

海洋生态系统动力学模型研究进展

任湘湘, 李海, 吴辉璇

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要:海洋生态系统动力学模型作为定量地认识和分析海洋生态系统现象的有力工具,近年来得到了长足发展。本文首先回顾了海洋生态动力学模型的发展历史,着重介绍了21世纪以来生态系统动力学模型的三大发展趋势:一是进一步探索海洋生态系统复杂性,二是全球气候变化与海洋生态系统的相互作用;三是不再局限于理论研究,而进入于灾害预报与评估、公共决策等应用领域。其次介绍了海洋生态动力学模型的分类及典型海洋生态动力学数值模型 COHERENS 的特点、功能和最新的应用情况。最后总结归纳了目前海洋生态动力学模型研究领域的几大问题与挑战,展望了该研究领域未来的发展趋势和方向。

关键词:海洋生态系统动力学;模型;研究进展

中图分类号:Q178 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-0239(2012)01-0065-08

1 海洋生态系统动力学模型发展简史

海洋生态系统动力学的发展过程自始至终与现代海洋学的发展过程交织在一起,密不可分,这是由海洋学的特性所决定的。海洋学从建立之初便是一门物理、生物、化学和地质等学科相互交叉的综合性应用科学,正如 MOLL 所指出的,海洋环境要素及其相互之间的关系错综复杂,一方面随着我们对海洋环境认识的不断深入,解决这些难题的必要性也日益提升,但另外一方面随着我们所要解决的环境问题日趋复杂,我们通过现场实验等手段调查海洋环境的能力却相对下降,在这种形势下发展生态系统动力学模型成为对复杂海洋环境进行研究的一种重要手段^[1]。

上世纪40年代末,随着竞争和捕食—被捕食关系等新生态理论的诞生,物理海洋学家和海洋生态学家尝试将数学模型引入海洋生态学领域,从此开始了第一代海洋生态动力学模型的研究工

作。1949年Riley与Stommel等人建立一个垂直—维数学模型来描述欧洲北海浮游生物的季节变化^[2],标志着海洋生态学从定性描述进入了定量模拟的时代。此后直到上世纪80年代前半期,海洋生态动力学模型虽然发展迅速,但在理论和方法上并无质的飞跃。这一时期的生态动力学模型,均以垂直—维水柱生态模型为基础,可被视为Riley模型的延续^[3]。

1986年前后,美国和日本的科学家开始了三维海洋生态动力学模型的研究工作。Kishi(1986)建立了一个濑户内海三维有限差分海洋生态动力学模型, Walsh(1988)建立了北大西洋海湾三维海洋生态动力学模型^[4]。

进入20世纪90年代,一系列国际海洋研究计划陆续启动。热带海洋与全球大气计划(TO-GA2-Tropical Ocean Global Atmosphere 2)、海岸带陆海相互作用(LOICZ-Land-Ocean Interaction in the Coastal Zone)和全球海洋观测系统(GOOS-Global Ocean Observing System)等计划的

收稿日期:2011-01-27

基金项目:国家自然科学基金“南海初级生产对季风变动响应的数值模拟”(40531006);科技部“赤潮预警预报、应急及损害评估技术”(2007AA092003-01);国家科技支撑项目“重大海洋灾害预警及应急技术研究”(2006BAC03B-01-05);国家自然科学基金“南海海洋生态系统碳循环的数值模拟研究”(41076011)

