

海洋生态预报的研究进展与发展应用

高 珊, 刘桂梅, 王 辉, 郑静静

(国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 从介绍海洋生态预报的概念和作用开始, 根据赤潮、绿潮、水母暴发、珊瑚白化等海洋生态灾害的致灾种类和涉及的富营养化、低氧和致病菌等灾害指标, 阐述了国内外近年来海洋生态预报的研究进展, 进而探讨了河口区、陆架海以及全球大洋等不同海域差异所涉及的海洋生态预报的发展应用, 论述了经验预报、统计预报和数值预报等海洋生态预报的国内外研究进展与实际应用, 最后展望提出海洋生态预报在未来发展中面临的挑战和亟需解决的关键科学问题。

关键词: 海洋生态预报; 赤潮; 绿潮; 水母; 数值预报

中图分类号: Q178.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)02-0084-10

1 引言

海洋生态预报(Marine Ecological Forecasting)是指针对气候变化、极端天气事件、环境污染以及海洋栖息地变化等环境影响因素所引起海洋生态系统以及组成成分发生变化的预测预报, 根据这些预报预测以及早期预警, 可以为海上人类活动、沿海社会安全、海洋环境健康等方面提供有效的信息服务和安全保障(<https://oceanservice.noaa.gov/ecoforecasting/>)。例如, 海水里的有害藻华(Harmful Algal Blooms, HABs), 其中常见一类为赤潮。2017年我国管辖海域共发现赤潮68次, 累计面积3 679 km²(《2017年中国海洋灾害公报》), 我国赤潮灾害年均造成的经济损失3.15亿元, 赤潮对生态系统服务功能产生的间接经济损失为每年276.85亿元^[1]。赤潮灾害对人类健康、渔业以及海洋动植物生存安全造成影响, 赤潮预报作为海洋生态预报的一个重要分支, 可以提供赤潮灾害敏感区水环境阈值异常的预警报以及赤潮生物漂移扩散范围等信息, 服务保障公众健康安全^[1]。

海洋生态预报涉及的影响因素复杂多样, 常常

需要有针对性地判定预报灾种, 考虑从河口区、陆架海到全球大洋的地域差异, 选择经验预报、统计预报、数值预报等多种预报方法。目前美国、欧洲等国家相继发展了具有自身特色的海洋生态预报, 并且有些已经投入业务化运行, 为社会公众和决策管理部门提供预报服务信息^[2-4]; 我国经过多年的经验积累, 发展了赤潮、绿潮的业务化预测预报^[5], 但从技术方法和预报水平上还待深化。因此, 本文重点综述海洋生态预报涉及的灾种、影响海洋生态预报的环境差异、以及开展海洋生态预报采用的方法手段等方面的国内外研究进展, 进而提出我国海洋生态预报的发展应用与未来展望。

2 海洋生态预报的灾种

海洋生态灾害(Marine Ecological Disaster)是指由自然变异和人为因素所造成的损害近海生态环境和海岸生态系统的灾害^[6]。我国近海环境复杂, 是世界上海洋灾害影响严重的国家之一(《2015年中国海洋灾害公报》), 赤潮、绿潮是影响海洋生态环境的主要灾种之一, 赤潮频发不仅会破坏生态平

收稿日期: 2019-02-26; 修回日期: 2019-08-27。

基金项目: 国家重点研发计划海洋环境安全保障专项(2016YFC1401605、2016YFC1401800); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA11020104); 国家自然科学基金项目(41206023、41222038)。

作者简介: 高珊(1982-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事海洋环境预报与数值模拟。E-mail: gaoshan_nmefc@126.com

衡,危害资源环境,而且赤潮毒素还会通过食物链导致人体中毒,危害人体健康^[7];和赤潮一样,绿潮灾种(主要指浒苔)的大量繁殖会遮蔽阳光,影响海底藻类的生长,消耗海水中的氧气;近年来在黄海出现的大规模水母暴发,水母生长速度快天敌少、蔓延迅速,大量猎杀和摄食浮游动物以及鱼类的卵和幼体,导致生态系统受损,对海洋渔业旅游沿岸工业和人身安全等造成很大威胁,形成严重生态灾害^[8];热带海域珊瑚白化事件也受到关注,同时海水低氧、酸化也是影响海洋生态环境的主要灾害,对于水产养殖区和生态系统脆弱的区域,海水含氧量、酸碱度也是海洋生态预报关注灾种的主要指标^[9]。

2.1 赤潮

有害藻华(Harmful Algal Blooms, HABs),是指由于海洋环境条件变化,导致海洋中的浮游植物、原生动物或细菌等爆发性繁殖或聚集,引起水体变色的异常现象,是影响我国近海环境的主要海洋生态灾害之一^[10];发生这种生态灾害的海域水体颜色多呈现为赤红色,故常常被称为赤潮(Red tide)。根据2001—2018年《中国海洋灾害公报》的数据统计,近20 a我国近海赤潮发生次数和面积比较严重的年份主要集中在2004—2006年,随着近海排放的控制和海洋环境的治理保护,近年来赤潮灾害发生有所减少。美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)有害藻华业务化预报系统(Harmful Algal Bloom Operational Forecasting System, HAB-OFS)根据卫星遥感图像、现场调查观测、数值模型、公共健康报告和浮标实时监测提供的种群暴发浓度、海流海况条件、风场方向和速度等数据来预报未来3—4 d美国近海赤潮敏感区(主要指墨西哥湾海域)赤潮灾害潜在发展程度、强度、漂移范围和影响状况,并利用对人体健康影响等级为公共健康提供指导性服务,这套业务化预报服务每周发布1—2次的专栏公报和预报简讯,服务对象主要包括当地海洋资源管理部门、公共健康和科研机构(https://tidesandcurrents.noaa.gov/hab_info.html)。爱尔兰西南部的班特里湾(Bantry Bay, Ireland)研发的作业化赤潮预报系统,该系统利用数值模型提供的温盐流预报场,

