

综 述

中国海洋生态学的发展和展望^{*}

李永祺, 唐学玺

(中国海洋大学海洋生命学院, 山东 青岛 266003)

摘 要: 本文结合国际海洋生态学的研究历史, 回顾了中国海洋生态学的发展历程。从海洋生物多样性、海洋生物生产力、海洋生态灾害以及大洋和极地研究等方面, 总结了 70 年来中国在海洋生态学领域取得的成就。同时, 指出了目前中国在此领域存在的问题、今后的发展方向和重点, 为促进中国海洋生态学学科的发展和海洋生态文明建设具有重要指导意义。

关键词: 海洋生态学; 生物多样性; 生物生产力; 生态灾害; 极地和大洋生态系统

中图法分类号: Q14

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2020)09-001-09

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20200083

引用格式: 李永祺, 唐学玺. 中国海洋生态学的发展和展望[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(9): 1-9.

LI Yong-Qi, TANG Xue-Xi. Development and prospect of marine ecology in China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(9): 1-9.

生态学是研究生物界的结构、功能及与其生活环境相互联系、相互作用规律的一门科学, 由于它能提供一些解决人类可持续发展所面临的资源、环境和全球气候变化困境的有益良方, 因而受到了普遍的重视。20 世纪末, 联合国教科文组织曾提出, 要把生态学知识普及到每个人, 做到家喻户晓^[1]。海洋生态学是生态学的一门重要组成学科, 是海洋资源(尤其是渔业资源)开发与利用、海洋生态环境保护和海洋综合管理的重要科学基础之一, 对构建海洋命运共同体有重要作用。回顾中国海洋生态学的发展, 让我们迈步为建设海洋强国再出发, 期望有所助益, 故呈此文。

1 发展简史

海洋生态学的发展, 从 1777 年丹麦学者 O.F. 米勒开始用显微镜观察微小的海洋浮游生物开始, 大致可分为三个时期^[2]。第一时期为探索和描述时期。如法国 J.V. 奥杜安和 H. 米尔恩-爱德华兹于 1832 年提出了浅海生物的分布图式; 英国 E. 福布斯首创了挖泥采集底栖动物的方法, 并在大量采集和研究基础上, 提出了海洋生物垂直分布带; 而英国“挑战者”号(1872—1876 年)涉及三大洋的海洋调查, 发现了大量新的种属, 初步分析了海洋生物与海洋环境的关系, 经过 20 年的整理, 编写了 50 本“挑战者号远征报告”; 以及广(狭)温

性生物、广(狭)盐性生物、生物群落等重要生态概念和浮游生物(Plankton)、底栖生物(Benthos)和游泳生物(Nekton)等重要生态名词的提出, 标志着海洋生态学的创立^[3]。

海洋生态学发展的第二个时期, 大致从 20 世纪初开始, 进入实验室操作、定性和定量相结合的研究阶段。此时期, 开始进行浮游生物和底栖生物的分布和数量变化, 鱼类数量变动洄游的研究。1935 年坦斯利^[4]提出“生态系统”的概念, 以及 1942 年林德曼^[5]“十分之一”规律的建立, 促进了从生态系统和能流的整体定量研究海洋生态过程和现象。而康奈尔和佩恩等的开创性研究-利用海洋模型研究干扰和竞争对海洋生态的影响, 对海洋生态学在理论和实际应用上均有重要作用^[2]。

Dugdale 和 Goering 于 1967 年提出新生产力(New Productivity)的概念^[6], Azam 于 1983 年提出微生物环(Microbial food loop)的概念^[7], 1977 年美国“阿尔文”号深潜器首次在太平洋加拉帕戈斯海底发现了繁茂的生物群落^[8], 以及遥感技术在海洋初级生产力的应用, 将海洋生态学的发展带进了新的时期。这个时期的主要特点是, 海洋生态学与人类的经济、社会、人文科学紧密地联系, 海洋污染(如海洋垃圾^[9]、微塑料^[10]、放射性^[11-12]、石油^[13]等)和全球气候变化对海

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1806213)资助

Supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U1806213)

收稿日期: 2020-03-15; 修订日期: 2020-05-15

作者简介: 李永祺(1935-), 男, 教授, 主要从事海洋环境生态学研究。E-mail: liyongqi1935@163.com

洋生态系统的影响^[14]、海洋生态灾害、生态修复、基于生态系统海洋综合管理以及大海洋生态系统等成为研究热点^[15]。同时,与海洋生态有关的国际合作研究项目也增多,如“海洋生物地球化学和生态系统综合研究计划(Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research, IMBER)”、“全球海洋生态系统动力学研究计划(Global Ocean Ecosystem Dynamics, GLOBEC)”、“全球有害赤潮生态学与海洋学(Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms, GEOHAB)”等。

在时间上,中国海洋生态学的起步在要比西方国家大约晚一百多年。在新中国成立之前,由于旧中国时期政治腐败、经济衰弱,因此仅有很少几次以海洋生物为主的调查。如以张玺教授为团长的“胶州湾海产动物采集团”于1935和1936年进行的春、秋二个季节的4次调查,1935—1936年浙江省水产试验场在浙江进行的渔业、海藻调查,以及1947年上海中央水产试验所在舟山近海进行的几次渔业调查等。