作者简介:任湘湘(1981-),女,助理研究员,主要从事物理海洋和海洋生态学模型研究。E-mail: rxx@nmefc.gov.cn

实施大大地推动了海洋生态系统动力学的发展^[4]。1989年1月美国推出了全球变化研究计划(US-GCRP-United States Global Change Research Program),其中全球海洋生态系统动力学研究计划(GLOBEC-GLOBal Ocean ECosystems Dynamics)于1995年被纳入国际地圈生物圈计划(IGBP-International Geosphere-Biosphere Program)的核心计划,海洋生态系统动力学研究成为海洋科学的前沿和热点。在这一背景下,围绕欧洲北海诞生了一系列各具特点的模式。1993年Skogen等将三维斜压水动力学模型POM(Princeton Ocean Model)与生物-化学模型耦合建立了NORWECOM(NORWegian ECological Model system)。1994年Delhez等人将一个简单的生态模型与一个中尺度环流模型耦合建立了GHER(GeoHydrodynamics and Environmental Research)模型。1995年MOLL等人在原有一维水柱生态模型的基础上耦合三维斜压水动力学模型HAMSOM(Hamburg Shelf Ocean Model),建立了三维生态动力学模型ECOHAM(Ecological North Sea Model Hamburg)。1999年Luyten等人将物理模型、生物模型、沉积物模型、污染物运输模型耦合在一起建立了多功能的COHERENS(COupled Hydrodynamical Ecological model for REgionAl Shelf seas)模型^[1]。我们可以看到这一时期的海洋生态动力学模型往往由物理-化学-生物模型耦合而成,其对海水温度、盐度、流场等物理要素的刻画日臻成熟和细致,但对生态系统本身的发展演变做了很大程度的简化,可以笼统地概括为营养盐-浮游植物-浮游动物-碎屑(NPZD- Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus Model)模型。营养盐方面考虑氮、磷的浓度及浮游植物生长所受的营养盐限制,生物方面则只考虑浮游植物、浮游动物、细菌三类^[5]。但无论如何,海洋生态模型进入了强调“动力学”的时代,可以被称为是真正“系统”意义上的海洋生态动力学模型。

20世纪90年代后期至今,海洋生态动力学模型的研究出现了三大新趋势。

第一个新趋势是对海洋生态系统的复杂性有了更多考虑。一些模型对引入了Fe, Si等营养盐的限制(Fe是微量元素),将浮游植物分为不同的粒级,浮游动物也分为大型和小型,从而引入不

同的摄食方式^[5],有的模型甚至涵盖了鱼类等更高营养级,更完整地再现了海洋食物链。例如Armstrong建立的模型就侧重于评价Fe在浮游植物生长过程中的限制作用^[6]。Chai等建立的一维模式除了考虑N、Si循环外还将Fe的限制作用隐含在硅藻生长速率中^[7]。Chai等还将CSM(Climate System Models)模型的海洋学部分与一个一维碳、硅、氮生态模型CoSINE(Carbon, Silicon, Nitrogen Ecosystem)耦合,模拟试验将赤道太平洋东部海区铁浓度提高后,硅藻生产力的变化情况^[8]。Fennel近年来尝试将简单的浮游生物动力学模型和鱼类生产模型耦合在一起,经验证,该模型可以对鱼类捕获量的年际变化进行模拟^[9-10]。

第二个新趋势是从全球气候变化的角度,关注CO₂浓度变化对海洋生态系统的影响,以及海洋生态系统对全球气候变化的响应^[11]。Leonard等用一个含有Fe限制的模型很好地再现了1990—1994年Enso事件期间浮游植物丰度下降与群落结构的变化^[12]。Skogen和MOLL分别使用NORWECOM和ECOHAM对1984—1994年间欧洲北海年平均初级生产力进行了长期模拟,模拟结果显示欧洲北海十年间年平均初级生产力在120—140 gCm⁻²y⁻¹间波动,没有显著变化^[1]。

第三个新趋势是突破理论研究的局限,应用于灾害预报与评估、公共决策制定等领域。近来Stow和Lynch等人则进一步提出了对物理-生物耦合模型的精确度进行评估的方法,使得海洋生态动力学模型可应用于预报,并最终服务于环境评估和公共决策^[13-14]。Dyble等人则用物理-生物耦合模型来模拟感染病原体 and 有害藻类地生长、输运和毒性,从而预测其对食品安全和人类健康的影响^[15]。

我国的海洋生态学研究始于1958年的全国海洋普查,但直到上世纪80年代,该领域的研究工作仍是以现场调查为主,如1981—1985年的“渤海海域渔业资源、生态环境及其增殖潜力的调查研究”,1985—1989年的“黄海大海洋生态系统调查”,这一系列的调查工作为我国海洋生态动力学的发展积累了宝贵的物理、化学、生物资料^[4]。

我国真正意义上的海洋生态动力学模型研究起步于上世纪90年代后期。随着国家自然科学基金

金重大项目“渤海生态系统动力学与生物资源可持续利用研究”以及国家重点基础研究发展规划(973)项目“东、黄海生态系统动力学与生物资源可持续利用”等一系列重大科研项目的带动,我国学者在海洋生态学现场调查、过程和模型研究中做了大量的工作^[16]。

