

# 我国南海资源开发装备发展研究

田辰玲<sup>1,2</sup>, 杨建民<sup>1,2,3\*</sup>, 林忠钦<sup>1</sup>, 李欣<sup>2,3</sup>, 程正顺<sup>2,3</sup>, 柳存根<sup>1,2</sup>

(1. 中国海洋装备工程科技发展战略研究院, 上海 200240; 2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;  
3. 上海交通大学三亚崖州湾深海科技研究院, 海南三亚 572024)

**摘要:** 南海是我国面积最大的海域, 超过 70% 为深海区域, 蕴藏着丰富的深海资源, 尤其是深海油气、深海矿产等。高温、高湿、高盐是我国南海区别于其他海域的主要特征, 研究适用于南海资源开发的海洋装备具有重要的战略意义。本文首先分析总结了国内外主要海洋资源开发装备的发展现状及趋势, 详细分析了南海资源开发装备的发展需求与关键技术, 提出了南海资源开发装备的发展目标和发展思路等。最后从装备与产业发展角度, 提出了南海资源开发装备产业的发展建议: 依托海南省建设深海油气开发关键技术研发中心和应急救援中心、深海矿产资源开发装备研发中心、深海养殖示范区和试验区以及国家南海深远海海上综合试验场等, 逐步建设“国家深海科技创新中心”“国家深海工程装备保障基地”“国家深海科技产业中心”等。

**关键词:** 南海资源; 海洋装备; 深海油气资源; 深海矿产资源; 海上试验场

**中图分类号:** TU982.2 **文献标识码:** A

## Development of Resource Exploitation Equipment for South China Sea

Tian Chenling<sup>1,2</sup>, Yang Jianmin<sup>1,2,3\*</sup>, Lin Zhongqin<sup>1</sup>, Li Xin<sup>2,3</sup>,  
Cheng Zhengshun<sup>2,3</sup>, Liu Cungen<sup>1,2</sup>

(1. China Strategy Institute of Ocean Engineering, Shanghai 200240, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. SJTU Yazhou Bay Institute of Deepsea Science and Technology, Sanya 572024, Hainan, China)

**Abstract:** South China Sea is the largest sea of China with over 70 percent of it being deep-sea area, which is rich in deep-sea resources, particularly oil, gas, and mineral resources. Besides, high temperature, high humidity, and high salinity are the major features that distinguish South China Sea from other sea areas. Therefore, it is of strategic significance to study marine equipment suitable for resource exploitation in South China Sea. This study first reviews the development status and trend of major marine resource exploitation equipment both in China and abroad, examines the development demand for and key technologies of resource exploitation equipment for South China Sea, and proposes the development goals and ideas for the equipment. Furthermore, several suggestions are proposed from the perspective of equipment and industry development. Specifically, a key technology research and development (R&D) center and an emergency rescue center for deep-sea oil and gas development, a R&D center for deep-sea mineral resource exploitation equipment, a deep-sea aquaculture demonstration and experimental area, and a national deep-sea comprehensive test site in the South China Sea are proposed to be built relying on Hainan Province, thus to gradually establish a national deep-sea

**收稿日期:** 2023-03-08; **修回日期:** 2023-05-10

**通讯作者:** \*杨建民, 上海交通大学三亚崖州湾深海科技研究院教授, 主要研究方向为海洋深水平台水动力学; E-mail: jmyang@sjtu.edu.cn

**资助项目:** 中国工程院咨询项目“海洋装备重大基础技术与创新能力建设战略研究”(2022-HYZD-07)

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

science and technology innovation center, a national deep-sea engineering equipment support base, and a national deep-sea science and technology industry center.

**Keywords:** resources in the south china sea; marine equipment; deep-sea oil and gas resources; deep-sea mineral resources; sea test site

## 一、前言

海洋是我国高质量发展的战略要地。党的十八大和十九大分别提出了“建设海洋强国”和“加快建设海洋强国”的发展战略，二十大再次强调“加快建设海洋强国”。我国海洋国土面积约为 300 万平方千米，其中南海面积约为 200 多万平方千米，占全国海域面积的 2/3 左右。南海平均水深达 1212 m，超过 70% 的海域为深海区域。南海不仅富含石油、天然气、天然气水合物、砂矿等矿产资源，还拥有丰富的渔业资源、可再生能源等<sup>[1]</sup>。其中，南海的石油天然气资源量约为  $3.5 \times 10^{10}$  t 油当量，其中南部资源量约为北部的 3~4 倍。我国南海石油天然气总资源量仍在接续勘探。在经济方面，据《2021 年中国海洋经济统计公报》显示，南海海洋生产总值占全国 39.3%，在全国各大海洋经济圈中占比最大<sup>[2,3]</sup>。南海是开展深海研发和试验的最佳天然场所，需加快发展深海科技事业，推动我国海洋科技全面发展。南海海域辽阔、资源丰富、战略地位突出，是我国加快海洋强国建设的重要支撑点。近十年来，随着我国军事实力不断增强，填海造岛等民用技术不断发展<sup>[4]</sup>，我国已具备挺进南海深处的实力和条件，南海深海资源利用蓄势待发。

然而与世界海洋强国相比，我国海洋产业发展模式粗犷，极度依赖资源，属于典型的外向型经济形态。开发海洋，装备先行，开发高科技的海洋资源开发装备，将促进我国海洋产业转型升级，助力海洋强国建设。

海洋装备在海洋科学研究、资源开发与安全权益保障等方面至关重要。深海探测、深海开发进程方兴未艾，海洋装备技术正朝向“智能、绿色、深海、极地”快速发展<sup>[5]</sup>。南海的水深条件和地质情况决定了开发利用南海资源必须使用深海资源开发装备。针对上述南海主要资源种类，图 1 显示了南海资源开发装备的主要构成体系。除深海油气资源开发装备、深海矿产资源开发装备、海洋渔业养殖装备与海洋可再生能源开发装备外，海洋科学装备

是认识与开发海洋的重要基础保障。海上试验场可为深海资源开发装备的研发、测试与评估提供科学有效的试验环境，并能够获取长期连续、要素完备的数据资料，是海洋装备以及海洋科学领域的重要科研试验平台。

