型,以量化研究水量、水质和生态系统变化以及它们之间的相互关系,并得到实际应用。彭虹等^[13]在 2002 年针对南水北调中线工程的实施,研究建立了汉江下游河段综合水质生态数值模型,涉及浮游藻类、浮游动物、氨氮、硝氮、凯氏氮、总磷、生化需氧量、温度、光照、河流流速等多变量,该模型分析了该河段水体生态系统的相互转化、相互作用关系,具有十分重要的现实意义。

2 湖泊富营养化模型

自从湖泊富营养化问题出现以来,人们就设法通过构建模型来管理和认识湖泊富营养化过程。通过几十年的发展,富营养化模型无论在理论还是实践方面都有了较大的发展,并且建立了大量复杂程度不同的湖泊富营养化模型,从简单的单一状态变量、Vollenweider 式的经验总磷模型到复杂的湖泊生态系统动态模型,其中不少模型在认识和管理湖泊富营养化方面发挥了重要的作用^[14-15]。总的来说,富营养化模型经历了 3 个阶段,即营养盐模型、浮游植物生态模型和生态-动力学模型。

a. 营养盐模型。20 世纪 70 年代后期,联合国经济合作与开发组织(简称 OECD)为了防止湖泊富营养化,组织和协调了湖泊富营养化的合作研究,提出了湖水总磷浓度的计算模型,这就是最早使用的营养盐模型^[16]。营养盐模型在一段时期内发挥了重要作用,为各国遏制湖泊富营养化提供了帮助。但是,它的不足之处也很明显:模型只能求得均匀混合型湖泊总磷的平均浓度,无法反映大型湖泊污水入湖后总磷浓度分布的时空差异;在计算湖水中的总磷浓度时,模型没有考虑底质与水体界面的磷交换过程,所以在计算总磷浓度时会造成一定的误差;模型能够估测目标磷的负荷量,但不能预测湖泊对藻类生物量的季节性变化和不同管理措施的响应。底质与水界面之间养分交换过程仍然是今后湖泊富营养化研究的难点和重点。

b. 浮游植物生态模型。浮游植物大量繁殖是湖泊富营养化的主要特征之一^[17]。运用生态模型模拟浮游植物的发生、生长和繁殖规律对于全面预测湖泊生态系统结构和功能的改变有着十分重要的意义。浮游植物生态模型弥补了营养盐模型的不足,充

分考虑了植物生长与营养盐之间的关系。但是,它还需进一步完善,特别是对于一些空间上跨度很大的湖泊,通过把多级浮游植物、养分负荷模型与水动力学模型整合在一起,才能有效地预测养分负荷的改变对浮游植物组成及其优势种的影响,而且,它也未考虑悬浮底质和沉水植被对湖泊养分负荷的响应。

c. 富营养化生态-动力学模型。生态-动力学模型主要研究湖泊富营养化发生的机理,并对其发展趋势作出预测。它克服了以往富营养化模型的缺点,其主要特点是:考虑了生态系统中营养物随时间和空间的变化,详细地描述湖泊中的物理、化学和生物变化过程,考虑了更多种因素变化的影响。生态动力学模型一般包括 3 个营养级(浮游植物、浮游动物和鱼)与各元素(如碳、磷、氮)有关物理、化学与生物变化过程。在一般情况下,这一变化过程可用磷循环子模型、氮循环子模型和碳循环子模型等来描述^[18]。

自 20 世纪 80 年代以来,我国学者在湖泊富营养化模型构建方面也做了大量工作。阮景荣等^[14]建立武汉东湖的磷-浮游植物动态模型,该模型状态变量包括浮游植物磷、藻类生物量、正磷酸盐、碎屑磷和沉积物磷,经过校正和检验结果表明,模型对于系统给定状态的描述是令人满意的,并且对于系统的强制函数给予了合理的响应。刘玉生等^[19]在研究滇池碳、氮、磷时空分布、藻类动力学、浮游植物动力学及营养沉积与释放的基础上,建立了生态动力学模型,模拟了总磷、总氮和化学需氧量的动态变化过程及时空分布,并对滇池水环境容量和削减量进行计算,所得结果能较好地与实际相符,为滇池的水污染控制打下了基础。另外,宋永昌等^[20]以淀山湖为研究对象,建立了富营养化生态模型,为淀山湖科学管理和富营养化治理提供了依据。还有大量的学者在太湖进行了湖泊水动力学方面的研究,建立了风生流和风涌增减水的三维数值模型,较好地模拟了湖泊流场对湖泊水质和生态系统产生的重要影响^[21]。

