

深海生物资源开发装备发展研究

冯景春^{1,2}, 梁健臻¹, 张偲^{2,3}, 杨志峰^{1,2}, 祝振昌^{1,2}

(1. 广东工业大学环境生态工程研究院, 广州 510006; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;
3. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301)

摘要: 深海孕育了地球上规模最大、远未被详细认知的生态系统, 蕴藏着极为丰富且兼具特殊功能的生物资源。深海装备是保障深海生物资源绿色、安全、有序开发的关键支撑。为了厘清深海生物资源开发装备的基本特征、发展特色和技术瓶颈, 明确深海生物资源开发装备的未来发展方向和着力点, 本文分析了深海生物资源开发对装备的技术需求特征, 梳理了深海生物资源开发装备的发展现状; 盘点了我国深海生物资源开发装备的基本情况, 研判了领域内装备发展面临的困难和挑战。针对我国深海生物资源开发装备缺乏统一标准、试验平台和成果转化率不足等问题, 提出创新体系、通用技术、转化平台、国际合作等方面的发展建议, 以期从装备发展的视角为我国可持续开发深海生物资源提供方向参照。

关键词: 深海; 生物资源; 原位观测; 取样; 原位实验

中图分类号: P745 **文献标识码:** A

Development of Deep-Sea Biological Resources Exploitation Equipment

Feng Jingchun^{1,2}, Liang Jianzhen¹, Zhang Si^{2,3}, Yang Zhifeng^{1,2}, Zhu Zhenchang^{1,2}

(1. Institute of Environmental and Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;
3. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Abstract: The extreme environment in the deep sea gave birth to the largest ecosystem in the world that is far from known. The deep-sea environment possesses a huge amount of biological resources with special functions. Exploitation equipment plays an important role in promoting the green, safe, and orderly development of the deep-sea biological resources. To clarify the characteristics and technical challenges of the equipment for deep-sea biological resources exploitation and explore its development directions and focus, we investigate the technical requirements of deep-sea biological resources exploitation, introduce the current status of the deep-sea biological resource exploitation equipment, and analyzes the challenges faced in the development of these equipment. To overcome the difficulties such as lack of unified standards, shortage of testing platforms, and deficiency in technology transformation, we propose several suggestions from the perspective of innovation system, general technology, transformation platform, and international cooperation, hoping to contribute to the sustainable development of the deep-sea biological resources from the equipment development perspective.

Keywords: deep sea; biological resources; *in situ* observation; sample; *in situ* experiment

收稿日期: 2020-10-15; 修回日期: 2020-11-09

通讯作者: 张偲, 中国科学院南海海洋研究所研究员, 中国工程院院士, 研究方向为海洋生物学、海洋生物技术和海洋生态学;
E-mail: zhsimd@scsio.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“海洋装备发展战略研究”(2020-ZD-02); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0401, GML2019ZD0403)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

深海高压、黑暗、高温/低温、寡营养等极端环境孕育了深海热液、冷泉、海山、鲸落、深海平原等特殊生命系统，蕴藏着丰富的宏生物、微生物和基因资源 [1]。研究和开发这些特殊生物资源，为认知极端生命的起源、演化，解密地球深部多圈层的交互作用带来了宝贵机遇。适应深海极端环境的生物资源能够产生与陆地、近海等生命不一样的新颖结构化合物，在药品、食品、新能源材料、微生物肥料、石油污水降解等方面具有独特功能；开发这些特殊生物资源，对推动现代农业、医药、材料、环境保护的发展具有重要意义。深海生物资源是重要的国家战略储备资源，开发需求迫切。

深海生物资源开发装备是探测、观测、获取、保藏、培养深海生物资源的装备总称，适应深海极端严苛条件，具有耐压、耐温、耐腐蚀等特征。研发先进的深海生物资源开发装备，是实现深海生物资源绿色、安全、有序开发的重要支撑，也是“深海进入”“深海探测”“深海开发”递次发展的关键依托。相比陆地、近海，人类对深海生物资源还知之甚少。本文开展深海生物资源开发装备的需求分析，详细梳理国际国内相关装备的发展现状和特征，在凝练我国装备发展问题的基础上提出发展对策和建议。

二、深海生物资源开发装备的需求

(一) 现实需求

海洋中的生命始于 30 亿年以前，研究海洋生物有助于加深对于生命起源的理解。受装备技术能力的制约，人类对深海的认知进展缓慢。深海曾经被视为“生命的禁区”，经过 150 多年的深海探索历程，人类才逐渐了解多样而特殊的深海生命系统。随着海洋探测装备技术的进步，人类在认知深海生物资源、掌握深海生态系统服务功能方面得到拓展。然而，目前仅有约 20% 的深海海底情况为人类所认知，针对深海生物资源的观测、勘探多数限于局部研究 [2]，人类对深海生物资源的认识远未达到全面了解的状态。因此，亟待发展先进的深海生物资源开发装备，为探秘和利用深海生物资源提供技术手段；研究相应装备的发展特征，明确装备技