以往研究文献均对我国海洋装备技术发展存在的问题和重点方向进行了剖析<sup>[6,7]</sup>，指出我国海洋装备技术含量普遍较低、海洋与环境的立体观测能力亟待提升，目前主要以进口国外技术进行总装建造为主，缺乏核心竞争力。但是并未将海域规划、产业落地与各类海洋装备技术发展进行统筹考虑，也并未对南海资源开发装备进行过深入分析。本文主要研究了国外及我国南海资源开发装备的发展现状与趋势，分析了各类型南海资源开发装备的关键核心技术、发展目标和发展思路。在此基础上，提出南海资源开发装备与产业的发展建议。

## 二、全球海洋资源开发装备的进展与趋势

### (一) 深海油气资源开发装备

1. 海洋油气资源开发走向深海已成为全球趋势  
海洋油气资源开发装备产业具有典型的“三高”特征，即高投入、高风险与高技术。海洋环境复杂恶劣，尤其是深远海，给油气资源开采带来巨大挑战。海洋油气资源开采难度大、成本高，对装备技术要求高。目前，随着海洋油气钻采装备和技术不断提高，墨西哥湾、巴西、西非等重点海域的钻井作业水深不断刷新纪录，油气资源开发由近海

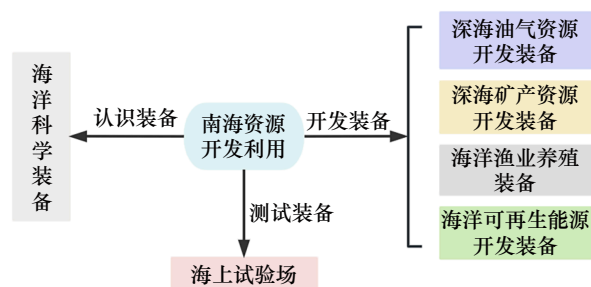


图 1 南海资源开发装备体系

向深远海挺进已成为全球趋势。此外，受俄乌冲突影响，能源价格持续高位运行，克拉克森海工指数不断上涨，可见油气行业正处于上行周期，海洋油气产业前景日趋乐观。

2. 浮式生产储卸油装置（FPSO）、浮式液化天然气生产储卸装置（FLNG）成国际热门深水油气生产装置

按照海洋油气资源开发流程，海洋油气资源开发装备分为勘探装备、钻井装备、施工装备、生产装备和应急救援装备五大种类。在勘探装备领域，物探船的产地主要集中在欧洲，其中挪威是物探船配套设备和建造船厂最集中的国家。目前，全球具备设计和开发大型物探船能力的国家较少，船型开发主要由一些挪威的设计公司主导。在钻井装备领域，目前全球主流的装备大多以半潜式钻井平台和钻井船为主。超深水浮式钻井平台供给依旧紧张，克拉克森钻井装置指数已达到2015年以来的最高纪录。尽管我国自主设计建造的全球最新型半潜式钻井平台“深蓝探索”已在南海海域服务作业<sup>[8]</sup>，但相比于美国Future Rig智能钻机、德国TI-350T自动化钻机，我国海洋油气开采的关键钻井设备在自动化和智能化方面的水平仍较为落后，主要钻井设备依赖进口，如“蓝鲸I号”的钻井设备来自于美国国民油井华高（NOV）公司。在施工装备领域，又可细分为起重船、铺管船、拖轮、深水工程船、驳船（浮托、下水、运输）等。随着相关技术的不断革新，施工装备逐渐向多功能、大型化发展。在生产装备领域，FPSO、半潜式生产平台、FLNG等装备是目前全球主流的深水油气生产装置。我国已可自主设计建造和安装FPSO，也已具备独立自主建造和安装半潜式生产平台的能力，但是设计能力和部分核心设备仍需要依靠国外公司完成。FLNG具有开采灵活、可独立开发、可回收和可运移等特点，已在西班牙、澳大利亚、马来西亚等国家海域服役<sup>[9]</sup>。韩国在FLNG制造领域一直处于领先地位，我国在该领域尚处于研发阶段。在应急救援装备领域，我国研制了“水上、水下、井下”多源实时监测的井喷智能预警系统，可有效保证人员和设备安全，同时避免海洋环境被污染和破坏，目前我国已成为全球第四个具备独立生产水下应急封井装置的国家。

## （二）深海矿产资源开发装备

1. 欧美、日本等已形成深海采矿装备基本技术体系

深海采矿装备是涵盖水下作业、水中输送和水面设施等全方位的平台和系统设备体系，主要分为平台类、作业系统类和支持系统类。平台类装备主要包括深海勘查装备、深海矿产勘探装备、深海采矿装备和水面支持保障装备等。其中深海矿产勘探装备和深海采矿装备属于深海采矿领域的专用装备，目前仍处于研发阶段，尚未实现商业化开采<sup>[9]</sup>。美国、日本、欧洲等国家和地区通过长期的探索和研究，已经完成了大量的相关技术储备。2006年加拿大鸚鵡螺矿业公司在巴布亚新几内亚的马努斯（Manus）盆地海底对深达1500 m的海底多金属硫化物进行首次切削采集。2017年日本在冲绳附近海域成功对海底多金属硫化物矿石进行采矿作业，并通过扬矿管道将采集矿石提升至采矿船上。由此，日本成为世界上首个成功实现连续采集海底多金属硫化物矿的国家。2020年7月，日本国家石油、天然气和金属公司（JOGMEC）在南岛礁南部的日本专属经济区内，成功实施了世界首次富钴结壳的采矿试验。

2. 我国正处于深海采矿装备技术关键攻克阶段

我国自20世纪90年代以来，大力开展深海采矿技术研究，进展显著。2018年5月，长沙矿冶研究院有限责任公司、长沙矿山研究院有限责任公司和中南大学联合研制的“鲲龙500”采矿车，长沙矿山研究院有限责任公司牵头研制的“鲲龙2000”富钴结壳中试样机，分别成功在南海海域完成了500米级水深的海底试验、在西太平洋的富钴结壳合同区海山获取了百公斤级天然结壳矿样，首次实现了模拟矿物的收集、海底稀软底质行走、水下导航定位等多项关键技术的突破<sup>[10,11]</sup>。2021年7月，我国在南海成功进行了1300米级水深的多金属结壳全流程开采海试，获取到一千多千克的多金属结核。