根据历史上赤潮发生、营养盐观测等相关数据,结合统计估算方法,可对未来14 d赤潮发生可能情况进行预测预警^[11-12]。

2.2 绿潮

绿潮(Green Tide),是指海洋大型绿藻脱离固着形成漂浮群体后,快速增殖或聚集导致的一类生态异常现象^[13-14]。2008年中国青岛近岸海域大面积、高密度漂浮浒苔聚集形成的绿潮,被认为是历史上至2015年世界范围内暴发的最大规模绿潮^[15-16]。此后,2009—2018年绿潮连年暴发,成为我国近海尤其是黄海主要关注的生态灾害(中国海洋灾害公报2009—2018年)。经过多年研究确定黄海绿潮的原因种为浒苔(*Ulva Prolifera*),因此黄海绿潮又名浒苔,主要起源于南黄海西部的苏北浅滩海域,同时也对黄海绿潮的早期发展过程、关键影响因素等方面掌握了比较系统深入的认识^[14]。绿潮也是世界沿海国家发生的海洋生态异常现象^[17-18],但我国黄海绿潮暴发规模大、影响范围广、持续时间长,明显有别于其他沿海国家以往所报道出现在半封闭海湾的绿潮,并且我国黄海绿潮原因种浒苔在遗传信息上与我国沿海一线其他地区采集的浒苔也存在差异^[14,19],同时绿潮原因种浒苔最初来源的研究也一直是研究黄海浒苔绿潮的最大困惑^[14],这也成为开展黄海浒苔绿潮生态灾害预警研究的难点之一。国际上其他沿海国家绿潮灾害暴发的影响范围相对较小,达到海滩上堆积时进行收集处理^[14],而我国黄海绿潮至今已经连年出现,对南黄海西部沿海一线的景观、环境和养殖业造成了严重破坏,因此开展黄海浒苔绿潮预警报一直成为每年度黄海防灾减灾的重要任务。自然资源部北海预报中心依据卫星遥感图片绿潮影像的解析,结合海表风场、流场的数值模拟结果和气象要素分析,预报绿潮漂移扩散的空间轨迹以及漂移距离和速度^[20-22];自然资源部第一海洋研究所乔方利等^[23]利用数值模拟的研究提出利用风场、流场的年际变化等特征代表的区域气候变化,也是预测浒苔年度暴发状况的一种途径;国家海洋环境预报中心2008年建立了浒苔漂移路径预测系统,向有关部门发布浒苔漂移轨迹预报和海洋环境预报,协助前线应急指挥中心完成了浒苔的控制和治理^[24],并在2019年度

海洋灾害预测会商会上提出了浒苔受温度、光照影响下包含生物生长消亡过程的漂移数值模型,可以对黄海浒苔绿潮生长漂移及生物量变化趋势开展预测预报^[25]。

2.3 水母暴发

水母暴发(Jellyfish Bloom),是指在过去20 a水母类生物在世界许多海域出现种群暴发的现象^[26],这对沿海人民的生活生产带来一系列不利影响。例如,2011年日本、以色列和苏格兰的核电站由于水母暴发导致停止运行;而且很多水母带有刺细胞,可对人体造成伤害,甚至会发生游客被水母蛰伤的事件;另外,由于水母的持续增加,有可能取代鱼类等大型生物成为生态系统的主导性生物,造成对海洋生态系统的灾难性危害^[27-28]。我国渤海海水母暴发的成灾种类主要有海月水母、沙海蜇和白色霞水母^[29],例如,2013年7月秦皇岛海域沙海蜇出现爆发性增长,蜇伤浴场游客事件频发^[30]。导致水母暴发原因比较复杂,具有不连续性,包括水母生活史的认识、海水温度的影响、海洋环境的动荡等理论基础的认识^[26]。对于水母暴发灾害的预报预测研究,目前开展的还比较有限,归纳为几类分别为^[31]:将水母视为粒子,利用拉格朗日追踪或者溯源的方法来研究水母暴发的路径^[32-34];将水母生活史过程通过实验数据进行归纳拟合成为数学公式,再现水母暴发过程并对未来可能暴发情况进行推测^[35-36];基于数值模拟预报的温盐数据,利用统计方法预测水母暴发可能性、浓度和分布特征^[37],另外也有考虑海水酸化、风混合作用、气候因素等相关数据,统计归纳与水母生物量关系来推测水母暴发灾害问题^[38-39]。随着对水母暴发研究的不断深入,结合监测的预警报技术也不断发展,例如,日本渔业信息中心(Japan Fisheries Information Centre, JAFIC)利用船舶、飞机等监测手段,获取大型水母分布情况,通过汇总分析,由网络、传真、移动终端发布水母短期预报^[40];澳大利亚联邦科学与工业研究组织(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CSIRO)基于水母蛰伤记录和天气情况,根据大堡礁箱水母的暴发和东南信风的关系,发现沿岸风的次日蛰伤事件增多,进而制定浴场管理策略,发布预警信息,减少水母蛰伤事件^[41];

自然资源部北海预报中心^[29,42]基于集合预报和拉格朗日粒子追踪方法,考虑水母垂直运动等自主运动,建立青岛近海大型水母的集合漂移预测模型,结合实时监测数据,开展青岛近岸海域水母集合漂移轨迹、速度、趋势和可能影响范围等要素的预测。