术的发展重点和突破方向，具有现实意义。

(二) 技术需求

地球表面 71% 的区域被海洋覆盖，其中超过一半的区域属于深水区域 (3000~6000 m) (见图 1)。广袤的深海区域孕育了地球上最大的生态系统，生物数量最多、生物种群最多、生物基因资源最丰富 [3]。为了获得这些特殊的基因资源，需要研制与深海环境相适应的专有装备。一方面，开发装备应具有较强的保真特性，这是因为：深海区域具有高静水压力、低温、缺氧、高盐等极端环境特征，且部分区域含有特殊腐蚀性化学物质；深海生物脱离特殊环境后，基因表达特性会发生变化；冷水珊瑚、深海管虫等珍稀生物资源在移动过程中极易破碎。另一方面，极端环境特征对装备的耐压、防腐性能提出苛刻要求，如深海生物资源分布广泛，在探测和取样过程中对装备的作业深度、作业范围、无扰动取样提出了严格要求。因此，明确深海生物资源开发装备的技术特征和发展路径、突破深海装备的核心关键技术，成为保护深海生物资源多样性、可持续开发深海生物资源的必然途径。

三、世界深海生物资源开发装备发展态势

(一) 探测、观测装备

原位探测和观测是对深海生物资源的种类、分布、特性进行研究的重要手段。利用光学、声学技术识别深海生物是重要的观测、探测方法，随着光学成像技术的发展，目前已经具备了微米级、厘米级、米级的深海生物探测识别成像能力。深海着陆器、深海潜水装备搭载这些光学成像设备，可进行数百公里范围内、垂直剖面 and 水平尺度上的深海生物物种、生态系统资源的识别和调查。

全息照相、结构照明、原位浮游生物成像、三维成像等新兴技术，为深海关键生物物种的信息识别和生态系统认识带来了全新机遇。2005 年，俄罗斯科学院开发了动物样本计数系统，利用 Mir-1、Mir-2 潜水器研究了大型浮游动物在查理-吉布斯断裂区的垂直分布，定量估计了不同深度层的浮游动物丰度 [4]。2008 年，法国 LOV 实验室使用水下视频剖面仪，评估了沿中大西洋海脊向下 1000 m 深处的大型浮游动物；该仪器可自动识别大型生

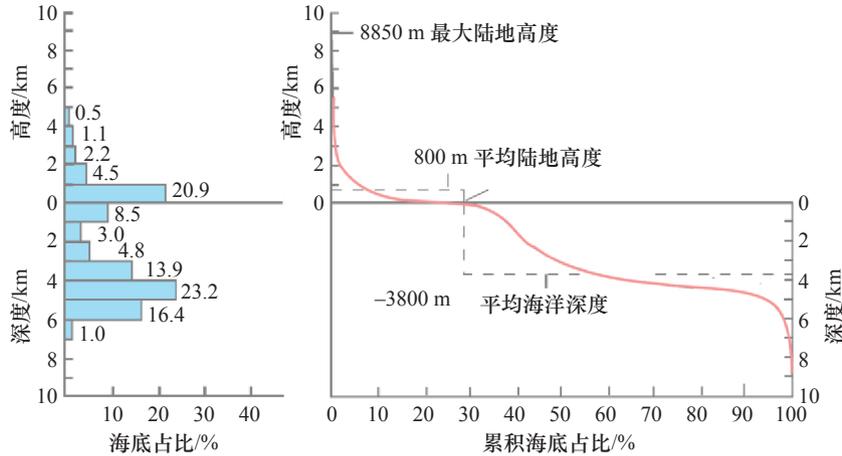


图1 全球海洋深度分布占比情况

物,特别适用于脆弱、凝胶状浮游生物的量化研究 [5]。2009年,为了长时间观测底栖边界层群落,美国蒙特利海洋生物研究所布放了声分裂波束阵列、从属数字延时摄像机系统,实现了在有线水下网络中长时间自主运行并实时向陆基传输数据的应用突破。2012年,新西兰学者将诱饵远程水下视频系统与1500 m海底管网衔接,构建了实时监测不同深度梯度的鱼类群落结构及多样性变化、传输反馈图像信息的能力 [6]。

脱氧核糖核酸(DNA)测序、质谱分析等高通量技术为深海生物资源的观测、探测研究带来了变革:直接监测分析生物种群的环境DNA(eDNA)特征即可厘清深海生物种群的多样性,无需对深海生物本身进行采样。目前,基因组学相关方法用于调查深海原核生物、微生物、后生动物群落,方法的有效性依赖于深海物种识别手段,如宏基因组学、元转录组学、元蛋白质组学、代谢组学等;将组学数据与其他深海观测数据、生物培养数据耦合,才能重构深海生态系统,全面认识深海生物资源特征 [7]。