3 海洋生态模型

随着沿海地区人口的日益增长,以及工业和海水养殖业的迅速发展,沿海生态环境已受到较为严重的破坏,水质恶化,导致赤潮的频繁出现、鱼病突发与人工养殖鱼虾的大面积死亡。因此,建立实用于评估海洋水体生态环境状况和预测海洋生态平衡和演变的数学模型已成为沿海各国寻求经济发展的科研战略之一。

国外海洋生态系统的数值模型研究可以追溯到 40 年前,并相继做了大量的工作。海洋生态模型从简单的包含营养盐、浮游植物和浮游动物三个状态

变量的模型(简称 NPZ 模型)^[22-23]发展到包含 11 个状态变量的北太平洋生态模型(简称 NEMURO 模型)^[24]以及包含 51 个状态变量的欧洲区域海生态模型(简称 ERSEM 模型)^[25]。20 世纪 80 年代以来,在围绕大西洋北海和地中海生态研究以及美国乔治亚海和日本若干海湾的生态研究中,提出了几十个不同营养层次和类型的海洋生态动力学模型^[26-27]。进入 20 世纪 90 年代,海洋生态系统研究异常活跃,并进入了强调“动力学”研究的时期。在传统的海洋水体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相互作用研究,强调浮游动物在海洋水体生态系统中的作用。

我国对于海洋生态模型的研究才处于初期探索阶段。1999 年,我国启动了渤、黄、东海水体生态系统动力学方面的研究,通过一些初期研究工作对渤海的浮游植物动力学、初级生产年循环、营养盐收支中各过程的贡献等有了初步了解。近年来,翟雪梅等^[28]开发了生态建模软件,比较成功地模拟了养虾池的生态演变过程;吴增茂与俞光耀等^[29-31]对胶州湾水体中营养盐、浮游植物、浮游动物、DO、POC、DOC 等的周年变化作了较好的模拟再现;俞光耀等^[30-31]对中国东海中心区域建立了简单的生态模型,模拟了包括浮游植物、浮游动物、自养和异养细菌、硝酸和 DOC 在内各组分垂直分布的季节特征。

4 综合生态模型

随着水质模型、富营养化模型的发展,生态模型作为水环境管理的一种工具得到广泛的应用与发展。目前,为了解决复杂的环境问题,又发展了多介质环境综合生态模型^[32]。进入环境中的污染物,在气、水、土和生物等环境介质中进行迁移和转化。污染物对环境的影响与各环境单元中的浓度水平和停留时间密切相关,为了评价污染物的潜在环境影响和生态危害性,要求发展多介质综合生态模型。多介质综合生态模型是相当复杂的,它不仅要描述生物生长变化过程,还要描述污染物在介质中的迁移转化。仅就水体污染而言,就包括污染物(点源和非点源)的产生、污染物在表层水和沉积物中的迁移转化、污染物在食物链中的积累及对个体和整个生态系统的影响等过程的模拟。美国环保局发展了两种暴露评价模型软件:一个是 FGETS 模型(Food and Gill Exchange of Toxic Substances),能够预测鱼体内有机物质积累的空间动力学特征,也能够计算有机物在鱼体内积累并达到致死浓度的时间;另一个是 NR-DAM/CME 模型(Natural Resource Damage Assessment Model for Coastal and Marine Environments),主要模拟海岸和海洋环境中原油等泄漏物质对自然资源