综合来看，深海采矿装备总体朝着多样化、高效率、大深度、智能化、环保化等方向发展，并逐步从试验验证阶段向试开采阶段迈进。

## （三）海洋科学装备

高信息化水平和能力是当今世界海洋强国开发和利用海洋资源的核心要素，其主要体现在海洋观测装备上。按照观测区域划分，可分为水下观测平

台、水面观测平台和移动式观测平台。其中,水下观测平台有美国国家海洋和大气管理局(NOAA)管理的,位于佛罗里达群岛国家海洋保护区的Aquarius Reef Base水下实验室,以及德国“赫尔戈兰”(Helgoland)水下实验室等,建在水面以下20 m左右。水面观测平台包含海洋遥感卫星、Argo浮标等。世界首颗海洋专用卫星由美国于1978年发射,结合后续发射的海洋风速测量卫星等,共同构成海洋监视卫星系统。日本长崎大学和京瓷公司联合开发的,用于建立全球海洋观测网的智能监测Argo浮标,可自动测量海面到2000 m水深之间海水的温度、盐度随深度的变化,并可获取海水的流速和流向。移动式观测平台种类丰富,包括科考船、无人自主式潜水器(AUV)、水下滑翔机等。美国是世界上科考船数量最多、设备最先进的国家,“Sikuliaq”极地科考船配备了船艏侧推器,破冰等级为PC5。美国科考设备几乎已经全部实现了产品化和系列化。日本“Kaimei”号海洋调查船设有5个实验室,配置多种海底资源取样装置。“雪龙号”极地系列科考船是我国目前唯一能在极地破冰航行的船舶,是世界上第一艘配有“宽带全球区域网络”系统的科考船。AUV因其具有自主水下航行与探测的优势,具有良好的应用前景。美国的“Sentry”号、“REMUS”号潜水器是典型的水下深潜器,后者已形成谱系化装备,可进行海洋环境远程监测。此外,波浪滑翔机是一种新型移动观测平台,具有无限续航、耐恶劣海况、隐身性好、成本较低等优点,在海洋环境调查、海洋生物监测、原油泄漏监测、军事侦察、水下目标探测、海天通信中继等方面拥有广阔的应用前景<sup>[12]</sup>。截至目前,美国SV3代波浪滑翔机已实现跨太平洋航行,并多次在恶劣海况下进行测试。我国多家机构相继开展了相关的研究工作,如中国海洋大学研发的“黑珍珠”波浪滑翔器。

#### (四) 海洋渔业养殖装备

1. 传统海洋养殖与捕捞出现瓶颈,深远海养殖正快速发展

海洋拥有丰富的生物资源,每年可提供约 $1 \times 10^8$  t优质蛋白,是人类健康生存与持续发展的重要保障。近年来,随着近海渔业资源衰退、海域空间利用冲突和沿岸生态环境破坏等问题陆续出现,

传统沿岸养殖和近海捕捞发展难以为继,现在逐渐转向深远海养殖。对深远海养殖装备研究比较早的国家主要有挪威、日本、美国、智利等。从20世纪70年代起,挪威在附近海域利用大型浮式网箱进行鲑鱼养殖,成为世界上首个进行离岸养殖的国家。紧接着,海洋渔业发达的欧美国家和地区陆续开展深远海养殖技术试验。深远海养殖网箱、养殖平台、养殖工船等高技术密集装备均是目前全球热门的深远海养殖装备。

2. 深远海养殖装备具有技术密集度高、造价昂贵的特点,大型深海网箱仍处于探索阶段

目前深远海渔业装备主要有深海养殖网箱、养殖工船等。深海养殖网箱高新技术和高附加值装备密集,如大型网衣、投饵装备、水下洗网装备、死鱼回收装备等。其中,挪威的深海网箱养殖技术最为成熟、发展最为迅速,其研发的大型深海网箱技术处于全球垄断地位。具有代表性的是挪威“Ocean Farm 1#”网箱,三文鱼年产量可达 $2 \times 10^6$ 条,单井年产值约为11.25亿元。养殖工船属于“深海养殖2.0装备”,具有自身可游弋适渔的特点,打破了渔业养殖受季节影响的限制,可进一步实现稳定高效的一体化生产。但其也存在造价昂贵,技术复杂等问题。目前,大型养殖网箱技术仍处于探索和试验阶段,这给我国在相关领域的发展带来重要机遇和挑战<sup>[13,14]</sup>。

#### (五) 海洋可再生能源开发装备

1. 海洋可再生能源前景广阔,将助力碳达峰、碳中和目标

海洋可再生能源被联合国视为当今最理想、最有前景的新能源之一。大力发展海洋可再生能源有助于国家调整能源结构,实现能源脱碳目标。狭义上,海洋可再生能源指的是潮汐能、潮流能、波浪能、温差能、盐差能等,广义上还包括海洋生物质能、海上氢能和海上风能等。国际海洋可再生能源产业前景广阔。据英国碳信托(Carbon Trust)咨询机构发布的《海洋能绿色增长报告》显示:到2050年,国际海洋可再生能源市场投资潜力乐观估计将达4600亿英镑,欧盟海洋可再生能源总装机容量将达 $10^{10}$  MW,可满足欧洲10%的电力需求。欧洲及美国等国家和地区均在海洋可再生能源产业领域大力布局。全球浮式风电快速发展,已有若干示范性工

程。波浪能和潮流能尚未实现产业化，目前正处于工程样机实海测试阶段。海洋温差能在美国夏威夷和日本等地均有应用。

2. 海洋可再生能源试验场成为海洋可再生能源发展的重要装备

目前，国际上已建成30多个海洋可再生能源试验场，有力地推动了国际海洋可再生能源技术提升，促进其产业化。相比之下，我国海洋可再生能源试验场建设缓慢，无法为我国海洋可再生能源技术的提升和改进提供有效的公共支撑。而相比风电、太阳能等可再生能源，海洋可再生能源发电成本仍然居高不下。这些因素限制了海洋可再生能源产业的规模化建设。此外，开发和利用海洋可再生能源的用海审批，需要经过严格的环境影响评估等流程，也增加了项目开发的经济和时间成本<sup>[16]</sup>。

