

特色专题

面向 2040 年的中国海洋工程科技发展战略

姚靖婕¹, 付强^{1,2}, 程兵^{1,2}, 李清平², 吴英^{1,2}

摘要 海洋科技水平是衡量一个国家科技实力的重要标志,在全球绿色能源低碳转型的大趋势和“双碳”目标引领下,海洋能源资源成为保障中国能源安全的重要增长极。选取海洋领域具有代表性的 6 个子领域,通过综合分析工程科技发展态势、发展需求与挑战,运用技术预见战略研究方法,结合经济社会发展愿景,创新性地凝练出了 10 项关键技术、10 项共性技术和 3 项颠覆性技术,提出了具备先进的自主的海洋装备和技术体系、提升海洋能源和资源绿色开发能力、建立海洋安全和战略利益技术保障体系“三位一体”的 2040 年中国海洋工程科技发展战略框架,以及 6 项海洋科技重大工程:海上能源综合开发示范、全球智能空天地海一体化海洋信息组网、海洋矿产资源绿色开发、海洋环境全方位监测组网建设、极地与大洋公海生物资源开发和中国海洋专属经济区渔业绿色开发。研究建议:加强海洋工程科技领域的顶层设计,做好统筹规划;发挥体制机制优势,实现产学研用一体化集成应用;强化自主创新,形成技术装备高质量发展;深化国际交流与合作,提升国际话语权;创新海洋人才体制机制,加强人才培养和成果转化;加大研发投入,把握跨越式发展新机遇,助力中国早日实现海洋强国的宏伟蓝图。

关键词 海洋能源;技术预见;发展愿景;关键技术;海洋强国

海洋蕴藏着丰富的石油、天然气、水合物、生物、矿产和可再生能源,开发利用海洋是事关人类生存和发展的重大战略,也是建设海洋强国的根本要求。党的二十大报告中提出“发展海洋经济,保护海洋生态环境,加快建设海洋强国”。党的二十届三中全会进一步指出“完善促进海洋经济发展体制机制”。在实现 2030 年可持续发展目标的时代背景下,海洋经济的发展离不开海洋工程科技的坚实支撑,海洋工程科技水平的高低成为衡量一个国家在科技创新、资源利用与环境保护方面能否走在世界前列的重要标志。

中国海洋领域科技创新能力稳步提升,海洋油气开发逐渐走向深远海,海上浮式风电、海洋能等可再生能源开发势头猛烈,传统海洋产业稳步发展,初步形成“陆海产业融合、科技创新引领、绿色转型提升、产业集聚发展”的现代海洋产业发展新模式,中国海洋经济总体上保持增长态势,海洋产业结构不断优化^[1]。中国海洋工程科技总体上处于快速发展阶段,部分关键技术如深水浅层钻井、天然气水合物勘探开发、碳汇渔业、卫星传感器等已达到国际先进水平,实现了与世界先进技术的并跑乃至领跑^[2-18]。然而,中国在海洋开发领域仍然存在诸多“卡脖子”问题,关键设备和高端装备的国产化率仍有待提升,深水工程作业经验不足,深海采矿装备自主研发能力欠缺,碳

1. 中海油研究总院有限责任公司,北京 100028

2. 海洋天然气水合物全国重点实验室,北京 100028

收稿日期:2024-08-08;修回日期:2025-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(L2124013)

作者简介:姚靖婕,工程师,研究方向为海洋资源开发战略,电子信箱:yaojj6@cnooc.com.cn

引用格式:姚靖婕,付强,程兵,等.面向 2040 年的中国海洋工程科技发展战略[J].科技导报,2025,43(14):60-68;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.08.00978

捕获、利用与封存(CCUS), 新能源开发等技术起步较晚, 数字化、智能化技术基础薄弱、数据收集处理能力有限、基础设施建设不足^[19-24]。为此, 有必要深入分析海洋领域工程科技发展态势、发展需求与存在的困难和挑战, 提出面向 2040 年的海洋工程科技发展战略, 助力建设海洋强国。

当前, 中国海洋工程科技研究聚焦于技术创新、高端装备研发、技术进展的系统梳理, 以及国内外技术水平的深入对比分析, 例如, 在深海探测领域, 成功研发了深海载人潜水器“奋斗者”号^[25]; 在海洋工程装备方面, 亚洲首艘圆筒型浮式生产储卸油装置(FPSO)“海葵一号”正式投入运行^[26]。然而, 从更为宏观的战略视角出发, 针对 2040 年这一长远目标, 系统性、前瞻性地规划中国海洋工程科技的发展路线尚显不足。为此, 选取海洋能源开发、海洋与极地环境探测与装备、海底矿产资源勘查与开发、海洋生物资源探查及开发、海水资源和海洋能综合利用、海洋环境安全保障 6 个具有代表性的海洋工程科技子领域, 运用技术预见战略研究方法^[27], 研判未来海洋科技发展趋势, 构建一套涵盖关键技术突破、新兴领域培育、产业链协同优化、国际合作深化等多维度的长远发展战略框架, 提出面向 2040 年中国海洋工程科技发展的战略框架、关键技术、重大工程建议, 以确保中国海洋工程科技在全球竞争中持续保持领先地位, 并为中国海洋强国战略提供强有力的决策支撑。