中国海洋生态学研究,是从新中国成立后开始的。由于党和政府对海洋事业的重视,从建国初期,就逐步建立海洋科研机构、在高校培养海洋科研人员、建造调查船、以及研制和采购仪器设备等,并将海洋科技列入国家科技发展规划,国家和地方政府设立专项(题)研究项目给予经费支持。从1950年代起,有计划的从摸清中国沿海资源、开展海洋综合调查,逐步开始进行南极海洋、北极和大洋调查。在“开发海洋、建设海洋强国”战略指引下,尤其是2012年以来,国家把生态建设纳入国家“五位一体”总布局,高度重视生态文明建设,使中国海洋生态学研究与其他海洋科技一样,迎来了蓬勃发展的春天。历经70年,中国追赶国际海洋生态研究步伐,在海洋生物生态调查,海洋生物多样性研究,海洋生态系统的结构和功能,海湾和河口生态过程,珊瑚礁、红树林和海草典型生态系统保护,大洋、深海和海山生态调查、海洋生态灾害、人类活动对海洋生态系统的影响、海洋生态承载力、海洋生态修复、全球气候变化和海洋酸化的生态效应,海洋生态系统服务功能和基于海洋生态系统的管理等研究,以及国际海洋重大研究计划的合作等均取得了显著的进步,受到了国内外广泛的关注和高度评价。可以说,中国海洋生态学的研究,用了70年的时间,从海洋生态学发展的第一时期已跨入了发展的第三时期^[16-23]。

2 主要进展

2.1 查清了中国近海生物多样性和生态特点

为全面掌握中国近海海洋生物资源和生物多样性状况,从1953年“烟台、威海渔场及其附近海域的鲈鱼

资源”调查起,国家和地方先后组织了全国或局部海域(包括海洋生物生态)的综合调查。如“全国海洋普查”(1958—1960年)、“南海北部和中部海域调查”(1973—1974、1977—1978、1979—1982、1983年)、“南海南部海域调查”(1984、1987、1988—1989、1991—1995年)、“台湾海峡海洋环境综合调查”(1983—1984、1984—1985、1994年)、“长江口及济州岛附近海域综合调查”(1981—1982年)、“全国海岸带和海涂资源调查”(1980—1986年)、“全国海岛资源综合调查”(1988—1995年)、进入21世纪启动的“中国近海海洋综合调查与评价专项”(简称“908专项”,2004—2008年)等,国家科技部、基金委员会和沿海省市也先后多次立项了专项调查任务。在此背景下,中国学者全面开展了海洋生物分类、物种多样性和生态类型的研究,发现了大量新物种,对中国近海主要生态类型(浮游植物、浮游动物、底栖生物、游泳生物等)的种群分布、群落特征和多样性状况有了全面的了解,为渔业、海洋生态环境保护提供了宝贵的科学基础。

2.1.1 中国近海的生物多样性 生物多样性是地球上生命及其相互关系的总和,是人类赖以生存的物质基础。中国是世界上最大的沿海国家之一,海洋疆域北起渤海北端的大凌河(41°N),南至南海南端(3°30'N);南北延伸4 167 km,跨越37.5个纬度,覆盖温带、亚热带、热带三大气候带,海洋生境复杂,生态群落、生态系统多种多样。

中国近海的生态系统包括河口生态系统、潮间带生态系统、盐沼生态系统、红树林生态系统、珊瑚礁生态系统、海草床生态系统、沿岸生态系统、上升流生态系统、大陆架生态系统、大洋生态系统、热泉生态系统、岛屿生态系统等12个类型;以及人工和半人工生态系统,如潮间带池塘生态系统、人工鱼塘生态系统、围隔生态系统(包括网箱养殖)等,是世界沿海生态类型丰富多样的国家^[24],每一类型的海洋生态系统又包括多个层级生态系统。

不同海洋生态系统因生境的差异,生活着众多的生物种类。据2008年科学出版社出版的刘瑞玉院士主编《中国海洋生物名录》,记录了包括细菌界、色素界、原生生物界、植物界和动物界共约46门、22 629个现存生物物种^[25],约占全球已鉴定海洋生物物种1/10,居北半球之冠,为全球第八位。台湾于同一年出版了台湾岛包括陆地、海洋生物种类名录^[26]。通过几十年的调查,先后出版了中国海藻志、中国无脊椎动物志、鱼类志等近500部分类学(包括种群生态)专著,为深入系统研究海洋生物学、海洋生态学奠定了丰厚的科学基础。

2.1.2 中国海洋生物及其分布特点 中国海洋生物特

有的门类多,包括栉水母、动吻动物、曳鳃动物、腕足动物、帚虫动物、毛颚动物、半索动物和尾索动物等 12 个门类。中国海洋生物的种类比淡水水域多,如已记录的鱼类 3 802 种,其中海洋 3 104 种,淡水仅 752 种,两种生境共有约 18 种,海洋桡足类 523 种,淡水仅 206 种。中国海洋生物的物种种类数,由北往南递增,已记录黄渤海为 1 140 种,东海 4 167 种,南海 5 613 种^[27]。中国近海生物物种受黑潮的影响较大。

2.1.3 海洋生物区系划分 曾呈奎院士^[28]指出,一个海区的海藻区系种类明确之后,应进一步分析研究区系的特点,以确定区系的温度性质及地理分布,阐明它与临近区系的亲疏关系及其在世界海藻区系种所占的地位并探讨其起源。他强调指出,海洋植物区系的一个基本性质是它的温度性质。他在 Ekman^[29]提出的潮间带及浅海动物区系的基础上,将全球海洋植物区系划分为 5 个区系和 9 个区系,较清晰的表示了海洋植物在世界分布的格局。

迄今,中国近海生物区系大致可划为 3 个区系,即:渤海、黄海属于“北太平洋温带区系”的“东亚亚区”,属于暖温带区系(Warm Temperate Bitoa);东海和南海北部陆架区属于“印度-西太平洋暖水区系”的中国-日本亚区,属于亚热带区系(Sub-tropical Biota);东、南海,台湾-海南以南海域属印尼-马来西亚区,属于热带区系(Tropical Biota)。根据海洋生物对水温变化的适应和耐受能力,中国近海生物也大致可划分为冷水种、温水种和暖水种三个类型^[30]。