近年来,俞光耀(1999)^[17-18]、高会旺(1999)^[19]、崔茂常(2000)^[20-21]、张书文(2002)^[22]、魏皓(2003)^[23-24]等人在海洋生态动力学建模领域进行了一系列尝试,对渤海、黄海区域的营养盐分布、浮游植物生物量、初级生产力等生态系统要素进行了较成功的模拟。夏洁等(2006)将POM模式与ERSEM(European Regional Seas Ecosystem Model)耦合建立垂直一维生态动力学模型对南黄海东部营养盐、叶绿素浓度的季节变化进行了模拟^[25];刘浩(2006)等建立了一个与POM耦合同时考虑了太阳辐射和河流输入的NPZD生态模型并将其应用于渤海,验证了渤海f-ratio特征及硝酸盐、铵盐对渤海浮游植物生长的相对贡献率^[26];刘浩等(2008)运用物理-生物耦合模型对渤海的初级生产力、浮游植物生物量和N、P的季节变化特征进行了模拟^[27]。

特别值得一提的是,曾庆存院士等在2008年发表的《地球系统动力学模式及模拟研究》一文中将海洋生物地球化学模式作为地球系统动力学模式的重要组成部分进行了介绍^[28]。这种将地球上的大气、海洋、岩石和生态各圈视作一个有机整体进行研究的观点正是当前地球科学发展的主要趋势。我国海洋生态动力学模型的研究已经开始从全球气候变化的高度关注海洋生态系统在地球动力系统碳循环中的作用^[29-30],这标志着我国的海洋生态动力学模型研究进入了一个新的阶段。

2 海洋生态系统动力学数值模型分类

根据科学目的、研究对象、研究区域、数值求解方法等不同标准,海洋生态动力学模型有许多分类方法。

2.1 根据研究范围不同,海洋生态动力学模型可分为:

(1) 全球或海盆尺度海洋生态系统动力学模型

目前主流的全球或海盆尺度海洋生态系统动力学模型大多是生物—物理耦合的三维模型,建

立在海洋动力学环流模型的基础之上,并力图全面地纳入各种生物—化学变化过程。但必须承认目前的全球或海盆尺度海洋生态动力学模型仍停留在定性描述阶段。近年来,人们逐渐认识到大尺度的气候变化对全球生态系统有着深刻影响,而生态系统也以其特有的方式反作用于全球气候系统。但目前地球科学界尚未揭示出生态系统与气候变化之间相互作用的根本机制。因此从全球气候变化的意义上探索海洋生态系统和全球气候变化之间的关系是许多全球或大尺度海洋生态系统动力学数值模型重点关注的问题,特别是人为产生的CO₂对气候变化和海洋生态系统带来的影响是研究的热点。

(2) 近岸区域海洋、海湾生态系统动力学模型迄今为止,欧洲北海及其某些海湾是海洋生态动力学模型研究最频繁的区域,并由此诞生了NORWECOM、GHER、ECOHAM、ERSEM、COHERENS、POL3dERSEM(Proudman Oceanographic Laboratory 3d European Regional Seas Ecosystem Model)等一系列各具特色的模型。上世纪70—80年代,近岸海洋生态动力学模型的研究重点是富营养化条件下的近岸生态系统。但近年来,随着研究的不断深入和环境、资源管理要求的不断升级,模型除了关注浮游生态系统、初级生产力模拟之外,近岸海洋生态动力学模型也开始应用于渔业产量测算、近岸环境变化预测等领域^[3]。Franks和陈长胜等人将海湾近岸海洋模型ECOM-si与NPZ生态模型耦合对乔治浅滩初级生产力和春季浮游植物水华等一系列问题进行了研究,并取得了一些符合实际情况的研究结论^[31-33]。

(3) 河口生态系统动力学模型

河口地区由于自身环境的特殊性,其流场结构、水质、生物种群结构等均具有与其他海区明显不同的特点,故此形成其特有的河口地区生态系统。GEMBASE是具有代表性的河口生态动力学模型之一。Chen等人利用生物—物理耦合模型模拟了河流淡水输入对于美国路易斯安娜与得克萨斯近岸生态系统的影响^[34]。

2.2 根据研究对象不同,海洋生态动力学模型可分为

2.2.1 过程模型

过程模型一般针对特定的生物过程(如摄食、

种群竞争等),描述生物个体的生理参数与生物功能之间的关系(如摄食率与饵料浓度的线性关系,代谢率与温度的关系等),并以线性或非线性回归方程表示。它能够较好地反映数据的统计特征,但难以刻画生物过程的动力学规律^[4]。过程模型是建立生态系统模型的基础。

