

深海生态学研究进展和几点建议*

李永祺 王 蔚

(中国海洋大学海洋生命学院 青岛 266003)

摘要 深海及其底部生物圈的探测和研究,是当前海洋大科学研究的焦点,是未来的海洋科学,具有重要的战略意义。深海及其底深部生态学的研究,是其中的一项重要内容。本文简要回顾了深海生态学发展的三个里程碑以及中国在该学科的研究进展,提出了大力发展深海探测和钻探设备、技术,建设深海生态站和大洋钻探船;以生态系统为中心开展深海生态研究;将深海生态研究纳入国家和有关部门的研究计划、支持多学科交叉和融合的建议。

关键词 深海探测;大洋钻探;海洋大科学;热泉生物群落;冷泉生物群落;海洋生态系统

中图分类号 Q148 **doi:** 10.11693/hyh20200300058

深海的水深标准,至今尚未统一。有人主张 200m 以下为深海,因为真光层的最低水深为 200m;但更多人主张水深超过 1000m 为深海,因为 200—1000m 之间的水层仍有微弱的光,是微弱光区(twilight zone),且在千米以深的水温相对稳定,环境与上层水域有较大差异(Kaiser *et al.*, 2011; 孙松等, 2017a)。深海底深部,一般指大洋底往下到地球内部第一个不连续之间的圈层,大洋型地壳的厚度比大陆型地壳厚度小,一般变化于 5—15km。

近半个世纪以来,深海与其底深部的探测和研究取得了显著的成就,极大地推动了深海生态学的发展。深海及其底深部生态学的研究,既是海洋生态学研究的新领域,又是当今海洋大科学、生命科学和环境科学紧密交叉、融合的汇集点。深入开展研究,将有助于阐明海洋生态系统的能流、物流、信息流和基因流,生命起源、水循环、液体成矿、全球气候变化,以及深海资源的开发和保护等科学问题,推动相关学科的发展。

本文简要回顾了深海生态研究的三个里程碑和我国深海生态学的研究进展,对发展我国深海生态学提出了三方面建议,即:大力发展深海探测和钻探设备、技术,建设深海生态站和大洋钻探船;以生态系统为中心开展研究;将深海生态研究纳入海洋

大科学计划,支持多学科交叉和融合。意在与大家共议,期望有助于海洋强国建设。

1 深海生态研究的三个里程碑

深海生态研究的三个里程碑,都是得益于深海采样、探测和深海钻探设备与技术的成就,以及众多的海洋科学考察实践(莫杰, 2004; 罗伯特·鲍尔德, 2006; 理查德·巴伯等, 2006; 冯东等, 2010; 李一良, 2010; 翟世奎, 2018)。

1.1 “挑战者”(challenger)号的深海调查

由于深海生物采样和观察不易,早期的物理海洋学家认为深海是静止不动的(管玉平, 2018)。而海洋生物学家,如福布斯曾断言,海洋深处是没有生命的。因为他是著名的海洋生物学家,因此他的观点被普遍接受。既然深海没有生命,当然就谈不上深海生态学的研究(李冠国等, 2011)。一直到 1872—1876 年,英国的“挑战者”(H.M.S Challenger)科考船,从 6250m 水深处采到 20 个深海动物标本,由此才开始引起对深海生物的关注,开启了深海生物的科考活动。之后,许多深海调查的结果表明,深海有种类繁多的微生物和动物,说明深海没有生命的看法是错误的(李冠国等, 2011; 陈旭森等, 2014; 邵宗泽, 2018)。因此,“挑战者”号的科考成就,开启了深海生态学的研究,

