

文章编号: 1001-8166(2004)01-0081-06

海洋生态预报的复杂性与研究方法的讨论*

吴增茂¹, 谢红琴¹, 张志南², 万小芳¹

(1. 中国海洋大学海洋环境学院, 山东 青岛 266003; 2. 中国海洋大学生命科学学院, 山东 青岛 266003)

摘 要: 海洋生态动态预报预测研究已经成为海洋科学乃至地球系统科学领域中的热点问题。比较深入地分析了海洋生态预报的复杂性、不确定性和实况监测资料严重不足等问题, 为促进海洋生态预报研究的快速发展, 借鉴中期数值天气预报的一些有效方法, 提出以下建议: ①加深理解海洋生态系统的非线性动力学特征, 深入开展随机—动力耦合的海洋生态系统模型研究; ②加强海洋生态集合(ensemble)预报和综合预报方法研究; ③大力促进卫星遥感信息的海洋生态应用研究, 加强资料同化研究和反问题研究方法的应用, 努力发掘各种信息资料的预报应用。

关 键 词: 海洋生态系统; 随机—动力学模型; 集合预报; 反问题研究

中图分类号: Q178.53; P731.3 **文献标识码:** A

随着全球环境、资源与人口问题的日益突出, 海洋生态动力学预测预报受到世界各国的重视。从全球变化研究、气候预测到海湾、河口及陆架海域生态与生物资源的管理以及开发应用研究, 都从不同的层面对海洋生态预报提出了迫切要求。于 1995 年开始启动的全球海洋生态系统动力学研究计划(GLOBEC)的主要研究目标是: 提高对全球海洋生态系统及其主要亚系统的结构、功能以及它对物理环境压力的响应的认识, 发展预测海洋生态系统对全球变化响应的能力^[1]。为了预测海洋生态的自然变化和人为变化, 因此需要大力加强海洋生态及环境的监测与资料综合。于 2002 年 10 月在青岛举行的第 2 届 GLOBEC 国际科学会议上, 涌现了一批数量十分可观的动态模拟分析海洋生产力及渔获量同全球变化与气候变异的关联, 以及预测不确定性的报告^[2]。海洋生态动力学预报研究已成为海洋科学乃至地球系统科学研究中的热点问题。

海洋生态预报是海洋生态动力学模型研究的最主要目的之一。早在 30 年前英国科学家就使用简单的动力学模型成功进行了泰晤士河潮汐区的溶解

氧及水质动态预报^[3]。20 世纪 70 年代以来, 日本就开展了赤潮的统计预报, 到了 80 年代末期以后, 随着海洋生态动力学研究迅速发展, 赤潮过程分析及预测研究强调了物理过程与生物学过程的耦合研究。近年来我国不断深化的赤潮预报、区域海洋生态管理及资源可持续利用研究, 激发了人们去深入分析研究海洋生态动力学预报的可行性与有效方法。

本文着重讨论以下几个问题: ①海洋生态模型动态预报的可行性; ②海洋生态预报的发展现状分析; ③海洋生态预报发展趋向的分析讨论。

1 海洋生态预报的可行性分析

在地球科学体系中动态预报发展得最为成熟的是中期天气预报。大气可视为牛顿流体, 其动力学系统具有动量、质量及能量守恒性的近似约束。然而由于该动力学系统是非线性的, 并且显示出对初值状态敏感的混沌特征, 因而气象学家从理论及预报实践上证明, 瞬时天气状态的有效预报不会超过 2~3 周^[4]。那么海洋生态系统瞬时状态的可预报性如何呢? 应如何认识海洋生态预报呢?

* 收稿日期: 2003-02-16. 修回日期: 2003-06-21.

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“东、黄海生态系统动力学和生物资源可持续利用”(编号: G19990437); 国际合作重点计划“中国近海典型海域入海物质水文地球化学过程与环境效应”(编号: 2001CB711004)资助。

作者简介: 吴增茂(1940-), 男, 山东省文登人, 教授, 主要从事海岸气象与海洋生态动力模型研究. E-mail: zmwu@mail.ouc.edu.cn

