

# 潜水器在深海生物多样性研究中的应用进展

张灿影<sup>1</sup>, 郭琳<sup>1</sup>, 鲁景亮<sup>2</sup>, 冯志纲<sup>1</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院兰州文献情报中心, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 简要介绍了世界主要海洋国家潜水器的建设情况, 并重点分析了潜水器在深海不同生境生物多样性研究中的应用, 包括热液系统、冷泉、海山、峡谷和海沟等, 以及深海生物多样性保护等几个方面。旨在为我国深海生物多样性研究提供参考, 并推动我国潜水器在深海科学考察中的应用。

**关键词:** 潜水器; 深海生境; 生物多样性; 科学考察

**中图分类号:** Q15      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3096(2019)01-0112-09

**DOI:** 10.11759/hyqx20180726001

潜水器是一种具有水下观察和作业能力的活动深潜装置, 一般分为载人潜水器(human occupied vehicle, HOV)和无人潜水器(underwater vehicle, UUV), UUV 又分为有缆遥控潜水器(remotely operated vehicle, ROV)、无缆自治潜水器(autonomous underwater vehicle, AUV)和混合遥控潜水器(hybrid remotely operated vehicle, HROV)。HOV 可携带科研人员进入海洋深处在现场直接观察、分析和评估, 操作机械手实高效作业。ROV 可以由水面母船上的控制人员通过水下电视、声呐和遥控机械手等专用设备, 进行长时间的水下作业。AUV 能自行控制水下航行, 适用于区域性详细勘查。HROV 结合了 ROV 和 AUV 的技术优势, 集合了两种潜水器的功能。与其他深海科考装备相比, 潜水器具备完善的动力系统、操作系统并能灵活搭载各类作业仪器设备, 在深海领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。

深海一般是指水深在 200 m 以上的海域, 通常包括半深海(bathyal, 水深 200~2 000 m, 也叫次深海)、深渊(abysal, 水深 2 000~6 000 m)和超深渊区(hadal, 水深大于 6 000 m, 也叫海斗深渊)<sup>[2]</sup>, 具有静水压力高、氧气浓度低、黑暗、寒冷、地质活动频繁且食物匮乏等特点, 占海洋面积的 90%以上, 是地球上最大的生态系统, 但我们对其中大部分生物知之甚少<sup>[3]</sup>。20 世纪后期开始, 世界各国对深海研究有了战略性认识的提升, 纷纷加大了对潜水器的研制和使用, 使得近距离研究深海热液、冷泉、海山和海斗深渊等深海生境成为可能, 有关深海生物多样性的研究日益增多, 深海调查研究也更为全面和深入。

目前, 深海底栖生物调查方法主要包括拖网、海底照相和录像<sup>[4]</sup>。其中拖网是评估栖息地生物种类最

常见的一种方法, 但拖网过程中容易造成样本破碎, 而且不能捕捉快速移动的等足类和端足类甲壳动物, 导致准确率不高<sup>[5]</sup>。而一般潜水器都具有灵活的机械手, 配置先进的水下照明、照相和高清摄像系统, 并可搭载各种传感器、探测和取样设备, 可在不破坏深海栖息地的条件下直接对深海底栖生物和海底沉积物取样, 提高了海底调查的准确率和有效性<sup>[6]</sup>。世界各国研究人员利用潜水器在深海物种新发现、深海生物相似性和连通性、扩散途径、生物多样性的影响因素和生物群落营养结构等方面取得了丰厚的科研成果。本文简要概述了国内外主要海洋国家潜水器的建设现状, 并着重分析了潜水器在深海生物多样性领域的应用情况, 为我国深海生物多样性研究提供参考, 并推动我国潜水器在深海科学考察中的应用。

## 1 国际主要海洋国家潜水器发展现状

美国是较早开展载人潜水器研究的国家之一, 美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)下属的美国国家深潜装备中心(NDSF)负责协调使用国家资助的大型潜水器<sup>[7]</sup>, 负责管理运行 HOV Alvin、ROV Jason/Medea、AUV Sentry。比较著名的载人潜水器是 1964 年建造

收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-09-03

基金项目: 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划子项目(2016ASKJ11-ZRW03)

[Foundation: Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) Aoshan Technology innovation programme, No.2016ASKJ11-ZRW03]

作者简介: 张灿影(1988-), 女, 安徽阜阳人, 馆员, 硕士, 主要从事海洋战略情报研究, E-mail: zhangcanying@qdio.ac.cn; 冯志纲, 通信作者, 男, 研究馆员, 主要从事图书馆管理与情报研究, E-mail: zhi@qdio.ac.cn

的 Alvin 号, 可以下潜到 4 500 m 的深海, 迄今已经成功完成 5 000 次的下潜, 是全球应用最为频繁和成功的载人潜水器<sup>[8]</sup>。2013 年进行了最大一次改造, 在照明灯、主体材料、推进器、机械手、外壳、观察窗、压水系统和蓄电池等方面做了较大改进, 升级后的阿尔文号拥有触摸屏和全新的导航系统, 新的照明和成像系统可拍摄更高质量的图像和视频质量, 新采用的锂电池容量是老式铅酸蓄电池的两倍, 下潜时间长达 10h 多<sup>[9]</sup>。

自 2011 年起, WHOI 针对极地海冰调查, 开始在 Nereus 号(2015 年 5 月失踪)的基础上, 研制新型水下航行器 HROV 即 Nereid UI。该航行器最大工作水深 2000 m, 携带 20 km 的微细光缆, 并搭载多种生物、化学传感器, 可进行大范围的冰下观测和取样等作业<sup>[10]</sup>。此外, 美国夏威夷大学<sup>[11]</sup>和蒙特雷湾水族馆研究所<sup>[12]</sup>也分别拥有 HOV Pisces IV(2 000 m)、HOV Pisces V(2 000 m)、ROV Lu'ukai(6 000 m)和 ROV Tiburon(4 000 m)、ROV Doc Ricketts(4 000 m)、ROV Ventana(1 850 m)、AUV Dorado(6 000 m)。