2.2.2 个体模型、种群模型和种间模型

个体模型通常用来描述生物个体与环境之间的物质能量交换和生物个体本身的生长、发育并最终死亡的整个过程。种群模型是通过描述种群密度、出生率、死亡率、年龄分布、生长形式等特征属性来刻画某一种群的形态、生长、发展和变化。种间模型则是建立在种群模型的基础之上,除了刻画几个不同种群的自身特征属性之外,同时描述了不同种群之间的竞争、捕食等错综复杂的关系。Chen等利用海湾近岸海洋模型ECOM-si(Estuarine, Coastal and Ocean Model semi-implicit)与个体模型IBMs的耦合模型模拟了乔治浅滩潮流混合对桡足类的生长繁殖过程的影响^[35]。He等人将区域海洋模型ROMS与一个种群动力学模型耦合对2005年缅甸湾西部亚历山大藻暴发进行了后报模拟^[36]。

2.2.3 系统模型

系统模型是针对整个系统,在一定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^[37]。系统模型往往包含物理、化学、生物等多种变量,或着眼于刻画海洋生态系统中的物质和能量流动。系统模型有的重在模拟大洋或局地海洋生态系统的总结构,刻画整个系统内的物质循环、能量传递及稳态调节机制;有的重在研究生态系统中物理和生物要素之间的相互作用关系^[38]。近年来,系统模型已经成为海洋生态动力学模型的主流,NORWECOM、ECOHAM、COHERENS、ERSEM等各有特点模型均为系统模型。

2.3 根据模型空间结构不同,海洋生态动力学模型可分为:

2.3.1 箱式模型

将某特定区域内的水体视为若干个相互连接的箱体,箱内所有生态变量都是均匀的,仅为时间的函数,不同的箱之间以及箱与外界环境之间存在物质交换,根据这种思路建立起来的生态动

力学模型为箱式模型^[39]。其中最有代表性的是欧洲区域海生态模型ERSEM,它将欧洲北海表层分为85个箱,底层分为45个箱。欧洲各国科学家利用该模型在欧洲北海生态学研究方面做了大量卓有成效的工作。Varela等(1995)用ERSEM计算了北海的总初级生产力^[1];Bryant等人(1995)利用ERSEM模拟了北海北部鱼类的繁殖、生长和种群变迁^[1];Patsch等(1997)模拟再现了欧洲北海1955—1993年间的海富营养化现象^[1]。Lenhart(1997)用改进的ERSEM II箱式模型模拟了河流输入的营养盐对欧洲北海营养盐和初级生产力空间分布的影响^[1]。Allen等人(2001)将ERSEM箱式生态动力学模型嵌入到一个三维环流模型,建立了三维生态动力学模型POL3dERSEM^[1]。夏洁将ERSEM与一维POM模式进行耦合,模拟了南黄海东部浮游生态系统的季节变化规律^[20]。如今将箱式模型嵌入到物理模型中已成为一种常见的做法。

2.3.2 一维模型

垂直一维生态动力学模型不考虑水平输运对生态系统的影响,因此一般适用于生态系统水平方向变化不显著的大洋区域,对描述生态变量年际变化非常有效。1949年Riley开发的模型就是垂直一维模型。1985年Radach等人则利用垂直一维模型模拟了北海中部25年间(1962—1986年)生产力的年际变化^[1]。

2.3.3 三维模型

三维海洋生态系统动力学模型对大气、海洋等物理背景的模拟更加精确,能够反映出生态系统的三维空间分布特征和随时间演变的特征,NORWECOM, ECOHAM, COHERENS, FVCOM都是三维海洋生态动力学模型的经典代表。

3 典型的三维海洋生态系统动力学模型——COHERENS

COHERENS(Coupled Hydrodynamical Ecological model for REgionNal Shelf seas)是1990—1998年间由NOMADS(National Model Archive and Distribution System)等一系列欧盟计划共同资助建立的三维多功能沿岸和陆架海模型。它主要由物理模型、生物模型、沉积物模型和污染物运输模型耦合而成。

COHERENS 的物理模型以 POM 模式为基础, 具有以下基本特点:

垂直方向采用 σ 坐标;

水平采用曲线正交坐标和 Arakawa C 网格差分方案;

水平时间差分是显式格式而垂直差分是隐式格式;

模式包含二阶湍流闭合子模式提供垂直混合系数;

模式具有自由表面, 时间积分采用分裂解法。模式外模是二维的, 根据 CFL 条件和外波速采用短时间步长; 内模是三维的, 根据 CFL 条件和内波速采用长时间步长;

包含完备的热力学过程;