* 李永祺, 教授, E-mail: liyongqiq@sina.com

收稿日期: 2020-03-06, 收修改稿日期: 2020-04-08

是第一个里程碑。但人们普遍认为,深海动物的食物是来自以太阳能驱动的海洋上层水域生物的产物(如排泄物、动物尸体等)。

1.2 热泉和冷泉生物群落的发现

1977 年,美国科学家利用“阿尔文”(Alvin)号深潜器,在东太平洋加拉帕戈斯裂谷(Galápagos Rift)的水深 2500m 洋底,首次发现热液喷口(即“热烟囱”, hydrothermal vent)不仅正在喷出水温高达 350—400°C 的热水,水中含有丰富的金属物质、以及硫磺等气体,而且使人惊奇地是看到热液口附近有一片繁盛茂密的生物群落。既有个体长达几米的橙红色蠕虫(*Riftia pachyptila*)、几十厘米大的蛤(*Calymene magnifica*)和贻贝(*Bathymodiolus thermophilus*, 嗜热深海偏顶蛤),还有许多个体大小不等的蟹(*Bythograea thermydron*)和鱼等动物,形成奇幻无比的海底绿洲,被科学家称为“海底玫瑰园”(Lonsdale, 1977; Corliss *et al.*, 1979; 莫杰, 2004; Kaiser *et al.*, 2011)。1979 年,美国地质、生物和化学家,再次乘坐“阿尔文”深潜器对加拉帕戈斯裂谷及东太平洋海隆进行了考察,拍摄了电视纪录片。之后,美、日、法、德、加等国在世界各大洋相继发现了数百个热烟囱及其周围的生物群落(Von Damm, 1990; Shank *et al.*, 1998; 莫杰, 2004; Kelley, 2005; 肖湘等, 2010; Vrijenhoek, 2010)。1983 年,美国科学家还首次在墨西哥湾佛罗里达陡崖发现冷泉(cold seeps)及其生物群落,之后,各大洋都发现了冷泉生物群落(Paull *et al.*, 1984; Zhang *et al.*, 2004; 陈忠等, 2007; Cordes *et al.*, 2009; 冯东等, 2010; 李超伦等, 2016)。经研究表明,热液口和冷泉口周围的动物与大量微生物共生,它们主要依靠微生物利用硫化物、甲烷等化能合成有机物获得营养,被称为“暗食物链”(Hentschel *et al.*, 2001; Duperron *et al.*, 2007; 谢树成等, 2010; 苗婷婷等, 2012; 李学恭等, 2013)。

在没有阳光、没有光合作用的深邃海底,存在一个个五彩缤纷,充满生机活力的生物群落。这表明,太阳并不是地球生物圈生物的唯一能量来源,从而改变了深海动物的食物都是来自太阳能驱动的生物生产物的认知,同时也提出了深海生物多样性,以及动物生理、代谢、繁殖和种群与群落等新的课题。因此,深海热泉和冷泉群落的发现,是对经典生态学已有认知的重大挑战,是又一个重要的里程碑。

1.3 大洋底深部生物圈的发现

随着深海钻探计划(Deep Sea Drilling Program,

DSDP, 1968—1983),以及随后的大洋钻探计划(Ocean Drilling Program, ODP, 1985—2003)的实施,研究人员在取得的大洋底深部沉积物的原位样品中揭示了:海床以下几百米甚至上千米的深度内不仅有微生物存在(Parkes *et al.*, 2000; D'Hondt *et al.*, 2004; 王桂芝, 2010),而且细胞数至少有 $10^6/\text{cm}^3$,最高可达 $10^{10}/\text{cm}^3$,利用 RNA 技术测定,这些细胞处于旺盛代谢状态,并非处于休眠或死亡状况(Schippers *et al.*, 2005)。估计,地球深部生物圈(deep biosphere)的微生物,其总量至少可达地球全部生物量的 1/3 (McKenzie, 2003; Arrigo, 2005; Lipp *et al.*, 2008; 张晓华, 2016)。大洋钻探和一些陆地油井的钻探取得的原位样品分析结果(Liu *et al.*, 2019),都支持和证实了天体物理学家高德(Gold)率先提出的,地球深部存在一个由微生物构成的深的、热的生物圈(the deep hot biosphere)的假说(Gold, 1999; 李一良, 2010)。

深部生物圈的微生物处于高温、高压环境中,具有嗜压、嗜热、嗜碱、嗜酸等特性,向人类展示了未知但丰富的基因库。大洋底深部生物圈完全是由地球深部的能量和碳源支撑的生态系统(张传伦等, 2010; 王南南等, 2018; 张瑶, 2018)。由此引起人们的许多思考:如除了化能合成能源外,是否还有可被生物利用的能源,比如热能、辐射能;深部生物圈是否是地球生命的起源;目前这个圈层是否还在创造生命;大洋底深部与海洋是如何进行物质、基因交流的等等(袁训来, 2010)。因此,大洋底深部生物圈的发现,是深海生态学研究发展的又一个里程碑。

2 我国深海生态研究的进展

新中国诞生后,国家重视海洋的科技、教育和资源开发利用,对近海的资源和环境开展了多次大规模的综合调查研究,基本摸清了我国近海的状况和变动规律,为发展海洋经济、海洋强国建设奠定了良好的基础。由于国力所限,对深远海的科考力不从心。虽然从 20 世纪 70 年代末,我国即开始对太平洋多金属结核进行调查,并在多次调查的基础上,于 1991 年获得太平洋 CC 区一块多金属结核开辟区,成为继印度、法国、前苏联、日本之后第五个“深海采矿先驱投资者国家”。但直到 20 世纪末,我国大洋调查主要还仅限于寻找大洋矿产资源。但在此期间,一些发达国家纷纷由海底单一多金属结核调查,向富钴结壳、多金属软泥、热液硫化物、气体水合物、深海生物多样性、深海基因资源和底部生物圈等多元化