俄罗斯是目前世界上拥有载人潜水器最多的国家, 比较著名的是 1987 年建成的 6000 m 级的 MIR 载人潜水器(“MIR-1”号与“MIR-2”号), 目前由俄罗斯科学院 P.P 希尔绍夫海洋研究所(IORAS)管理运营, 自 1987 年投入使用以来, MIR 潜水器就一直从事多种科研任务, 在海底热液综合考察中, 发现大量的铁、锰、镍、铜、锌、钴等金属结核及其他硫化物金属矿床<sup>[13]</sup>。

日本代表性的海洋研究机构日本海洋科技中心<sup>[14]</sup>(JAMSTEC)十分重视基础技术开发与应用, 是世界潜水器领域的研究中心, 拥有日本大部分的潜水器, 包括 HOV Shinkai2000(2 000 m)、HOV Shinkai6500(6 500 m)、ROV Hyper Dolphin(3 000 m)、ROV Kaiko(11 000 m, 2003 年丢失)、ROV kaiko7000(7 000 m)和 AUV Urashima(3 500 m)。其中 Shinkai6500 载人潜水器于 1989 年建成, 水下作业时间 8 h, 自 1991 年开始服役以来, 主要在太平洋、大西洋和印度洋从事海底地形、地质和海洋生物的调研, 截止到 2017 年下潜次数超过了 1 500 次。2012 年的 3 月, 日本海洋科学技术中心对 Shinkai6500 进行了最大规模的一次升级改造, 将原来的主摆动式船尾推进器改为两个中等大小的船尾推进器, 浮力材料换成复合泡沫塑料, Shinkai6500 最初配备了银-锌电池, 2004 年换成了锂离子电池; 配备的灯光是汽车灯照明亮度的

3~4 倍。在没有悬浮物质的海水中, 每一束灯光都可以照见潜水器周围 10 m 的范围<sup>[15]</sup>。

英国国家海洋中心(NOC)是英国著名海洋研究机构, 拥有众多 AUV 和 ROV, 包括 AUV Autosub 6000 和 Autosub LR 号(BoatyMcBoatface), 最大下潜深度均为 6 000 m, ROV Isis 和 HyBIS, 分别可下潜至 6 500 m 和 6 000 m<sup>[16]</sup>。2017 年 6 月, 英国南安普顿大学的研究人员首次采用 AUV BoatyMcBoatface 捕捉到了地球上最冷深海海域—南极底层水的温度、流速等数据<sup>[17]</sup>。

法国海洋开发研究院(Iframer)1985 年研制成的 Nautilie 号潜水器最大下潜深度可达 6 000 m, 累计下潜了 1 500 多次<sup>[18]</sup>, 完成过多金属结核区域, 深海底生态等调查, 以及沉船、有害废料等搜索任务<sup>[19]</sup>。VICTOR 6000 是远程遥控水下机器人 ROV, 服务于法国的 Ifremer 船队, 是致力于海洋科学研究的深海远程操控潜器, 曾于 1999 年探测格陵兰 5 500 m 海底。潜水器下部是模块化的科学平台, 可搭载大多数仪器以及采样设备, 拥有 7 个功能机械臂与 5 个功能抓臂, 起重均在 100kg 以上, 作业深度可达 6 000 m<sup>[20]</sup>。

德国亥姆霍兹基尔海洋科学研究中心<sup>[21]</sup>(GEOMAR)是德国著名海洋研究机构, 拥有一个技术保障中心, 负责运营一些大型装置, 包括 ROV Kiel(6 000 m), ROV Phoca(3000 m), AUV Abyss(6 000 m)、AUV Jago(400 m)和 AUV Aegir(200 m)。

## 2 我国潜水器发展现状

在国家 863 计划和中国科学院战略性先导科技专项等项目的支持下, 我国潜水器数量不断增加, 且种类多样, 基本满足我国深海海洋科学研究与资源探测需求<sup>[22]</sup>, 目前主要由中国科学院沈阳自动化研究所、上海交通大学、中国船舶重工集团公司第七〇二研究所和哈尔滨工程大学牵头联合其他机构进行研究开发<sup>[23]</sup>, 由中国科学院、国家深海基地管理中心和中国地质调查局运行管理, 具体潜水器情况见表 1。其中 2012 年开始服役的“蛟龙号”7 000 m 级深海载人潜水器, 是目前世界上下潜最深的载人潜水器。“深海勇士号”关键部件国产化率达 91.3%, 主要部件国产化率达 86.4%, 大大提高了海洋装备科技的国产化水平<sup>[23]</sup>。“海马号”和“潜龙一号”分别是我国自主研发的下潜深度最大、国产化率最高的无人遥控潜水器和无缆自治潜水器。自投入使用以来, “蛟龙号”、“海马号”和“潜龙一号”等潜水

器在中国南海、太平洋和印度洋等海域多次下潜,进行了现场观察与采样,作业地形涵盖了海山、冷泉、热液、海沟、海盆等典型海底地形区域,为开展深海

铁锰结核、天然气水合物、沉积动力过程和生物多样性等研究提供了重要的科学依据,大大提高了我国深海研究能力。

表 1 我国主要潜水器及其性能指标

Tab. 1 Main submersibles and their performance indicators in China

中国潜器	类型	下潜深度/m	服役起始时间	母船	运营机构
蛟龙号	HOV	7 000	2012 年	向阳红 09	国家深海基地管理中心
深海勇士号	HOV	4 500	2018 年	探索一号	中国科学院深海科学与工程研究所
发现号	ROV	4 500	2014 年	科学号	中国科学院海洋研究所
海斗号	ARV	10 767	2015 年	探索一号	中国科学院深海科学与工程研究所
海龙一号	ROV	3 500	2005 年	大洋一号	国家深海基地管理中心
海龙二号	ROV	3 500	2009 年	大洋一号	国家深海基地管理中心
潜龙一号	AUV	6 000	2013 年	向阳红 10	国家深海基地管理中心
潜龙二号	AUV	4 500	2015 年	向阳红 10	国家深海基地管理中心
探索号	AUV	4 500	2017 年	科学号	中国科学院海洋研究所
海马号	ROV	4 500	2015 年	海洋六号	中国地质调查局广州海洋地质调查局
海狮号	ROV	4 000	2009 年	海洋六号	中国地质调查局广州海洋地质调查局