2.4 珊瑚白化

珊瑚白化(Coral Bleaching),是指珊瑚失去共生藻或它们的色素或同时失去共生藻和色素而变白的现象^[43-46]。珊瑚白化不但会使其失去美丽的颜色,抗病力大大减弱,还会使珊瑚礁生态系统的生物多样性降低,鱼群数量减少,进而导致珊瑚群落的衰退和珊瑚礁生态系统的消亡^[47-51]。因此,防止珊瑚白化,就要保护珊瑚群落乃至珊瑚礁生态系统的基础,即适当的温度、良好的水质以及充足的光照等环境条件^[52]。NOAA的全球珊瑚礁监控系统(The NOAA Coral Reef Watch, <http://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/publications.php>)利用卫星遥感数据、近岸实时观测和长期监测数据、数值模型以及影响珊瑚生态系统的海洋物理环境条件报告,来监控全球珊瑚分布范围内未来4个月内可能出现珊瑚白化的警报区、水温升高时间、海表温度和海表温度异常及升高趋势、潜在压力等级、赤道无风带的变化、以及可视站点的详细数据等,给出分辨率5 km每日监控数据和分辨率50 km每周监控数据,并结合气候预测,提供珊瑚白化事件与ENSO(El Niño-Southern Oscillation, 厄尔尼诺-南方涛动)预测相关的指导性分析^[53-54]。

2.5 富营养化、低氧和致病菌等灾害指标

前几小节分别从海洋生态预报灾种的角度回顾了国内外研究进展,在实际中,伴随海洋生态灾害的发生也同时会出现海水富营养化、低氧、致病菌超标等水质参数的变化,因此还需要针对营养盐、溶解氧、酸碱度、致病菌等生化指标进行预报预测。水体富营养化指氮、磷以及有机质的增加^[55],评价海水富营养化的标准常包括溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)、化学耗氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)、硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、活性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)和叶绿素a浓度

(Chl-a)等,目前这些参数是海水质量监测评价的常见指标,但涉及到这些参数的业务化预报就开展得非常有限^[5]。海水富营养化引起藻类大量生长,而导致水体含氧量下降;海洋中大多数生物都需要溶解氧来维持,如鱼类生长所需的溶解氧为6 mg/L,蟹、虾需要2~3.5 mg/L以上的溶解氧^[56-57],低氧对底栖生物的影响最为显著,当溶解氧浓度小于2 mg/L,且长时间持续,海洋生态系统中的各种动植物,尤其是运动能力弱的底栖生物群落将面临死亡^[58]。通常定义水体中的溶解氧浓度<2.0 mg/L为低氧状态(Hypoxia),对应这一溶解氧较低的区域也被称为海洋生物的死亡区(Dead Zone)^[9]。美国墨西哥湾低氧监控系统(Gulf of Mexico Hypoxia Watch, <http://www.ncddc.noaa.gov/hypoxia/products>)通过每年夏季航次调查的实时数据制作成图像产品对公众发布,进而理解、预测并最终减少低氧事件对海洋渔业和生物的影响;通过这种长期而具有持续性地对墨西哥湾低氧状况的认识,利用低氧统计评估模型进而评估预测下一年度该海域的低氧状况,为管理部门提供防治措施^[59-60]。海洋生态灾害暴发常伴有致病菌的出现,例如,仅2011年,美国就有43%的海滩监测到致病菌污染,因此美国NOAA把致病菌(Pathogens)也列入海洋生态预报主要方向之一,通过发展监控和预警方法来尽可能降低沿海居民健康和经济发展的损失^[61-62]。香港近年来也启用了WATERMAN水质示范预报项目(Project Waterman of HongKong, <http://www.waterman.hku.hk/>),每日可提供16个泳滩的水质预报,预报要素为大肠杆菌及健康风险等要素^[63-64]。

3 海洋生态预报的环境差异

海洋生态系统具有显著的区域差异性,一方面受局地驱动的影响,如风、潮汐和地形等因素,另一方面受外源强迫的调控,如海洋边界的水体交换、河流输入、大气-海洋界面的相互作用等^[65]。在物理、化学、生物多种因素的综合作用下,季节与年际营养盐分布特征、浮游植物生长代谢过程也具有显著不同,因此针对不同环境的海洋生态预报也需要差异化研究,根据预报对象和服务要求,在实际预报中有所侧重。

3.1 河口区

河口区,是海水和淡水交汇混合的部分封闭的沿岸区域,它通常受潮汐作用的强烈影响;本文提到的河口区也是指类似潮间带这种陆地和海洋环境的交替区(过渡带),是海洋水质环境主要关注的区域之一,也就成为海洋生态预报需要研究方向之一。我国河流众多,有黄河、长江、珠江这样大流量的河口区,结合潮汐影响,在这些海域具有明显的海水与淡水循环、以及水体分层特征^[66]。值得注意的是,在河口区这个区域,除了有来自陆地的营养盐补充外,还有一个重要因素是具有滞留营养物的水文和生物机制。在距离岸边较远的向海一侧,浮游植物因营养盐供应补充和海水透明度较高,浮游植物常产生水华。在水华之后植物死亡沉降到盐度较高的下层,通过潮流和河口的特殊水文状态相结合^[67],这些沉降和分解的植物碎屑产生的营养盐又被向岸和向上的盐水流带到表面,补充表面流带走的营养盐,成为一个“自我富营养化”的系统。因此,河口区是一个生产力水平很高的区域,关注的预报要素就主要涉及赤潮藻华、氮磷等富营养化、低氧与缺氧、海水酸碱度和重金属以及致病菌等。这些要素与人们生产生活息息相关,如水产养殖和海洋浴场的水质标准等,因此需要精细化程度高、预报时效性高、和水质密切相关的生态预报产品。例如,珠江口建立的可以检测亚热带水体中有害细菌的水质模型,该模型试验点靠近一个污水排放口,而在污染物排放前后,预报准确率也很高,可达81%~91%^[64]。

3.2 陆架海

本文所说的陆架海主要指自海岸线(一般取低潮线)起,向海洋方面延伸,直到海底坡度显著增加的大陆坡折处为止的区域,通常把200 m等深线作为陆架下限,从一定意义上来讲也包括河口区,是海洋生物资源活跃的区域。我们主要关注和预报相关的物理过程对生物过程的影响有:(1) 包括潮汐、陆架陡坡和上升流等海洋锋面;(2) 边界湍流;(3) 风混合和潮汐混合等过程,其中近岸上升流锋面的影响是最主要关注的因素,即低温、低溶解氧、高营养盐、高盐度和高密度^[67]。我国渤、黄、东海陆

