# 我国三类典型深海运载装备应用技术研究

杨磊，杜志元，陈云赛，沈鹏，刘坤

（国家深海基地管理中心 青岛 266061）

**摘要**：文章详细对比分析了国内外以“三龙”系列为代表的深海运载器海洋探测开发装备发展现状，特别针对我国以“蛟龙”号为代表的载人潜水器，以“海龙”系列为代表的无人有缆潜水器和以“潜龙”系列为代表的无人无缆自治潜水器的性能和功能进行了剖析，从作业深度、作业时间、取样能力和搭载工具等方面进行了分析研究，并借鉴大洋航次海上调查作业经验，构建了大型运载装备应用能力解析图，明确了不同装备的深海科学考察应用范畴，优化了大型装备的协同作业方案，通过对我国“三龙”装备体系、人才队伍、应用技术和制度体系等能力建设，形成我国三大系列装备转入业务化运行的全链条发展理念，为我国“深海进入，深海探测，深海开发”战略提供强有力的装备支撑。

**关键词**：海洋调查；“三龙”系列深海潜水器；应用能力；协同作业；开放共享；运行平台

**中图分类号**：P75 **文献标志码**：A **文章编号**：1005－9857(2018)09－0100－07

# The Operation and Application Technology of China's Three Typical Deep-sea Submersibles

YANG Lei，DU Zhiyuan，CHEN Yunsai，SHEN Peng，LIU Kun

（National Deep Sea Center，Qingdao 266061，China）

**Abstract**：This paper analysed the current situation and developing trend of deep-sea exploration and equipment development represented by three series deep-sea vehicle：“Jiao Long” human occupied vehicle，“Hai Long” undersea remote operated vehicleand “Qian Long” autonomous underwater vehicles.The performance and function of these three series equipment were analyzed in aspects of submergence depth，operation time，sampling capacity and carrying operating tools.By referencing the experience of ocean voyage offshore survey operations，the application ability parsing diagram of these series vehicles was figured.Then，the application scope about different kinds of deep-sea expedition equipment was clarified and the cooperative operation scheme of the equipment was optimized.The basic abilities including equipment system，talent team，application technology and institutional system of three series deep-sea vehicles should be constructed to promote

**收稿日期**：2018-03-15；**修订日期**：2018-08-13

**基金项目**：国家重点研发计划(2017YFC0306804)；大洋勘探船船型开发(K24366).

**作者简介**：杨磊，高级工程师，博士，研究方向为深海装备的研发与管理

these vehicles into vocational operation. The whole chain development philosophy should be formed.It will provide strong equipment support for China's strategy known as "deep-sea entry, deep-sea exploration, deep-sea development".

**Key words**: Marine survey, "San Long" serial deep-sea submersible, Application ability, Collaborative operation, Open-share, Operation platform

## 0 引言

世界上的海洋面积约占地球面积的 71%，在当今陆地资源日益枯竭的情况下，世界各国纷纷制定了本国的海洋研究开发战略。过去几年来，在党中央、国务院的领导下，国家海洋局会同科技部等相关部门，调动各方面力量，加快了在海洋探测开发特别是深海资源勘探方面的投入力度，围绕建设海洋强国的战略目标和“一带一路”战略部署，我国在海洋装备领域取得了一批具有国际影响力的重大成果[1]。以“三龙”为代表的深海运载器系列海洋探测开发装备已经初具规模，它们分别是以“蛟龙”号为代表的载人潜水器，以“海龙”系列为代表的深海无人有缆潜水器和以“潜龙”系列为代表的深海无人无缆自治式潜水器，未来将为我国的“深海进入，深海探测，深海开发”三部曲战略提供有力的装备支撑[2]。