采用了 Boussinesq 近似和准静力近似。

COHERENS 的生物模型是以 Tett(1990) 提出的“微生物舱”为基础建立的, 共包含 8 个状态变量: 微型浮游植物碳、微型浮游植物氮、碎屑碳、碎屑氮、硝酸盐、铵盐、溶解氧和浮游动物氮。生物模型主要考虑了微型浮游生物部分和碎屑部分之间的有机碳和有机氮的循环过程, 此外还考虑了溶解硝酸盐、铵盐和溶解氧浓度的变化。通过求解这些状态变量的输送扩散方程得到它们随时间变化的三维分布, 在方程中将它们生物过程作为输运方程的源汇项, 同时考虑了垂直

沉降以及平流、扩散产生的物理输送。生物模型结构见图 1。

COHERENS 自诞生以来在海洋环境模拟和海洋生态系统模拟方面得到了广泛的应用。Lee 等 (2002) 将其应用在欧洲北海北部, 并与之前用 ERSEM、ECOHAM1 模拟的结果进行了比较。COHERENS 模型只考虑了生物圈氮循环, 而 ECOHAM1 模型则只考虑了磷循环, ERSEM 不但包含氮、磷、硅循环还纳入了底栖动物。ERSEM 在生物部分自有其优势, 但 COHERENS 模型的物理模块更加成熟。鉴于 COHERENS 自带的生态模块未将硅藻考虑在内, Geneviève Lacroix 等 (2005) 将 COHERENS 与生态模型 MIRO^[40] 耦合建立三维海洋生态动力学模型 MIRO&CO-3D 对 1991—2003 年间北海南部海湾的无机碳、有机碳、营养盐、浮游植物、浮游动物、细菌的年变化进行了模拟。在时间序列上, 模型能够反映营养盐和浮游植物的季节变化规律, 但模拟的春季叶绿素 a 平均浓度偏低, 硅循环的模拟则失败了, 因为模型模拟的春季硅藻暴发比实际延迟了; 在空间分布上, 冬季海表面营养盐浓度特别是 PO_4 模拟得比较成功, 但莱茵河口的模拟结果偏低, 法国海岸的模拟结果则偏高。陈秀华等 (2007) 以 COHERENS 为基础建立了 σ 坐标下的三维渤海东海夏季环流模型并在此基础上进行了拉格朗日颗

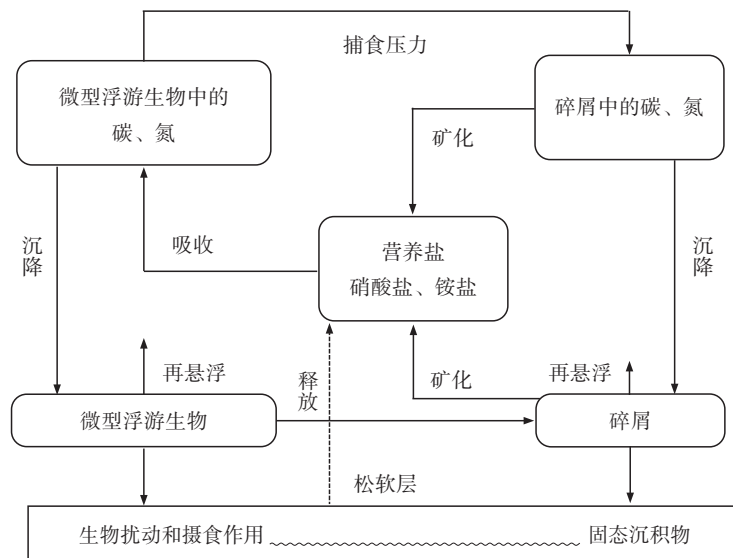


图 1 COHERENS 模式生态模型结构图^[34]

粒追踪和欧拉输运数值模拟来推测长江口及其临近海域赤潮高发区的可能赤潮源^[41-42]。Liang B.C.等(2006)将COHERENS与SWAN耦合后应用于渤海,模拟了海浪对表面风压和表面混合高度的影响^[43]。李艳芸等(2006)运用COHERENS建立了渤海天文潮预报模型,模拟了9712号热带风暴作用下渤海的增水过程^[44]。

4 总结与展望

综上所述,上世纪90年代特别是进入新世纪以来,海洋生态动力学模型取得了长足的发展。对海洋水动力环境的描述日益细化,例如对垂直方向的湍流描述多采用湍流闭合方案^[45]。生态系统基本上分为营养盐、溶解有机物、浮游植物、浮游动物、细菌等几大单元,过程上则注重描述营养盐和碳的循环过程,近年来更是将铁、硅的营养盐限制作用还有不同粒级浮游生物的营养和摄食考虑进来^[5]。