深海潜水装备的发展极大促进了深海生物资源观测和探测,主要分为载人潜水器(HOV)、缆控式无人潜水器(ROV)、自主式潜水器(AUV)。自1977年发现深海热液生态系统以来,人类在潜水装备下潜观测过程中发现了热液、冷泉等深海生态系统分布以及新的物种 [8]。目前,ROV、AUV因其作业范围广、灵活性强等优势得到了较多应

用。世界海洋强国逐步形成了涵盖3000米级深海、6000米级深渊、11000 m全海深作业深度范围,包括潜水装备、水下通信作业设施、水面支持母船在内的完整装备谱系,为海沟、深渊的生物资源原位观测和探测提供了关键能力。美国、加拿大、中国、日本、澳大利亚、法国、德国是相关装备主要发展国家,美国、中国、日本在深渊装备方面技术领先。

(二) 获取、保藏装备

深海生物的有效获取和安全保藏是开发利用深海生物资源的前提,世界各国在深海生物取样技术方面取得较快发展(见表1) [9]。新西兰国家水与大气研究所制造了重量相对较轻的撬网,配置了缆绳和铁链分离系统,用于在海底地形和基底上的大型、巨型无脊椎动物群取样 [10]。配合摄像系统的原位诱捕链钩是捕获软底基质大型、小型生物的有效装置。荷兰皇家海洋研究所开发了由金属框架、拖网和刀片组成的深海挖泥器,能够高效采集海底穴居动物样本 [11]。取芯器用于获取小型深海生物,仅适用于软底基质沉积物中的生物获取。

在潜水装备的机械臂上搭载取样装置,可以获取各类生境和地质类型中的深海生物(见图2)。2005年,美国蒙特利海湾水族研究所开发了一种碎屑取样器,在ROV上原位收集极为脆弱的中层水生动物(如水母、幼虫等)。随着深海生物取样需

表 1 深海生物获取装备类型

装备类型	生物类型	底质类型
围网/捞网	鱼、大型无脊椎动物（尤其是无柄和浮游动物）	所有生境的软质平坦沉积环境
潜水装备	大型无脊椎动物和微生物	所有生境和底质类型
底表橇网	大型无脊椎动物及其表生动物	根据橇网类型
链钩	大型和小型附着动物	仅适用于软底基质
取芯器	小型动物	仅适用于软底基质

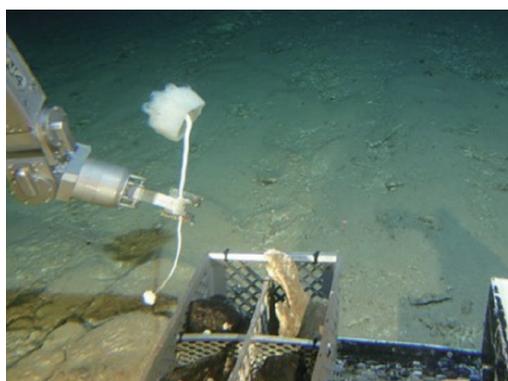


图 2 ROV 机械臂捕获深海海绵

求的不断提高，运用机器人系统来实现类似人类操纵灵活性的能力成为研究热点。2018 年，罗德岛大学开发了软机械手臂，通过控制穿戴式手套抓手（制作材料与海洋生物柔软脆弱特性相适应）在 2300 m 水深环境中完成了取样操作 [12]。为了精准采样并有效保护样品，2018 年哈佛大学使用柔性材料的增材制造方式获得柔顺手掌抓手，改善了软操纵器的操作稳定性，在柔软的指尖上增加了可互动的“指甲”以灵活抓取硬质基质上的样本 [13]。

深海生物资源取样设备的发展重点是，在深海极端环境下、对深海生物无扰动的前提下精准取样，不改变深海生物的原位环境，扩充取样设备的功能多样性。2019 年，法国 LOV 实验室研制了集深海生物原位采样、富集、转移于一体的设备 [14]。

四、我国深海生物资源开发装备的发展现状

与国际同步，深海生物资源开发成为我国海洋战略的重要发展方向，深海生物探测和研究技术以及相关的装备研制得到长足发展。2014 年以来，尤其是“十三五”时期，我国深海生物开发装备发展迅速，相关技术纳入国家生物资源开发战略规划，

涵盖生物保真取样、保真存储、生物培养等方面（见图 3）。目前，宏生物主动抓取和固定诱捕、微生物原位取样和富集是我国重点掌握的深海生物开发装备技术，保压转移、保真存储装备亦是重点研究方向（见图 4）。

（一）深海微生物取样与富集装备

取样和富集是深海微生物开发利用的基础条件，装备能力决定着资源利用效率；重点开发具有原位无污染保真采样、连续长距离采样、无污染取样、无压力突变取样、高丰度富集、长时间保存、结构简单、操作灵活等特点的装备。目前，国内基本突破了多点采样、无污染无压力突变采样、高压采样筒、多褶膜的大流量过滤等方面的关键技术。