2.2 深入开展了海洋生物生产力和生态过程的研究

2.2.1 海洋初级生产力 海洋初级生产力是海洋生态系统能流的基础,是全球碳循环、气候变化、渔业资源评估关键的环节,也是海洋科学、海洋生态学、水产资源学等领域研究的热点之一。

中国学者从 20 世纪开始即对海洋初级生产力的研究方法进行研究。1970 年代末起开始对近海海湾、河口、上升流和渤、黄、东、南四个海域以及黑潮区进行初级生产力的调查,估算了浮游植物的现存量和初级生产力水平,基本掌握了中国近海的初级生产力及其分布、变动规律^[31]。

国际上,新生产力、微食物环概念的提出,以及海洋微型生物(尤其是细菌、病毒)在碳循环中重要作用的揭示,大大促进了中国初级生产力的研究^[32-34]。其中,焦念志院士开启了中国海洋新生产力研究,并在理论上重要贡献。他提出了海洋初级生产力结构的内涵,可归纳为 4 个方面的内容:①初级生产力的组分结构,即不同类群生产者对初级生产力贡献的比例;②初级生产力的粒级结构,即不同粒径级的初级生产者对初级生产力贡献的比例;③初级生产力的产品结构,即

初级产品中 POC、DOC 的分配比例;④初级生产力的功能结构,即总初级生产力中新生产力所占的比例。简言之,初级生产力的结构应包括组分结构、粒级结构、产品结构与功能结构^[35]。

进入 21 世纪以来,焦念志等在研究海洋中特殊功能类群-好氧不产氧光合异氧菌(Aerobic anoxygenic phototrophic bacteria, AAPB)的生理生态功能时发现,AAPB 对于 DOM 具有选择利用性。受此启发,创造性地提出了“海洋微型生物碳泵”这一海洋储碳新机制。认为海洋中微型生物在利用活性溶解有机碳(Labile DOC, LDOC)的同时亦产生惰性溶解有机碳(Recalcitrant DOC, RDOC),正是海洋中数以亿万计的微型生物生命活动,造就了海洋中 RDOC 库,客观上将大气二氧化碳长期封存至海洋,为海洋生物在碳循环中的作用,以及海洋在全球气候变化的作用提供了新的认识^[36-37]。

2.2.2 海洋次级生产力 以浮游生物为主的海洋次级生产力,在海洋生态系统中起承上启下的作用。70 年来,中国学者在海洋浮游动物的个体、种群和群落生态学领域进行了较全面、系统的研究,取得了丰硕的成果。

温度一直被认为是影响中华哲水蚤(*Calanus simicus*)分布的最重要因素之一^[38]。黄海冷水团的存在使得中国哲水蚤的种群数量与其它海区不同,在黄海一年有两个相对的密度高峰,分别在春季和夏季。而在渤海和东海只有春季一个高峰,而在南海和厦门港只有冬季和春季才有分布,夏季消失。黄海冷水团的存在保证了中华哲水蚤以拟成体的状态平安度过炎热夏季,待到条件适宜再发展壮大。还有研究认为,黄、东海是整个中国沿岸地区中华哲水蚤种群补充的源地^[39]。有关中华哲水蚤的度夏机制,作为陆架区典型生态系统,被认为是物理过程、生物过程耦合研究的一个成功案例^[40]。东海黑潮和上升流对浮游动物的种类、分布和种群数量变动有显著影响^[41-42]。

随着生态模型与生物地球化学模型在海洋学研究中的发展,功能群在海洋生态学的研究中受到了重视。海洋生物功能群,指的是不同的生物类群在生态系统的作用和地位相同或相近的生物可归纳为一个类群,称之为功能群。这有助于对生态系统结构的理解,不再局限于某个种类的变化,而是整个功能群的变化。孙松等^[41]在对胶州湾生态系统的深入研究和对中国科学院胶州湾生态站长期调查、观测资料分析的基础上,将胶州湾的浮游动物划为 6 个功能群,即桡足类、毛颚类、被囊类、水母类、微型浮游动物和其它浮游动物。研究表明,胶州湾的生物多样性没有显著变化,但是胶州湾生物的种类组成发生了很大的变化,如甲壳类浮

游动物的种类减少或消失了,但是小型水母等的种类和数量都增加了,这对生态系统的结构与功能、生态系统的健康会产生很大的影响^[43]。

2.2.3 海洋生态动力学研究 中国海洋生态动力学的研究发展几乎与国际同步。中国科学家于1991年即进入国际“全球海洋生态系统动力学研究计划(Global Ocean Ecosystems Dynamics, GLOBEC)”科学指导委员会,参与计划的制定和促进发展等活动。在苏纪兰、唐启升院士的大力推动下,1996年,国家自然科学基金委启动了“渤海生态系统动力学与生物资源持续利用”重大项目。1999年,在国家973计划中,又启动了“东、黄海生态系统动力学与生物资源可持续利用”研究项目。

在此领域,通过多年研究取得了丰富成果^[44-46]。如,河流截流和人工改造黄河入海口等人类活动严重影响了虾幼体到达渤海栖息地的可能性;气候的长期变化导致了渤海水环境的显著变化,并对生态系统的生物生产产生影响。年代间的调查研究表明,渤海渔业生物资源的群落结构向低质化发展、食物网营养级下降、食物链缩短,生态系统控制机制的各种传统理论难以单一地套用于渤海;水层—底栖多箱模拟结果表明,在渤海生态系统循环中,浮游植物光合作用吸收的碳量约有13%进入主食物链,呼吸排出的碳量约为44%,20%左右向底栖亚系统食物链转移^[46]。除外,还有学者开展了海湾和养殖池塘的生态动力学研究,如胶州湾水层生态动力学模拟^[47]、“虾池生态系能流结构分析”^[48]等。