但必须承认,海洋生态动力学模型经过几十年的发展仍有一些问题未能得到解决。

(1) 观测资料的匮乏一直是困扰世界海洋生态学的一个难题。魏皓曾指出在过去的生态模型中,缺乏针对特定海域的生物化学过程参数^[38],张素香则认为参数的缺乏使得模拟结果的准确性难以提高^[46]。

(2) 模型对海洋生态系统特别是更高营养级的描述仍然不够全面也不够准确。目前的海洋生态动力学模型有两个分支,一是重点描述生物化学过程的浮游生物生态动力学模型,鱼类一般作为“捕食压力”隐含其中;二是鱼类生产模型,以浮游生物为代表的低营养级一般作为“食物”隐含其中^[9-10]。浮游生物生态动力学模型的发展虽相对成熟,但仍不能全面准确地模拟许多化学、生物变化过程。而同时涵盖浮游生物和鱼类的海洋生态动力学模型仍停留在起步阶段,刘桂梅认为目前在多营养级模型建立方面仍然存在较大不足^[4]。

(3) 模型的时间、空间尺度难以选择。传统的浮游生物动力学模型其物理变化过程的时间和空间尺度往往比化学、生物变化过程的尺度大得多,这成为制约该类型模型发展的一个因素。商少凌指出,尺度不同的物理过程和生物过程的模

拟不能匹配是造成模型结果与观测不符的重要原因之一^[5]。而随着涵盖鱼类等更高营养级的海洋生态动力学模型不断发展,必须将鱼类的生命周期长(往往超过一年),迁徙范围广(覆盖整个大洋)等因素考虑在内,因此物理模型的空间尺度则应当选择海盆级,而时间尺度则应当选择跨年或十年^[47]。因此考虑到整个海洋生态系统中物理、化学、生物等各因素的特性和相互作用,海洋生态动力学模型的时空尺度选择确实是一项挑战。

(4) 全球尺度或者海盆尺度的模型只能进行趋势描述而无法进行精确模拟。目前的区域性海洋生态动力学模型无法拓展到全球范围,而全球尺度模型的精度往往很难提高,这些都与观测资料的匮乏和物理模型的限制是分不开的。

针对这些问题和挑战,人们对海洋生态动力学模型的未来发展有以下几点考虑:

(1) 在发展模型的同时注重实测资料的获取和处理

资料匮乏是贯穿海洋生态动力学模型发展过程的老问题。王辉曾指出在我国目前的生态动力学模型发展水平下,应针对生态系统的特点设计现场调查方案,采取先进的取样和分析手段^[37]。同时还应该发展参数优化技术等资料处理方法,使得现有资料获得最大限度的利用,为模型的发展提供基础。

(2) 更加全面、准确地描述化学、生物变化过程

海洋生态系统中物理、化学、生物变化过程及其相互作用的错综复杂是公认的。高会旺曾指出,上世纪90年代以后的海洋生态动力学模型状态变量已经从2—4个发展到3—7个^[45]。可以预见,如果状态变量太少,则无法全面反映海洋生态系统的复杂性,而动辄十几个,甚至几十个状态变量也必将严重影响模型的计算速度。因此在全面真实反映海洋生态系统状况和计算效率之间,研究者必须取得平衡。

(3) 涵盖海洋食物网中的更高营养级

多营养级的海洋生态动力学模型研究虽然刚刚起步,但已是大势所趋,浮游生物生态动力学模型和鱼类生产模型都不能完整地模拟整个海洋食物网,故未来海洋生态动力学模型的发展将瞄

准多营养级的食物网动力学并体现生物多样性^[9]。

(4) 全球变化意义上的海洋生态动力学模型应当对中尺度时空变化过程给予充分重视^{[5][37]}。

海洋生态学界非常重视全球气候变化和海洋生态系统之间的相互作用,全球变化意义上的海洋生态动力学模型发展是大势所趋,但目前全球或海盆尺度的海洋生态动力学模型仍停留在定性描述的阶段,对中尺度时空变化过程的忽略可能是一个重要原因。中尺度涡旋,热带非稳定波等中尺度问题的解决将有可能使得全球尺度的海洋生态动力学模型进入定量模拟的时代。

参考文献:

- [1] Moll A, Radach G. Review of three-dimensional ecological modeling related to the North Sea Shelf system Part I: models and their results [J]. *Progress in Oceanography*, 2003, 57(2003): 175-217.
- [2] Riley G A, Stommel H, Bumpus D F. Quantitative ecology of plankton of Western North Atlantic [J]. *Bull Bingham Oceanogr Coll*, 12:1, 169.
- [3] 王海黎, 洪华生. 海洋生态动力学模式 [J]. *海洋科学*, 1996, 2: 16-18.
- [4] 刘桂梅, 孙松, 王辉. 海洋生态系统动力学模型及其研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2003, 18(3): 427-432.
- [5] 商少凌, 柴扉, 洪华生. 海洋生物地球化学模式研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 621-629.
- [6] Armstrong R A. An optimization-based model of iron-light-ammonium colimitation of nitrate uptake and phytoplankton growth [J]. *Limnology Oceanography*, 1999, 44: 1436-1446.
- [7] Chai F, Dugdale R C, Peng T H, et al. One dimensional ecosystem model of the equatorial Pacific Upwelling system. Part I: Model development and silicon and nitrogen cycle [J]. *Deep Sea Research II*, 2002, 49: 2713-2734.
- [8] Chai F, Jiang M S, Chao Y, et al. Modeling responses of diatom productivity and biogenic silica export to iron environment in the equatorial Pacific Ocean [J]. *GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES*, 2007, VOL.21, GB3S90, doi: 10.1029/2006GB002804.
- [9] Fennel W. Parameterization of truncated food web models from the perspective of an end to end model approach [J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 76(1-2): 171-185.
- [10] Fennel W. Towards bridging biogeochemical and fish-production models [J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 71(1-2): 171-194.
- [11] Harley C D G, Hughes A R, Hultgren K M, et al. The impacts of climate change in coastal marine systems [J]. *Ecology Letters*, 2006, 9: 228-241.
- [12] Leonard C L, McClain C R, Murtugudde R, et al. An iron based ecosystem model of central equatorial Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 1325-1341.
- [13] Stow C L, Jolliff J, McGillicuddy Jr. D J, et al. Skill assessment for coupled biological/physical models of marine systems [J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 76: 4-15.
- [14] Lynch D R, McGillicuddy Jr. D J, Wenner F E. Preface Skill assessment for coupled biological/physical models of marine systems [J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 76: 1-3.
- [15] Dyble J, Bienfang P, Dusek E, et al. Environmental controls, oceanography and population dynamics of pathogens and harmful algal blooms: connecting sources to human exposure [J]. *Environmental Health*, 2008, 7(S2): S5.
- [16] 苏纪兰, 唐启升. 我国海洋生态系统基础研究的发展——国际趋势和国内需求 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(2): 139-143.
- [17] 余光耀, 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. *青岛海洋大学学报*, 1999, 29(3): 421-428.
- [18] 吴增茂, 余光耀, 张志南, 等. 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.
- [19] 高会旺, 王强. 1999年渤海浮游植物生物量的数值模拟 [J]. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(5): 867-873.
- [20] Zhu Hai, Cui Maochang. Coupled physical-ecological modeling of the central part of Jiaozhou bay I: Physical modeling [J]. *Chinese Journal of Oceanography Limnology*, 2000, 18(4): 309-314.
- [21] Cui Maochang, Zhu Hai. Coupled physical-ecological modeling of the central part of Jiaozhou bay II: Coupled with an ecological model [J]. *Chinese Journal of Oceanography Limnology*, 2001, 19(1): 21-28.
- [22] 张书文, 夏长水, 袁业立. 黄海冷水团水域物理-生态耦合数值模式研究 [J]. *自然科学进展*, 2002, 12(3): 315-319.
- [23] 魏皓, 赵亮, 冯士筭. 渤海碳循环与浮游植物动力学过程研究 [J]. *海洋学报*, 2003, 25(S2): 151-156.
- [24] 魏皓, 赵亮, 冯士筭. 渤海浮游植物生物量与初级生产力变化的三维模拟 [J]. *海洋学报*, 2003, 25(S2): 66-72.
- [25] 夏洁, 高会旺. 南黄海东部海域浮游生态系统要素季节变化的模拟研究 [J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(4): 59-65.
- [26] 刘浩, 尹宝树. 渤海生态动力学过程的模型研究 I. 模型描述 [J]. *海洋学报*, 2006, 28(6): 21-31.
- [27] 刘浩, 潘伟然. 营养盐负荷对浮游植物水华影响的模型研究 [J]. *水科学进展*, 2008, 19(3): 345-351.
- [28] 曾庆存, 周广庆, 浦一芬, 等. 地球系统动力学模式及模拟研究 [J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 653-690.
- [29] 徐永福, 浦一芬, 赵亮. 海洋碳循环模式的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(10): 1106-1115.
- [30] 徐永福, 赵亮, 李阳春. 海洋碳循环与海洋生态系统动力学 [J]. *海洋环境科学*, 2007, 26(5): 495-500.