架区、台湾海峡以及海南岛近岸都存在上升流,在这些海域,富含营养盐的深层水向上涌升,使表层水变得肥沃,从而具有较高的生物生产力。在陆架海关注的生态环境预报主要有中国近海赤潮^[10, 68]、黄东海绿潮^[20-25]、水母暴发^[29, 40, 42]等灾害问题。以赤潮为例,我国陆架海赤潮变化分布具有显著季节性和空间性^[68]:南海赤潮主要集中在珠江口附近海域,各月发生频次较为平均;东海赤潮主要发生在长江口附近海域、浙江沿岸和福建中部至北部沿岸海域,时间集中在4—9月;渤、黄海赤潮主要发生在辽东湾的中部、西部海域和渤海湾海域,以及辽宁省大连市至东港市沿岸、烟台市至威海市沿岸和胶州湾、海州湾海域,时间集中在5—10月,其中5—6月达到鼎盛期。黄海是我国绿潮灾害主要暴发海域,尤其是我国苏北浅滩是黄海绿潮早期形成发展的关键地区^[14]。此外,影响我国陆架海的生态灾害还有大规模水母暴发,辽东半岛也是灾害暴发的主要海域之一^[69]。

3.3 全球大洋

大洋区是大陆架之外的整个水体和海底,相对于河口区、陆架海,大洋的环境是相对稳定的^[70]。大部分大洋表层的阳光充足,表层溶解氧含量较高,温跃层明显,盐度基本恒定^[65]。大洋中生物量的时空分布与环流的动力结构和热力特征紧密相关,海洋生产力高值区主要集中在赤道和副极地气旋式涡状环流内,低值位于南北副热带涡状环流海域。重要的是赤道上上升流海域,这里的深层高营养盐海水向混合层上升流动,形成由东高西低的高营养盐带,这里具有非常丰富的海洋生产力,集中了世界上著名的渔场。黑潮流系是西北太平洋区域重要的西边界流,将营养盐、浮游植物以及幼鱼等由南向北进行输运,对陆架海的浮游植物水华也起到重要作用。另外还有副热带海域内冷中心和暖中心的涡状环流也是研究生态系统结构和变异的重要区域,这些涡常伴随着营养盐结构的调整,形成浮游植物生产繁殖的利弊条件^[67]。在全球大洋海域,海洋生态预报主要关注的问题多与全球气候变化相关,预报的要素也多为长时间尺度海水生物泵影响下的海水二氧化碳分压和酸碱度变化,以及碳源汇格局分布等^[71-72]。NOAA的全球珊瑚礁监控系

统^[53-54]、欧洲的MyOcean和MyOcean2项目(<http://www.myocean.eu.org>)也是全球大洋生态环境预报预测系统的主要示范,在预测全球大洋叶绿素浓度、营养盐浓度等生态过程和生态要素方面提供了业务化应用^[73-74]。

4 海洋生态预报的技术方法

4.1 经验预报

海洋生态预报涉及方法广泛,经验预报仍然是最主要采用的方法之一,例如,传统的赤潮预报主要是根据藻类生消过程中环境因子的变化规律进行预测,依赖于某个环境因子的异常变化来定性判断赤潮发生^[10]。我国沿海致灾藻类种类繁多,而且分布广泛,海上生物、化学条件已经基本具备,在这种情况下,水文气象条件往往是诱发赤潮的重要因素,因此,到目前为止,根据天气形势分析赤潮发生可能性的预报,仍然是赤潮预报最基本的手段^[68]。赤潮灾害的形成往往是多环境因子造成的,因此,在一定程度上也限制了该方法的实用性。

4.2 统计预报

利用海洋生物要素与环境因子之间的统计关系来分析海洋生物生长繁殖过程是海洋生态学的常用研究方法^[65]。在海洋生态预报方面,也会综合分析引发生态灾害过程的多个环境因子,基于统计学方法,对监测资料进行分析处理,筛选主要环境因子,对海洋生态灾害进行预测预报^[75]。例如,利用水温气象要素与赤潮发生的统计关系,来预测赤潮发生的可能性^[76]。另外,神经网络方法、数据挖掘等也是基于统计分析的方法,根据有害藻华多发水域的气象、物理、化学、生物等因子,利用观测和实验,建立赤潮统计预测模型,对灾害发生时间、地点等要素进行判断^[77-78]。

4.3 数值预报

海洋生态数值预报是指利用海洋生态动力学模型(海洋水动力模型耦合生物地球化学模型),深入认识海洋生物地球化学循环过程、营养盐通量和相关要素的循环路径^[79],对海水中的营养盐、浮游植物、浮游动物,以及溶解氧、海水二氧化碳含量等要