的科考方向发展。

进入新世纪,我国制定了向远洋、深海进军的计划,加大了深海探测设备、技术的自主研发,以及大洋、深海的科考活动,努力赶超国际先进水平。从世纪初起,先后对太平洋、印度洋和大西洋进行了调查。在 2007 年 7 月 Dy (大洋)第 19 航次,我国首次在西南印度洋发现了新的热液区,并成功取得了“黑烟囱体”的样品。之后,又在各大洋发现了数十处热液区(中国科学技术协会等, 2016)。

在我国深海生态学发展史上,以下三件事具有重要意义:

一是我国自主研制的深海载人深潜器“蛟龙”号,于 2013 年 7 月在南海的深海区深潜成功,并采集了大量珍贵深海底栖生物样品,标志着我国已具备了深海探测、开展深海生态学研究的能力。

二是中国科学院海洋研究所李新正研究员,作为首批参加“蛟龙”号试验性应用航次的学者,全程参与该航段的深海冷泉区和海山区底栖生物的考察,并在 3500 米水深的大海山区随“蛟龙”号下潜,亲自观察和采集了生物样品,成为中国首位进行深海考察的海洋生物科学家。

三是中国科学院战略性先导科技专项“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及影响”(2013—2018),经过 5 年的努力,在深海综合探测体系与能力建设、海洋化能生态系统和海山生态系统的科考取得了创新性成果;2016 年中科院“探索一号”利用自主研发的万米科考设备在马里亚纳海沟进行综合科考,是我国首次在 11000 米海沟成功进行无人深潜及探测,标志着我国深海科技进入了万米水深时代,宣示了我国海洋深海科技能力实现从“跟踪”为主向“并行”、“领先”为主的转变(李硕等, 2016; 李超伦等, 2016; 孙松等, 2017b)。

近些年,我国学者对海底热泉、冷泉和海山生物群落,深海生物多样性、深海微生物的资源开发与应用,以及深海生物采集和保真、深海生物的培养技术等研究取得了较好的成绩。如,在西太平洋海山区和东太平洋结核合同区,开展了深海微生物原位富集培养;成为继日本、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;“东方红 2 号”调查船,在马里亚纳海沟进行水动力、地质、地球物理、生物地球化学过程及演变规律科考中,发现了深海烃类降解菌;国家“973”计划“超深渊底栖动物群落空间分异机制研究”和国家科技基础资源调查专

项“西太平洋典型海山生态系统科学调查”,发现了一些新的物种,并对生物群落和差异进行了探讨;在对西太平洋雅浦海山、马里亚纳海山和卡罗琳海山的海域进行了初级生产力、浮游植物、浮游动物、底栖生物的生态调查,获得了大量生物样品(张均龙等, 2013)。目前,我国已建成了深海微生物样品库、深海大型生物样品库,为深入开展生态学研究提供支持(王淑芳等, 2012; 苗婷婷等, 2012; 郭书举等, 2012; 张武昌等, 2014; 中国科学技术协会等, 2016; 刘杰等, 2017; 郭文捷等, 2017; 郭欣雨等, 2017; 中国海洋年鉴编纂委员会, 2018; 李中石等, 2018; Liu *et al.*, 2019)。据 1953—2015 年间,对世界海沟进行研究的前 15 个国家和地区发表论文统计,中国海沟研究的论文逐年增多,2015 年已跃居美、日之后,居第三位,而海沟生态系统研究是主要内容之一(张灿影等, 2016)。总之,我国深海生态学的研究已迈开步伐,紧追国际先进水平。

3 发展我国深海生态学研究的建议

综上所述,我国深海生态学的研究已有良好的基础,为了助推发展,提出以下建议:

3.1 大力发展深海探测和钻探设备、技术,建设深海生态站和大洋钻探船

科学的发展总是和工具的改进分不开的。每当有重大的工具和技术发明,科学也就孕育着重大的飞跃。深海生态学发展的三个里程碑也是有利的证明。

我国近十几年,大洋、深海科考和研究能取得快速发展,首先是由于国家大力支持自主研发深海探测设备和技术。这才有现今青岛海洋科学与技术试点国家实验室拥有 200、1000、4000 和 10000m 谱系的“海燕”水下滑翔机研发和生产的能力;中国科学院海洋研究所建立宏观与微观、走航与定点、梯度与原位相结合的深远海环境探测技术体系,并实现了从室内模拟实验室→海洋移动实验室→深海原位实验室的跨越。这些设备和技术,为我国大洋、深海科学研究提供了很好的条件。在此基础上,为了对世界深海科学研究做出更大贡献,根据我国的财力、科技水平和需要,建议国家能立项建设深海生态站和大洋钻探船。