2.3 揭示了中国沿海生态灾害发生的原因、过程和机制

在污染、栖息地受损、过度捕捞及全球气候变化多重压力下,中国沿海生态系统的健康受损。这突出表现在局部海域污染严重,海洋生态灾害频发,一些典型海洋生态系统(如红树林、珊瑚礁、海草床等)在规模、结构和功能上都出现了严重退化,引起党和国家的高度重视。科技部、国家自然科学基金委、中国科学院、国家自然资源部等部门均设立多项重点项目或专项,组织国内专家进入深入研究。如:“人类活动下中国典型生态系统变化”,“中国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防范”,“中国近海藻华灾害演变机制与安全”,“长江口海域赤潮形成原因研究”,“中国近海水母爆发的关键过程、机理及生态效应”,“黄海绿潮业务化预测预警关键技术研究与应用”,“突发性聚集绿潮藻工程化快速处置及高值化利用技术与示范”,“中国东海沿海赤潮发生机理研究”,“黑潮及变异对中国近海生态系统影响”,“北戴河邻近海域典型生态灾害与污染控制关键技术与应用”等项目。通过30多年的研究,掌握了中国近海生态环境状况,揭示了海

洋生态灾害发生的原因、过程和机制,并促进了海洋环境生态学学科的发展。

2.3.1 生态灾害 中国沿海生态灾害和致灾生物的种类多,其中赤潮生物主要是甲藻、硅藻和原生生物^[49],自1970年代以来,赤潮几乎在沿海不同海域都有发生;褐潮的致灾生物为抑食金球藻,自2009年以来在秦皇岛局部海域发生;绿潮主要是石莼属的一些藻类,如浒苔、孔石莼等;近两年发生在黄海局部的金潮,为大型海藻马尾藻;白潮主要出现在黄海、渤海、东海,主要致灾生物为海月水母、霞水母和沙海蜇。

致灾生物形成灾害,既取决于其生理、生殖、生长和发育特性,受到物理(水文)、化学(氮、磷、硅等营养盐)所驱动,也与过度捕捞、全球变化和增殖放流有关。

研究表明,中国东海赤潮高发区,主要是由长江口及邻近海域的富营养化和黑潮输入大量营养盐引发的^[50]。迄今,在赤潮致灾种类的分子生物学鉴定、甲藻孢囊、有害赤潮毒素、赤潮监测、赤潮暴发的机制和预测、赤潮消杀等方面均取得了重要成果,尤其是用改性粘土处置赤潮灾害,经多次现场应用得到了很好的效果,也得到了国际学术界的肯定^[51-55]。

围绕黄、东海水母爆发的机理探讨,近年来对中国近海水母暴发的机理提出了一种新的理论模式,即水母生活史中的大部分时间以水螅体的形式生活在海底,水母暴发是水螅体对环境变异的一种应激反应,是为了逃避动荡环境,扩大分布范围,寻求新的生存空间,为种群繁衍寻求更多机会的一种策略^[56];导致水母种群暴发的关键过程是海底温度的变动和饵料数量的变化,全球气候变化和富营养化是中国近海水母暴发的最主要诱发因素^[57]。

自2007年以来,黄海南部发生大规模绿潮灾害。经研究表明:黄海绿潮浒苔来源于江苏省条斑紫菜养殖区;浒苔复杂的生活史和多种繁殖方式(有性生殖、无性生殖和营养繁殖等)在绿潮形成过程中发挥重要作用;浒苔生长受温度影响明显,在14~20℃间的增长率随温度增加而增加,20℃以上随温宿增加反而降低;水体中微观繁殖体遇到合适的附着基就会萌发长成幼苗;浒苔具有很强的漂浮能力和快速的种群增长率,是浒苔能够在短时间暴发并形成绿潮的生物学基础;浒苔自身中空管状,是有效进行光合作用和漂浮生长的生物学条件;浒苔是典型的“嗜肥”种类,使其在种间营养盐竞争中处于有利的地位^[58-60]。

2.3.2 促进海洋环境生态学的发展 海洋环境生态学是海洋科学、环境科学和生态学交叉形成的新学科,着重研究在人类活动压力下生态系统的变化规律和对气候变化的响应,寻求受损生态系统的恢复或重建^[61]。中国学者在海洋污染、生境破坏、海洋自然保护区建

设、生态毒理、生态恢复等领域做了大量的研究工作^[62-64]。鉴于海洋微塑料污染严重,华东师范大学还建立了“海洋塑料(垃圾)研究中心”,开展海洋微塑料的调研工作^[65]。在总结大量研究成果的基础上,李永琪和唐学玺编写了《海洋污染生物学》^[66]、《海洋环境生态学》^[42]、《海洋生态灾害学》^[64]和《海洋恢复生态学》^[67]等专著。

2.4 为极地和大洋生态研究做出了贡献

中国从1984年建立南极第一座考察站-长城站起,已先后建立了中山站,昆仑站,泰山站等。进行了30多次包括南极大陆和邻近海域综合调查。从1999年起,先后多次对北极进行了考察。先后开展了“南大洋生物生态学”、“生物地球化学与通量”、“北极海域系统功能现状考察及其对全球变化的响应”等调查研究。在海洋生物群落结构组成与多样性现状,关键物种与资源分布和生态适应性等方面的调研成果,为极地海洋的生物资源变化,模型建立以及应用评估提供了大量数据。