的损害,包括污染物迁移、生物效应和恢复等子模型^[32]。表 1 列出了国外在水环境污染生物生态模型研究方面的一些实例^[33]。

表 1 水环境综合生态模型研究实例

主要污染物	模拟过程
Cd	类似富营养化的食物链模型
重金属	浓度因子、排泄、生物积累
Hg	水、沉积物、悬浮物质、无脊椎动物、植物和鱼
海水中 Cu	络合物形成、吸附、铜离子的亚致死效应
Pb	水动力学、沉淀、离子态铅对藻类、无脊椎动物和鱼类的影响
Cd、PCB	水的涨落速率、沉积物相互作用、稳态食物链子模型
Cd、芳香族化合物	水动力学因素、沉降、再悬浮、挥发、降解、吸附
有毒物质	浮游生物食物网
多介质污染	面向对象的水生态系统模型
有机物	重金属、有机物的迁移和对细菌生长动力学模拟

5 结论与展望

随着生态学的发展,生态模型已得到比较普遍的重视,特别是水环境的污染和生态系统的退化所带来的一系列影响人类健康和生存的问题,使得我们有理由相信,这些模型现在是、将来也必将是在各种尺度范围内研究生态问题的重要工具。鉴于我国水环境污染和生态破坏的严重性,深入研究水环境生态模型并加以推广应用,以此来作为遏制水环境污染和恢复生态环境的手段之一,就显得尤为重要。我国对水环境生态模型的研究起步较晚,通过与国外相关研究进行比较,笔者认为国内以后研究的重点在以下几个方面。

5.1 模型的全局灵敏度分析

灵敏度分析用于定性或定量地评价模型参数误差对模型结果产生的影响,是模型参数化过程和模型校正过程中的有用工具,具有重要的生态学意义。灵敏度分析包括局部灵敏度分析和全局灵敏度分析。局部灵敏度分析只检验单个参数的变化对模型结果的影响程度;全局灵敏度分析则检验多个参数的变化对模型运行结果总的影响,并分析每一个参数及其参数之间相互作用对模型结果的影响。目前,在对生态模型的灵敏度分析中,越来越倾向于使用全局灵敏度分析的方法,但国内仍多采用局部灵敏度分析方法。

5.2 生物生长与水体污染物模型的动态耦合

关于水体中污染物的生态模型研究,目前有两种趋势:一是研究的焦点放在生物上,主要集中在污染物的生物积累和对种群的影响方面,建立生物种群动态模型。另一种是研究的焦点主要放在化学污染物方面,试图通过对污染物的研究,与生态效应建

立某种联系,从而预测水体中污染物的生态风险性。后者是目前学术界研究的趋势,因此,实现生物生长模块和水体水质、水动力模型模块的动态耦合,成为将来水环境生态模型研究热点和难点。

5.3 与现代科学技术的结合

生态系统模型的发展和进步离不开现代科学技术,GIS、GPS 和 RS 技术使人们可以利用卫星的光谱资料信息和数字化的环境资料对大区域植物进行识别、分析和分类,并能描绘它们分布,使我们有可能在大范围尺度内对植被动态进行长期连续的监测。而且,在 GIS 工作平台上,可以把植被的动态变化与海洋、湖泊等水体环境的变化结合起来以研究某一时段内水体生态系统的变化。因此,把这几项技术整合到生态模型中去,将是未来几年生态模型发展的强大动力。

参考文献:

[1] ROSENZWEIG C, PARRY M L. Potential impact of climate change on world food supply[J]. Nature, 1994, 367: 133-138.

[2] 彭少麟, 张桂莲, 柳新伟. 生态系统模拟模型的研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2005, 13(1): 85-94.

[3] 苏宏新, 桑卫国. 宏观植物生态模型的研究现状与展望[J]. 植物生态学报, 2003(增刊): 98-106.

[4] 黄樾. 数学与计算机仿真在生态学研究中的应用[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2001, 25(5): 63-6.

[5] 陆健健. 生态模型法原理[M]. 周玉丽, 译. 上海: 上海翻译出版社, 1988.

[6] 徐崇刚, 胡远满, 常禹, 等. 生态模型的灵敏度分析[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1056-1062.

[7] FENNEL K, LOSCH M, SCHROTER J, et al. Testing a marine ecosystem model: sensitivity analysis and parameter optimization[J]. Jour Mar Syst, 2001, 28: 45-63.

[8] DAVID P H, SCHLADOW S G. Prediction of water quality in lakes and reservoirs: Part I - model description[J]. Ecological Modelling, 1997, 96: 91-110.

[9] 叶守泽, 夏军, 郭生练, 等. 水库水环境模拟预测与评价[M]. 武汉: 中国水利水电出版社, 1997.