1.1 海洋生态动力学系统的复杂性与内在随机性分析

海洋生态系统是海洋生物种群与非生物环境相互作用的复杂动力学系统,海洋生态系统动力学的复杂性不仅因为它包含着生物多样性,而且包含生物地化循环过程、物理过程的多样性及其非线性相互作用的复杂性。影响海洋生态动态变化的不仅仅有能流和物流,而且有别于一般流体动力学系统的生物信息流也起着重要作用。由于海洋生态群落及类群结构的复杂与多变,以至于在低营养层的海洋生态动力学模型中近年来广泛的引用了功能群和标准生物的概念以使问题简化^[5]。然而这种简化处理必将掩盖生态系演变过程中种群演替对应的相空间轨迹的分叉行为。类似于陆地昆虫种群、海洋动物种群(包括浮游动物、底栖动物等),由于种群内及种群之间的自残,使得种群中不同发育阶段的虫口密度表现出很强的非线性相互作用,以至于使不同发育阶段呈现出种群统计(demographic)的不确定性,这种不确定性可归因于由内部结构相互作用引起种群统计随机性及环境随机性的共同结果^[6]。

海洋生态系统动力学是多尺度的生物海洋学过程、化学海洋学过程与物理海洋学过程耦合的非线性动力学系统,具有明显的多源性、开放性、耗散性和远离平衡态的复杂动力学特征。事实上,在海洋生态系统动力学模型中,描述生物学变量及生源要素变量的动力学方程,并不像作为主动流体的海水,后者有着基本上公允的一系列地球流体动力近似关系为约束,而前者具有协同性和自组织性,这是至今还难以定量描述的。Dennis 等^[6]认为,生态学非线性理论可以被概括为一个宽泛的假说:在一个多种群的生态系统中,其丰度扰动动态势大都可以用相对低维度(自由度)的非线性相互作用来解释。依据这种观点,那么种群扰动就是相空间的无变度集合(invariant set)中的平衡点、周期与非周期环、混沌、稳定与不稳定流形的结果,受多个吸引子作用并且有某些不可解释的噪音的作用。

1.2 海洋生态资料的代表性、准确性与动态监测问题

天气数值预报发展水平高的另一个重要原因是它有着几乎可以说是四维无缝隙的较高精度的探测资料。在技术先进国家所用卫星遥感及雷达探测等手段的非常规资料约占全部探测资料的 80%。然而,由于海洋生态观测资料获取的难度大及资料定量分析技术的复杂性,使得可用于生态动力学模型预报研究的资料极少。另一方面,由于一些海洋生

物量都是由各种粒径个体数估算或由某种间接测度转换得到(如浮游植物生物量),再加上各类生物又常呈现斑块或群体状的非均匀分布,因此在同一站位或其附近的连续多次采样观测的结果往往都会表现出很大的离散度。至于大面站探测资料的代表性及精确度,相比之下就更低了。在海洋生态卫星遥感探测方面,现在除了在上层海洋叶绿素的水色遥感和对赤潮的观测以及渔情分析与探测外,在其他生物量及生源要素的遥感观测方面还很少有突破。由于缺少连续探测资料,因而至今人们还无法定量分析一个真实海域的生态系统的动力学可预报性或给出相应的 Lyapunov 指数估计。

1.3 海洋生态能量转换方程内在的不确定性

海洋生态动力学模型的参数除少部分是由海上实验或现场的样品分析直接获取外,多数是通过以下方法获得:

(1)是通过实验室或围隔生态系的人工控制实验,经资料分析获取的一些过程演变控制参数或能量转换模型,upscaling 延伸到真实的海域生态模型研究之中,由于自然海域受制于复杂的海—气及陆—海相互作用以及人为环境影响,因此当这些参数应用于不同海域的生态研究中,往往要进行大幅度的调整(如各种“半饱和和常数值”)。而这种调整的依据是模型能比较好地拟合所获取的数量有限的实验资料。

(2)在生态动力学模型中还有相当数量的反映生物学能流物流过程、生物地化循环过程以及某些复杂中小尺度时变过程作用的数学描述或参量是依据有限资料,通过数值模拟实验及优化估计给出的。然后拟线性地推广应用到所研究(预测)的整个海域或时段。由于海洋生物对环境条件变化响应的非线性和不连续性特征,所以如此得到的参数或函数估计常常带有虚假性。

2 海洋生态预测预报发展的现状分析

由于海洋生态系统具有生物结构多样性及非生物环境多样性特征,因此海洋生态系统的分类方法及分类亦具有显著的多样性。海洋生态动力学模型具有多学科交叉与耦合的特点。海洋生态预测往往是同海洋环境水质预报、海洋生物灾害(赤潮或有害藻类水华)预报、海洋生物资源丰度动态预报,以及全球变化及其海洋生态响应的预测紧密地联系在一起。本文将动力学特征突出,同海洋科学发展及海洋资源可持续开发利用关系最为紧密的河口与海