浙江大学研究团队牵头研制了系列化的深海微生物采样和富集装置，可以独立安放在海底工作，也可搭载 ROV 进行移动工作，取样深度范围为数百米到 6000 m；在深海环境下通过泵吸、抓取、不同级数循环过滤等流程来实现微生物的采集和富集，使用固定液保护极易被破坏的核糖核酸（RNA）。中南大学研究团队研制的微生物获取装置最大浓缩比可达 500，取样获得的样品压力变化在 6 h 内小于 5% [15]。

（二）深海宏生物取样、观测、诱捕装备

深海宏生物生活在高压、低温/高温的极端环境中，在开发过程中样品的遗传物质表达由于脱离了原位环境而可能出现显著变化。相关发展方向是保温、保压、快速精准的取样装备，敏捷、灵活、针对性强、诱捕率高的诱捕装备。国内研发的宏生物取样装备主要用于对深海宏生物的原位取样，分为挖掘式、铲撬式、拖网式等，也可和诱捕装置集成使用。

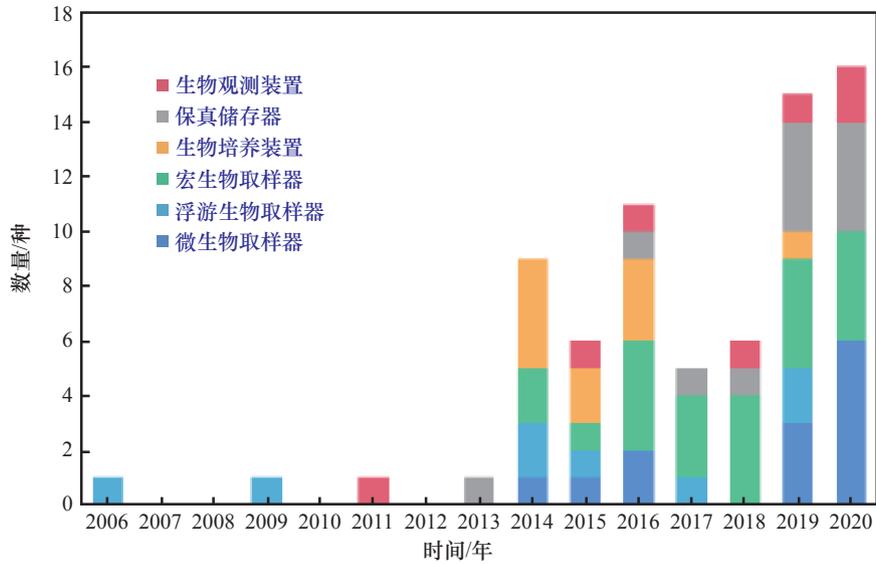


图 3 我国深海生物装置专利发展情况

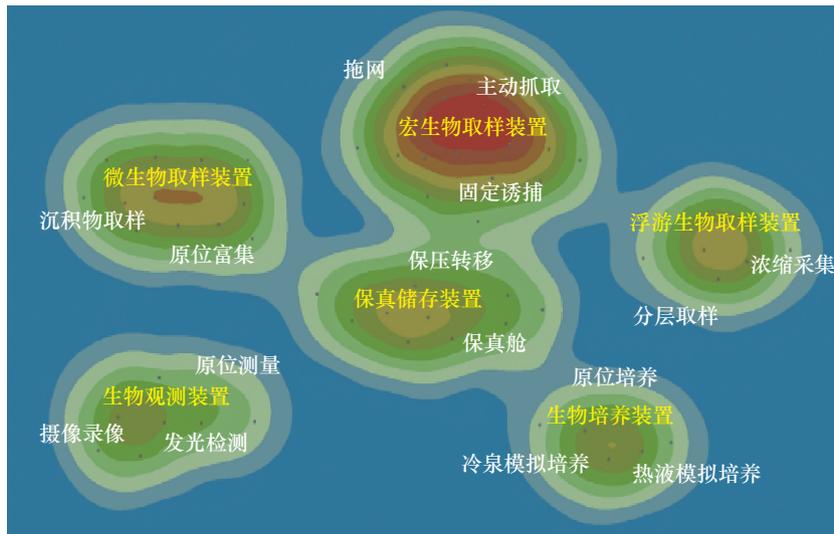


图 4 我国深海生物开发装备的专利热点

取样装备的关键在于保护生物样品生活的极端压力和温度环境。为了克服传统生物拖网容易破坏脆弱的海底生物等难题，国内研制了深海近底层多网分段 / 分层生物幼体保压取样器 [16]、深海近底层生物幼体直视取样系统 [17]，实现了远程视频监控取样作业。发展的深海宏生物诱捕装置可搭载 ROV 操作平台使用，也可独立原位固定在海底，主要由诱惑牵引部件、封闭部件等组成，如上海海洋大学研究团队开发的诱捕装备实现了深海宏生物的实时完整取样。