[10] MONZUR A I, TAKASHI A. Artificial mixing of lake water by bubble plume and effects of bubbling operations on algal bloom[J]. Water Research, 2000, 34(6): 1919-1929.

[11] LIU W C, ALBERT Y K. Sensitivity analysis of a mathematical model of chlorophyll distribution in the tidal keeling river[J]. J Environ Sci Health, 2000, 35(4): 489-514.

[12] 左其亭, 夏军. 陆面水量~水质~生态耦合系统模型研究[J]. 水利学报, 2003, 2(2): 61-65.

[13] 彭虹, 郭生练. 汉江下游河段水质生态模型及数值模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(4): 363-369.

[14] 阮景荣, 蔡庆华, 刘建康. 武汉东湖的磷-浮游植物动态模型[J]. 水生生物学报, 1988, 12(4): 289-307.

[15] SOMLYODY L. Eutrophication modeling, management and decision making: the Kis - Balaton case[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(3): 165-175.

[16] 全为民, 严力蛟, 虞左明, 等. 湖泊富营养化模型研究进展[J]. 生物多样性, 2001, 9(2): 168-175.

[17] 刘元波, 陈伟. 湖泊藻类动态模拟[J]. 湖泊科学, 2000, 12(2): 171-176.

[18] KAO J J, LIN W L, TSAI C H. Dynamic spatial modeling approach for estimation of internal phosphorus load[J]. Water Research, 2001, 35(1): 47-56.

[19] 刘玉生, 唐宗武, 韩梅, 等. 滇池富营养化生态动力学模型及其应用[J]. 环境科学研究, 2001, 16(1): 1-8.

[20] 宋永昌, 王云, 戚仁海. 淀山湖富营养化及其防治研究[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1991.

[21] 胡维平, 秦伯强, 濮培民. 太湖水动力学三维数值试验研究(III): 马山围垦对太湖风生流的影响[J]. 湖泊科学, 2000, 12(4): 335-342.

[22] FRANKS P J S, CHEN C S. A 3-D prognostic numerical model study of the Georges Bank ecosystem: part II: biological/physical model[J]. Deep Sea Research II, 2001, 48: 457-482.

[23] FRANKS P J S. NPZ models of plankton dynamics: their construction, coupling to physics, and application[J]. Journal of Oceanography, 2002, 58: 379-387.

[24] ESLINGER D V, KASHIWAI M B, KISHI M J, et al. Report of the 2000 model workshop on lower trophic level modeling[J]. PICES Science Report, 2000, 15: 177-186.

[25] LENHART H J, PATSCH J. Daily nutrient loads for the European continental rivers during 1977-1998[J]. Technical Report, 2001, 40: 146-152.

[26] MOLL A. Regional distribution of primary production in the North Sea simulation by a three dimensional model[J]. Journal of marine systems, 1998, 16(12): 151-170.

[27] SKOGEN M D, MOLL A. Interannual variability of the North Sea primary production: comparison from two model studies[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20: 129-151.

[28] 翟雪梅, 张志南. 虾池生态系浮游生物亚模型[J]. 青岛海洋大学学报, 1999, 29(1): 94-100.

[29] 吴增茂, 俞光耀. 海洋生态系统动力学模型的基本特征及其研究进展[J]. 地球科学进展, 1996, 11(1): 13-18.

[30] 俞光耀, 吴增茂, 张志南, 等. 胶州湾北部水层生态动力学模型与模拟 I: 胶州湾北部水层生态动力学模型[J]. 青岛海洋大学学报, 1999, 29(3): 421-428.

[31] 吴增茂, 俞光耀, 张志南. 胶州湾北部水层生态动力学模型与模拟 II: 胶州湾北部水层生态动力学的模拟研究[J]. 青岛海洋大学学报, 1999, 29(3): 429-435.

[32] 何孟常, 杨居荣. 水质模型、生态模型及计算机模型软件[J]. 环境科学进展, 1999, 17(3): 62-69.

[33] BARETTA J W. The European regional seas ecosystem model: a complex marine ecosystem model[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1995, 33(3): 233-246.

(收稿日期: 2008-01-24 编辑: 高渭文)