湾生态系统、陆架浅海生态系统的预测预报为主要讨论对象。以下分几方面予以概要分析。

2.1 河口、海湾水质动态预报

早在 20 世纪 70 年代初,英国就进行了伦敦南面泰晤士河潮汐区的溶解氧(DO)和生物需氧量(BOD)的动态预报,他们仅仅使用了一个 DO 和 BOD 间相互作用的简单模型而获得了很大的成功。Longhurst 在讨论各种河口溶解氧模型时认为,在预报实际工作中取得这样的明显成功,使得一些根据已证实的汇集着更复杂物质守恒方程式的物理依时模式研究者都会感到茫然。他认为出现这样的结果也许在于严重污染的河口区存在着简化了的生态性质^[3]。日本于 20 多年以前就比较广泛地开展了典型海湾的营养盐循环动力学模型及其用于改进海水质量与沉积物预测的应用研究。

2.2 赤潮预报研究

赤潮是一种由海水富营养化在一定的气象、海洋环境条件下形成的海洋某些小型、微型和微微型藻,以及原生动植物爆发性增殖聚集的生态异常现象,已成为全球海洋的一大灾害。因此赤潮预报早就引起世界各沿海国家的普遍重视。然而,由于赤潮事件是由海洋物理、化学、生物的多种因素综合作用下形成的,各因子间具有着复杂的相互作用,加之赤潮生物的复杂变异性,因而赤潮定量分析、预报的难度很大。日本是世界上遭受赤潮危害严重和开展赤潮预报比较早的国家之一,于 20 世纪 70 年代末就利用多元统计分析及主成分分析进行了赤潮发生预测。20 世纪 80 年代中期之后,日本及中国学者比较广泛地将回归分析、演绎结构分析与聚类分析等统计方法用于赤潮预报研究^[7]。由于统计方法预报不能给出赤潮发生、发展与消亡的动态演变过程,因此进入 90 年代以后,随着海洋生态系统动力学研究的深入发展,人们开始研究建立赤潮生态动力学模型,进行赤潮过程的动态模拟、机制分析以及预测研究。其中比较有代表性的如德国汉堡近年发展起来的欧洲北海生态模型和夏综万等建立的中国南海大鹏湾赤潮生态仿真模型^[7,8]。

赤潮的发生是受多种因子的综合与交互作用结果,其演变具有明显的突变特征。因此赤潮的发生、发展与消亡的依时空分布预报还有很大的距离。上述赤潮统计、动力预报方法研究都为发展在海洋生态系统水平上的赤潮动力学预报模型打下了基础。为了推动和发展全球有害藻类水华(HAB)灾害的评估、预测和减缓的能力,国际海洋科学委员会

(SCOR)和政府间海洋委员会(IOC)于 1998 年联合举办了讨论会,并协调制定了国际 HAB 的科学研究与合作计划^[9]。中国沿海近 10 余年来赤潮灾害频发,赤潮机理及预报方法受到国家高度重视。发展赤潮的生物—化学—物理耦合动态预报模型以及动力—统计相结合的预报方法是当前赤潮研究的主要目标之一。

2.3 河口海湾流型改造的生态预测评估

为防减风暴潮灾害和水能开发利用等目的,世界上有不少河口、海湾进行了建拦水坝等工程建设。在实施工程设计和建设之前,许多国家对工程将引起的水域生态变化进行了模拟实验分析和预测评估。如 Small 等^[10]报告了荷兰为防减风暴潮侵袭在莱茵(Rhine)河、默兹(Meuse)河及斯海尔德(Scheldt)河汇流区建堤的生态响应实验研究。该研究是在海洋生态系统水平上的动力模拟实验分析和评估研究。此前,有多篇报告曾就英国在塞文(Severn)河上建造潮汐发电站将对布里斯托尔(Bristol)海峡的生态影响进行的多角度的预测分析,其中最重要的工作是建立了国际上颇有影响的 GEMBASE 河口海湾生态研究预测模式系统,并且对该工程的海洋环境影响进行了细致的分析研究和预评估工作^[11,12]。