注:“海龙一号”于 2007 年丢失。

### 3 潜水器在深海生物多样性科学考察中的应用

检索 Web of Science 科学引文索引(Science Citation Index Expanded, SCIE)数据库中潜水器相关研究论文,共检索到 3 413 条,文献类型为 Article、Proceedings paper、和 Review,检索日期 2018 年 5 月 4 日。

分析潜水器研究论文的附加关键词和作者关键词,发现除了潜水器载体结构、控制系统、导航系统、能源系统、推进系统和通信系统等技术性关键词外,潜水器海洋科学研究关键词前 15 位分别是热液喷口(hydrothermal vent)、冷水珊瑚(cold-water corals)、原位测量(in situ measurements)、地中海(Mediterranean Sea)、冷泉(cold seep)、新物种(new species)、海山(seamount)、大西洋中脊(Mid-Atlantic Ridge)、分类(taxonomy)、生物多样性(biodiversity)、天然气水合物(gas hydrate)、深海珊瑚(*Lophelia pertusa*)、墨西哥湾(Gulf of Mexico)、栖息地(habitat)和巨型动物(megafauna),除地中海、大西洋中脊和墨西哥湾等地域性关键词和海底热液喷口、冷泉和海山等深海生境关键词外,主要关键词是围绕深海生物科学领域,这可能得益于国际海洋生物普查计划(CoML)中的深海海洋生物多样性普查(CeDAMar)、欧洲海热点生

态系统研究及人类活动的影响(HERMIONE)、深海生态系统科学考察国际网络(INDEEP)以及超深渊生态系统研究计划项目(HADES)等大型国际计划和项目的实施,尤其是 CoML 计划的开展,对深海、海山、洋中脊、陆架边缘、冷泉、热液及南北极等诸多特殊生境的生物多样性和分布进行了普查,获得了大量新发现和研究成果<sup>[24]</sup>。因此本文主要概述潜水器在深海生物多样性科学考察中的应用研究进展。

#### 3.1 深海热液

人们对热液的研究始于 20 世纪 70 年代,相比于冷泉,深海热液更被人熟知,相关研究也更多,是目前国际上开展深海生物勘察研究最为活跃的区域之一<sup>[1]</sup>,鉴于深海热液喷口所处的特殊环境,利用潜水器可直接对海底生物进行检测,对海底环境及其物理、化学参数进行直接的测定<sup>[25]</sup>。1977 年美国阿尔文号在加拉帕哥斯(Galapagos)断裂带首次发现了海底热液和其中的生物群落<sup>[26]</sup>,截至目前在全球大洋中已发现了 649 个热液活动区<sup>[27]</sup>,在热液生物群落组成方面有了较为深入的认识<sup>[25]</sup>。

深海热液系统主要分布在海底洋中脊<sup>[25]</sup>,温度最高可达 400℃,通过潜水器的下潜观测和取样,发现在这样一个高温、高压、缺氧的海底热液区生态系统中,存在着细菌、古菌、病毒、蠕虫、贻贝、蟹类、虾类和水母等生物群落<sup>[25, 28]</sup>。Pescadero 盆地热

液喷口是蒙特利湾海洋研究所研究人员利用 ROV Doc Ricketts 发现的目前太平洋周围被发现的最深的高温热液喷口,位于加利福尼亚湾表层之下 3 800 m 处,通过后续的 3 次下潜探索,研究人员发现加利福尼亚海湾南部的热液喷口至少有 3 种不同类型,且每种环境都供养着它们自己独特的生物群落<sup>[29]</sup>。有研究表明海水深度、区域地质学特征、喷口热液的温度和化学成分等是影响喷口周围动物群落分布的重要因素<sup>[25, 28, 30]</sup>, Goffredi 等<sup>[30]</sup>利用 ROV Doc Ricketts 收集了相距 75 km Alarcón 山脊和 Pescadero 盆地两个热液喷口处的水体样本,并进行了高通量 DNA 测序,发现即使相邻热液喷口也有完全不同的生物群落,两个喷口处的 2/3 的生物都不相同,具有丰富的生物多样性。

随着潜水器对深海热液的多次下潜考察,发现了许多新的物种和生命形式,而且被发现的海底热液区生物新种中,大多数均为热液环境的特有种。2007 年中国远洋科学考察船“大洋一号”在 DY115-19 航次中通过租用伍兹霍尔海洋研究所的 AUV ABE 首次在西南印度洋超慢速洋中脊发现的活动热液喷口“龙气”<sup>[31]</sup>(Dragon's Breath)。Copley 等<sup>[32]</sup>利用 ROV Kiel 在“龙气”热液喷口处发现了 6 种新物种,包括 1 种“霍夫”蟹、2 种螺类、1 种帽贝、1 种鳞沙蚕和 1 种深海蠕虫。Rouse 等<sup>[33]</sup>利用 ROV Tiburon 在加利福尼亚湾水深 3700 m 的深热液喷口发现最深异涡虫新物种 *Xenoturbella profunda*。