值得提出的是,近十多年来中国在对大洋,深海和海山的调查研究有了长足的进步。如“蛟龙号”先后对中国南海、东太平洋金属结核区、西太平洋海山结壳勘探区、西南印度洋脊多金属硫化物勘探区、西北印度洋脊多金属硫化物调查区、西太平洋雅浦海沟区、西太平洋马里亚纳海沟等七大海区开展了上百次下潜。在中国南海区初步查明了南海冷泉区和海山生物群落特征,西南印度洋中国多金属硫化物勘探区共附生微生物多样性,证实了西太平洋采薇海山与维嘉海山区大型底栖生物分布具有良好的联通性;初步查明雅浦海沟北段西侧生物群落结构,微生物(细菌,古菌,真菌)的多样性特征等。

中国科学院“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”A类先导项目,自2013年启动以来,在大洋、深海、海山的生物生态调查取得了可喜的成果。在国际上率先开展热液喷口流体温度梯度原位探测,在马努斯热液口探明20余个热喷口(最高温度344℃),使用自主研发的深海热液口流体温度仪和拉曼光谱仪获得了热液口周围的温度梯度和物质组成数据^[68]。首次在国内1800~2000m的热液区开展深海大型生物的原位培养、环境胁迫、深海生物的水族箱培养等试验。在马努斯海盆1700m的深海热液区,获得了大量的海洋生物样品,发现了一些新的生物种类。实现了深海热液大型生物的实验室培养,成为继日本和德国之后,第三个可以在实验室进行深海热液大型生物培养的国家,打破了传统认为超过1500m的深海大型生物不可培养的观点^[69]。另外,张偲院士的研究组,在开展深海微生物的研究和利用方面也取得了显著的进

展。中国海洋大学张晓华教授研究组,首次发现了太平洋马里亚纳海沟10400m水深处存在大量能够降解烃类的细菌^[70]。

此外,中国学者围绕全球气候变化的生态效应也开展了许多有益的工作。如在三亚、南海和台湾多次记录到珊瑚白化事件^[71-73];大型底栖生物^[74]和浮游植物^[75]全球气候变化的响应表现出多样性。另外,在海洋酸化,臭氧层空洞对海洋生物的影响也开展了许多研究^[70, 76-79]。

3 发展建议

70年来,中国海洋生态学的研究取得了长足的进步,迈入了世界先进行列。本文限于作者的水平,概述难以全面、系统。但从上述已取得的成就就让我们振奋。面对国际上学科快速发展我们还有差距,许多海洋生态奥秘有待揭示,建设海洋生态文明也刚起步。为此需要我们再出发,在理论、预测、应用、人才培养方面创造性地工作,而如何在海洋生态研究与应用领域,实现信息化、智能化更需尽快迈开步伐。

我们建议:通过深入分析中国近海和大洋的大量调查、监测、实验数据和模拟,能更多地提炼出规律性的认识,提出有影响的假说、理论;加大对深海、大洋,尤其是“暗”生态系统的生态过程研究;深入开展人类生产、生活及全球气候变化多重压力对海洋生态系统的影响及良好对策;促进海洋生态学研究方法、设备的信息化和智能化;加强海洋生态学与其他海洋科学学科以及经济、社会、人文、管理科学的融合,努力为海洋生态文明建设多做贡献。

参考文献:

- [1] 孙儒泳. 动物生态学原理[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2001. Sun R Y. The Principle of Animal Ecology[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2001.
- [2] Kaiser M J, Attrill M J, Jennings S, et al. Marine Ecology: Processes, Systems, and Impacts[M]. Oxford: Oxford University Press, 2011.
- [3] 刘瑞玉, 崔玉珩. 中国海岸带生物[M]. 北京: 海洋出版社, 1996. Liu R Y, Cui Y H. Coastal Organisms of China[M]. Beijing: Ocean Press, 1996.
- [4] Tansley A G. The use and abuse of vegetational concepts and terms [J]. Ecology, 1935, 16(3): 284-307.
- [5] Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology[J]. Ecology, 1942, 23(4): 167-191.
- [6] Dugdale R C. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity[J]. Limnol Oceanogr, 1967, 12(2): 196-206.
- [7] Azam F, Fenchel T, Field J G, et al. The ecological role of water-column microbes in the sea[J]. Marine Ecology Progress Series, 1983; 257-263.
- [8] Corliss J B, Dymond J, Gordon L I, et al. Submarine thermal