### （六）海上试验场

海上试验场是海洋技术装备研发、测试、评价及海洋科学研究的重要试验平台。主要类型有海洋装备类海上试验场、海洋科学类海上试验场和综合性海上试验场。美国、加拿大、日本、韩国和欧洲部分国家等均建有自己的海上试验场，有效促进了国际海洋科学研究、海洋技术装备研发以及海洋可再生能源的产业化。其中，较为知名的海上试验场主要有美国蒙特雷湾海上试验场（军民共用海上综合试验场）、加拿大海王星海底观测站（军方海上海洋科学类试验场）等<sup>[16]</sup>。美国蒙特雷湾海上试验场具备深海观测、自主海水采样、实时环境分析、海洋信息采集和交叉学科数据评估等能力，是国际大科学计划（“海王星”计划）的重要组成部分。加拿大海王星海底观测站主要通过搭载系列传感器来监测地震、海啸等海洋自然灾害事件，以及海洋生态系统活动等<sup>[17,18]</sup>。

## 三、我国南海资源开发装备发展现状与挑战

南海超过70%面积的海域属于深海。深海油气与矿产等深海资源目前远未被开发利用，未来开发潜力巨大。深海充满着未知与挑战，深海资源的开发利用，离不开各类深海装备。

世界海洋强国纷纷都在海洋领域发展科技含量高、附加价值高的海洋装备与设施。欧洲、美国、

日本、韩国等国家和地区在深水浮式平台、大型施工作业装备、水下生产系统以及深海矿产资源开发等方面主导着国际标准和规则。

我国正处于百年未有之大变局的关键时刻，对海洋领域资源开发装备的发展需求比以往任何时候都更为迫切。高技术的海洋装备将大力推动我国勘探开发海洋资源、促进海洋经济与产业蓬勃发展，加速海洋强国建设。

### （一）发展现状与趋势

1. 南海中南部油气资源开发潜力巨大，深海油气资源开发装备炙手可热

从2013年至今，中国新增石油天然气产量的72%来自海洋，海洋油气是中国油气产量的主要增长点。当前南海油气资源开发主要以北部湾的石油资源开发为主<sup>[19,20]</sup>，如荔湾3-1、流花16-2、深海一号等11个油气田。而南海中南部的资源量约为北部的3~4倍，南海中南部为深水海域，其油气资源开发离不开深海油气资源开发装备。深海油气资源开发装备的服役环境和工况极为恶劣，深水隔水管、水下采油树等设备的失效风险极大，因此深海油气资源开发装备的研发难度大，属于技术密集型、高附加值产品。全球首座10万吨级深水半潜式生产储油平台“深海一号”是我国深海油气开发装备的典型代表，标志着我国海洋石油开采逐步走向深海。

2. 深海矿产资源开发装备正处于单体海试阶段  
近年来，国际政治形势变化导致战略性矿产资源紧张，我国铜、钴进口量占比达70%以上，而海洋储量远高于陆地储量，海陆比高达55.2。我国是海底矿种和矿区最多的国家，大洋矿产开采势在必行。南海是中国深海矿产资源开发装备的重要海试场所，目前相关海试均在南海开展，通过深海采矿装备的前期技术探索，积累了宝贵经验。我国目前对深海矿产资源开发装备研发较为成熟的是深海采矿重载作业装备，主要包括矿石采掘装备、矿石破碎装备和矿石收集装备。其中矿石采掘装备研制基本处于原理样机设计阶段，并主要针对多金属结核和富钴结壳开展了采集实验。在矿石破碎装备方面，我国主要在富钴结壳样机上进行了配置，其他矿种上研究较少。而对矿石收集装备的研究则较早，对三种矿物质均进行了试验验证。集矿方式主要有水力式集矿、水力-机械复合式集矿等。矿石输送装备作

为深海采矿的第二环节,我国自“八五”时期便开始进行研究,输送系统的自主设计能力不断提高,在南海多次进行提升系统试验性验证。而对于水面支持装备,系统极其复杂,我国相关经验较为缺乏。综合来看,南海已具备深海矿产资源开发装备先发优势,有望形成国际深海采矿装备研发高地。

### 3. 海洋科学装备向“透明化”“数据化”方向发展

信息化水平和能力是世界海洋强国的主要参考依据,更是未来开发和利用海洋的核心要素。南海海洋科学未来势必将向“透明化”“数据化”战略方向发展<sup>[21]</sup>。南海海底观测网作为我国“两洋一海”的海底观测网络体系的重要核心部分,目前已经布放了大型浮标、深海潜标以及其他海洋科学观测装备,观测水平处于国际领先。“三龙”探海以及“奋斗者号”全海深载人潜水器代表着我国海洋探测装备已处于国际并跑水平。“向阳红”“雪龙”“东方红”等系列科考船标志着我国海洋科考装备向谱系化发展。但是整体来看,我国海洋科学装备发展体系仍有待完善,智能化水平有待提高。

### 4. 我国深远海养殖装备研究虽起步较晚,但已具备总装建造能力

南海拥有丰富的海洋渔业资源,如石斑鱼、军曹鱼等,临近南海的海南省建设有7座 $1 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的大型渔场。但是,养殖主体以不规范的小企业和养殖户为主,现代化大型企业偏少,产品附加值低<sup>[22]</sup>。此外,我国已具备深远海养殖装备如大型网箱、养殖工船的总装建造能力,南海渔业养殖装备与产业发展具备坚实的基础。大型化、综合性的深远海养殖装备陆续建成,世界首座全潜式深远海养殖网箱“深蓝一号”也是我国首个深远海渔业养殖装备,突破了大型全潜式装备在总体设计、运动控制、鱼苗全方位监测与养殖等方面技术,开启了我国深远海养殖装备的新时代。我国又陆续建成了全球首座单柱式半潜深远海大型网箱渔场“海峡一号”,可在45 m以深海域作业。

### 5. 海洋可再生能源装备产业未来发展空间广阔

我国海洋可再生能源开发装备的研发技术水平与国际差距正逐步缩小。我国江夏潮汐电站总装机达4.1 MW,位居世界第四。在南海偏远海岛并网运行的“先导一号”波浪能装置属全球首次。潮流能发电机组已处于样机海试阶段,如浙江大学的水平