我国深海研究领域已跨入“深海探测”阶段，提出了比深海进入阶段更加严格的技术要求，我国的三大系列装备贯彻了从方案论证，设计研发，设备海试到海上应用的全链条发展思路，截至目前，“蛟龙”号载人潜水器已完成试验性应用阶段，即将投入业务化运行，“深海勇士”号载人潜水器已完成海上试验，即将进入试验性应用阶段。“海龙三号”无人有缆潜水器与“潜龙三号”无人自治式潜水器已完成陆地测试和湖上试验，即将进入海上试验阶段，开展三大类型潜水器的应用能力技术研究，为将来我国深海装备的类型化管理，规模化应用奠定基础，是适时且必要的。

## 1 三类典型潜水器国内外发展现状

目前世界上已有多个国家具有无人潜水器和载人潜水器等深海装备的设计、运行及维护能力，经过几十年的发展，各国依托于自己的研究所或设计局等专门机构，结合海上作业经验探索出了相应的业务化运行模式。由于我国在深海大型装备建设方面起步较晚，因此研究世界各国的潜水器装备发展现状对提升我国深海装备的应用能力技术水平具有重要的借鉴意义。

### 1.1 载人潜水器

美国 WHOI 运营的 6 500 米级“Alvin”号载人潜水器[3]，建造于 1964 年，迄今已搭载 14 787 人进行了 4 932 次的下潜作业，取得了丰硕的海底样品和海底资源环境资料。2011 年，“Alvin”号进行了大修和改造升级，改善了潜水器的操纵性和视像系统能力。“SHINKAI 6500”是日本 JAMSTEC 研制的 6 500 米级载人潜水器，截至 2012 年，“SHINKAI 6500”累计下潜次数为 1300 次，同年 3 月，“SHINKAI 6500”完成了大修与技术升级，扩展了潜水器的整体框架，并改进了其推进系统。“Nautile”号是法国在 1985 年研制成功的 6 000 米级载人潜水器，至今已下潜过 1 500 余次，该潜水器配备多种作业工具，并能携带一个小型无人潜水器完成辅助拍摄或作业任务。“MIR I”号和“MIR II”号是俄罗斯建造于 1985 年的系列潜水器，它们曾进行过“泰坦尼克”号的海底观察，并辅助完成了相关电影的拍摄，其在 1994 年和 2004 年进行过两次大修与技术升级。

“蛟龙”号载人深潜器是我国首台自主设计、自主集成研制深海载人潜水器，其于 2012 年成功下潜至水下 7 062 m 的深度，迄今已成功完成 152 次下潜作业。先后在南海、太平洋多金属结核区与印度洋多金属硫化物区等七大海区进行下潜作业，覆盖海山、冷泉、热液、洋中脊、海沟、海盆等典型海底区域，获取了大量的视像资料、地质与生物样品，全面验证了“蛟龙”号技术设计的安全性与可靠性。“深海勇士”号是我国第二台载人潜水器[4]，于 2017 年顺利完成海试，其设计下潜深度为 4 500 m，基本覆

盖中国主要海域和国际海域资源可开发的深度。“深海勇士”号的研制实现了浮力材料、深海锂电池、机械手等关键部件的全国产化,国产化率达到95%,表明我国深海通用配套技术取得了较快的发展,为将来的万米全海深载人潜水器研制奠定了坚实基础,是继“蛟龙”号后我国深海装备的又一里程碑,实现了我国深海装备由集成创新向自主创新的跨越(图1)。

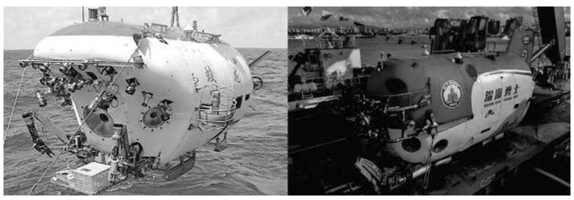

图1 “蛟龙”号与“深海勇士”号载人潜水器

### 1.2 无人缆控潜水器

“Jason”是由美国 WHOI 实验室设计和建造的无人缆控潜水器,通过一条 10 000 m 的光缆系统连接至水面母船,传递本体系统和母船间的电力、控制信号、视像资料等,潜水器配有声呐、录像机和图像系统、照明和数字采样系统[5]。日本 JAMSTEC 研发的“KAIKO-Ⅱ”无人缆控潜水器作业深度为 7 000 m,它的主要任务使命是辅助“SHINKAI 6500”进行作业并进行水下救援,自研制以来取得了丰硕的科研成果,其前身“KAIKO”曾在马里亚纳海沟创造 10 911 m 世界纪录,但后来在作业中丢失。“VICTOR 6000”号是法国的无人缆控潜水器,工作水深为 6 000 m,它可进行高品质的海底光学成像,并能携带和操作不同的作业工具和科学负载,并搭载有先进的科学检测模块。