3 海洋生态预报方法的发展趋向分析

海洋生态预报包括近海水域赤潮与浮游植物水华事件及水质预报,特定海域和大海洋生态系统(LMEs)的可持续性、生物获量及生态健康预测^[13],以及区域海洋生态对多类时间尺度气象事件响应的动态预报等。其发展现状及研究实践说明应从 3 个大方面推进其发展。其一是发展和更新探测方法与资料获取手段,大幅度地改善海洋生态资料质量和数量;其二是加深对关键性海洋生态动力学过程的理解和定量化分析,加深海洋生物学及生物地化循环过程与物理海洋学过程相互作用的认识和理解;其三是加强海洋生态系统动力学模型及动态预测方法研究。下面着重讨论的是第三个问题。

海洋生态系统变化的随机性是由外在环境随机性(天气过程及气候变化、大气及陆源物质运输、流场改变等)及内在随机性(生态动力学的随机性)共同作用决定的。赤潮及与 ENSO 相关联的生态事件等大量的研究证明,对海洋生态系统的动态变化而言,在多数情况下,环境的变化与扰动似乎是起着主导作用,而当环境变化比较平稳、随机扰动小时,

生态系统内在的动力学随机性对于生态演变扰动则起着决定性的作用。在以前的生态预测中基于随机理论的统计学方法和基于确定性理论的动力学模型方法几乎是并行发展着的。然而对于任何生物种群演变动态总可以理解为确定性过程和随机过程的共同作用,而且这两种过程又是相互耦合和相互作用的。Grenfell 等^[14]在分析麻疹病菌传播的非线性与可预报性时认为,如果是将确定性成分与随机性成分分开考虑是不能完全理解种群演变动态的。海洋生态系统动态演变过程中的种群演替以及海洋赤潮与浮游植物水华等导致海洋生态系统结构突变与状态的不连续,这都对应着动力学系统在相空间的分叉行为。由于海洋生态系统动力学行为的复杂性,所以用任何一种确定性的动力学模型都不可能胜任海洋生态系统中多时空尺度演变过程的预报。尽管不难见到成功模拟了某些区域海洋生态过程的动力学模型,但尚难见到有效的生态动态预测模型系统,而单纯统计预报法又只能给出概率估计。因此把动力学方法与统计学方法结合起来,发展海洋生态学的动力—统计模型系统应是当前海洋生态动力学研究向海洋生态预报发展的大方向。

3.1 海洋生态动力—统计模型系统的研究发展

许多实验研究说明,不论是极近日常条件下养殖的,还是在广泛的自然条件下观测的种群丰度的时间序列,都显示出弥漫性的不能解释的随机性扰动特征。时间序列资料分析发现,其低维数的确定性动力学很少会考虑资料中多于半数的可变性。然而当在种群丰度时间序列分析中,把天气多种变化的影响包括进去,那将是潜在的考虑了野外种群的某些不能被解释的变化性。Dennis 等^[6]认为,种群生态学家距可以依赖于微分或差分方程形式的种群动力学规律进行定量研究还有很长的路要走。种群动力学研究是海洋生态系统动力学模拟与预测研究的基础,因此不难理解,确定性的生态动力学模型是不能真实反映出海洋生态系统动力学演变特征的。由于太阳活动的周期性控制作用,使得中高纬海域的生态系统演变具有年循环周期性的基本特征,因而形成了生态动力模型确定性的轮廓。而各种来自环境的随机扰动与内在(动力学)随机扰动都可以被处理为随机性信号迭加到具有确定性的动力学骨架上,随机扰动作用需要依据扰动的随机分布函数来处理。于是就构造成了以动力—统计方法相结合的随机(stochastic)生态动力学模型^[6, 15, 16]。非线性生态模型近年来的一些应用已经取得了令人鼓舞的成

功,很大一部分原因是由于改进了统计方法与随机模拟途径^[6]。

近年来发展起来的另一类基于动力—统计耦合应用思想的海洋生态动力学模型是部分确定生态模型(partially specified ecological model, PSEM)以及所谓的半动力(semi-mechanistic)生态模型、半参数(semiparametric)生态模型^[16]。在 PSEM 模式某些成分是以未知函数表示而不是给定特定函数,并且定性信息被引入作为模式参数或函数的定界限制。希望以这种具有更大普适性方法限定的模式将有可能更加逼近于真实。与完全确定的生态模型相比较,PSEM 可以避免在前者中易出现的某些由于使用了不合理假设带给生态系动力学行为的虚假的限制。一个公式化(方程)表示的生态动力模型应该能精确地反映建模者所要包含的有关系统的信息,同时尽力避免对于含有虚假成分的生态学假设的依赖。因此选择具有最优效果的模式复杂性是至关重要的。依据实测资料对 PSEM 进行参数适配(fitting)是基于近似理论的有约束的最优化问题。Wood^[16]、Matar^[17]对海洋浮游动物种群动力学的 PSEM 适配技术有比较细致的讨论,这里不再赘述。