3.1.1 建设深海生态站 深海生态研究,开展室内模拟实验、分类鉴定、代谢过程以及适应极端环境机制的研究都是必要的,但深海生物群落的变化过程和规律的阐明离不开现场的定点、长时间的观察和

实验。比如,热泉、冷泉生物群落的生、消,动物幼体的扩散和生长发育,群落中动物与微生物共生,不同种动物之间的共生或竞争等等,以及一些假设和理论都离不开现场观察和实验。Shank 等(1998)曾用“阿尔文”号潜水器,对东太平洋中脊的一处热液口进行了长达5年的不连续观察和化合物的监测,结果表明,热液口的硫化物和铁的浓度、微生物、以及动物优势种和生物量均处于不断变化中。但因是不连续观察,热泉群落的生物从哪里来的?又如何演化?最后它们又到哪里去?不连续观察很难做出回答。为此,迫切需要长时序、连续、定点观测(于新生等, 2017)。

建议可以在南海或西太平洋海山链选址建设深海生态站,将南海生态站纳入近日由同济大学统筹协调建设的“国家海底科学观测网”的南海海底观测子网计划中。目前世界上尚无深海生态站,我国如能先行一步,势将在深海生态研究取得突破性成果,并为深海资源开发和保护提供科学支持。

3.1.2 建设大洋钻探船 海洋科学钻探、积极探索大洋深部地质和生物圈,抢占其制高点,是海洋大科学和地球科学未来发展的战略要务。而谁拥有钻探船,谁就掌握主动权。迄今,仅美、日两国拥有大洋钻探船。近几年,我国已有一些学者呼吁建造大洋钻探船。吴立新院士在2016年就提出,国家海洋重点实验室拟在未来3到5年内,推动中国大洋钻探船立项建设,并以此为平台实现深海与深地科学的协同发展,寻求地球科学突破口(青岛晚报, 2016.11.11)。汪品先院士也积极建议,他认为建造一艘中国科学大洋钻探船,是中国地球与海洋科学家多年的梦想;如果我们能够下定决心,走通过科技与产业相结合的道路建造自己的大洋钻探船,就将能问鼎世界深海研究的顶层,向建设海洋强国跨一大步(参考消息, 2016.2.16)。

3.2 以生态系统研究为中心开展深海生态研究

生态系统(ecosystem)的概念是1935年英国植物生态学家Tansley提出的。按其定义,生态系统是指生物成分和非生物成分在一定时间和空间范围内,通过彼此之间不间断的物质循环、能量流动及信息传递而相互联系、相互影响、相互制约的生态学功能单位(林文雄, 2013)。系统(system)的定义,是指彼此间相互作用、互相依赖的事物,有规律地联合的整体,是有序作用的整体。生态系统主要是功能单位,而不是生物学中的分类单位(孙儒泳, 1987)。生态系统的

研究内容包括生态系统的组成、空间结构和营养结构、能量流动、物质循环和信息传递、发展演化和经营管理等(孙鸿烈, 2005)。生态系统的概念,体现了唯物辩证法的思想,应当成为深海和大洋底深部生物圈生态研究的中心思想和议题。

根据生态系统驱动力的能源来源多样性,建议将海洋生态系统划分为海洋光生态系统、深海暗生态系统和大洋底深部生态系统三大类型。海洋光生态系统,能源来自太阳;深海暗生态系统,能源有的来自化学能(热泉、冷泉生态系统),有的来自海洋上层光生态系统的生物产物(如颗粒有机碳和动物尸体)(张瑶, 2018);大洋底深部生态系统的能源,除了化学能外,可能还有热能和放射能。由于能源不同,因此生态系统的结构和功能就有较大的差异。例如,海洋光生态系统,初级生产者主要是浮游植物,初级消费者主要是浮游动物;而深海暗生态系统,没有浮游植物,微生物是热泉和冷泉生物群落的初级生产者,无脊椎动物形成了独特的身体结构及代谢机制(姜丽晶, 2018; 曾湘, 2018);大洋底深部迄今仅发现有大量微生物,没有动物。因此,研究海洋三大生态系统的结构和功能,以及它们之间的彼此物质、物种、基因流动和变化规律应是中心议题。

在三大海洋生态系统中,由于处于不同的环境,导致生物群落也明显不同。因而各大生态系统又可再划分为次一级生态系统。如,我国的海洋光生态系统,又可划分为河口、海湾、浅海、大陆坡、上升流、红树林、珊瑚礁等生态系统(孙鸿烈, 2005)。深海暗生态系统,又可分为深海平原、海沟、海山、热泉、冷泉等生态系统。各生态系统之间还存在过渡带(ecotone),起着能量、水、营养盐、颗粒物、有机质和生物转移的通道,对探讨系统之间的关系也很重要。