- [31] Franks P J S, Chen C. A 3-D prognostic numerical model study of the Georges Bank in Summer[J]. *Journal of Marine Research*, 2001,54:631-651.
- [32] Chen C,Beardsley R C,Franks P J S. A 3-D prognostic model study of the ecosystem over Georges Bank and adjacent coastal regions[J].Part 1: Physical model. *Deep-Sea Research*, 2001,48: 419-456.
- [33] Ji R,x Chen C. Spring phytoplankton bloom and associated lower trophic level food web dynamics on Georges Bank:1-D and 2-D model stydies[J]. *Deep-Sea Research II* ,2006,53(23-24) : 2656- 2683.
- [34] Chen C,Denis A,Wiesenburg,et al.Influences of river discharge on biological production in the inner shelf: A coupled biological and physical model of the Louisiana-Texas Shelf [J]. *Journal of Marine Resesrch*,1997,55(2):293-320.
- [35] 陈长胜.海洋生态系统动力学与模型[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [36] Ruoying He, Dennis J, McGillicuddy J,et al. Historic 2005 toxic bloom of *Alexandrium fundyense* in the western Gulf of Maine: 2 Coupled biophysical numerical modeling[J].*Journal of Geophysical Research*,2008,113(C7):
- [37] 王辉.海洋生态系统模型研究的几个基本问题[J].*海洋与湖沼*, 1998,29(4):341-346.
- [38] 魏皓,赵亮,武建平.浮游植物动力学模型及其在海域富营养化研究中的应用[J]. *地球科学进展*,2001,16(2):220-225.
- [39] Luyten P J, Jones J E, Proctor R, et al.1999. COHERENS-A coupled hydrodynamical-ecological model for regional and shelf seas: User Documentation [M]. Belgium: MUMM Report, Management Unit of the Mathematical Models of the north Sea, 1999.
- [40] Lacroix G,Ruddick K,Park Y,et al. Validation of the 3D biogeochemical model MIRO&CO with field nutrient and phytoplankton data and MERIS-derived surface chlorophyll a images[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007,64:66-88.
- [41] Chen X H. Numerical simulation of summer circulation in the East China Sea and its application in estimating the sources of red tides in the Yangtze River estuary and adjacent sea Areas[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(3):272-281.
- [42] 陈秀华,朱良生.COHERENS模式在长江口赤潮源推测中的应用[J]. *海洋通报*,2007,26(3):3-11.
- [43] Liang B C, Li H J, Lee D Y. Numerical study of wave effects on surface wind stress and surface mixing length by three-dimensional circulation modeling[J].*Journal of Hydrodynamics*, 2006, 18:97-404.
- [44] 李艳芸,李绍武,风暴潮预报模式在渤海海域中的应用研究[J], *海洋技术*,2006,25(1):101-106.
- [45] 高会旺,冯士筭,管玉平.海洋浮游生态系统动力学模式的研究[J]. *海洋与湖沼*,2000, 31(3):341-347.
- [46] 张素香,李瑞杰,罗锋,等. 海洋生态动力学模型的研究进展[J]. *海洋湖沼通报*,2006,4:121-127.
- [47] Young B, Heath M, Werner F. et al.Chanllenges of Modeling Ocean Basin Ecosystems[J].*SCIENCE*,2004,304:1463-1466.

A review of marine ecosystem dynamics model

REN Xiang-xiang, LI Hai, WU Hui-ding

(National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China)

Abstract: With increasing pressure for a profound understanding of marine ecosystems, numerical modeling becomes a powerful tool for the research. The development of marine ecosystem dynamics model in the last decades is reviewed. In general, marine ecosystem dynamics model could be classified into several different categories according to various features. Typical model COHERENS (COUpIed Hydrodynamical Ecological model for REgioNal Shelf seas) is introduced in this article. The latest study focussed on marine ecosystem dynamics model are summarized, for example, interaction between marine ecosystem and global climate change, biological approach models including higher trophic levels, application of ecosystem models in forecasting and public policy. Finally, issues and challenges in the marine ecosystem model in the near future are also discussed.

Key words: marine ecosystem dynamics, numerical model, research progress