在宏生物观测方面，国内研制了基于光缆的水下视频和数据传输系统、基于光电复合缆的深海摄像系统 [18]、基于生物识别与分类的高清深海摄像系统 [19]，实现了采集过程中的生物识别，样品智能分类正确率可达 80%。

(三) 深海生物培养装备

深海生物的生存条件具有特殊性，一些嗜热、嗜冷，另一些嗜盐、嗜高压。作为开发利用深海生物资源的有效方式，深海原位定植培养将陆地实验

室中常用的海洋微生物培养基和培养方法“移植”到深海海底,利用深海原位的高压、低温、寡营养、无光等极端环境,富集和培养深海生物。现有装置主要用于微生物的原位富集培养,能在深海海底环境中自主工作,具有采集环境参数信息变化的能力。相关发展方向有:开发长周期工作、自主感应记录环境参数、定向诱导富集、智能控制的微生物原位定植培养装备,开发原位定向条件控制的深海宏生物智能培养装备。

国内研发的深海水体原位定植培养系统,可在深海环境下长期放置,利用 16S rRNA 基因高通量技术与分离培养方法,形成微生物聚集多样性的研究能力;可在 6000 m 深海海底可视化定点投放和回收,也可投放施加营养物调节局部培养环境的深海沉积物原位定植培养系统 [20]。浙江大学研究团队研制了一种可搭载或独立工作的深海实验生态系统原位观测装置,在深海原位环境进行人工诱导培养,记录生态系统发育过程 [21]。

在陆域模拟培养方面,自然资源部第三海洋研究所、上海交通大学、浙江大学、中国海洋大学、中国科学院深海科学与工程研究所、哈尔滨工业大学研制了数套深海微生物培养系统,最高模拟压力为 60 MPa,通过了在陆域实验室或科考船进行的深海高压、厌氧环境模拟,实现了对热液和冷泉区微生物的连续培养 [22]。上海交通大学研究团队利用深海环境模拟技术,在实验室模拟深海冷泉的喷发环境,提出了冷泉碳循环的新模型 [23]。

也要注意,国内在深海生物资源开发陆域环境模拟装备的设计和制造方面还面临一些短板,如压力、温度等连续高精度控制能力有待加强,溶解氧、 H_2S 、 CO_2 等深海生物生存环境关键指标的精确在线监测能力较少涉及。

(四) 深海生物资源开发潜水装备

我国深海潜水装备谱系化发展迅速,下潜深度不断刷新(见图 5),为深海生物资源的开发提供了不可或缺的装备技术支撑。

在深海载人潜水装备方面,“蛟龙号”“深海勇士号”可对冷泉特征生物进行保真取样,带回实验室对其进行分析和培育 [24,25];科学家搭载自主研发的载人潜水器,发现了丰富多样的热液大生物群

落,采集了丰富的热液流体、热液大生物等样品,为深入研究现代海底热液流体系统的物质循环、生命演化、适应机制、生态环境效应提供了重要的基础数据和样品。

在深海无人深潜器方面,国内研制了科考型、作业型、观察型等多种系列的无人深潜装备;建成以“海龙号”“海马号”“发现号”为代表的 ROV 无人深潜装备,以“潜龙”系列、“海斗号”“海翼号”为代表的 AUV 无人深潜装备。这些无人深潜装备能够支持深海观测、拍摄、摄像,实现大跨度、长距离的近底观测取样,具备精细化作业能力;在下潜作业期间,拍摄了大量深海生物样品影像资料,获取了贻贝、铠甲虾、管状蠕虫、蛇尾、囊蛤等众多冷泉生物样品,海百合、海葵、海绵、深对虾、躄鱼、海兔、海鞘、深海扇贝等 200 多种海洋生物样品,为深海生物演化历史和生态系统结构研究提供了丰富的基础资料 [26]。

在深海着陆器方面,面向深渊生物的研究需求,通常搭载温盐深仪、溶解氧传感器、高清摄像机、采水瓶、生物诱捕器、沉积物采样器、微生物原位富集采样器等装置 [27];国内研制了 1500 米级“海燕号”、7000 米级“海角号”、万米级“天涯号”“原位实验号”深海着陆器,实现了在万米海底成功进行深渊底部氮循环、氨氧化的微生物原位培养实验能力,在各级深度获取了 2000 多个大生物样品,为探索深渊物种起源与演化、群体遗传特征及其共生微生物对极端高压环境的适应机制提供了宝贵的科研资料 [28]。