将海洋划为三大生态系统,符合生态系统的定义,也有利于从系统之间的比较和联系中寻找生态学的突破点。例如,浅层海水与深渊区域海水中微生物群落表现出明显的差异(Nunoura *et al*, 2015);从海沟中分离出的嗜压菌与浅层海水中的近亲种在基因组组成方面极为不同(Lauro *et al*, 2007),原因是什么?又如生物具有高度的地域性,热泉生物群落的优势种和生物种类组成,在世界各大洋表现出较大的差异。Vrijenhoek (2010)将全球热液区划分为六个生物地理区,并对各区热泉生物群落进行比较和差异的原因进行了探讨(Vrijenhoek, 2010; 杨梅等, 2017)。这

六个生物地理区为: 东太平洋海隆北部和加拉帕戈斯裂谷区(Northern East Pacific Rift, NEPR + Galapagos Rift, GRA); 东北太平洋区(Northeast Pacific, NEP); 东南太平洋洋脊区(Southern East Pacific Rise, SEPR)和太平洋-南极海岭(Pacific-Antarctic Ridge, PAC); 中大西洋脊区(Mid-Atlantic Ridge, MAR); 中印度洋洋脊区和西南太平洋区(Central Indian Ridge, CIR+Southwest Pacific, SWR); 和西北太平洋洋区(Northwest Pacific, NWP)。

海洋三大生态系统之间并不是互相隔绝的。海流是物质运输、生物体迁移和扩散的主要运载体。深海并非一潭死水, 大洋底流不仅确实存在(Holister, 1963; 李家钢等, 2013; 管玉平, 2018), 而且深海底部有阵发性水流、甚至逆向水流, 流速可以从平静的 5cm/s 左右在若干天内突然跃变为 30—40cm/s, 个别观测点可记录到 73cm/s 的高值(Richardson *et al.*, 1981); 还发现多个深水峡谷存在着和半日潮周期具有紧密相关的上下往复环流活动(Shepard *et al.*, 1979), 深海环流存在 90 天以内的高频度变化(王桂华, 2018)。全球大部分重要的深渊都处在深海热盐环流的关键通道上。以太平洋为例, 在太平洋底层, 南大洋深层水随深海热盐环流从南向北进入西太平洋, 依次经过克马德克海沟、汤加海沟、马里亚纳海沟、伊豆-小笠原海沟, 最终到达最北部的阿留申海沟(Yanagimoto *et al.*, 2010; 谢强, 2018)。在垂向上, 气旋式环流的存在使得深渊底层水从深渊中心上涌, 进入上层深海热盐环流流系中, 而上升水体通过混合下沉进入深渊系统, 从而实现深渊与深海的水体和物质交换等(Talley, 2013)。因此, 与水动力研究相结合, 是探索生态系统之间的物流、物种流和基因流的关键。

另外, 据估计上部洋壳的平均孔隙约为 10% (曾志刚等, 2018), 推测可能是深海和大洋底深部进行物质和生物交流的一个通道。

3.3 将深海生态研究纳入海洋大科学研究计划, 支持多学科交叉和融合

为解决全球性的重大科学问题, 已出现“海洋大科学”(Ocean Megascience)研究新潮。研究聚焦在全球海洋观测、海洋科学钻探、热液过程及其生态系统、海洋生物多样性、海岸带综合管理等领域, 提出了许多待研究的重大课题。如海洋与气候、海洋与地球多圈层的相互作用、海底构造运动规律与成矿机制、深海底地壳内的微生物、海洋生物地球化学和海洋生态

系统等等。尽管研究领域和重大课题的主攻方向、内容各有侧重, 但要获得重大突破, 加强学科交叉和融合很重要。

路甬祥(2005)曾指出“学科交叉是学术思路的交融, 实质上是交叉思维方式的综合, 系统辩证思维的体现。自然现象复杂多样, 仅从一种视角研究事物, 必然有很大的局限性, 不可能揭示其本质, 也不可能深刻地认识其全部规律。因此, 唯有从多视角、采取交叉思维的方式, 进行跨学科研究, 才可能完成正确的认识”。

瞄准国际海洋大科学的发展, 2018 年中科院决定依托中科院海洋研究所, 联合中科院其他 12 个研究机构建立海洋大科学中心, 制定了开展“印太汇聚区多圈层相互作用, 在印度洋、太平洋建立水深、立体、实时探测体系, 以及海-气-地-生多圈层相互作用的理论和模式, 和海洋生命过程的认知”等核心科研内容。青岛海洋科学与技术试点国家实验室、中国海洋大学等单位, 也计划加大深海探测和生命过程与演化, 以及海沟地形、洋流运动等关键科学问题的研究。期望国家有关部门在“十四五”期间, 能加大对深海生态研究的支持。特别希望能支持非生物、生态专业的海洋学者参与或主持有关深海生态的科学研究。