近年来在水层鱼类种群动态模拟研究中,人们对基于生物个体的生态模型(Individual-Based Models, IBM)表现出了很大兴趣,而且还拓展用于浮游动物种群的广泛研究中。IBM 是海洋生物生态—物理环境耦合和动力学—统计学方法相结合的模型系统,它被认为可能是鱼类生态过程的唯一合理手段^[18]。IBM 模型系统的兴趣是通过参数化描述足够多的过程,以求提高模式的预报能力,而不是去追求在生态过程模拟上的深入^[19]。

3.2 海洋生态的集成(综合)预报

由前面的讨论可以得知,由于海洋生态非线性系统的外在随机性和内在(动力)随机性,结构的复杂性,以及海洋生态监测资料的匮乏,使得海洋生态预测预报似乎要比天气以及海洋环境要素预报还困难很多。不言而喻,海洋生态预报在实现有实用价值的“定时、定点、定量”预报目标方面还需做深入的研究。基于上述分析,我们对当前发展海洋生态动态预测预报方法研究方面提出以下几点建议:

(1) 大力加强和发展实验海洋生态研究,大幅度地改善资料获取质量与数量的基础上,大力加深生态动力学非线性机理研究,大力发展动力—统计研究方法相结合的生态预报模型,包括生物—物理耦合的 IBM 类海洋生态模型及 PSEM 类模型。

(2)海洋生态动力学模型实验证明了动力学模型对初值及参数的敏感性^[17, 20], 因此发展包括多个初值场样本及多个动力学方案(包括参数、函数方程、模型的多样性)的集合预报研究。集合预报产品的统计分析与信息提炼应依据预报对象的时空尺度特征, 参考气象学过程集合预报产品的统计分析和释用方法, 如形势分析的“面条法”和能提供预报全面信息的聚类法等^[21]。

(3)加强海洋生态数据资料同化与动力模型建模的有机结合研究。依据卫星遥感资料和物理海洋学模型系统, 现今人们已能比较符合实际地再现同步海洋温、流场及其他物理学场。现在我们的目标是将这种再现和预测能力推广到包括海洋生物和化学在内的海洋生态动力学要素场去。数据同化的理论基础是控制理论和最优化估计理论, 当今数据同化已从早期的对观测数据本身进行的静态客观分析迈向观测数据结合动力约束的动态分析。现在认为真正意义的同化是糅合观测数据和模式解, 能为连续状态提供最优估计的包括时间维的变分同化方法^[22]。资料同化与建模研究的紧密结合, 采用反问题的研究思路, 利用动力学模型的整合与推演能力对缺测资料予以估计并取得第一猜值场。利用带有动力约束的变分同化方法可以得到动力学模式系统的最优参数估计以及海洋生态系统动力学预报的更合理的初值场。近年来利用资料同化及围隔生态实验研究或沿岸半封闭水域生态实验的连续观测资料来改进动力学模型系统, 已成为一种十分有效的方法^[23, 24]。

参考文献(References):

[1] Tang Qisheng(唐启升), Su Jilan(苏纪兰), *et al.* Marine Ecosystem Dynamics Research of China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2000.

[2] GLOBEC 2nd Open Science meeting. Programme and Abstracts [C]. UK: Plymouth, 2002. 1-3.

[3] Mann K H. Ecology of Coastal Waters[M]. Cai Fubng, *et al.*, translated. University of California Press, 1982.

[4] Hoffman R N. Controlling the global weather[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(2): 241-248.

[5] Baretta J W, Ebenhoh W, Ruardij P. The European regional seas ecosystem model, a complex marine ecosystem model[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1995, 33(3~4): 233-246.

[6] Dennis B, Robert A, Desharnais J M, *et al.* Estimating chaos and complex dynamics in an insect population[J]. *Ecological Monographs*, 2001, 71(2): 277-303.

[7] Huo Wenyi(霍文毅), Hao Jianhua(郝建华), Yu Zhiming(俞志明), *et al.* A Review of harmful red tide numerical analysis[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica(海洋与湖泊)*, 1999, 30(5): 568-574(in Chinese).

[8] Xu Weiyi(许卫亿), Zhu Weidi(朱维弟), Zhang Jing(张经), *et al.* Simulations of the process of red tide development in a real sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica(海洋与湖泊)*, 2001, 32(6): 598-603(in Chinese).