- springs on the Galapagos Rift[J]. *Science*, 1979, 203(4385): 1073-1083.
- [9] Bergmann M, Gutow L, Klages M. *Marine Anthropogenic Litter* [M]. Berlin: Springer, 2015.
- [10] Law K L, Thompson R C. Microplastics in the seas[J]. *Science*, 2014, 345(6193): 144-145.
- [11] De Mora S, Demers S, Vernet M. *The Effects of UV Radiation in the Marine Environment* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [12] Tedetti M, Sempéré R. Penetration of ultraviolet radiation in the marine environment. A review[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2006, 82(2): 389-397.
- [13] Harayama S, Kishira H, Kasai Y, et al. Petroleum biodegradation in marine environments[J]. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 1999, 1(1): 63-70.
- [14] McKinney M A, Sara P, Rune D, et al. A review of ecological impacts of global climate change on persistent organic pollutant and mercury pathways and exposures in arctic marine ecosystems[J]. *Current Zoology*, 2015, 61(4): 617-618.
- [15] Sherman K. The large marine ecosystem concept: Research and management strategy for living marine resources[J]. *Ecological Applications*, 1991, 1(4): 349-360.
- [16] 线薇薇, 张辉, 刘淑德. 河口鱼类浮游生物生态学研究进展[J]. *海洋科学集刊*, 2016, 51: 167-180.
- Xian W W, Zhang H, Liu S D. Advances in zooplankton ecology of estuarine fishes[J]. *Journal of Marine Science*, 2016, 51: 167-180.
- [17] 张均龙, 史本泽, 赵峰, 等. 中国海洋底栖生物学发展回顾与展望[J]. *海洋科学集刊*, 2016, 51: 194-204.
- Zhang J L, Shi B Z, Zhao F, et al. Review and prospect of marine benthic biology in China[J]. *Journal of Marine Science*, 2016, 51: 194-204.
- [18] 中国科学技术协会. 2014—2015 海洋科学学科发展报告[R]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016.
- China Association for Science and Technology. 2014—2015 Marine Science Discipline Development Report[R]. Beijing: Popular Science Press, 2016.
- [19] 于仁成, 罗璇. 我国近海有毒藻和藻毒素的研究现状与展望[J]. *海洋科学集刊*, 2016, 51: 155-166.
- Yu R C, Luo X. Research status and prospect of poisonous algae and phycotoxins in the coast of China[J]. *Journal of Marine Science*, 2016, 51: 155-166.
- [20] 曾呈奎, 徐鸿儒, 王春林. *中国海洋志* [M]. 郑州: 大象出版社, 2003.
- Zeng C K, Xu H R, Wang C L. *Marine Chronicles of China* [M]. Zhengzhou: Daxiang Press, 2003.
- [21] 张志南, 周红, 华尔, 等. 中国小型底栖生物研究的 40 年——进展与展望[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(4): 657-671.
- Zhang Z N, Zhou H, Hua E, et al. 40 years of research on meiobenthos in China—progress and prospect[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2017, 48(4): 657-671.
- [22] 中国科学技术协会. *中国海洋学学科史* [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2014.
- China Association for Science and Technology. *History of Oceanography in China* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2014.
- [23] 中国科学技术协会. *海洋科学学科报告* [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016.
- China Association for Science and Technology. *Marine Science Discipline Report* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2016.
- [24] 孙鸿烈. *中国生态系统(上册)* [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- Sun H L. *Chinese Ecosystem (Volume I)* [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [25] 刘瑞玉. *中国海洋生物名录(精)* [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- Liu R Y. *List of Marine Organisms in China (Refined)* [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [26] 王立彭, 张斌. 浅析海洋生物资源可持续发展[J]. *中国水运(下半月)*, 2008, 8(3): 186-188.
- Wang L P, Zhang B. Analysis on the sustainable development of marine living resources[J]. *China Waterway (second half)*, 2008, 8(3): 186-188.
- [27] 邵广昭, 彭镜毅, 吴文哲. *台湾物种多样性 II. 物种名录* [M]. 台北: 行政院农业委员会林务局, 2008.
- Shao G Z, Peng J Y, Wu W Z. *Species Diversity II. in Taiwan. A List of Species* [M]. Taipei: Agriculture Committee of the Executive Yuan, Forestry Bureau, 2008.
- [28] 曾呈奎. 关于海藻区系分析研究的一些问题[J]. *海洋与湖沼*, 1963, 5(4): 298-305.
- Zeng C K. Some problems on the analysis and study of seaweed flora[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1963, 5(4): 298-305.
- [29] Ekman S. *Zoogeography of the Sea*. vol. 9; Sidgwick and Jackson [M]. Pittsburgh: Academic Press, 1953.
- [30] 陈品健, 陈小麟. *动物生物学* [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- Chen P J, Chen X L. *Animal Biology* [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [31] 宁修仁, 刘子琳, 史君贤, 渤, 黄. 东海初级生产力和潜在渔业生产量的评估[J]. *海洋学报*, 1995, (3): 72-84.
- Ning X R, Liu Z L, Shi J X. Assessment of primary productivity and potential fishery production in the Bohai, Yellow and East China Seas[J]. *Journal of Oceanography*, 1995, (3): 72-84.
- [32] 焦念志, 王荣. 新生产力——一个新的海洋学研究领域[J]. *海洋与湖沼*, 1993, 24(2): 204-211.
- Jiao N Z, Wang R. New productivity—A new field of oceanographic research[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1993, 24(2): 204-211.
- [33] Azam F, Fenchel T, Field J G, et al. The ecological role of water-column microbes in the sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1983; 257-263.
- [34] Dugdale R. Nutrient limitation in the sea: Dynamics, identification, and significance[J]. *Limnology and Oceanography*, 1967, 12(4): 685-695.
- [35] 焦念志. *海湾生态过程与持续发展* [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- Jiao N Z. *Ecological Process and Sustainable Development of the Gulf* [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [36] 焦念志. *海洋微型生物生态学* [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- Jiao N Z. *Marine Micro-Bio-Ecology* [M]. Beijing: Science Press, 2006.