最后, 建议加强深海探测、钻探和有关深海生态研究的国际合作。如正在实施的国际大洋发现计划(International Ocean Discovery Program, IODP, 2013—2023), 该计划重点发展海洋与气候变化、生物圈前沿、地球表面环境的联系和运动中的地球四大领域。中国作为国际大洋钻探计划的成员, 应积极参与(张晓华, 2016)。

参 考 文 献

- 于新生, 阎子衿, 朱明亮等, 2017. 自主式深海海底溶质通量原位观测站研究进展. 海洋科学, 41(6): 150—161
- 王南南, 焦念志, 2018. 深海溶解有机碳库是怎样形成的. 见: 10000 个科学难题-海洋科学卷. 北京: 科学出版社, 391—395
- 王桂芝, 2010. 为什么海床深部沉积物中有生命的存在. 见: 10000 个科学难题-地球科学卷. 北京: 科学出版社, 913—915
- 王桂华, 2018. 深海环流的高频变化及机理. 见: 10000 个科学难题-海洋科学卷. 北京: 科学出版社, 32—34
- 王淑芳, 陈 月, 钱媛媛, 2012. 深海热液喷口金属硫化物中甲烷菌的多样性研究. 海洋科学, 36(6): 31—38
- 中国科学技术协会主编, 中国海洋学会编著, 2016. 海洋科学学科发展报告(2014—2015). 北京: 中国科学技术出版社