热液喷口微生物化能合成作用和动物与微生物之间的共生关系一直是热点研究问题。微生物通过化能合成作用充当热液生物的主要供给者,构成了深海热液喷口生物赖以生存的食物链的基础<sup>[34]</sup>,其中  $\epsilon$ -变形杆菌占支配地位<sup>[25]</sup>。McNichol 等<sup>[35]</sup>利用 ROV Jason 携带的等压气密取样器(IGTs)在东太平洋 Crab Spa 热液喷口处收集了含有微生物的流体样本,在保持着与深海环境相同的压力和温度的情况下,利用纳米稳定性同位素质谱技术(NanoSIMS),在样本中加入硝酸盐、氢气和氧气等化学物质,结果表明一种被称为 *Campylobacteria* 的微生物,之前被称为 *Epsilonproteobacteria*,是主要的碳生产者,研究人员估计每天全球深海热液系统微生物群落能够产生 4000t 有机碳供喷口生物消费。在过去几年中,研究人员越来越明确了深海热液喷口微生物的硝酸盐还原作用。Pérezrodríguez 等<sup>[36]</sup>利用阿尔文号收集了东太平洋海隆和大西洋洋中脊 3 个不同类型的深海热液微生物群落样本,进行了膜结合硝酸盐还原酶

(Nar)基因的编码研究,发现 Nar 催化硝酸盐还原反应很可能与温度和较少的还原性环境有关。Ikuta 等<sup>[37]</sup>利用 ROV Hyper Dolphin 在相模湾初岛以及冲绳中部海槽采集到了深海 1 000 m 处的 *Calymene okutanii*,并在其足部注射了血清素,成功完成了世界首例的 *C. okutanii* 诱导产卵,并在其卵的细胞外侧发现了成体腮细胞中的共生菌,这是一种全新的共生菌遗传模式,对于理解深海宿主与共生菌之间的相互作用具有重要意义。

### 3.2 深海冷泉

冷泉是零散分布于海底碳氢化合物泄漏区并具有高生产力的海洋生态系统。自 1983 年美国阿尔文号第一次在墨西哥湾佛罗里达陡崖 3 200 m 深发现海底冷泉<sup>[38]</sup>,目前潜水器发现的冷泉沿大陆架边缘已遍布于所有的主要海区<sup>[39]</sup>。通过潜水器对全球各地的冷泉多次下潜,研究人员认为与海底热液喷口类似,冷泉也存在着独特的生物群落<sup>[40]</sup>,而且因冷泉流体的化学成分、甲烷流体流速、冷泉地理位置和深度和氧气、硫化物浓度等的差异性<sup>[40-41]</sup>,不同地方的冷泉系统生物群落结构不同。冷泉化能合成生态系统中的微生物及其丰富,它们能够利用甲烷或者其他碳氢化合物生存,为化能合成生物群落繁衍提供了碳源和能量,供养着管状蠕虫、蛤类、贻贝类、多毛类动物以及海星、海胆、海虾等一级消费者和鱼、螃蟹、扁形虫、冷水珊瑚等次级消费者<sup>[42-43]</sup>。位于冷泉中的细菌群落,与非冷泉区的群落相比,其物种的丰度、群落组成及空间尺度大不相同。Pop 等<sup>[44]</sup>利用 ROV Quest 采集了东地中海 9 个不同冷泉区的沉积物,借助自动核糖体间隔基因分析(ARISA)技术和 454 高通量测序技术,发现冷泉区与非冷泉区细菌群落组成以及物种多样性的空间变化等特征大不相同。

冷泉区的特点是通常有许多从海底沉积物中升起的甲烷气泡串,沿卡斯卡迪亚断层(Cascadia fault)ROV Hercules 发现了超过 1 000 个气泡串,分布在 800 km 的距离上。卡斯卡迪亚断层的板块构造活动促进了甲烷的产生和渗出,越来越多的冷泉在此处被发现,冷泉区的温度大致与周围海水的温度相近,沿卡斯卡迪亚断层温度为 2~4℃。Seabrook 等<sup>[45]</sup>利用 ROV Hercules 对在卡斯卡迪亚断层新发现的 8 个冷泉区进行了生物群落的调查,发现了令人震惊的动物群落多样性,并利用收集到的样品研究了冷泉

生物物种的分布、变异和复杂性,首次在 Heceta 冷泉区这一持续性低氧区发现了大量的管虫,而人们之前认为在该海区中的其他冷泉区内管虫缺失就是由于该地区的低氧造成的。Rouse 等<sup>[46]</sup>利用 ROV Doc Ricketts 在加利福尼亚湾水深 1 700 m 的深海冷泉中发现的新异涡虫物种 *Xenoturbella churro* 有助于研究人员更好地了解早期动物进化。

2015 年广州海洋地质调查局利用我国自主研发的 4 500 m 级“海马”号 ROV 在南海的西沙海域首次发现了海底巨型活动性“冷泉”,这也是“海马”号研发成功后首次应用于海洋调查,故将该“冷泉”命名为“海马冷泉”,冷泉生物群广泛发育,管状蠕虫、蛤类及贻贝等多种冷泉生物共存,其中贻贝分布最为广泛,不同种类和不同生长期生物在空间上交互分布<sup>[47]</sup>。

### 3.3 海山

海山区是深海生物多样性热点区域<sup>[48]</sup>,也是独特物种繁荣生长的家园。许多研究人员利用潜水器对海山生物丰度、分布规律、种群关系以及群落结构进行了研究。Pineda 等<sup>[49]</sup>利用载人潜水器 Deep Rover 2 在 Hannibal Bank 海山发现了大量红蟹聚集在海底低氧水域中,经过 DNA 测序,该螃蟹被鉴定为是 *Pleuroncodes planipes* 物种,重点调查了形成这一丰富的生态系统的生物和物理过程,还将进一步针对高生物多样性开展研究。2016 年英国研究人员利用 ROV Isis 和 Autosub 6000 捕捉了生活在苏格兰以西 200~450 km 的东北大西洋 4 个海山上的物种,包括珊瑚、食肉性鮫鱈鱼和甲壳类动物,阐明这些物种在不同地点的相互关系,了解动物种群之间的关系对于在英国大陆边缘规划海洋保护区网络非常关键<sup>[50]</sup>。2014 年 4 月任先秋等<sup>[51]</sup>利用 ROV 发现号在冲绳海槽水深 1200 m 多的热液区发现了甲壳动物蔓足类 1 新科 1 新属 1 新种,该物种被命名为“发现原深茗荷”( *Probathylepas faxian* ),该项发现填补了生物进化的甲壳类动物研究空白。