轴潮流能机组和LHD垂直轴潮流能机组。南海有着丰富的海洋可再生能源,如海上风能、太阳能、波浪能和温差能等能源形式,为南海海洋可再生能源开发梯级推进提供了广阔空间资源,其中年平均风功率密度约为 $350 \text{ W/m}^2$ ,南海温差能资源潜在储量约为 $3.67 \times 10^8 \text{ kW}$ ,主要集中在南海中部和东部。

6. 海上试验场将推动完善海洋装备实海测试体系  
我国海洋综合试验场体系建设按照“北东南”“浅海+深远海”的布局,将规划建设威海、舟山、珠海和“深海”四个国家海洋综合试验场。目前,我国首个“国字号”海洋综合试验场已落户威海,包括海上和陆地两部分。海上部分主要用于建设仪器装备试验平台、海洋观测站、波浪能与潮流能试验泊位等。陆上部分主要用于建设试验场控制中心、岸基测试与观测站、配电站等基础设施。南海具有高温、高湿、高盐特征,是实海测试的最佳场所。随着南海科学研究、海上技术装备海上测试需求日益增多,规划建设海上试验场(包含近海和深远海),可为南海科学研究、海上技术装备开发、测试与评价等提供科学可靠的实海试验环境,并能够获取长期连续、要素完备的数据资料,将有效促进深海科技、深海产业的发展。建设南海海上试验场体系,可有力支撑我国海洋强国建设<sup>[23]</sup>。

## (二) 存在问题与挑战

### 1. 南海油气资源开发装备配套能力较弱,高端产业链尚未形成

南海未来油气资源开发的重点区域位于南海中南部,以天然气为主,主要采用水下生产系统。目前几乎处于空白阶段,未取得实质性突破。海南将成为南海油气资源(尤其是中南部天然气)开发的重要基地,但是目前南海油气资源开发装备产业存在设计研发力量薄弱、装备设计规范与海洋环境要求存在差距、海洋石油机械配套能力与国外相比差距大等问题;高端产业链尚未形成;专业人才缺乏,技术储备不足,创新和研发能力薄弱,限制了产业规模进一步扩大。

### 2. 深海矿产装备仍处于样机研发阶段

深海矿产资源开发产业将成为我国新兴的战略产业。美国、欧盟、日本等基本完成了深海矿产资源开采装备的全流程实验,形成深海矿产资源开发的基本技术体系,并主导国际标准和规则制定,

商业化开采呼之欲出。我国深海采矿装备目前处于样机研发阶段，距离商业化仍有一定距离。

3. 海洋科学装备重集成，缺创新，科考数据共享程度低

受限于恶劣的环境，缺乏对南海海洋资源时空分布的精确了解，因此南海一直是海洋科学研究的短板。而科学装备一直以集成制造为主，在高性能材料、智能控制等关键核心技术方面缺乏原创成果，关键设备长期依赖进口，国产装备可靠性和精确性较差。临近南海的海南省内从事海洋装备生产加工和配套的企业依然较少，导致海洋探测设备采购、使用、维护成本较高。此外，海洋相关的科考数据缺乏国家级的统一标准，数据共享与整合难度较大。

4. 近海渔业空间不足，且传统养殖装备不适用深海养殖

由于近海渔业资源空间严重不足，地缘政治冲突加剧、生态环境问题日益突出等，深海渔业将成为海洋渔业现代化产业的新发展领域。但是深海环境恶劣，台风频发、浪大流急，传统养殖装备极易损坏，因此不适用于深海养殖。目前深海养殖装备与产业正处于起步阶段，养殖装备相对比较落后，智能化和绿色化水平较低，新一代深海养殖装备技术亟需突破。

5. 海洋可再生能源装备缺乏工程化示范标准，距离产业化尚早

开发南海海洋可再生能源的条件日渐成熟。开发海洋可再生能源并实现其产业化发展，已经成为南海周边省份促进经济高速发展，维护区域间能源安全，实现节能减排的重要保障。海洋可再生能源技术成熟度虽然已经达到一定程度，然而缺乏工程化示范标准，距离产业化尚有一定距离。再者，南海可再生能源开发装备技术研发占比较大，而装备制造、工程建设和并网运行占比较小。

6. 我国现有海上试验场功能较为单一，且主要聚焦于浅海

我国海上试验场建设仍处于追赶国外发达国家的阶段，目前的海上试验场大多位于浅海的高纬度海域，主要用于海军和涉海科研院所等机构进行新研发仪器设备检验。功能均较为单一、融合发展有所欠缺、服务领域也较为狭窄，同时用海审批问题也比较突出，尤其是南海海上试验场的建设，在与海洋生态环境问题的协调中，对试验场选址是个极

大的挑战。

#### 四、我国南海资源开发装备关键核心技术体系

##### (一) 深海油气资源开发装备关键技术

深水及超深水油气资源开发是一项庞大的系统工程，因此南海油气资源勘探开发需要安全、可靠、高效的海洋油气资源开发装备，包括但不限于各式钻井平台、生产平台、特种船舶等<sup>[24,25]</sup>。

南海深水油气田勘探开发主要包括深水油气勘探、钻井及生产平台设计制造、深水钻井、深水钻完井、深水钻井应急救援，以及深水油气生产和输送等环节，各环节涉及的主要装备有深水浮式钻井平台、深水钻井隔水管、水下井口系统、深水油气生产平台、水下采油树及管汇系统、水下生产控制系统等，主要涉及的关键技术如表1所示。

智能化深水钻完井修井及深水应急救援体系、水下生产系统等深海油气资源开发关键设备长期依靠进口，亟待实现国产化发展。可将智能化与数字化技术赋能于油气资源开发各环节，需要重点攻克的技术包括水下生产系统设计制造技术、深水钻完井关键技术与深水钻井应急救援技术。此外，随着海洋油气开发向超深水迈进，其内部高温高压的复杂环境使得控压钻井技术越来越受重视。

表 1 南海油气资源开发装备关键技术

主要环节	关键核心技术
深水油气勘探	深水油气地震勘探技术 深水油气探井钻探技术
钻井及生产平台设计制造	总体结构设计制造技术 平台定位系统技术 平台信息通信技术
深水钻井	深水表层高效钻井技术 深水极窄压力窗口安全钻井技术
深水钻完井	深水钻完井安全高效作业技术 隔水管安装与作业控制技术 水下井口系统设计制造与安装技术
深水钻井应急救援	井口安全监控及预警技术 深水救援井技术
深水油气生产和输送	深水油气生产平台动态响应控制技术 水下采油树系统设计制造与控制技术 水下生产系统设计制造与安全控制技术