我国的“海龙”系列无人缆控潜水器包括“海龙二号”和“海龙三号”,均由上海交通大学水下工程研究所研制。其中,“海龙二号”潜水器设计深度 3 500 m,曾应用于中国大洋 21 航次的深海热液科考任务,并在东太平洋海隆“鸟巢”黑烟囱区观察到罕见的巨大“黑烟囱”,可利用机械手准确抓获黑烟囱喷口的硫化物样品,使我国成为国际上极少数能使用水下机器人开展洋中脊热液调查和取样的国家之一。“海龙三号”为 6 000 米级勘察取样型潜水器,在“海龙二号”的基础上,充分考虑了矿区勘察取样需求,其具备海底自主巡线能力以及更强的推力、高清高速和重型设备搭载能力,能够支持搭载多种调查设备和重型取样工具。在作业工具包方面,“海龙三号”新添了岩石切割取样器、沉积物保压取样器、沉积物取样器等工具,同时预留的各路液压电气接口能够支持搭载多种类型的调查取样设备。

### 1.3 自治式无人无缆潜水器

水下自治式潜水器“Sentry”是美国研制的 6 000米级自治式潜水器,它可以完成深海测深、侧扫、底基和海底的磁力状态观测,并能在各种深海地形,如大洋中脊、深海喷口和冷泉区完成数字高清照片的拍摄。“URASHIMA”号是日本 JAMSTEC 研发的 3 500 米级自治式潜水器[6],其每个潜次可以在距海底 100 m 的高度扫描 25 $km^2$ 范围的区域,并搭载多种水文及地质探测传感器完成海底物理化学参数的测量及地形地貌的获取。“Asterx”号是法国研制的 3 000 米级自治潜水器,它可以搭载 200 kg 的有效载荷进行水下探测,航速可达 5 kn,该潜水器搭载了光谱仪、多波束声呐、ADCP 等传感设备,具有无线电和音频连接功能。

我国自主研发的“潜龙”系列自治式潜水器,目前包括“潜龙一号”“潜龙二号”和“潜龙三号”在内的 3 台潜水器。其中“潜龙一号”是我国研制的首个 6 000 米级自治式潜水器,采用回转体形式,可完成海底微地形地貌精细探测、底质判断、海底水文参数测量和海底多金属结核丰度测定等任务,目前“潜龙一号”已经完成 40 次海上作业,取得了丰富的海洋地形地貌数据。“潜龙二号”是我国自主研发的 4 500 米级自治式潜水器,其采用鱼型仿生形状,具有更好的运动灵活性和水中状态,并集成了热液异常探测、微地形地貌测量、海底照相和磁力探测等技术,形成了一套实用化的深海探测系统,可用于我国多金属硫化物等深海矿产资源勘探作业,目前,“潜龙二号”正在印度洋执行大洋 49 航次任务,性能状态稳定。“潜龙三号”是以完成大洋申请矿区的多金属硫化物资源调查任务为主要目标,在“潜龙二号”的基础上,研制的一套 4 500 米级自治式潜水器,旨在为大洋申请矿区的资源调查评估提

供服务，与“潜龙二号”相比，在最大速度、推进效率、全系统声噪声、最大续航能力上均有较大突破，该潜水器已完成千岛湖湖试，将赴南海海域进行海上试验，做进一步技术验证。