[9] GEOHAB. The Global ecology and Oceanography of harmful algal bloom: A plan for coordinated scientific research and cooperation to develop international capability for assessment, prediction and mitigation [R]. Denmark: Joint SCOR-IOC Workshop, Havreholm, 1998. 1-7.

[10] Small A C, Nienhuis P H. The eastern Scheldt (the Netherlands), from an estuary to a tidal bay: A Review of responses at the ecosystem level [J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1992, 30: 161-173.

[11] Baretta J W, Ruardij P. Modelling the ecosystem of the Ems Estuary[A]. In: Baretta J, Ruardij P, eds. Tidal Flat Estuaries [C]. London: Springer-Verlag, 1988.

[12] Radford P J. Pre-and post-barrage scenarios of the relative productivity of benthic and pelagic subsystems of the Bristol Channel and Severn Estuary[J]. *Biological Journal of the Linnean Society*, 1994, 51: 5-16.

[13] Sheman K. Sustainability, biomass yields, and health of Coastal ecosystem: An ecological perspective[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 112(3): 227-301.

[14] Grenfell B T, Bjornstad O N, Finkenstadt B F. Dynamics of measles: Scaling noise, determinism, and predictability with the TSIR model[J]. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 185-202.

[15] Zhang Binggen(张炳根). Models of Ecology[M]. Qingdao: Ocean University of Qingdao Press, 1990(in Chinese).

[16] Wood S N. Partially specified ecological models[J]. *Ecological Monographs*, 2001, 71(1): 1-25.

[17] Matear R J. Parameter optimization and analysis of ecosystem models using simulated annealing: A case study at station P[J]. *Journal of Marine Research*, 1995, 53: 571-607.

[18] Batchelder H P, Edwards C A, Powell T M. Individual-based models of copepod populations in coastal upwelling region: Implications of physiologically and environmentally influenced diel vertical migration on demographic success and nearshore retention [J]. *Progress in Oceanography*, 2002, 53: 307-333.

[19] Allain G, Petitgas P, Lazure P, *et al.* Using stochastic biophysical coupling along individual trajectories to predict anchovy recruitment[A]. In: GLOBEC 2nd Open Science meeting, programme and Abstracts[C]. Qingdao, China, 15-18, October 2002. 31-32. Plymouth UK.

[20] Wu Z, Zhai X, Zhang Z, *et al.* A simulation analysis on pelagic-benthic coupling ecosystem of the northern Jiaozhou Bay, Qingdao[J]. *China Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 20(3): 443-453.

- [21] Du Jun(杜钧). Present situation and prospects of ensemble numerical prediction[J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (应用气象学报), 2002, 13(1): 16-27(in Chinese).
- [22] Gao Shanhong(高山红), Wu Zengmao(吴增茂), Xie Hongqin(谢红琴). The developments and applications of Kalman filters in meteorological data assimilation[J]. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 2000, 15(5): 571-575(in Chinese).
- [23] Vallino J J. Improving marine ecosystem models: Use of data assimilation mesocosm experiments[J]. *Journal of Marine Research*, 2000, 58: 117-164.
- [24] Yanagi T, Montani K. Ecological modeling as a tool for coastal zone management in Dokai Bay[J]. *Journal of Marine System*, 1997, 13: 123-136.

ANALYSIS OF THE COMPLEXITY AND THE RESEARCH METHODS OF THE MARINE ECOSYSTEM DYNAMICS PREDICTION

WU Zeng-mao¹, XIE Hong-qin¹, ZHANG Zhi-nan², WAN Xiao-fang¹

(1. College of Physical & Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
2. College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: Dynamic prediction research on marine ecosystem has become one hot issue in marine science and even to geosystem sciences. The complexity and uncertainty of marine ecosystem dynamic prediction and the deficiency of field survey are deeply analysed. Several proposals are presented in this paper, by the aid of some analysis methods of numerical weather prediction, in order to promote the development of marine ecosystem dynamic prediction study: (1) to deeply understand the nonlinear dynamical characteristics of marine ecosystem and to develop stochastic-dynamical model; (2) to strengthen ensemble and synthesized prediction study for marine ecosystem; (3) to make full use of satellitic remote sensing data and pay more attention to data assimilation study and application study of inverse problem for the marine ecosystem dynamics.

Key words: Marine ecosystem; Dynamic prediction; Stochastic-dynamical model; Ensemble prediction; Data assimilation; Inverse problem study.