- [37] 焦念志, 汤凯, 张瑶, 等. 海洋微生物碳过程与机制概论[J]. 微生物学通报, 2013, 40(1): 71-86.
Jiao N Z, Tang K, Zhang Y, et al. An introduction to the process and mechanism of carbon storage in marine microorganisms[J]. Microbiology Bulletin, 2013, 40(1): 71-86.
- [38] 林元烧, 李松. 厦门港中华哲水蚤生活周期的初步研究[J]. 厦门大学学报, 1984, 23(1): 111-117.
Lin Y S, Li S. A preliminary study on the life cycle of *Calanus sinicus* in Xia Men Harbor[J]. Xiamen University Journal, 1984, 23(1): 111-117.
- [39] Hwang, J S. The China Coastal Current as a driving force for transporting *Calanus sinicus* (Copepoda: *Calanoida*) from its population centers to waters off Taiwan and Hong Kong during the winter northeast monsoon period[J]. Journal of Plankton Research, 2004, 27(2): 205-210.
- [40] Sun S, Zhang G. Over-summering strategy of *Calanus sinicus*[J]. GLOBEC Int Newsl, 2005, 11: 34.
- [41] 孙松, 李超伦, 宁修仁. 中国区域海洋学: 生物海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
Sun S, Li C L, Ning X R. Chinese Regional Oceanography: Biological Oceanography[M]. Beijing: Ocean Press, 2012.
- [42] 李永琪. 中国区域海洋学: 海洋环境生态学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
Li Y Q. Regional Oceanography in China: Marine Environmental Ecology[M]. Beijing: Ocean Press, 2012.
- [43] 孙松. 海湾生态系统的理论与实践: 以胶州湾为例[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Sun S. Theory and Practice of Gulf Ecosystem: Take Jiaozhou Bay as An Example[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [44] 唐启升, 苏纪兰. 中国海洋生态系统动力学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Tang Q S, Su J L. Study on Marine Ecosystem Dynamics in China [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [45] 唐启升, 苏纪兰, 孙松, 等. 中国近海生态系统动力学研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(12): 1288-1299.
Tang Q S, Su J L, Sun S, et al. Advances in the study of offshore ecosystem dynamics in China[J]. Advances in Geoscience, 2005, 20(12): 1288-1299.
- [46] 苏纪兰, 唐启升. 中国海洋生态系统动力学研究: 渤海生态系统动力学过程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Su J L, Tang Q S. A Study of Marine Ecosystem Dynamics in China: The Process of Ecosystem Dynamics in the Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [47] 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, 39(3): 82-89.
Yu G Y, Wu Z M, Zhang Z N, et al. Ecological dynamics model and simulation of water layer in the north of Jiaozhou Bay I. Ecological dynamics model of water layer in the north of Jiaozhou Bay [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1999, 39(3): 82-89.
- [48] 翟雪梅, 张志南. 虾池生态系能流结构分析[J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(2): 275-282.
Zhai X M, Zhang Z N. Analysis of energy flow structure of shrimp pond ecosystem[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1998, 28(2): 275-282.
- [49] 韦桂秋, 王华, 蔡伟叙, 等. 近 10 年珠江口海域赤潮发生特征及原因初探[J]. 海洋通报, 2012, 31(4): 466-474.
Wei G Q, Wang H, Cai W X, et al. 10-year retrospective analysis on the harmful algal blooms in the Pearl River Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(4): 466-474.
- [50] 王江涛, 曹婧. 长江口海域近 50a 来营养盐的变化及其对浮游植物群落演替的影响[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(3): 310-315.
Wang J T, Cao J. Changes of nutrients and their effects on phytoplankton community succession in the Yangtze River Estuary in recent 50a[J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(3): 310-315.
- [51] 冀秀玲, 金桂文, 程金平, 等. 分子生物学技术在赤潮毒素分析监测中的应用[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(1): 107-113.
Ji X L, Jin G W, Cheng J P, et al. Application of molecular biological techniques in the analysis and monitoring of red tide toxins [J]. Advances in Oceanography, 2004, 22(1): 107-113.
- [52] 郑磊, 齐雨藻. 赤潮甲藻孢囊研究综述[J]. 暨南大学学报, 1995, (1): 137-149.
Zheng L, Qi Y Z. A review on the study of dinoflagellate cysts in red tide[J]. Journal of Jinan University, 1995, (1): 137-149.
- [53] 齐雨藻, 王艳. 我国东海赤潮原甲藻应属哪种? [J]. 应用生态学报, 2003(7): 1188-1190.
Qi Y Z, Wang Y. Which species of *Prorocentrum* in the East China Sea should belong to? [J]. Journal of Applied Ecology, 2003 (7): 1188-1190.
- [54] 俞志明, 邹景忠. 一种去除赤潮生物更有效的粘土种类[J]. 自然灾害学报, 1994(2): 105-109.
Yu Z M, Zou J Z. A kind of clay that is more effective in removing red tide organisms[J]. Journal of Natural Disasters, 1994 (2): 105-109.
- [55] 李影, 汤亚楠, 沈萍萍, 等. 胶州湾表层沉积物中甲藻孢囊的分布[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(4): 760-766.
Li Y, Tang Y N, Shen P P, et al. Distribution of dinoflagellate cysts in surface sediments of Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2017, 48(4): 760-766.
- [56] 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.
Sun S. A new understanding of the outbreak mechanism of Yellow and East China Sea jellyfish[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2012, 43(3): 406-410.
- [57] 孙松, 张芳, 李超伦, 等. 黄海小型水母的分布特征[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 429-437.
Sun S, Zhang F, Li C L, et al. Distribution characteristics of small jellyfish in the Yellow Sea[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2012, 43(3): 429-437.
- [58] 叶乃好, 张晓雯, 毛玉泽, 等. 黄海绿潮浒苔 (*Enteromorpha prolifera*) 生活史的初步研究[J]. 中国水产科学, 2008, 15(5): 853-859.
Ye N H, Zhang X W, Mao Y Z, et al. A preliminary study on the life history of *Enteromorpha prolifera* of green tide in the Yellow Sea[J]. Chinese Fisheries Science, 2008, 15(5): 853-859.
- [59] 范士亮, 傅明珠, 李艳, 等. 2009—2010 年黄海绿潮起源与发生过程调查研究[J]. 海洋学报, 2012, 34(6): 187-194.
Fan S L, Fu M Z, Li Y, et al. Investigation and study on the ori-