## 2　3 类典型潜水器应用能力解析

3 种类型的潜水器有各自的特点并且优势互补，其应用范围涵盖了海洋探测开发领域的各个方面。其中载人潜水器由潜航员驾驶操作，可以携带深海工程技术人员或科学家亲临海底目标作业区域，进行最为逼真的现场观测、原位探测、精细采样等工作，主要应用于载人的深海资源勘查和深海科学考察领域。无人有缆潜水器为缆控作业型潜水器，在深海科学研究和海洋工程领域有广泛应用，由操作手在支持母船端遥控控制，根据潜水器线缆传来的海底影像远程控制潜水器本体的运动与机械手的精细取样，其特点是水下作业时间较长，可实现海底精确图像数据的实时回传，有效弥补载人潜水器的水下作业时间有限的不足，由于不需要人员跟随潜水器下潜，可代替载人潜水器应用于较危险的海底区域。无人自治潜水器可通过预编程实现潜水器水下自主运动规划，使潜水器在水下具有极强的自主性，可搭载各类声呐以及传感器完成海底微地形地貌精细探测、底质判断、海底水文参数测量和海底多金属结核丰度测定等任务。通过图 2 可以直观分析出 3 种不同类型潜水器各自应用的优势和不足，便于针对不同的作业任务类型择优选取。

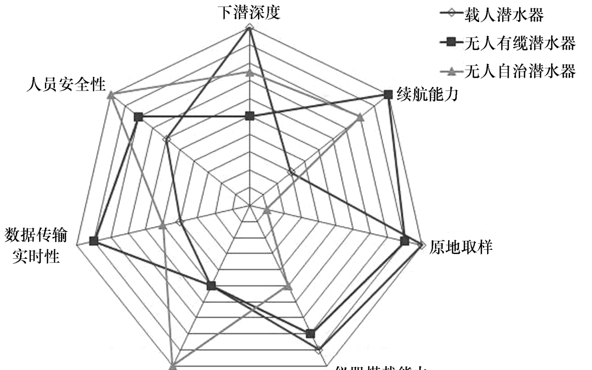


图 2　三类典型潜水器应用能力解析

“蛟龙”“海龙”“潜龙”系列潜水器是我国自行设计、自主集成、具有自主知识产权，并在深海勘查领域应用最为广泛的 3 类典型深海运载器。通过几十年发展，中国在 3 类潜水器的国产化研发集成水平与应用能力建设上均获得了较大的提升，并取得了一些国际先进成果，但由于起步较晚，我国在各类型潜水器应用能力上与发达国家存在较大差距，下面分别针对 3 类典型潜水器的应用技术能力与国外潜水器做一对比分析。

在深海大型装备中，载人潜水器技术是水下机器人设计技术的制高点，它反映了一个国家海洋科技的发展水平。衡量载人潜水器应用能力指标包括：水下作业深度、作业安全性、原位取样作业能力、系统可维护性、对支持母船要求、下潜作业次数以及获取样品数量等方面。图 3 分析了目前世界各国的载人潜水器应用能力现状。可以看出，我国的载人潜水器在下潜深度、潜水器作业安全性和原位取样作业能力等方面均位于世界同类型潜水器的前列，但在系统可维护性、对支持母船要求、下潜作业次数和获取样品数等方面与其他国家还存在一定差距。

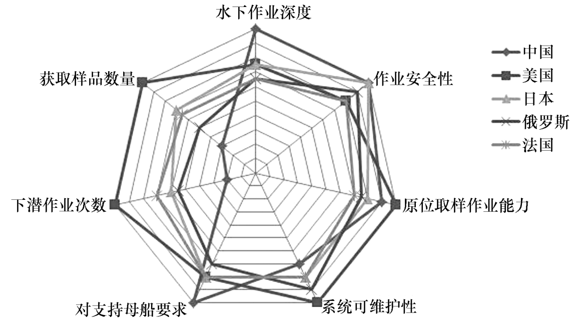


图 3　国际上载人潜水器应用能力对比

衡量无人有缆潜水器应用能力指标包括：潜水器作业深度、作业安全性、人员操纵水平、系统可维护性、下潜作业次数以及获取样品数量等方面。图 4 分析了目前世界各国的无人有缆潜水器应用能力现状。可以看出，我国的无人有缆潜水器在潜水器作业深度、作业安全性和系统可维性等方面均位于世界同类型潜水器的前列，但在人员操纵水平、下潜作业次数和获取样品数量等应用能力方面还与其他国家还存在较大差距。