- 中国海洋年鉴编纂委员会, 2018. 中国海洋年鉴-2017. 北京: 海洋出版社
- 冯 东, 陈 忠, 陈多福, 2010. 海底冷泉系统及其生态系统. 见: 10000 个科学难题-地球科学卷. 北京: 科学出版社, 462—465
- 刘 杰, 孙雅雯, 郭昱东等, 2017. 海山微生物多样性研究进展. 海洋科学, 41(1): 123—130
- 孙 松, 孙晓霞, 2017a. 热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响——中国科学院海洋先导专项介绍. 海洋与湖沼, 48(6): 1127—1131
- 孙 松, 孙晓霞, 2017b. 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. 海洋与湖沼, 48(6): 1132—1144
- 孙鸿烈主编, 2005. 中国生态系统(上册). 第五章: 海洋生态系统. 北京: 科学出版社
- 孙儒泳编著, 1987. 动物生态学原理. 北京: 北京师范大学出版社
- 李 硕, 唐元贵, 黄 琰等, 2016. 深海技术装备研制现状与展望. 中国科学院院刊, 31(12): 1316—1325
- 李一良, 2010. 地球存在一个深部生物圈吗? 见: 10000 个科学难题-地球科学卷. 北京: 科学出版社, 446—449
- 李中石, 汪 岷, 罗志祥等, 2018. 马里亚纳海沟浮游病毒垂直分布及动态变化. 海洋与湖沼, 49(6): 1251—1258
- 李学恭, 徐 俊, 肖 湘, 2013. 深海微生物高压适应与生物地球化学循环. 微生物学通报, 40(1): 59—70
- 李冠国, 范振刚, 2011. 海洋生态学. 2 版. 北京: 高等教育出版社
- 李家钢, 徐晓庆, 2013. 海洋深层水动力环境调查技术回顾. 海洋科学, 37(6): 121—125
- 李超伦, 李富超, 2016. 深海极端环境与生命过程研究现状与对策. 中国科学院院刊, 31(12): 1302—1307
- 杨 梅, 李新正, 2017. 深海热液口大型底栖生物遗传多样性的研究进展. 海洋科学, 41(6): 126—133
- 肖 湘, 李一良, 2010. 深海热液生态系统. 见: 10000 个科学难题-地球科学卷. 北京: 科学出版社, 952—954
- 张 瑶, 汤 凯, 2018. 深海生物圈的能量供给从何而来. 见: 10000 个科学难题-海洋科学卷. 北京: 科学出版社, 425—428
- 张传伦, 谢 伟, 2010. 海洋古菌在“极端”环境中是如何生存的? 见: 10000 个科学难题-地球科学卷. 北京: 科学出版社, 369—372
- 张均龙, 徐奎栋, 2013. 海山生物多样性研究进展与展望. 地球科学进展, 28(11): 1209—1216
- 张灿影, 於维樱, 王 琳等, 2016. 基于文献计量学的国际海沟研究发展态势分析. 海洋科学集刊, (1): 308—320
- 张武昌, 于 莹, 李超伦等, 2014. 海山区浮游生态学研究. 海洋与湖沼, 45(5): 973—978
- 张晓华, 2016. 海洋微生物学. 2 版. 北京: 科学出版社
- 陈 忠, 杨华平, 黄奇瑜等, 2007. 海底甲烷冷泉特征与冷泉生态系统的群落结构. 热带海洋学报, 26(6): 73—82
- 陈旭森, 徐奎栋, 2014. 深海原生动物多样性研究进展. 海洋科学, 38(10): 119—126
- 邵宗泽, 2018. 地球生命起源于深海吗? 又是如何起源的呢? 见: 10000 个科学难题-海洋科学卷. 北京: 科学出版社, 353—356
- 苗婷婷, 邢 翔, 杜宗军等, 2012. 柄海鞘共附生细菌的分离培养与系统发育多样性研究. 海洋科学进展, 30(1): 111—118
- 林文雄主编, 2013. 生态学. 2 版. 北京: 科学出版社
- 罗伯特·鲍尔德, 2006. 伍兹霍尔深海潜航研究的历史. 见: 美国国家科学研究理事会海洋研究委员会. 海洋揭秘 50 年——海洋科学基础研究进展. 北京: 科学出版社, 93—116
- 姜丽晶, 邵宗泽, 2018. 深海热液口无脊椎动物与化能自养微生物是如何互利共生的? 见: 10000 个科学难题-海洋科学卷. 北京: 科学出版社, 387—390
- 袁训来, 2010. 生命起源. 见: 10000 个科学难题-地球科学卷. 北京: 科学出版社, 179—181
- 莫 杰编著, 2004. 海洋地学前缘. 北京: 海洋出版社
- 郭文捷, 赵 瑾, 齐宏涛等, 2017. 南海冷泉区贻贝 (*Bathymodiolus platifrons*) 附生菌的分离培养与多样性分析. 海洋科学, 41(2): 89—95
- 郭书举, 史大永, 李富超等, 2012. 深海芽孢杆菌 E401B03 次生代谢产物分离和结构鉴定. 海洋科学, 36(6): 28—30
- 郭欣雨, 李超伦, 2017. 南海北部冷泉平端深海偏顶蛤的主要生化成分及其与热液和近岸种的对比研究. 海洋科学, 41(6): 65—71
- 理查德·巴伯, 安娜·希尔汀, 2006. 生物海洋学成就. 见: 美国国家科学研究理事会海洋研究委员会. 海洋揭秘 50 年——海洋科学基础研究进展. 北京: 科学出版社, 13—16
- 曾 湘, 邵宗泽, 2018. 海底热液区特殊生态系统的演替. 见: 10000 个科学难题-海洋科学卷. 北京: 科学出版社, 383—386
- 曾志刚, 张玉祥, 2018. 海底下的“海洋”与热液活动有关吗? 见: 10000 个科学难题-海洋科学卷. 北京: 科学出版社, 593—594
- 谢 强, 2018. 深渊环流是深海热盐环流的一部分吗? 见: 10000 个科学难题-海洋科学卷. 北京: 科学出版社, 25—28
- 谢树成, 殷鸿福, 2010. 地球生物学与微生物地质过程. 见: 10000 个科学难题-地球科学卷. 北京: 科学出版社, 213—216
- 路甬祥, 2005. 学科交叉与交叉科学的意义. 见: 李喜先主编. 21 世纪 100 个交叉科学难题. 北京: 科学出版社
- 管玉平, 2018. 究竟是什么力量使大洋热盐环流绕地球流动? 见: 10000 个科学难题-海洋科学卷. 北京: 科学出版社, 29—31
- 翟世奎, 2018. 海洋地质学. 青岛: 中国海洋大学出版社
- Arrigo K R, 2005. Marine microorganisms and global nutrient cycles. *Nature*, 437(7057): 349—355
- Cordes E E, Bergquist D C, Fisher C R, 2009. Macro-ecology of Gulf of Mexico cold seeps. *Annual Review of Marine Science*, 1: 143—168
- Corliss J B, Dymond J, Gordon L I *et al.*, 1979. Submarine thermal springs on the Galápagos Rift. *Science*, 203(4385): 1073—1083
- D'Hondt S, Jørgensen B B, Miller D J *et al.*, 2004. Distributions of microbial activities in deep seafloor sediments. *Science*, 306(5705): 2216—2221