五、我国深海生物资源开发装备发展面临的问题

(一) 缺乏顶层设计和统一的技术标准

在深海生物资源开发装备方面,我国尚未发布国家层面的发展规划,导致顶层设计不甚清晰。相关部门独立制定了行业层面的发展规划,但存在边界重叠、低层次重复建设的情况。部分装备和技术具有行业标准,但缺乏统一的国家标准,不利于装备技术的高效转化。相关样机技术的制造水平不平衡,测量数据接口不兼容,影响了各类深海环境数据的高效采集和处理。

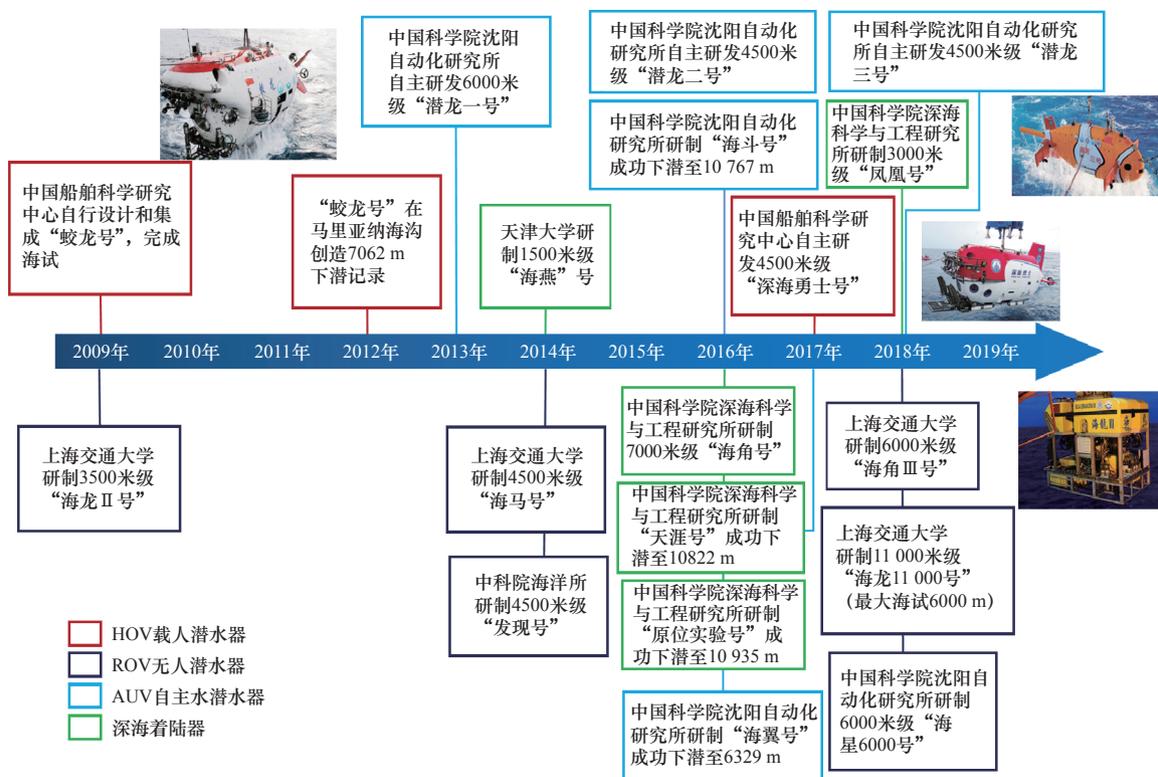


图 5 我国深海潜水装备开发历程 (2009—2019 年)

(二) 深海通用装备研发不足

尽管我国的部分深海生物仪器设备实现了自主研发，但存在设备类型偏少、技术先进性不强、智能化水平较低、长期稳定性不高等缺点；多数类型的深海仪器设备或技术仍处于引进后的消化吸收阶段。在深海专用材料、动力、通信、导航、作业设备等通用配套技术设备方面，我国与世界海洋强国存在较大差距；国产关键部件及中高端产品的市场份额不足 40%，大型高精度的原位培养和取样装备仍较多依赖进口 [29]。

(三) 装备测试场建设亟待加强

深海环境存在的超强压力、海水腐蚀、生物附着、通信困难等问题，使得相关科学研究高风险、高成本。我国在深海技术方面有了明显进步，但深海生物资源开发装备的使用、维护、管理水平还不高，导致后期投入成本居高不下，影响了后续科考使用。国内深海生物研究水平、人才队伍能力与国际一流水平尚有差距，如潜水器的年均下潜次数明显低于美国、日本等海洋强国。在深海开发方面，我国缺乏国家级、开放型、军民两用、多功

能的测试平台和海上试验场，为深海探测装备测试与评价、海洋高技术成果转化等提供试验服务保障的能力不足。

(四) 科技成果转化不足

国内的海洋科研机构 and 人员数量较多，海洋科研能力较强，深海技术与装备发展的相对优势也有体现。然而，众多海洋科技成果仍处于“实验室”阶段，深海生物资源开发方面的科技成果转化机制不明确，与现实应用结合推进节奏缓慢，导致科技成果向现实生产力的转化程度、效果均较低 [30]。