在日本海洋科技中心(JAMSTEC)QUELLE2013 路易斯维尔海山链和汤加-克马德克岛弧(Kermadec Arc)深度为 300~5 000 m 的生态系统和生物多样性的科学考察中,利用载人潜水器 Shinkai 6500 观察动物区系的深度分布特点,此次考察发现多种生物,包括海参、头足类、海绵动物、海胆、深海蟹、双壳类、比目鱼和虾等,并测量了水深、水温、盐度、溶解氧的浓度及硫化氢浓度等环境特性,对理解汤加-克马

德克岛弧生物群落的连续性和进化均有重要意义<sup>[52]</sup>。

Victorero 等<sup>[48]</sup>通过 ROV Isis 拍摄的深达 3 km 的视频资料,确定了赤道大西洋海域安南山表面的生物数量超过 3 万种,其中包括壮观的冷水珊瑚群。并利用统计模型阐述了生物群落结构模式变化机制,结果表明海洋生物群落之间主要区别在于物种的种类,而非数量,生物群落结构受海底小尺度变化的控制。

### 3.4 其他生境

随着技术的进步和深海调查的深入,越来越多的深海生境已被发掘和描述,除热液、冷泉、海山外,深海峡谷、海沟和深渊等生境生物种类、区系及多样性状况也都各具特色。由于有机质流倾泻入峡谷以及峡谷独特的地形造就的栖息地,深海峡谷也是海洋生物生存的热点区域,NOCC 研究人员 Gunton 等<sup>[53]</sup>利用 ROV 研究了 3 个不同海底峡谷分支区域的物种多样性,发现同一峡谷的不同分支与峡谷干流一样,均具有较高的物种多样性,这也是科学界首次对深海峡谷内的自身生物多样性进行比较研究。

外来生产力对深海物种多样性和丰富度的形成过程中起着重要的作用。Gallo 等<sup>[54]</sup>利用 HOV Deepsea Challenger 分别对位于新不列颠海沟和马里亚纳海沟的海斗深渊进行了 5 次下潜,对两处海沟的生物多样性进行了比较,目的是比较生产力的差异对底层或底栖群落结构的影响,发现在食物较为丰富的新不列颠海沟,物种多样性和丰富度均比马里亚纳海沟高,表明了外来生产力的重要作用。

日本海洋科学技术中心 Nunoura 等<sup>[55]</sup>研究人员利用 ROV Abismo 采集了马里亚纳海沟超深渊 10 300 m 深处的水样,并进行了分子生态和地球化学的分析,结果明确显示,在超深渊的水体中异氧细菌占主导地位,且尽管其他的物理化学条件,如温度、盐度、营养素与深海海洋基本一致,微生物群落组成和功能与其上层的半深海的群落组成有显著差别,对海洋微生物群落提供了全新认识。2014 和 2017 日本海洋科学技术中心利用 HOV 和 ROV 对马里亚纳海沟再次进行多次下潜,收集了 37 个来自 6 900 m 到 8 000 m 海沟深处的生物样本,通过 DNA 测序分析和骨骼结构的三维扫描,发现了一个新物种—马里亚纳狮子鱼(*Pseudolipari sswirei*),这是目前为止发现的海洋最深处的鱼,并对其形态学、生物学、分布和系统发育关系进行了分析<sup>[56]</sup>。

### 3.5 深海生物多样性的保护

在过去的几十年里,深海热液喷口和海底冷泉的栖息地受到各种人类活动的威胁越来越大,深海生态系统多样性受到了严重的毁坏<sup>[57]</sup>。据估计,200 m 以下的海底有超过百万平方公里的区域被拖网扫过<sup>[58]</sup>,在未来的 10 年里,对石油、天然气和矿产的采掘将会在更深的水域展开<sup>[59]</sup>。2014 年 Nature 发文称为维护和修复深海生物多样性及其功能,在 2020 年之前应设立正式的管理机构和基金,在国家政府和国际机构的支持下,制定一个全球性的保护策略<sup>[60]</sup>。

海斗深渊拥有高浓度的多金属结节。Vanreusel 等<sup>[61]</sup>利用 ROV Kiel 拍摄的视频研究结果表明多金属结节区域内的动物比没有结核或含量较低区域具有更高丰度和多样性,开采海底结核资源很可能具有高度破坏性,深海采矿活动对海洋生态系统产生了至少持续几十年的明显影响,甚至是永久性的<sup>[62]</sup>,而深海恢复的时间从几年到几百年不等,而且部分热液喷口生态系统可能永远无法恢复<sup>[63]</sup>。科学家们在太平洋中部的克利珀顿区利用 ROV 发现的一个全新的海绵群体,是该地区最丰富的以金属结核为栖息地的动物,可能是监测未来深海多金属结核开采带来的影响的一个关键指示物种<sup>[64]</sup>。

建立保护区是维护栖息地完整和物种多样性的重要方式之一,Nakajima 等<sup>[65]</sup>利用潜水器收集的 155 种软体动物、环节动物和节肢动物的分布数据对千岛群岛、日本海槽、南海海槽、琉球海槽和相模湾的 27 个甲烷渗漏口,以及伊豆-小笠原岛弧和冲绳海槽的 15 个热液喷口的底栖大型、巨型生物的物种丰富度、特有种以及群落结构进行了研究,以确定深海化学合成生境的优先保护区域。从物种丰富度和特有种的角度看,物种丰富的地点,其生物物种应该优先保护,在所有 42 个研究站点中,应该对至少 30 个(17 个甲烷渗漏处和 13 个热液口)站点进行保护,以避免深海化能系统中的大型或者巨型特有种灭绝。