- Duperron S, Sibuet M, MacGregor B J *et al*, 2007. Diversity, relative abundance and metabolic potential of bacterial endosymbionts in three *Bathymodiolus* mussel species from cold seeps in the Gulf of Mexico. *Environmental Microbiology*, 9(6): 1423—1438
- Gold T, 1999. *The Deep Hot Biosphere. The Myth of Fossil Fuels*. New York: Springer
- Hentschel U, Schmid M, Wagner M *et al*, 2001. Isolation and phylogenetic analysis of bacteria with antimicrobial activities from the Mediterranean sponges *Aplysina aerophoba* and *Aplysina cavernicola*. *FEMS Microbiology Ecology*, 35(3): 305—312
- Holister G S, 1963. Cyclic-stress reduction within pin-loaded lugs resulting from optimum interference fits. *Experimental Mechanics*, 3(9): 222—224
- Kaiser M J, Attrill M J, Jennings S *et al*, 2011. *Marine Ecology: Processes, Systems, and Impacts*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press
- Kelley D S, 2005. From the mantle to microbes: the lost city hydrothermal field. *Oceanography*, 18(3): 32—45
- Lauro F M, Chastain R A, Blankenship L E *et al*, 2007. The unique 16s rRNA genes of piezophiles reflect both phylogeny and adaptation. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(3): 838—845
- Lipp J S, Morono Y, Inagaki F *et al*, 2008. Significant contribution of Archaea to extant biomass in marine subsurface sediments. *Nature*, 454(7207): 991—994
- Liu J W, Zheng Y F, Lin H Y *et al*, 2019. Proliferation of hydrocarbon-degrading microbes at the bottom of the Mariana Trench. *Microbiome*, 7(1): 47, <http://dx.doi.org/10.1186/s40168-019-0652-3>.
- Lonsdale P, 1977. Clustering of suspension-feeding macrobenthos near abyssal hydrothermal vents at oceanic spreading centers. *Deep Sea Research*, 24(9): 857—863
- McKenzie J A, 2003. The search for life within the seafloor ocean: A journey to “The Edge of the Sea”. EGS-AGU-EUG Joint Assembly
- Nunoura T, Takaki Y, Hirai M *et al*, 2015. Hadal biosphere: Insight into the microbial ecosystem in the deepest Ocean on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(11): E1230—E1236
- Parkes R J, Cragg B A, Wellsbury P, 2000. Recent studies on bacterial populations and processes in seafloor sediments: A review. *Hydrogeology Journal*, 8(1): 11—28
- Paull C K, Hecker B, Commeau R *et al*, 1984. Biological communities at the Florida Escarpment resemble hydrothermal vent taxa. *Science*, 226(4677): 965—967
- Richardson M J, Wimbush M, Mayer L, 1981. Exceptionally strong near-bottom flows on the continental rise of Nova Scotia. *Science*, 213(4510): 887—888
- Schippers A, Neretin L N, Kallmeyer J *et al*, 2005. Prokaryotic cells of the deep sub-seafloor biosphere identified as living bacteria. *Nature*, 433(7028): 861—864
- Shank T M, Fornari D J, Von Damm K L *et al*, 1998. Temporal and spatial patterns of biological community development at nascent deep-sea hydrothermal vents (9°50'N, East Pacific Rise). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 45(1—3): 465—515
- Shepard F P, Marshall N F, McLoughlin P A *et al*, 1979. *Currents in Submarine Canyons and Other Seavalleys*. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists
- Talley L D, 2013. Closure of the global overturning circulation through the Indian, Pacific, and Southern Oceans: Schematics and transports. *Oceanography*, 26(1): 80—97
- Von Damm K L, 1990. Seafloor hydrothermal activity: Black smoker chemistry and chimneys. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 18: 173—204
- Vrijenhoek R C, 2010. Genetic diversity and connectivity of deep-sea hydrothermal vent metapopulations. *Molecular Ecology*, 19(20): 4391—4411
- Yanagimoto D, Kawabe M, Fujio S, 2010. Direct velocity measurements of deep circulation southwest of the Shatsky Rise in the western North Pacific. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57(3): 328—337
- Zhang C L, Lanoil B, 2004. Geomicrobiology and biogeochemistry of gas hydrates and cold seeps. *Chemical Geology*, 205(3—4): 187—194

ADVANCES IN DEEP-SEA ECOLOGY RESEARCH AND SEVERAL SUGGESTIONS

LI Yong-Qi, WANG Wei

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

Abstract The exploration and study of the deep ocean and its bottom biosphere is the research focus of modern ocean mega-sciences and future ocean science, which has important strategic significance. One of its important contents is the study on deep-ocean and deep ecology. In this paper, three milestones in the development of deep-sea ecology, and the research progresses in this subject in China are briefly reviewed. In addition, suggestions are put forward to vigorously develop deep-sea exploration and drilling equipment and technology, to build deep-sea ecological stations and ocean drilling ships, to conduct deep-sea ecological research focusing on ecosystem, to incorporate deep-sea ecological research into the research plans of the state and relevant departments, and to support interdisciplinary and integrated research.

Key words deep-sea exploration; ocean drilling; ocean mega-sciences; hydrothermal community; cold spring community; marine ecosystem