衡量无人自治潜水器应用能力指标包括：潜水器作业深度、自主导航精度、系统可维护性、仪器搭

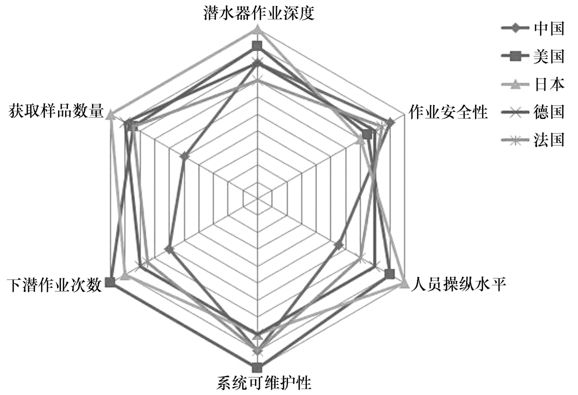


图 4 国际上无人有缆潜水器应用能力对比

载性、下潜作业次数和水下作业时间等方面。图 5 分析了目前世界各国的无人自治潜水器应用能力现状。可以看出,我国的无人自治潜水器在作业深度、潜水器自主导航精度等方面位于世界同类型潜水器的前列,但在下潜作业次数、仪器搭载性能等方面与其他国家还存在一定差距。

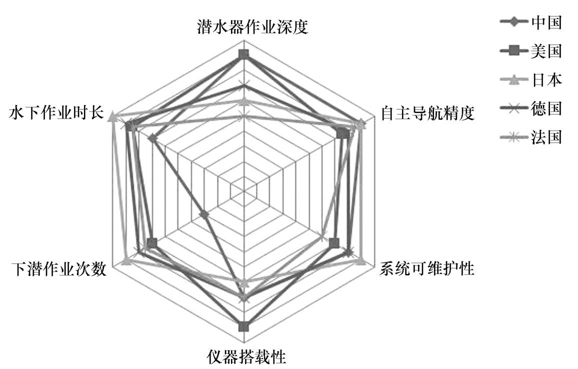


图 5 国际上无人自治潜水器应用能力对比

通过图 3 至图 5 的对比分析可知,由于我国在深海潜水器装备研制方面起步较晚,虽然在装备制造水平方面取得了较大进步,但在某些应用能力,例如,人员操纵水平、下潜作业次数和样品采集数量上尚存在明显的不足,为提升 3 类潜水器的科学应用能力水平,需要加强 3 类典型潜水器的应用能力建设。

## 3 3 类潜水器应用能力建设

### 3.1 应用机制建设

为提高 3 类潜水器的应用能力,需要建立开放共享的长效应用机制,既发挥各潜水器研发机构的技术优势,又充分发挥运行平台的维护保障优势,明确双方责权与任务分工,为国内外海洋科研院所、高校、军民融合部门提供装备支撑。

针对载人潜水器应用能力建设,我国已建成世界第五个深海技术支撑基地一国家深海基地管理中心,作为运行维护保障单位,集合多年的“蛟龙”号航次组织实施经验,该基地目前已编制形成了《蛟龙号试验性应用安全管理制度体系》,分层级分系统梳理了全部技术资料和规程,载人潜水器应用管理机制日趋成熟[7]。目前“蛟龙”号已成功参与完成国家“973”计划、“863”计划、中科院先导计划,国家重点研发计划等多项重大课题,并为国家海洋局第一海洋研究所、国家海洋局第三海洋研究所、中国海洋大学、海洋科学与技术国家实验室、中国科学院等机构提供了优质服务。