## 4 结束语

海洋技术是海洋国家勘探开发海洋资源、确保国家海洋经济可持续发展的重要手段,是海洋科学研究深入发展的关键因素<sup>[66]</sup>,其中最重要的设备是海洋科考船和潜水器<sup>[67]</sup>。未来 20 年,海洋基础对潜水器的需求将继续大幅增长<sup>[68]</sup>。虽然我国潜水器数量已位于世界前列,但由于管理机制不健全、使用成本高等问题造成潜水器使用率低、任务不饱满

的现状<sup>[22]</sup>。而随着气候变化、深海采矿、海底拖网和能源采集等活动对深海生态系统影响的加深,更深入地了解深海生物多样性愈加重要。为了确保潜器性能能够满足未来海洋基础研究的需要,我国应制定长远海洋基础设施开发、维护和更新规划,并完善现有管理机制,提高潜水器使用效率。

#### 参考文献:

- [1] 刘保华,丁忠军,史先鹏,等. 载人潜水器在深海科学考察中的应用研究进展[J]. 海洋学报, 2015, 37(10): 1-10.  
Liu Baohua, Ding Zhongjun, Shi Xianpeng, et al. Progress of the application and research of manned submersibles used in deep sea scientific investigations[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(10): 1-10.
- [2] Gage J D, Tyler P A. Deep-Sea Biology: A Natural History of Organisms at the Deep-Sea Floor[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [3] Glover A G, Gooday A J, Bailey D M, et al. Temporal change in deep-sea benthic ecosystems: a review of the evidence from recent time-series studies[J]. Advances in Marine Biology, 2010, 58: 1-95.
- [4] Gallo N D, Cameron J, Hardy K, et al. Submersible- and lander-observed community patterns in the Mariana and New Britain trenches: Influence of productivity and depth on epibenthic and scavenging communities[J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Paper, 2015, 99: 119-133.
- [5] Jamieson A T, Fujii M, Solan A, et al. Liparid and macrourid fishes of the hadal zone: in situ observations of activity and feeding behaviour[J]. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 2009, 276(1659): 1037-1045.
- [6] Morris K J, Bett B J, Durden J M, et al. A new method for ecological surveying of the abyss using autonomous underwater vehicle photography[J]. Limnology & Oceanography Methods, 2015, 12(11): 795-809.
- [7] WHOI. NDSF vehicles [EB/OL].[2018-09-03]. <http://www.whoi.edu/main/ndsf>.
- [8] 任玉刚,刘保华,丁忠军,等. 载人潜水器发展现状及趋势[J]. 海洋技术学报, 2018(2): 114-122.  
Ren Yugang, Liu Baohua, Ding Zhongjun, et al. Research on the current status and development trend of manned submersibles[J]. Ocean Technology, 2018(2): 114-122.
- [9] WHOI. Alvin Upgrade [EB/OL].[2018-08-28]. <http://www.whoi.edu/main/alvin/upgrade>.
- [10] WHOI. Nereid Under Ice (NUI) [EB/OL].[2014-03-21]. <http://www.whoi.edu/main/nereid-under-ice>.
- [11] NOAA. Pisces IV and V [EB/OL].[2013-04-16]. <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/pisces/pisces>.