- gin and occurrence process of green tide in the Yellow Sea from 2009 to 2010[J]. Journal of Oceanography, 2012, 34(6): 187-194.
- [60] 刘峰. 黄海绿潮的成因以及绿潮浒苔的生理生态学和分子系统学研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2010.
- Liu F. Studies on the Causes of Green Tide in the Yellow Sea and the Physiological Ecology and Molecular Systematics of Enteromorpha[D]. Qingdao: Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [61] 李永祺, 王蔚. 浅议海洋生态学的定义[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(5): 931-936.
- Li Y Q, Wang W. On the definition of marine ecology[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2019, 50(5): 931-936.
- [62] 陈亮. 我国海洋污染问题、防治现状及对策建议[J]. 环境保护, 2016, 44(5): 65-68.
- Chen L. Marine pollution problems, prevention and control status and countermeasures in China [J]. Environmental Protection, 2016, 44(5): 65-68.
- [63] 匡增军, 徐攀亚. 南海海洋保护区建设的必要性与可行性分析[J]. 湖南科技大学学报, 2018(2): 23.
- Kuang Z J, Xu P Y. Analysis on the necessity and feasibility of the construction of marine protected areas in the South China Sea [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology, 2018(2): 23.
- [64] 唐学玺, 王斌, 高翔. 海洋生态灾害学[M]. 北京: 海洋出版社, 2019.
- Tang X X, Wang B, Gao X. Marine Ecological Disaster Science [M]. Beijing: Ocean Press, 2019.
- [65] Zhang W, Zhang S, Wang J, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China[J]. Environmental Pollution, 2017(231): 541-548.
- [66] 李永祺, 丁美丽. 海洋污染生物学[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
- Li Y Q, Ding M L. Biology of Marine Pollution[M]. Beijing: Ocean Press, 1991.
- [67] 李永祺, 唐学玺. 海洋恢复生态学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2016.
- Li Y Q, Tang X X. Marine Restoration Ecology[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2016.
- [68] 孙松, 孙晓霞. 全面提升海洋综合探测与研究能力——中国科学院海洋先导专项进展[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1132-1144.
- Sun S, Sun X X. Comprehensively improve the ability of comprehensive marine exploration and research-Progress of the marine pilot project of the Chinese Academy of sciences[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2017, 48(6): 1132-1144.
- [69] 李超伦, 李富超. 深海极端环境与生命过程研究现状与对策[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(12): 1302-1307.
- Li C L, Li F C. Research status and countermeasures of deep-sea extreme environment and life process[J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(12): 1302-1307.
- [70] Melzner F, Mark F C, Seibel B A, et al. Ocean acidification and coastal marine invertebrates: Tracking CO₂ effects from seawater to the cell[J]. Annual Review of Marine Science, 2019, 12(1): 1-25.
- [71] Li X, Liu S, Huang H, et al. Coral bleaching caused by an abnormal water temperature rise at Luhuitou fringing reef, Sanya Bay, China[J]. Taylor and Francis Group, 2012, 15(2): 227-233.
- [66] DeCarlo T M, Cohen A L, Wong G T, et al. Mass coral mortality under local amplification of 2 °C ocean warming[J]. Scientific Reports, 2017(7): 44586.
- [72] 李淑, 余克服, 陈天然, 等. 珊瑚共生虫黄藻密度结合卫星遥感分析 2007 年南沙群岛珊瑚热白化[J]. 科学通报, 2011, 56(10): 747-755.
- Li S, Yu K F, Chen T R, et al. Coral symbiont *Xanthophyta* density combined with satellite remote sensing analysis of coral thermal whitening in Nansha Islands in 2007[J]. Science Bulletin, 2011, 56(10): 747-755.
- [73] 李新正. 我国海洋大型底栖生物多样性研究及展望: 以黄海为例[J]. 生物多样性, 2011, 19(6): 676-684.
- Li X Z. Research and prospect of marine macrobenthic biodiversity in China: A case study of the Yellow Sea[J]. Biodiversity, 2011, 19(6): 676-684.
- [74] 林更铭, 杨清良. 全球气候变化背景下台湾海峡浮游植物的长期变化[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(5): 615-623.
- Lin G M, Yang Q L. Long-term changes of phytoplankton in the Taiwan Strait under the background of global climate change[J]. Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, 17(5): 615-623.
- [75] Young C S, Gobler C J. Ocean acidification accelerates the growth of two bloom-forming macroalgae[J]. PloS One, 2016, 11(5): e0155152.
- [76] Wang X. Reproduction and progeny of *Silene latifolia* (Caryophyllaceae) as affected by atmospheric CO₂ concentration[J]. American Journal of Botany, 2005, 92(5): 826-832.
- [77] Doney S C, Fabry V J, Feely R A, et al. Ocean acidification: The other CO₂ problem[J]. Annual Review of Marine Science, 2009, 1: 169-192.
- [78] Hurd C L, Beardall J, Comeau S, et al. Ocean acidification as a multiple driver: How interactions between changing seawater carbonate parameters affect marine life[J]. Marine and Freshwater Research, 2020, 71(3): 263-274.

Development and Prospect of Marine Ecology in China

LI Yong-Qi, TANG Xue-Xi

(College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: This article reviewed the development history of marine ecology in China, which combined with the history of international marine ecology research. In terms of marine biodiversity, marine biological productivity, marine ecological disasters, and ocean and polar research, we summarized the achievements China has made in the field of marine ecology in the past 70 years. At the same time, this article pointed out the current problems in this field in China, the future development direction and focus, and it has important guiding significance for promoting the development of marine ecology disciplines and the construction of marine ecological civilization in China.

Key words: marine ecology; biodiversity; biological productivity; ecological disasters; polar and ocean ecosystem

责任编辑 高 蓓