“海龙”系列潜水器即将完成海试进入试验性应用阶段,在针对无人有缆潜水器的应用机制建设方面,需要借鉴“蛟龙”号取得的经验,潜水器管理运行机构应积极与研发机构对接,加强航次运行保障人员与潜水器研发人员的技术交流,使潜水器成功从实验室试验阶段顺利走向深海大洋应用阶段,潜水器支撑机构通过人员培训方式逐步掌握潜水器的运行机理及维护技术,并与技术责任单位协商运行管理制度体系的建立,梳理形成面向无人有缆潜水器应用的制度管理体系。

针对无人自治潜水器的应用机制建设,潜水器运行维护机构通过派员参加潜水器研发机构的湖试和海上试验航次,了解研发机构现有的规章制度和技术文件,并积极与技术责任单位协调培训教材和相关技术资料的移交工作,对接形成无人自治式潜水器的应用管理制度体系。

### 3.2 人才队伍建设

为提高 3 类潜水器的应用能力,还应培养面向深海大型系列装备运行维护的高素质技能型人才,基于“蛟龙”号管理运行中形成的人才培养经验,构建 “三龙”体系的人才队伍梯度。通过优化岗位分工并结合业务发展组建 3 支技术支撑保障队伍,不断通过引培并举的方式加强人才队伍的建设,人才队伍的建设主要包括以下几方面。

3.2.1　载人潜水器人才队伍

依据现有“蛟龙”号维护保障队伍情况，载人潜水器人才队伍分为潜水器本体、水面支持、潜航员管理办公室 3 个部门，每部设立技术负责人一名。

3.2.2　无人有缆潜水器人才队伍

与载人潜水器相比，无人有缆潜水器系统分工较为简单，并不需要搭载人员进入海底，但增加了对潜水器水面操作手的技术水平要求，根据无人有缆潜水器业务化运行需要，并充分借鉴“海龙二号”已经取得的运行维护经验，潜水器分为本体维护、操作手、水面绞车 3 个技术部门，并设立系统总负责人和分系统负责人。

3.2.3　无人自治潜水器人才队伍

“潜龙”系列无人自治潜水器特点是可以自主进行水下长航程长时间巡航探测，由于潜水器的自主性，在其作业期间并不需要太多的人员干预。在充分借鉴“潜龙一号”潜水器取得的运行维护经验基础上，根据潜龙系列业务化建设需要，潜水器运行保障团队设总体技术负责人一名，并根据结构、软件、电控、机电、声光、布放回收各个系统成立组长负责制。

### 3.3　装备运行能力

3.3.1　配备完善潜水器专用维护维修工装

统筹优化配置潜水器支撑平台机构现有的车间厂房、水池、港池、码头、测试平台等场地设施，依照“三龙”体系装备的特点，科学规划三龙系列独立维护维修功能区及测试试验功能区，保障全部装备具备足额的维护维修及测试的空间。考虑新装备建设发展情况，积极筹措新厂房建设，推动新总装配车间和维护维修车间建设。按照维护保障技术要求，为“三龙”体系装备研制或购置足额的专用维护维修工装和性能测试平台，补充“三龙”系列装备本体及其附属起吊设备的备品备件，提升维护保障条件。

3.3.2　推动“三龙”体系运维系统建设

在“蛟龙”号载人潜水器的运维系统基础上，积极推动载人潜水器体系的运维系统建设和应用，并依据反馈意见进行系统升级与拓展，完成系列载人潜水器运维系统的建设。分别根据“海龙”系列无人有缆潜水器和“潜龙”系列自治潜水器的技术特点及应用情况，充分借鉴“蛟龙”号的运维系统建设经验，建设无人有缆潜水器与无人自治潜水器的运维系统，建立相应维保应用数据库，推动其业务化运行进程。