- html.
- [12] MBARI. Remotely operated vehicles[EB/OL].[2018-08-26]. <https://www.mbari.org/at-sea/vehicles/remotely-operated-vehicles/>
- [13] 高峰, 王辉, 李超伦. 世界主要海洋研究机构概况[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
Gao Feng, Wang Hui, Li Chaolun. Overview of the World's Major Marine Research Institutions[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [14] JAMSTEC. Research vessels and vehicles[EB/OL]. [2018-05-21]. <http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/index.html>.
- [15] JAMSTEC. SHINKAI 6500 [EB/OL].[2018-08-25]. <http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/shinkai6500.html>.
- [16] NOC. National marine equipment pool [EB/OL]. [2018-08-25]. <http://www.noc.ac.uk/facilities/national-marine-equipment-pool>
- [17] NERC. BoatyMcBoatface returns home with unprecedented data[EB/OL].[2017-06-28]. <https://nerc.ukri.org/press/releases/2017/14-boaty/>.
- [18] Ifremer. Nautille [EB/OL].[2018-07-15]. <http://flotte.ifremer.fr/fleet/Presentation-of-the-fleet/Underwater-systems/Nautille>.
- [19] 高振会, 史先鹏. 深海技术与可持续发展[J]. 海洋开发与管理, 2011, 28(7): 41-46.  
Gao Zhenhui, Shi Xianpeng. Deep-sea technology and sustainable development[J]. Ocean Development and Management, 2011, 28(7): 41-46.
- [20] Ifremer. VICTOR-6000 [EB/OL].[2018-08-15]. <http://flotte.ifremer.fr/fleet/Presentation-of-the-fleet/Underwater-systems/VICTOR-6000>.
- [21] GEOMAR. Technology & logistics centre[EB/OL]. [2018-5-23]. <https://www.geomar.de/en/centre/central-facilities/tlz/>.
- [22] 钱洪宝, 俞建成, 韩鹏, 等. 我国大型深潜装备研发管理存在的问题及对策思考[J]. 高技术通讯, 2016, 26(2): 200-206.  
Qian Hongbao, Yu Jiancheng, Han Peng, et al. Problems and countermeasures of the management of China's R&D on large deep-sea submersible vehicles[J]. Chinese High Technology Letters, 2016, 26(2): 200-206.
- [23] 朱大奇, 胡震. 深海潜水器研究现状与展望[J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2018(3): 206-216.  
Zhu Daqi, Hu Zhen. Research status and prospect of deep-sea underwater vehicle[J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2018(3): 206-216.
- [24] Stocks KI, Clark M R, Rowden A A, et al. CenSeam, an international program on seamounts within the census of marine life: Achievements and lessons learned[J]. Plos One, 2012, 7(2): 86-86.
- [25] 王丽玲, 林景星, 胡建芳. 深海热液喷口生物群落研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(6): 604-612.  
Wang Liling, Lin Jingxing, Hu Jianfang. Recent progress in deep-sea hydrothermal vent communities[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(6): 604-612.
- [26] WHOI. History-of-alvin[EB/OL].[2005-12-01]. <http://www.whoi.edu/main/history-of-alvin>.
- [27] 王淑杰, 翟世奎, 于增慧, 等. 关于现代海底热液活动系统模式的思考[J]. 地球科学, 2018, 43(3): 835-850.  
Wang Shujie, Zhai Shikui, Yu Zenghui, et al. Reflections on model of modern seafloor hydrothermal system[J]. Earth Science, 2018, 43(3): 835-850.
- [28] Tarasov V G, Gebruk A V, Mironov A N, et al. Deep-sea and shallow-water hydrothermal vent communities: two different phenomena?[J]. Chemical Geology, 2005, 224(1): 5-39.
- [29] MBARI. Deepest high-temperature hydrothermal vents discovered in Pacific Ocean[EB/OL].[2015-06-02]. <http://www.sciencedaily.com/releases/2015/06/150602171917.htm>.
- [30] Goffredi S, Johnson S, Tunnicliffe V, et al. Hydrothermal vent fields discovered in the southern Gulf of California clarify role of habitat in augmenting regional diversity[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2017, 284: 20170817.
- [31] Tao C, Lin J, Guo S, et al. First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge[J]. Geology, 2012, 40(1): 47-50.
- [32] Copley J T, Marsh L, Glover A G, et al. Ecology and biogeography of megafauna and macrofauna at the first known deep-sea hydrothermal vents on the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 39158.
- [33] Rouse G W, Wilson N G, Carvajal J I, et al. New deep-sea species of *Xenoturbella* and the position of *Xenacoelomorpha*[J]. Nature, 2016, 530: 94-97.
- [34] 魏曼曼, 陈新华, 周洪波. 深海热液喷口微生物群落研究进展[J]. 海洋科学, 2012, 36(6): 113-121.  
Wei Manman, Chen Xinhua, Zhou Hongbo. Research process of microbial community in deep-sea hydrothermal vents[J]. Marine Sciences, 2012, 36(6): 113-121.
- [35] McNichol J, Stryhanyuk H, Sylva S P, et al. Primary productivity below the seafloor at deep-sea hot springs[J]. PNAS, 2018, 115 (26): 6756-6761.
- [36] Pérezrodriguez I, Bohnert K A, Cuebas M, et al. Detection and phylogenetic analysis of the membrane-bound nitrate reductase (Nar) in pure cultures and microbial communities from deep-sea hydrothermal vents[J]. Fems Microbiology Ecology, 2013, 86(2): 256-267.
- [37] Ikuta T, Igawa K, Tame A, et al. Surfing the vegetal pole in a small population: extracellular vertical transmission of an 'intracellular' deep-sea clam symbiont[J].