素进行量化模拟,进而对海洋生态系统示范区的富营养化、海洋生态环境健康、有害藻华、水产养殖区水质环境状况以及气候变化对海洋生态系统影响等方面提供预报预测服务(<https://oceanservice.noaa.gov/ecoforecasting>)。近年来,海洋生态数值模型的发展与应用已日渐成熟,从最早 NPZD (Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus) 的 4 个变量已经发展到多个乃至几十个变量,例如欧洲的 ERSEM (European Regional Seas Ecosystem Model, 欧洲区域性海洋生态系模式) 包含多项精细化的循环过程,可以刻画陆架海生态系统的关键生物化学过程,即浮游植物群落复杂性、微生物循环、多种营养元素的化学计量(氮计量和碳计量等)、碳循环过程、不同海区不同叶绿素比例的生化循环(<http://www.meece.eu/library/ersem.html>),该模型耦合水动力模型,在英国气象厅(Met Office)已经业务化运行,可提供欧洲西北部陆架海的生态系统健康、水质辅助监测、富营养化、有害藻华类预测等产品服务^[2],再分析和预报产品集合到 MyOcean 网站上发布。依据 ERSEM 多种营养元素的精细化循环过程的基本形式,Vichi 等^[80-81]对生物地球化学过程公式给出了统一的标准形式,并开发了适用于近岸、远海以及全球复杂环境特征的生物地球化学模型 BFM (Biogeochemical Flux Model),并结合数据同化方法同化了卫星遥感叶绿素资料^[82],已在地中海海盆及陆架区域实现业务化生态预报,可应用于藻类生物量预报、近岸沉积物和鱼群量评估等^[3]。欧洲开发的海洋生态模型大多在全球、大西洋以及欧洲各海域使用广泛,此后美国和日本等国家又相继开发了适用于太平洋及邻近海域的海洋生态模型,例如,CoSiNE (Carbon, Silicon, Nitrogen Ecosystem) 在太平洋、日本海、南海等开展了大量的试验和研究,具备模拟水体中关键生态过程的能力,比如小型浮游植物和硅藻对不同营养盐输入的响应、不同浮游动植物之间的捕食和竞争关系、浮游植物对光和营养盐限制的动态响应、以及浮游动植物和颗粒物对水体溶解氧的调节等^[83-86]。日本的 NEMURO (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography) 基于北太平洋生态系统结构搭建^[87-88],包括氮、磷、硅、大小浮游植物、大小浮游动物等多种变量,在北太平洋开展

了一维、二维和三维的营养盐、碳循环和生物化学循环过程的数值模拟实验,发展了微生物循环(eNEMURO)^[89]、以及低营养盐水平模块和流域尺度大的鱼类种群模块(NEMURO.FISH)^[90]。结合海洋生态数值模型,利用遥感数据以及实时监测数据,海洋生态预报领域也在大力发展近岸精细化数值模拟与预报技术,预测赤潮等有害藻华可能发生的概率、位置以及潜在影响范围强度等^[4]。针对墨西哥湾的低氧环境现象,海洋生态模型的数值敏感性实验也可以用来研究由风引起的上升流对墨西哥北部低氧区域的影响,进而开展评估和预报^[59-60]。

5 海洋生态预报的发展方向与未来展望

5.1 丰富完善的数据是海洋生态预报的基础支撑

我国近年来在沿岸、近海、大洋的观测能力不断提升,气象水文、生物化学等数据不断丰富,船载走航、定点台站、连续浮标、卫星遥感、水下机器人、以及无人机和无人艇等多设备多手段的集成,都可以通过合理方法运用到海洋生态预报,为掌握目标海域的环境特征和生态灾害暴发状况提供数据支持,配合预报检验和评估,利用数据融合与同化方法提高预报模型的准确性,结合未来发展的大数据挖掘、基于神经网络的智能反演算法,最终实现定时、定点、定量的海洋生态预报数据集成系统。

5.2 加强海洋生态学的机制机理研究

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,其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^[75]。开展海洋生态预报的根本问题是对海洋生态系统概念的认识,不同类型海洋生态灾害的发生实际上是海洋生态系统结构与功能的演变、乃至结构转换的表现形式之一。不同海洋生态灾种、不同海洋环境都具有极大的差异性和不确定性。深入理解海洋生态学的机制机理,利用实验和观测手段,将海洋生态系统中个体、种群和过程研究朝着模型化、参数化、精细化方面发展,揭示浮游植物异常暴

发的生物学机理、诱发原因、源头以及和各种海洋环境要素的关系,以及海洋浮游植物的异常性暴发增长与全球变化的关系,才能从根本上实现海洋生态预报。

5.3 开发海洋生态预报先进技术

海洋生态动力学模型是开展量化海洋生态预报的有效方法之一,结合数据同化技术的海洋生态动力学模拟研究是现阶段发展海洋生态数值预报的主要研究方向,在国际上海洋生态预报科研和业务化领域也已经广泛采用。随着先进技术的不断发展,大数据挖掘、基于神经网络的智能反演、精细化格点预报等先进技术已经在天气预报领域逐渐发展起来,未来也将不断引进到海洋生态预报领域,弥补海洋生态系统非线性的结构特点^[91],对适应系统的复杂性有效的理解和预测,综合运用经验预报、统计预报、数值预报以及先进预报技术,提高海洋生态预报的可靠性。

5.4 着力解决制约海洋生态预报的瓶颈问题

海洋生态环境要素监测大部分需要调查采样、生化分析等人为手段,近年来通过研发微型、低功耗的物理、生物、化学传感器并装载到Argo浮标上所形成同步观测物理和生物地球化学参数的生物地球化学剖面浮标(Biogeochemical Argo Float, BGC-Argo)^[92],在一定程度上解决了卫星遥感与人为测量的瓶颈问题,数据可实现自动、连续、稳定,但BGC-Argo成本较高,主要投放在上千米的深海,近海与近岸的海洋生态环境要素观(监)测还无法满足海洋生态预报的要求,这成为制约海洋生态预报的瓶颈问题之一。另外,我国近海近岸海洋生态系统差异较大,所涉及的海洋生态灾害的灾种、致灾生物、环境因素等也存在较大差异,针对任一种海洋生态灾害,都需要深入调查分析研究致灾机理,才能给出海洋生态预报的判定依据,这在实际工作中难度较大,也成为制约海洋生态预报的另一瓶颈问题。此外,海洋生态系统具有自动调节功能^[65],致灾生物也会发展变化,例如,近几年黄海在出现浒苔绿潮灾害暴发的同时,又出现马尾藻金潮的有害藻华问题(《2013年北海区海洋灾害公报》、《2017年中国海洋灾害公报》);南海长棘海星大面

积暴发也严重威胁我国珊瑚礁生态系统^[93];我国近海核电站附近海域水母、毛虾、海地瓜、赤潮(棕囊藻)等海洋生物的暴发性增长也成为新型的海洋生态灾害问题^[94],这些都成为对海洋生态预报理解认识的一种新挑战。