3.3.3　开发潜水器配套作业工具包

针对载人潜水器系统和无人有缆潜水器系统开发相应的深海取样和原位探测作业工具包，开发可以获取矿产资源勘探目标区的海底微地形地貌、热液流体、生物群落、微生物资源和原位环境参数的探测器和作业工具，以及可以获取高清视像资料的视像系统，通过配套作业工具包使潜水器具备高精度定点、定位和时间序列的热液取样、生物取样和环境监测等功能，并增加潜水器可视取样的作业功能。针对无人自治潜水器开发海底地形地貌探测、水文资料、地址资料探测的小型化、低功耗、大内存的海洋传感器，增强潜水器的探测观测能力。

### 3.4　潜水器作业模式探索

以共用、互换、租借代替占有的新社会经济模式引发了商品服务消费的变革，这种模式涉及广大服务领域（工具、设备、汽车等）。以此为鉴，建立深海“三龙”装备的开放共享作业模式，鼓励各个研究所、高校以及涉海科研机构联合申请航次，实现深海装备的集中运行与管理，整合资源，摊平参航单位航次成本。

“蛟龙”号新母船“深海一号”已开工建造，预计 2020 年建成下水，该船不仅可以作为“蛟龙”号的水面支持母船，还具有搭载无人有缆潜水器和无人自治潜水器的能力，有望实现 3 种潜水器的协同作业，“三龙”协同作业将大大提高深海大洋科考的效率。届时将充分发挥自治式潜水器的海底探测能力，进行详细的地形地貌探测，并可根据获得的地形数据，合理安排载人潜水器或无人有缆潜水器下潜进行精确探测和定点取样等操作。“三龙”协同作业模式不仅可用于传统大洋科考领域，还可在水下救生、沉物打捞、军用领域、影片拍摄等新型产业或领域发挥重要作用。

## 4　结论

载人潜水器、无人有缆潜水器、无人自治式潜

水器是人类进行海洋科学探测与开发的 3 种典型深海运载器,我国"蛟龙"号、"海龙系列"、"潜龙"系列潜水器完成建造并初具规模,专门用于潜水器运行维护和大洋科考保障的综合业务化运行平台－国家深海基地管理中心已完成一期建设并投入运行。深海基地项目是继俄罗斯、美国、法国和日本之后,世界上第五个深海技术支撑基地,将建成面向全国具有多功能、全开放的国家级公共服务平台,为实现中华民族"可上九天揽月""可下五洋捉鳖"的宏伟夙愿,对维护中国的海洋安全和海洋权益具有长远战略意义。然而由于我国的深海装备建设发展较晚,虽然已经具备了较好的硬件能力,在这些深海重大装备的应用能力、作业水平等软实力上,与国外还存在较大差距,我国的海洋强国战略和"一带一路"重要部署正在稳步推进,新形势下,开展潜水器应用技术研究,建立专业力量为骨干的潜水器运行维护保障人才队伍,通过海上试验及大洋科考航次积累海上调查作业应用经验,加快推进深海大型装备的应用能力建设是顺应国际大势,建设海洋强国的必然选择。

## 参考文献

[1] 卫梦星,殷克东.海洋科技综合实力评价指标体系研究[J].海洋开发与管理,2009,26(8):101－105.

[2] 科学网."三龙"系列潜水器聚首青岛探深海奥秘[J].科技传播,2017(3):56.

[3] 刘峰.深海载人潜水器的现状与展望[J].工程研究:跨学科视野中的工程,2016(2):172－178.

[4] 吴月辉.我国成功完成"深海勇士"号载人深潜试验[N].人民日报,2017－10－04(1).

[5] AYERS H. Woods Hole Oceanographic Institution. Jason/Medea Specifications[EB/OL].[2018－03－13].http://www.whoi.edu/main/jason/specifications.html.

[6] TAIRA A, MAEDA Y. Japan Agency For Marine-Earth Science And Technology. Deep Sea Cruising AUV URASHIMA[EB/OL].[2018－03－13].http://www.jamstec.go.jp/e/abou－t/equipment/ships/urashima.html.

[7] 张奕,丁忠军."蛟龙"号载人潜水器安全保障制度构建研究[J].海洋开发与管理,2017,34(11):32－36.