- Royal Society Open Science, 2016, 3(5): 160130.
- [38] Paull C K, Hecker B, Commeau R, et al. Biological communities at the Florida escarpment resemble hydrothermal vent taxa[J]. Science, 1984, 226(4677): 965-967.
- [39] Seabrook S, Leo F D, Baumberger T, et al. Heterogeneity of methane seep biomes in the Northeast Pacific[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2018, 150: 195-209.
- [40] Sibuet M, Olu K. Biogeography, biodiversity and fluid dependence of deep-sea cold-seep communities at active and passive margins[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 1998, 45(1-3): 517-567.
- [41] Ritt B, Sarrazin J, Caprais J C, et al. First insights into the structure and environmental setting of cold-seep communities in the Marmara Sea[J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Paper, 2010, 57(9): 1120-1136.
- [42] 陈忠, 杨华平, 黄奇瑜, 等. 海底甲烷冷泉特征与冷泉生态系统的群落结构[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(6): 73-82.  
Chen Zhong, Yang Huaping, Huang Qiyu, et al. Characteristics of cold seeps and structures of chemoautotrophy-based communities in seep sediments[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(6): 73-82.
- [43] 席世川, 张鑫, 王冰, 等. 海底冷泉标志与主要冷泉区的分布和比较[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(2): 7-18.  
Xi Shichuan, Zhang Xin, Wang Bing, et al. The indicators of seabed cold seep and comparison among main distribution areas[J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(2): 7-18.
- [44] Pop R P, Wenzhöfer F, Ramette A, et al. Spatial scales of bacterial community diversity at cold seeps (Eastern Mediterranean Sea)[J]. Isme Journal, 2014, 9(6): 1306-1318.
- [45] Seabrook S, Leo F D, Baumberger T, et al. Heterogeneity of methane seep biomes in the Northeast Pacific[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2018, 150: 195-209.
- [46] Rouse G W, Wilson N G, Carvajal J I, et al. New deep-sea species of *Xenoturbella* and the position of *Xenacoelomorpha*[J]. Nature, 2016, 530(7588): 94.
- [47] 中国地质调查局. 我国在南海发现大规模天然气水合物冷泉区并命名为“海马冷泉”[EB/OL]. [2016-06-27]. [http://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201607/t20160702\\_337005.html](http://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201607/t20160702_337005.html).  
China Geological Survey. China has discovered a large-scale natural gas hydrate cold spring area in the south China sea and named it “haima cold spring”. [EB/OL]. [2016-06-27]. [http://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201607/t20160702\\_337005.html](http://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201607/t20160702_337005.html).
- [48] Victorero L, Robert K, Laura F, et al. Species replacement dominates megabenthos beta diversity in a remote seamount setting[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 4158.
- [49] Pineda J, Cho W, Starczak V, et al. A crab swarm at an ecological hotspot: Patchiness and population density from AUV observations at a coastal, tropical seamount[J]. Peer J, 2016, 4(4): e1770.
- [50] University of Plymouth. Underwater robots offer glimpse into deep-sea life [EB/OL]. [2013-12-01]. <https://www.plymouth.ac.uk/news/underwater-robots-offer-glimpse-into-deep-sea-life>.
- [51] Ren Xianqiu, Sha Zhongli. Probathylepadidae, a new family of Scalpelliformes (Thoracica: Cirripedia: Crustacea), for *Probathylepas faxianguensis* sp. nov., from hydrothermal vent in Okinawa Trough[J]. Zootaxa, 2015, 4033(1): 144-150.
- [52] JAMSTEC. Progress report on QUELLE2013—an around-the-world voyage by the SHINKAI 6500 Surveys at an area near the Kermadec Trench in the South Pacific Ocean [EB/OL]. [2013-12-01]. [http://www.jamstec.go.jp/e/about/press\\_release/20131101/](http://www.jamstec.go.jp/e/about/press_release/20131101/).
- [53] Gunton L M, Gooday A J, Glover A G, et al. Macrofaunal abundance and community composition at lower bathyal depths in different branches of the Whittard Canyon and on the adjacent slope (3500 m; NE Atlantic)[J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Paper, 2015, 97(3-4): 29-39.
- [54] Gallo N D, Cameron J, Hardy K, et al. Submersible and lander-observed community patterns in the Mariana and New Britain trenches: Influence of productivity and depth on epibenthic and scavenging communities[J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Paper, 2015, 99: 119-133.
- [55] Nunoura T, Takaki Y, Hirai M, et al. Hadal biosphere: Insight into the microbial ecosystem in the deepest ocean on Earth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(11): 1230-1236.
- [56] Gerringer M E, Linley T D, Jamieson A J, et al. *Pseudoliparis swirei* sp. nov.: a newly-discovered hadal-nailfish (Scorpaeniformes: Liparidae) from the Mariana Trench[J]. Zootaxa, 2017, 4358(1): 161-177.
- [57] Dover C L V, Smith C R, Ardron J, et al. Designating networks of chemosynthetic ecosystem reserves in the deep sea[J]. Marine Policy, 2012, 36(2): 378-381.
- [58] Priede I G, Godbold J A, Niedzielski T, et al. A review of the spatial extent of fishery effects and species vulnerability of the deep-sea demersal fish assemblage of the Porcupine Seabight, Northeast Atlantic Ocean (ICES Subarea VII)[J]. Ices Journal of Marine Science,



- 2011, 67(2): 281-289.
- [59] Dover C L V. Tighten regulations on deep-sea mining[J]. Nature, 2011, 470(7332): 31-33.
- [60] Barbier EB, Mateos M, Rogers A D, et al. Ecology: Protect the deep sea[J]. Nature, 2014, 505(7484): 475-477.
- [61] Vanreusel A, Hilario A, Pedro AR, et al. Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 26808.
- [62] NOC. Long-term impacts of deep-sea mineral mining [EB/OL]. [2017-02-09]. <http://www.noc.ac.uk/news/long-term-impacts-deep-sea-mineral-mining>.
- [63] Suzuki K, Yoshida K, Watanabe H, et al. Mapping the resilience of chemosynthetic communities in hydrothermal vent fields[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 9364.
- [64] Lim S C, Wiklund H, Glover A G, et al. A new genus and species of abyssal sponge commonly encrusting polymetallic nodules in the Clarion-Clipperton Zone, East Pacific Ocean[J]. Renewable Energy, 2017, 101(98): 316-326.
- [65] Nakajima R, Yamakita T, Watanabe H, et al. Species richness and community structure of benthic macrofauna and megafauna in the deep-sea chemosynthetic ecosystems around the Japanese archipelago: An attempt to identify priority areas for conservation[J]. Diversity & Distributions, 2015, 20(10): 1160-1172.
- [66] 高峰, 王辉, 王凡, 等. 国际海洋科学技术未来战略部署[J]. 世界科技研究与发展, 2018, 40(2): 113-125. Gao Feng, Wang Hui, Wang Fan, et al. Future strategic deployment of international marine science and technology[J]. World Sci-Tech R & D, 2018, 40(2): 113-125.
- [67] 吕志. 日本海洋科技开发战略及动向[J]. 全球科技经济瞭望, 2014, 29(10): 1-7. Lü Zhi. The strategies and trends of Japanese marine science & technology[J]. Global Science Technology and Economy Outlook, 2014, 29(10): 1-7.
- [68] National Research Council. Critical infrastructure for ocean research and societal needs in 2030[EB/OL]. [2018-08-03]. [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=13081](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=13081).

## Progress of the submersible in deep-sea biodiversity research

ZHANG Can-ying<sup>1</sup>, GUO Lin<sup>1</sup>, LU Jing-liang<sup>2</sup>, FENG Zhi-gang<sup>1</sup>

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Lanzhou Literature and Information Center of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Received: Jul. 26, 2018

**Key words:** submersible; deep-sea biotopes; biodiversity; scientific expeditions

**Abstract:** This paper briefly introduces the deployment of the submersible in the world's major marine countries, and provides a detailed analysis of the application of the submersible in research of deep-sea biodiversity, including hydrothermal systems, cold seeps, seamounts, canyons and trenches, and deep-sea biodiversity protection. The purpose of this study is to provide a reference for the study of deep-sea biodiversity in China and to promote the application of Chinese submersibles in deep-sea scientific investigation.

(本文编辑: 刘珊珊)