(五) 深海技术装备产业化道路举步维艰

我国深海技术装备整体上处于装备集成创新阶段，而主要关键部件依赖进口。深海技术装备的研发通常具有周期长、耗资大、需求量小的特点，较高的投资风险导致社会资源参与建设的积极性不高。深海技术研发人员大多集中在高校、科研院所，相关研发经费高度依赖政府投资。由于未能将深海技术研发与市场机制有效结合，深海技术装备的产业化程度明显落后于世界海洋强国。

六、对策建议

(一) 建设深海生物资源开发装备制造的科技创新体系

建议加快制定深海生物资源开发装备发展的国家规划、技术规范、行业标准，着力推动深海生物资源开发装备研制的标准化与规范化。突出“产学研”结合，鼓励企业参与科研成果的转化过程，推动深海技术装备的产业化发展；及时制定长期稳定的激励政策，扶持深海生物资源开发装备制造业的发展。

(二) 发展深海生物资源开发通用配套技术

建议开展以深海专用材料为代表的深海技术装备通用技术研究，使深海生物资源开发的整体水平适应产业自主发展的需求；构建深海生物资源开发装备关键基础零部件研制的体系化能力，保障关键设备的自主研制和生产；支持形成具有自主知识产权和产品市场竞争力的若干企业，推动深海生物资源开发通用技术及仪器设备的系列化、产业化、市场化。

(三) 建立国家级深海生物资源开发装备试验、成果转化平台

积极落实《国家海洋事业发展规划纲要》《国家深海高技术发展专项规划（2009—2020年）》《“十三五”海洋领域科技创新专项规划》，加快建设国家级海洋科学技术共享服务平台、实验室、试验场。建议补充建设国家级深海探测装备公共试验平台、深海试验场，按照企业化、业务化模式运作；结合国家海洋领域重大布局，建设一批国家工程中心、企业技术中心，落实“产学研”结合、加速深海探测装备制造产业化的进程。

(四) 深化深海生物资源开发装备方面的国际合作

深海生物资源属于战略新兴领域，建议在把握深海生物资源开发先机的同时，积极推进与国际组织、国外海洋科研机构的交流与战略合作。切实加强“一带一路”沿线国家的“蓝色经济”合作，建立与海洋强国在生物资源开发装备领域研究的多边参与模式，成立通用关键技术领域的共同研究计

划，促进深海生物资源开发装备制造产业的快速、健康、持续发展。

参考文献

- [1] Koslow J A. The silent deep: The discovery, ecology, and conservation of the deep sea [M]. Chicago: University of Chicago Press, 2007.
- [2] Smith C R, De Leo F C, Bernardino A F, et al. Abyssal food limitation, ecosystem structure and climate change [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2008, 23(9): 518–528.
- [3] Ramirez-Llodra E, Brandt A, Danovaro R, et al. Deep, diverse and definitely different: Unique attributes of the world's largest ecosystem [J]. Biogeosciences, 2010, 7(9): 2851–2899.
- [4] Vinogradov G M. Vertical distribution of macroplankton at the Charlie-Gibbs Fracture Zone (North Atlantic), as observed from the manned submersible “Mir-1” [J]. Marine Biology, 2005, 146(2): 325–331.
- [5] Stemmann L, Hoshia A, Youngbluth M J, et al. Vertical distribution (0–1000 m) of macrozooplankton, estimated using the underwater video profiler, in different hydrographic regimes along the northern portion of the Mid-Atlantic Ridge [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2008, 55(1–2): 94–105.
- [6] Sherman A D, Smith Jr K L. Deep-sea benthic boundary layer communities and food supply: A long-term monitoring strategy [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2009, 56(19–20): 1754–1762.
- [7] Levin L A, Bett B J, Gates A R, et al. Global observing needs in the deep ocean [J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 1–32.
- [8] Williams D L, Green K, Van Andel T H, et al. The hydrothermal mounds of the Galapagos Rift: Observations with DSRV Alvin and detailed heat flow studies [J]. JGR Solid Earth, 1979, 84(B13): 7467–7484.
- [9] Clark M R, Consalvey M, Rowden A A. Biological sampling in the deep sea [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [10] Clark M R, Rowden A A. Effect of deepwater trawling on the macro-invertebrate assemblages of seamounts on the Chatham Rise, New Zealand [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2009, 56(9): 1540–1554.
- [11] Rees H L, Bergman M J N, Birchenough S N R, et al. Guidelines for the study of the epibenthos of subtidal environments [C]. Copenhagen: International Council for the Exploration of the Sea, 2009.
- [12] Phillips B T, Becker K P, Kurumaya S, et al. A dexterous, glove-based teleoperable low-power soft robotic arm for delicate deep-sea biological exploration [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1–9.
- [13] Vogt D, Becker K P, Phillips B, et al. Shipboard design and fabrication of custom 3D-printed soft robotic manipulators for the investigation of delicate deep-sea organisms [J]. PloS One, 2018, 13(8): 1–16.
- [14] Marc G, Patricia B, Séverine M, et al. Pressure-retaining sampler and high-pressure systems to study deep-sea microbes under in situ conditions [J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 1–13.
- [15] 刘少军, 陈毅章, 李力, 等. 深海保真取样器研究及其虚拟样机实现 [J]. 机械工程与自动化, 2005 (1): 1–4