5.5 海洋生态预报是一项系统工程

海洋生态预报是集数据监测、数值模拟、预报评估、业务化应用等各方面于一体的系统工程,涉及多学科交叉,多部门的支持合作,例如美国海洋生态预报的实施路线图(NOAA's Ecological Forecast Roadmap),组织机构的合作支持、针对客户对象需求的业务方法、广泛的沟通交流和实地考察、制作发布^[61]。因此,开展海洋生态预报,亟需利用海洋实时观(监)测平台、结合高分辨率数值模式、开发研制海洋生态集合预报系统、发布针对专项用户的业务化产品,实现定时、定点、定量预报,覆盖河口区、陆架海、至全球大洋,并保证安全、高效、稳定运行,以提高政府对海洋灾害的应急响应决策能力,提升海洋防灾减灾能力,保障我国海洋环境的生态安全。

参考文献:

- [1] 王初升,唐森铭,宋普庆.我国赤潮灾害的经济损失评估[J].海洋环境科学,2011,30(3):428-431.
- [2] Edwards K P, Barciela R, Butenschön M. Validation of the NEMO-ERSEM operational ecosystem model for the North West European Continental Shelf[J]. Ocean Science Discussions, 2012, 9(2): 745-786.
- [3] Lazzari P, Teruzzi A, Salon S, et al. Pre-operational short-term forecasts for Mediterranean Sea biogeochemistry[J]. Ocean Science, 2010, 6(1): 25-39.
- [4] Sougandh B K. A web-based modeling approach for tracking algal blooms in lower great lakes[M]. New York: State University of New York at Buffalo, 2008.
- [5] 王辉,万莉颖,秦英豪,等.中国全球业务化海洋学预报系统的发展和应用[J].地球科学进展,2016,31(10):1090-1104.
- [6] 海洋科技名词审定委员会.海洋科技名词2007[M].2版.北京:科学出版社,2007.
- [7] 刘亚林,刘洁生,俞志明,等.陆源输入营养盐对赤潮形成的影响[J].海洋科学,2006,30(6):66-72.
- [8] 孙松.水母暴发研究所面临的挑战[J].地球科学进展,2012,27(3):257-261.
- [9] Noone K J, Sumaila U R, Diaz R J. Managing ocean environments in a changing climate: sustainability and economic perspectives

- [M]. Amsterdam: Elsevier, 2013: 15-35, 67-73.
- [10] 王丹, 刘桂梅, 何恩业, 等. 有害藻华的预测技术和防灾减灾对策研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(2): 233-242.
- [11] Dabrowski T, Lyons K, Nolan G, et al. Harmful algal bloom forecast system for SW Ireland. Part I: Description and validation of an operational forecasting model[J]. Harmful Algae, 2016, 53: 64-76.
- [12] Cusack C, Dabrowski T, Lyons K, et al. Harmful algal bloom forecast system for SW Ireland. Part II: Are operational oceanographic models useful in a HAB warning system[J]. Harmful Algae, 2016, 53: 86-101.
- [13] 刘桂梅, 李海, 王辉, 等. 我国海洋绿潮生态动力学研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(2): 147-153.
- [14] 于仁成, 孙松, 颜天, 等. 黄海绿潮研究: 回顾与展望[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(5): 942-949.
- [15] Hu C M, Li D Q, Chen C S, et al. On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C5): C05017.
- [16] Wang Z L, Xiao J, Fan S L, et al. Who made the world's largest green tide in China? - an integrated study on the initiation and early development of the green tide in Yellow Sea[J]. Limnology and Oceanography, 2015, 60(4): 1105-1117.
- [17] 唐启升, 张晓雯, 叶乃好, 等. 绿潮研究现状与问题[J]. 中国科学基金, 2010, 24(1): 5-9.
- [18] Smetacek V, Zingone A. Green and golden seaweed tides on the rise[J]. Nature, 2013, 504(7478): 84-88.
- [19] Zhao J, Jiang P, Qin S, et al. Genetic analyses of floating *Ulva prolifera* in the Yellow Sea suggest a unique ecotype[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 163: 96-102.
- [20] 黄娟, 吴玲娟, 高松, 等. 黄海绿潮应急漂移数值模拟[J]. 海洋预报, 2011, 28(1): 25-32.
- [21] 吴玲娟, 曹丛华, 黄娟, 等. 黄海绿潮应急溯源数值模拟初步研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(6): 44-47.
- [22] 白涛, 黄娟, 高松, 等. 黄海绿潮应急预测系统业务化研究与应用[J]. 海洋预报, 2013, 30(1): 51-58.
- [23] 乔方利, 王关锁, 吕新刚, 等. 2008与2010年黄海浒苔漂移输运特征对比[J]. 科学通报, 2011, 56(18): 1470-1476.
- [24] 李燕, 李云, 刘钦政. 浒苔漂移轨迹预报系统[J]. 海洋预报, 2010, 27(4): 74-78.
- [25] 李云. 中国近海赤潮、绿潮趋势预测[R]. 深圳: 2019年度海洋灾害预测商会, 2019.
- [26] 孙松. 对黄、东海水母暴发机理的新认知[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 406-410.
- [27] Jackson J B C, Kirby M X, Berger W H, et al. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems[J]. Science, 2001, 293(5530): 629-637.
- [28] Richardson A J, Gibbons M J. Are jellyfish increasing in response to ocean acidification?[J]. Limnology and Oceanography, 2008, 53(5): 2040-2045.
- [29] 吴玲娟, 高松, 刘桂艳, 等. 青岛近海大型水母漂移集合预测方法研究[J]. 海洋预报, 2015, 32(2): 62-71.
- [30] 郑向荣, 李燕, 饶庆贺, 等. 秦皇岛近海大型水母暴发性增长原因探析[J]. 河北渔业, 2014, (2): 16-20.
- [31] 季轩梁, 刘桂梅, 高姗. 水母暴发因素及模型研究的现状和展望[J]. 海洋预报, 2013, 30(5): 84-91.
- [32] Moon J H, Pang I C, Yang J Y, et al. Behavior of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* in the East China Sea and East/Japan Sea during the summer of 2005: a numerical model approach using a particle-tracking experiment[J]. Journal of Marine Systems, 2010, 80(1-2): 101-114.
- [33] 张海彦, 赵亮, 魏皓. 青岛外海夏季水母路径溯源研究[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 662-668.
- [34] 罗晓凡, 魏皓, 王玉衡. 黄、东海水母质点追踪影响因素分析[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 635-642.
- [35] Ruiz J, Prieto L, Astorga D. A model for temperature control of jellyfish (*Cotylorhiza tuberculata*) outbreaks: A causal analysis in a Mediterranean coastal lagoon[J]. Ecological Modelling, 2012, 233: 59-69.
- [36] Yuan H Z, Shu S, Niu X D, et al. A numerical study of jet propulsion of an oblate jellyfish using a momentum exchange-based immersed boundary-lattice Boltzmann method[J]. Advances in Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 6(3): 307-326.
- [37] Decker M B, Brown C W, Hood R R, et al. Predicting the distribution of the scyphomedusa *Chrysaora quinquecirrha* in Chesapeake Bay[J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, 329: 99-113.
- [38] Brodeur R D, Decker M B, Ciannelli L, et al. Rise and fall of jellyfish in the eastern Bering Sea in relation to climate regime shifts[J]. Progress in Oceanography, 2008, 77(2-3): 103-111.
- [39] Attrill M J, Wright J, Edwards M. Climate-related increases in jellyfish frequency suggest a more gelatinous future for the North Sea[J]. Limnology and Oceanography, 2007, 52(1): 480-485.
- [40] 张芳, 李超伦, 孙松, 等. 水母灾害的形成机理、监测预测及防控技术研究进展[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1187-1195.
- [41] Gershwin L A, Condie S A, Mansbridge J V, et al. Dangerous jellyfish blooms are predictable[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2014, 11(96): 20131168.
- [42] 吴玲娟, 高松, 白涛. 大型水母迁移规律和灾害监测预警技术研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 3103-3107.
- [43] Mitchelmore C L, Schwarz J A, Weis V M. Development of symbiosis-specific genes as biomarkers for the early detection of cnidarian-algal symbiosis breakdown[J]. Marine Environmental Research, 2002, 54(3-5): 345-349.
- [44] Gleason D F, Wellington G M. Ultraviolet radiation and coral bleaching[J]. Nature, 1993, 365(6449): 836-838.
- [45] Warner M E, Fitt W K, Schmidt G W. Damage to photosystem II in symbiotic dinoflagellates: A determinant of coral bleaching[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United