## (二) 深海矿产资源开发装备关键技术

深海矿产资源开发五大体系,即矿产勘探装备、水面支持装备、海底采矿装备、水下输送装备、采矿对生产环境影响与评估,其涉及的关键技术如表2所示<sup>[26]</sup>。

近五年内攻克深海矿产资源开发装备各体系的关键技术,重点布局海底矿产精探、水面支持、海底开采、环境评估与修复等方面的技术攻关,实现深海矿产开发所需的关键核心技术的突破,为深海矿产商业试采奠定基础。近十年内实现深海矿产资源勘探、开采、监测和平台建设等核心技术的系统性攻克,建立深海矿产资源开发技术装备体系,实现深海矿场商业化试采。

遵循勘探、开采、监测和平台等技术装备研发与深海矿产成矿系统理论研究一体化协同发展的思路,充分结合智能互联、智能感知等先进前沿技术,开展深海采矿多装备共融实施和信息化决策技术,建立绿色、高效、安全、智能的深海采矿装备体系。

## (三) 海洋科学装备关键技术

按照主要海洋科学装备进行分类,即科考船、深海潜水器、海底观测网等,并对其各自的关键核心技术进行梳理总结,如表3所示。

绿色化、智能化的海洋科学装备已成为全球主流。通过研制建造综合性的大型科考船、空海一体的海洋立体观测网,深海载人/无人潜水器实现谱系化发展,使得各类现代海洋观测技术得到集成发

表 2 深海矿产资源开发装备关键核心技术

主要体系	关键核心技术
海底矿产勘探装备	成矿机理和海底矿区分布规律研究 海底钻机群智能协同勘探技术 海底钻探岩芯原位实时分析技术
水面支持装备	深海采矿船精确定位和随动控制技术
海底采矿装备	深海环境综合感知技术 深海精确导航与定位技术 海底自主行进控制技术
水下输送装备	水下长距离粗颗粒矿石输送技术 固液两相流矿浆输送技术 水下中继舱稳定性与优化设计技术
生态环境影响与评估	海底长期实时多参数监测技术 海洋生物群落代谢指标原位监测技术 海洋环境噪声监测技术

表 3 海洋科学装备关键核心技术

主要分类	关键核心技术
科考船	绿色能源动力推进技术 智能控制、集成与航行技术
深海潜水器	水下潜航体技术 水下通信定位技术 耐压与水密技术 浮力材料技术
海底观测网	传感器技术 光纤传输技术 空海一体化信息网络系统技术

展,全方位、多区域综合感知海洋信息,最终目标是建设“透明海洋”。

## (四) 海洋渔业养殖装备关键技术

海洋渔业养殖已逐渐走向深远海,对养殖装备与技术提出了更高的要求<sup>[27]</sup>。养殖网箱、养殖工船均属于高价值、高技术装备,其大型网衣设计建造技术、自动投饵技术、网衣高效清洁技术、水下传感技术、渔获起捕技术等均是深海养殖装备的关键核心技术。

深海养殖系统需向多功能、智能化、创新型方向发展。通过应用新材料技术、智能化技术以及防腐防污技术,并与大型海洋工程结构设计制造技术融合发展,为海洋渔业养殖走向深远海提供装备支撑与技术保障。

## (五) 海洋可再生能源开发装备关键技术

根据海洋可再生能源种类,海洋可再生能源开发利用技术主要包括潮汐能发电技术、波浪能转换技术、规模化潮流能开发利用技术、海洋温差能和盐差能开发利用技术以及浮式风电技术等。其共性技术中的关键核心技术涉及发电机组制造技术、电力并网输送技术、储能技术等,对于浮式风电平台,高压直流输电电缆技术、全直流风电场技术、大容量风机技术等均是关键核心技术。

规模化、可靠性高的海洋可再生能源开发装备是我国海洋能高质量发展的前提保障。“双碳”目标下,我国海洋可再生能源综合开发利用是未来重要的发展方向,可通过海洋可再生能源发电为深海油气平台、深远海养殖平台等提供电力保障,将绿



色发展深入融合到南海资源可持续开发利用中。

### （六）海上试验场关键技术

南海资源开发装备需要在高温、高湿、高盐环境中进行相关测试，南海海上试验场将提供绝佳的试验场所。建设南海海上试验场需要攻克的关键核心技术主要包括海洋水文环境监测技术、水面目标感知与识别技术、水下目标定位测量技术、海洋材料与防腐技术、岸-海及试验场区供电与通信技术等。

五年内在南海建设近海试验场，可在海上试验场中建设海洋装备调试与功能试验区、可再生能源装备测试区、海洋传感器测试区、海洋材料防腐试验区、深海潜水器测试区以及其他水面智能装备测试区等功能测试区，为国家试验场的全面建设和运行积累技术基础和运行管理经验。

## 五、我国南海资源开发装备与产业发展建议

南海资源开发在我国海洋产业发展中具有举足轻重的地位。南海作为我国南部边疆，是我国深海战略性资源开发的前沿，也是维护国家安全和海洋权益的重点区域。建议把南海和海南省作为中国深海开发的核心承载区，2030年前将海南省打造成为“国家深海科技创新中心”与“国家深海工程装备保障基地”。2035年前建设成“国家深海科技产业中心”，通过整合“政产学研”各方力量，以科技创新推动南海资源开发装备体系发展，构建现代化深海产业体系。

为此，提出以下南海资源开发装备与产业发展重点任务。

### （一）深海油气资源开发装备与产业发展建议

一是建设深海油气开发关键技术研发中心和应急救援中心。通过吸引国内外优势企业聚焦水下生产系统等深海油气配套装备开发生产，大力研发水下采油树、防喷器等水下生产系统装备和无人遥控潜水器（ROV）等深海作业检测和维修装备；打造南海油气资源开发应急救援中心，主要研制水下应急封井器等深海油气应急救援关键装备。

二是重点扶持南海油气资源开发装备的高科技产业，打造中国“休斯顿”。首先建设海洋油气高

端技术研发与服务产业链，推动高端海洋油气产业与配套上下游制造业快速发展。其次将深海能源大会打造为与OTC齐名的国际两大深海油气开发交流平台之一，建设成重要的国际技术交流中心。