- Li S J, Chen Y Z, Li L, et al. A pressure & temperature-retained sampler in deep sea and its virtual prototype [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2005 (1): 1–4.
- [16] 葛朝平. 深海近底层多网分段/分层生物幼体保压取样器研究 [D]. 杭州: 浙江大学(硕士学位论文), 2008.
Ge C P. Research on near the bottom of deep-sea biological larva pressure-retained sampler of multiple nets subsection/layered [D]. Hangzhou: Zhejiang University(Master's thesis), 2008.
- [17] 李现慧. 深海近底层生物幼体直视取样装置监控系统研制 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学(硕士学位论文), 2013.
Li X H. Research and design of near the bottom of deep-sea remote video surveillance system for marine beacon biological larva sampler [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University(Master's thesis), 2013.
- [18] 陈奇. 基于光电复合缆的深海摄像系统技术方案探讨与开发 [J]. 海洋技术, 2013, 32(4): 89–92.
Chen Q. Technical solution and development of a deep-sea video system based on optical composite cable [J]. Ocean Technology, 2013, 32(4): 89–92.
- [19] 于海滨, 陈启, 杨俊毅. 基于生物识别与分类的高清深海摄像系统 [J]. 电子技术与软件工程, 2015 (14): 90–93.
Yu H B, Chen Q, Yang J Y. High definition deep sea camera system based on biometrics and classification [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2015 (14): 90–93.
- [20] 王蕾, 王丽萍, 董纯明, 等. 南海深海氮循环微生物的原位培养与多样性分析 [J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(1): 1–13.
Wang L, Wang L P, Dong C M, et al. Deep sea *in situ* cultivation and diversity analysis of microorganism involved in nitrogen cycling in the South China Sea [J]. Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(1): 1–13.
- [21] 酆炳杰. 深海实验生态系统时间序列原位观测装置的研制 [D]. 杭州: 浙江大学(硕士学位论文), 2018.
Li B J. Development of time series in situ observation device for deep-sea experimental ecosystem [D]. Hangzhou: Zhejiang University(Master's thesis), 2018.
- [22] 李世伦, 侯继伟, 叶树明, 等. 深海极端环境模拟平台控制系统研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(11): 1769–1772
Li S L, Hou J W, Ye S M, et al. Control system of simulating platform for deep-sea extreme environment [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2005, 39(11): 1769–1772.
- [23] Yang S S, Lv Y X, Liu X P, et al. Genomic and enzymatic evidence of acetogenesis by anaerobic methanotrophic archaea [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1–12.
- [24] 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 Z H, Shi X P. Deep-sea technology and sustainable development [J]. Ocean Development and Management, 2011, 28(7): 41–46.
- [25] 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 B H, Ding Z J, Shi X P, 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.
- [26] 中国科学院海斗深渊前沿科技问题研究与攻关战略性先导科技专项研究团队. 开启深渊之门——海斗深渊前沿科技问题研究与攻关先导科技专项进展 [J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(9): 1105–1111.
Team of Strategic Priority Program of Frontier Study on Hadal Science and Technology. Open a door to the hadal trenches—Progress on frontier study on hadal science and technology [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(9): 1105–1111.
- [27] 陶军, 陈宗恒. “海马”号无人遥控潜水器的研制与应用 [J]. 工程研究, 2016, 8(2): 185–191.
Tao J, Chen Z H. Development and application of HAIMA (ROV) [J]. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 185–191.
- [28] 杨磊, 杜志元, 陈云赛, 等. 我国三类典型深海运载装备应用技术研究 [J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(9): 100–106.
Yang L, Du Z Y, Chen Y S, et al. The operation and application technology of China's three typical deep-sea submersibles [J]. Ocean Development and Management, 2018, 35(9): 100–106.
- [29] 刘振宇, 管泉, 刘瑾, 等. 青岛市海洋环境观测产业发展 [J]. 中国科技信息, 2016 (10): 96–99
Liu Z Y, Guan Q, Liu J, et al. Development of marine environment observation industry in Qingdao [J]. China Science and Technology Information, 2016 (10): 96–99.
- [30] 马贝, 王彦霖, 高强. 国外海洋产业发展经验对中国的启示 [J]. 世界农业, 2016 (7): 79–84.
Ma B, Wang Y L, Gao Q. The enlightenment of foreign marine industry development experience to China [J]. World Agriculture, 2016 (7): 79–84.