- States of America, 1999, 96(14): 8007-8012.
- [46] Douglas A E. Coral bleaching-how and why?[J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 46(4): 385-392.
- [47] Grandcourt E M, Cesar H S J. The bio-economic impact of mass coral mortality on the coastal reef fisheries of the Seychelles[J]. Fisheries Research, 2003, 60(2-3): 539-550.
- [48] Downs C A, Fauth J E, Halas J C, et al. Oxidative stress and seasonal coral bleaching[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2002, 33(4): 533-543.
- [49] Spalding M D, Jarvis G E. The impact of the 1998 coral mortality on reef fish communities in the Seychelles[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(4): 309-321.
- [50] Edwards A J, Clark S, Zahir H, et al. Coral bleaching and mortality on artificial and natural reefs in Maldives in 1998, sea surface temperature anomalies and initial recovery[J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, 42(1): 7-15.
- [51] McClanahan T R. Bleaching damage and recovery potential of Maldivian coral reefs[J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, 40(7): 587-597.
- [52] Yentsch C S, Yentsch C M, Cullen J J, et al. Sunlight and water transparency: Cornerstones in coral research[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2002, 268(2): 171-183.
- [53] Heron S F, Johnston L, Liu G, et al. Validation of reef-scale thermal stress satellite products for coral bleaching monitoring[J]. Remote Sensing, 2016, 8(1): 59.
- [54] Liu G, Heron S F, Eakin C M, et al. Reef-scale thermal stress monitoring of coral ecosystems: New 5-km global products from NOAA coral reef watch[J]. Remote Sensing, 2014, 6(11): 11579-11606.
- [55] 林晓娟, 高姗, 仇天宇, 等. 海水富营养化评价方法的研究进展与应用现状[J]. 地球科学进展, 2018, 33(4): 373-384.
- [56] 郑静静, 刘桂梅, 高姗. 海洋缺氧现象的研究进展[J]. 海洋预报, 2016, 33(4): 88-97.
- [57] Gray J S, Wu R S, Or Y Y. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment[J]. Marine Ecology Progress Series, 2002, 238: 249-279.
- [58] Karlson K, Rosenberg R, Bonsdorff E. Temporal and spatial large-scale effects of eutrophication and oxygen deficiency on benthic fauna in Scandinavian and Baltic waters - A review[J]. Oceanography and Marine Biology, 2002, 40: 427-489.
- [59] Feng Y, Fennel K, Jackson G A, et al. A model study of the response of hypoxia to upwelling-favorable wind on the northern Gulf of Mexico shelf[J]. Journal of Marine Systems, 2014, 131: 63-73.
- [60] Bianchi T S, DiMarco S F, Cowan Jr J H, et al. The science of hypoxia in the Northern Gulf of Mexico: A review[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(7): 1471-1484.
- [61] NOAA's Ecological Forecast Roadmap. A strategic vision for NOAA's ecological forecast roadmap 2015-2019[Z].
- [62] Zhang A, Hess K W, Aikman III F. User-based skill assessment techniques for operational hydrodynamic forecast systems[J]. Journal of Operational Oceanography, 2010, 3(2): 11-24.
- [63] Thoe W, Wong S H C, Choi K W, et al. Daily prediction of marine beach water quality in Hong Kong[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2012, 6(3): 164-180.
- [64] Chan S N, Thoe W, Lee J H W. Real-time forecasting of Hong Kong beach water quality by 3D deterministic model[J]. Water Research, 2013, 47(4): 1631-1647.
- [65] 沈国英, 施并章. 海洋生态学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2002: 306-344.
- [66] Odum H T. Environment, power, and society[M]. New York: Wiley, 1971: 130.
- [67] 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: 131-178.
- [68] 何恩业, 王丹, 黄莉, 等. 西太平洋副热带高压的变动对我国赤潮发生的影响分析[J]. 海洋预报, 2015, 32(4): 83-89.
- [69] Dong Z J, Liu D Y, Keesing J K. Contrasting trends in populations of *Rhopilema esculentum* and *Aurelia aurita* in Chinese waters [M]/Pitt K A, Lucas C H. Jellyfish Blooms. Dordrecht: Springer, 2014.
- [70] 冯士筭, 李凤歧, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 325-371.
- [71] Palacz A P, Chai F. Spatial and temporal variability in nutrients and carbon uptake during 2004 and 2005 in the eastern equatorial Pacific Ocean[J]. Biogeosciences, 2012, 9(11): 4369-4383.
- [72] Xiu P, Chai F. Variability of oceanic carbon cycle in the North Pacific from seasonal to decadal scales[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 119(8): 5270-5288.
- [73] Lellouche J M, Le Galloudec O, Drévillon M, et al. Evaluation of global monitoring and forecasting systems at Mercator Océan[J]. Ocean Science, 2013, 9(1): 57-81.
- [74] Lellouche J M, Legalloudec O, Bourdallé - Badie R, et al. The Global Mercator Ocean analysis and forecasting high resolution system and its main future updates[C]//EGU General Assembly 2015. Vienna, Austria: European Geosciences Union, 2015.
- [75] 吴增茂, 谢红琴, 张志南, 等. 海洋生态预报的复杂性与研究方法的讨论[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 81-86.
- [76] 张俊峰, 俞建良, 庞海龙, 等. 利用水文气象要素因子的变化趋势预测南海区赤潮的发生[J]. 海洋预报, 2006, 23(1): 9-19.
- [77] 何恩业, 李海, 任湘湘, 等. BP人工神经网络在渤海湾叶绿素预测中的应用[J]. 海洋预报, 2008, 25(2): 1-10.
- [78] 杨建强, 高振会, 孙培艳, 等. 应用遗传神经网络方法分析赤潮监测数据[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(2): 77-82.
- [79] Proctor R, Holt J T, Allen J I, et al. Nutrient fluxes and budgets for the North West European Shelf from a three-dimensional model [J]. Science of the Total Environment, 2003, 314-316: 769-785.
- [80] Vichi M, Pinardi N, Masina S. A generalized model of pelagic

- biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part I: Theory [J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 64(1-4): 89-109.
- [81] Vichi M, Masina S, Navarra A. A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part II: Numerical simulations[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 64(1-4): 110-134.
- [82] Teruzzi A, Dobricic S, Solidoro C, et al. A 3-D variational assimilation scheme in coupled transport-biogeochemical models: Forecast of Mediterranean biogeochemical properties[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(1): 200-217.
- [83] 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 Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2002, 49(13-14): 2713-2745.
- [84] Liu G M, Chai F. Seasonal and interannual variation of physical and biological processes during 1994-2001 in the Sea of Japan / East Sea: A three-dimensional physical-biogeochemical modeling study[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 78(2): 265-277.
- [85] Xiu P, Chai F. Modeled biogeochemical responses to mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C10): C10006.
- [86] Xiu P, Chai F. Connections between physical, optical and biogeochemical processes in the Pacific Ocean[J]. *Progress in Oceanography*, 2014, 122: 30-53.
- [87] Kishi M J, Kashiwai M, Wared D M, et al. NEMURO-a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 202(1-2): 12-25.
- [88] Kishi M J, Ito S I, Megrey B A, et al. A review of the NEMURO and NEMURO. FISH models and their application to marine ecosystem investigations[J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(1): 3-16.
- [89] Yoshie N, Guo X Y, Fujii N, et al. Ecosystem and Nutrient Dynamics in the Seto Inland Sea, Japan[M]//Omori K, Guo X, Yoshie N, et al. *Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry-Marine Environmental Modeling & Analysis*. Tokyo: TERRAPUB, 2011: 39-49.
- [90] Werner F E, Ito S I, Megrey B A, et al. Synthesis of the NEMURO model studies and future directions of marine ecosystem modeling [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 202(1-2): 211-223.
- [91] 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.
- [92] 邱国强, 王海黎, 邢小罡. BGC-Argo 浮标观测在海洋生物地球化学中的应用[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2018, 57(6): 827-840.
- [93] 康霖. 西沙群岛海洋渔业资源调查研究[J]. *海洋与渔业*, 2016, (2): 64-66.
- [94] 唐娅菲. 滨海核电运行安全典型致灾生物研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018: 3-8.

Research progress and developmental application of marine ecological forecasting

GAO Shan, LIU Gui-mei, WANG Hui, ZHENG Jing-jing

(Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081 China)

Abstract: This paper begins with the introduction of the concept and function of marine ecological forecasting. The development status of marine ecological forecasting is expounded, according to the types of marine ecological disasters, such as harmful algal blooms (red tide), green macroalgae blooms (green tide), jellyfish outbreak, coral whitening, and disaster indicators, such as eutrophication, hypoxia and pathogenic bacteria. Moreover, the application of marine ecological forecasting in different sea areas is given examples for the estuaries near the shore, the offshore sea (continental shelf) and the global oceanic waters. Furthermore, the paper illustrates the domestic and international operational application of the marine ecological forecasting methods, such as experience, statistical and numerical forecasting methods. Finally, the paper discusses key scientific issues of marine ecological forecasting in the context of future challenges.

Key words: marine ecological forecasting; harmful algal blooms (red tide); green macroalgae blooms (green tide); jellyfish; numerical forecasting