### （二）深海矿产资源开发装备与产业发展建议

一是组建深海矿产资源勘探技术研发中心、深海矿产资源开发装备研发中心、深海矿产资源开发生态环境影响评估中心。吸引深海采矿企业落户海南来进一步培育深海矿产资源开发产业链；设立深海矿产资源开发领域大型工程项目，牵头关键技术攻关。海南省可率先推出相关政策优惠，吸引投资商，整合相关涉海高校、科研院所和相关企事业单位，构筑深海采矿“产学研”一体化发展战略，打造深海采矿产业前沿阵地。

二是建设深海矿产资源开发产业园区。依托三亚崖州湾深海科技城，形成深海采矿总部产业，建设深海采矿产业园区，培育深海矿产资源开发产业链，提升企业整体科技水平，实现产业结构优化和行业跨越式发展。

### （三）海洋科学装备与产业发展建议

一是打造国际著名科考母港。以南山港为基地，吸引科考船、深潜器等国内外重要科考装备靠港开展科研工作。引育优势企业，发展水下摄像、水下照明、水下推进器等深海科考装备关键小件更换与维护，将三亚崖州湾建设为海洋科考维修保障基地。

二是建立南海科学数据库。基于法律和政策，明确原始数据产权归属、共享数据方式、成果利益归属等问题，推行国家级南海科学数据标准。

三是推动海洋微生物成果产业化。依托华大基因、上海交通大学微生物团队以及南海海洋资源利用国家重点实验室（海洋微生物资源开发与利用团队）等研发机构，重点推进工业酶、人类稀缺药物、基因工程等产业。

### （四）海洋渔业养殖装备与产业发展建议

一是打造南海深海现代化渔业装备研发平台。重点突破深海大型智能养殖网箱、养殖工船、深远海捕捞船、海上冷链运输船等装备的关键技术；针对石斑鱼、军曹鱼、龙虾、金枪鱼等高附加值鱼

类,利用深远海远程智能养殖平台和养殖工船,建设南海海洋牧场示范区。进而构建以深海渔业生产为核心,装备制造、饵料生产、种苗选育和加工物流为节点的深海渔业产业链,建立健全深海渔业产业链各环节间紧密型利益联结机制,推动深海渔业向区域化布局、专业化生产、一体化经营和企业化管理的方向发展。

二是建设南海深海养殖示范区与试验区。在南海西沙永乐群岛、南沙美济礁等水深 50 m 以上海域,依托远程智能养殖平台,重点养殖石斑鱼、军曹鱼、金枪鱼等珍贵鱼种,同时结合休闲垂钓等娱乐项目,培育南海深海养殖产业与休闲渔业。

### (五) 海洋可再生能源开发装备与产业发展建议

一是发展温差能综合利用关键技术与装备,推进其在南海岛礁的示范应用。建设温差能综合利用关键技术与装备研发中心,在南海岛礁开展工程示范应用,用于岛礁供电、淡水制备、冷水养鱼与蔬菜种植等。

二是推进漂浮式海上风机研发制造。在三亚崖州湾建设漂浮式海上风电设计研发基地,结合儋州洋浦、东方等固定式海上风电装备基地建设,推动海南省漂浮式海上风电产业的发展。依托三亚崖州湾深海科技城,建设 10 MW 级漂浮式海上风电示范工程。推进南海远海岛礁温差能装备研发,用于岛礁供电、淡水制备、冷水养鱼、蔬菜种植等。

### (六) 海上试验场发展建议

一是加快建设三亚崖州湾近海试验场。打造国内首个大型综合性海上测试公共服务平台,兼备实际海域大型装备功能性测试分析、配套设备长期作业效率测试评估、海洋观测和实验基地等全方位功能。

二是推进建设三亚崖州湾海洋可再生能源试验场。打造海洋可再生能源技术装备研发和测试、海洋可再生能源制氢系统研发和测试的大型海上公共服务平台,推动海洋可再生能源技术装备从实验室研发、工程样机向规模化和产业化发展。

三是建设国家南海深远海海上综合试验场。在近海试验场建设基础上,规划建设国家南海深远海海上综合试验场。充分发挥南海海域深度优势,大力推动深海科技创新,为国家深海科技提供试验服

务和技术保障。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** March 8, 2023; **Revised date:** May 10, 2023

**Corresponding author:** Yang Jianmin is a professor from the SJTU Yazhou Bay Institute of Deepsea Science and Technology. His major research field is hydrodynamics of offshore deepwater platforms. E-mail: jmyang@sjtu.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Development of Major Basic Technologies and Innovation Capabilities of Marine Equipment” (2022-HYZD-07)

#### 参考文献

- [1] 赵从举,韩奇.南海资源[M].桂林:广西师范大学出版社,2011. Zhao C J, Han Q. Resources of the South China Sea [M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2011.
- [2] 《2021年中国海洋经济统计公报》发布[J].浙江国土资源,2022(4):18. “The 2021 statistical bulletin of China’s marine economy” released [J]. Zhejiang land resources, 2022 (4): 18.
- [3] 王盛.21世纪海上丝绸之路的安全挑战及对策研究[D].济南:山东大学(硕士学位论文),2020. Wang S. An introduction to safety challenges and coping solutions of 21st Century Maritime Silk Road [D]. Ji’nan: Shandong University(Master’s thesis), 2020.
- [4] 杨华.海洋战略背景下我国南海填海造地的国际法分析[C].《上海法学研究》集刊(2019年第21卷),上海市法学会海洋法治研究会文集,2019:13-21. Yang H. International law analysis of land reclamation in the South China Sea under the background of marine strategy [C]. Shanghai Law Studies (Vol. 21 of 2019), Collection of Marine Rule of Law Studies of Shanghai Law Society, 2019: 13-21.
- [5] 吴有生,司马灿,朱忠,等.海洋装备技术的重点发展方向[J].前瞻科技,2022,1(2):20-35. Wu Y S, Si M C, Zhu Z, et al. Key development directions of marine science and technology [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 20-35.
- [6] 曹可.我国海洋装备技术发展的的问题与展望[J].科技创新导报,2011(4):2. Cao K. Problem and prospect of China’s marine equipment and technology [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011 (4): 2.
- [7] 倪国江.海洋资源开发技术发展趋势及我国的发展重点[J].海洋技术,2009,28(1):5. Ni G J. Development in marine resources development technology and China’s strategic focus [J]. Ocean Technology, 2009, 28(1): 5.
- [8] 谢彬,喻西崇,韩旭亮,等.FLNG研究现状及在中国南海深远海气田开发中的应用前景[J].中国海上油气,2017,29(2):127-134. Xie B, Yu X C, Han X L, et al. Research status of FLNG and its application prospect for deep water gas field development in South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(2): 127-134.
- [9] 李家彪,王叶剑,刘磊,等.深海矿产资源开发技术发展现状与展望[J].前瞻科技,2022,1(2):92-102. Li J B, Wang Y J, Liu L, et al. Current status and prospect of deep-

- sea mining technology [J]. *Science and Technology Foresight*, 2022, 1(2): 92–102.
- [10] 陈秉正. “鲲龙500”采矿车履带行驶机构的研制与试验研究 [J]. *采矿技术*, 2019, 19(5): 4.  
Chen B Z. Development and experimental study on track driving mechanism of “Kunlong 500” mining car [J]. *Mining Technology*, 2019, 19(5): 4.
- [11] 江敏, 陈新明. 鲲龙2000: 中国首台富钴结壳采矿车 [J]. *科技纵横*, 2018 (12): 2.  
Jiang M, Chen X M. Kun Long 2000: China’s first cobalt-rich crust-mining vehicle [J]. *Science and Technology Survey*, 2018 (12): 2.
- [12] 王鹏. 波浪滑翔机运动与控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学(硕士学位论文), 2019.  
Wang P. Research on motion and control of wave glider [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University(Master’s thesis), 2019.
- [13] 程世琪, 石建高, 袁瑞, 等. 中国海水网箱的产业现状与未来发展方向 [J]. *水产科技情报*, 2022, 49(6): 369–376, 380.  
Cheng S Q, Shi J G, Yuan R, et al. Current situation and future development direction of marine cage in China [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2022, 49(6): 369–376, 380.
- [14] 曹英志, 翟伟康, 张建辉, 等. 我国海洋渔业发展现状及问题研究 [J]. *中国渔业经济*, 2015, 33(5): 41–46.  
Cao Y Z, Zhai W K, Zhang J H, et al. Analysis of conditions and problems of the national marine fisheries [J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2015, 33(5): 41–46.
- [15] 彭伟, 王芳, 王冀. 我国海洋可再生能源开发利用现状及发展建议 [J]. *海洋经济*, 2022, 12(3): 70–75.  
Peng W, Wang F, Wang J. Status and development suggestion for the development and utilization of ocean energy in China [J]. *Marine Economy*, 2022, 12(3): 70–75.
- [16] 李彦, Kate Moran, Benot Pirene. 加拿大“海王星”海底观测网络系统 [J]. *海洋技术*, 2013, 32(4): 72–75, 80.  
Li Y, Moran K, Pirene B. Preliminary study on tidal current energy direct drive type seawater desalination system [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2013, 32(4): 72–75, 80.
- [17] 李建如, 许惠平. 加拿大“海王星”海底观测网 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(6): 656–661.  
Li J R, Xu H P. NEPTUNE-Canada [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(6): 656–661.
- [18] 马蕊, 赵修涛, 柳存根. 海洋水下立体观测技术装备发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 19–25.  
Ma R, Zhao X T, Liu C G. Development of marine equipment for underwater stereoscopic observation [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 19–25.
- [19] 朱伟林, 张功成, 钟锴, 等. 中国南海油气资源前景 [J]. *中国工程科学*, 2010, 12(5): 46–50.  
Zhu W L, Zhang G C, Zhong K, et al. South China Sea: Oil and gas outlook [J]. *Strategic Study of CAE*, 2010, 12(5): 46–50.
- [20] 周守为, 李清平, 朱海山, 等. 海洋能源勘探开发技术现状与展望 [J]. *中国工程科学*, 2016, 18(2): 19–31.  
Zhou S W, Li Q P, Zhu H S, et al. The current state and future of offshore energy exploration and development technology [J]. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(2): 19–31.
- [21] 宋宪仓, 杜君峰, 王树青, 等. 海洋科学装备研究进展与发展建议 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 76–83.  
Song X C, Du J F, Wang S Q, et al. Research progress of marine scientific equipment and development recommendations in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 76–83.
- [22] 陈力, 张超, 陈凤桂. 海南省现代海洋渔业发展现状与对策建议 [J]. *应用海洋学学报*, 2022, 41(4): 708–714.  
Chen L, Zhang C, Chen F G. Status and suggestions for modern marine fisheries development in Hainan Province [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2022, 41(4): 708–714.
- [23] 张晓波, 宗乐, 于凯本, 等. 海上试验场公共测试服务平台的运行管理制度 [J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(12): 66–69.  
Zhang X B, Zong L, Yu K B, et al. Operation management system of public test service platform in offshore proving ground [J]. *Ocean Development and Management*, 2018, 35(12): 66–69.
- [24] 高德利, 张广瑞, 王宴滨. 中国海洋深水油气工程技术与装备创新需求预见及风险分析 [J]. *科技导报*, 2022, 40(13): 6–16.  
Gao D L, Zhang G R, Wang Y B. Innovation demand foresight and risk analysis of technologies and equipment for deepwater oil & gas engineering in China [J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40(13): 6–16.
- [25] 李中. 中国海油深水钻井技术进展及发展展望 [J]. *中国海上油气*, 2021, 33(3): 114–120.  
Li Z. Process and prospect of deepwater drilling technology in CNOOC [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(3): 114–120.
- [26] 杨建民, 刘磊, 吕海宁, 等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 1–9.  
Yang J M, Liu L, Lyu H N, et al. Deep-sea mining equipment in China: Current status and prospect [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 1–9.
- [27] 鲍旭腾, 谌志新, 崔铭超, 等. 中国深远海养殖装备发展探讨及思考 [J]. *渔业现代化*, 2022, 49(5): 8–14.  
Bao X T, Zhan Z X, Cui M C, et al. Discussion and consideration on the development of deep sea aquaculture equipment in China [J]. *Fishery Modernization*, 2022, 49(5): 8–14.