1 面向 2040 年的全球海洋工程科技发展态势

当前, 海洋工程科技发展态势呈现出深海化、绿色化、智能化、信息化等显著特征, 世界各国纷纷开展科技创新布局(表 1), 共同推动海洋科技的发展。海洋油气、矿产、生物、海洋探测、海洋能等子领域的科技发展态势如下: 近海油气高效开发, 深远海开发稳步发展; 海上风电走向深远海, 海上储能、风电制氢等正在发展^[28]; 天然气水合物已经进入现场试采技术验证阶段^[29]; 多种途径的海上 CCUS 技术亟待突破。海洋立体观测及预警预报能力极大提升, 研发以“星-空-海、水面-水中-海底智能组网”为代表的海洋多源监测技术和信息互联互通的智慧海洋系统, 为海上活动全球到达和权益保障提供精准信息服务, 实现全球海洋透明化^[30]。滨浅海矿产开采向着快速高效、智能、绿色、低成本、安全的趋势发展; 海底矿产开发向高精度、高效率、规模化、绿色环保的目标发展; 积极应对国际大洋矿产开发制度的出台, 抢占技术装备制高点^[31]。海洋生物资源开发利用向着产出高效、产品安全、资源节约、环境友好、低碳节能趋势发展; 生物资源信息化立体精准探测、碳汇渔业技术正在发展; 极地、深渊生物资源开发有待拓展^[23]。海水淡化和海洋能实现规模化应用, 逐渐形成完善的海水和海洋能开发利用产业体系。节约能源、降低成本、绿色发展是海水资源利用技术和产业发展的共同趋势^[32]。海洋油气、生物、可再生能源资源迈向全方位安全绿色开发, 正在推动大规模海洋碳汇技术应用, 安全环保技

表 1 世界各国正在开展的重大海洋领域科技计划

子领域	重大科技计划
海洋能源开发	综合大洋钻探计划; 天然气水合物多气合采和CO ₂ 水合物固化封存计划; 海上风电发展科技计划
海洋与极地环境探测与装备	全球海洋观测系统; 美国综合海洋观测系统及计划; 欧洲哥白尼计划; 澳大利亚综合海洋观测系统; Argo全球海洋观测网
海底矿产资源勘查与开发	欧洲海底资源环境友好型采矿计划; 日本战略性海底资源开采项目; 深海生态环境调查保护计划; 印度洋多金属硫化物矿床勘探计划
海洋生物资源探查及开发	海洋遗传资源与产物资源开发利用; 海洋生物群体资源绿色开发利用; 极地、深海生物多样性
海水资源和海洋能综合利用	阿联酋塔维勒海水淡化项目/乌姆盖万海水淡化项目; 埃及绿色能源海水淡化项目; 欧盟海洋能计划; 美国“海洋及水动力”计划; 英国海洋能计划
海洋环境安全保障	美国能源部甲烷水合物计划; 日本国家甲烷水合物资源研发计划; 欧盟“蓝色经济”创新计划

术受到更多的重视。攻克海上可再生能源装备清洁运营核心技术,建立环境友好型实施工艺,推动海洋“蓝色经济”发展。

2 2040年中国海洋工程科技发展需求与挑战

21世纪以来,中国海洋经济发展取得了巨大的进步,呈现出产业规模逐步扩大、产业结构持续优化、新兴产业蓬勃发展的态势,在国民经济中的地位越来越重要。未来中国将加快构建海洋新发展格局,着力推动高质量发展。

围绕海洋强国目标,中国社会经济的不断发展对海洋工程科技的需求主要来自3方面:海洋安全与维权,保障中国能源和资源安全;建设海洋工程科技强国,推动海洋经济优化转型;助力实现“双碳”目标,建设海洋生态文明。由此提出4大经济社会发展愿景^[33]。(1)海洋经济完成高质量发展转型,产业结构进一步优化。科技创新驱动的海洋战略性新兴产业实现集群化高质量发展,占国内生产总值(GDP)比重明显增加,基本建成与中国综合实力和国际影响力相适应的海洋强国。(2)海洋油气及新能源助力海洋能源开发低碳转型,海上负碳技术广泛应用,为能源安全和“双碳”目标作出显著贡献;海底矿产、海洋生物资源实现高效开发和用途拓展,为中国资源安全和经济发展提供有力支撑。(3)海洋战略空间保护和利用取得显著突破,深远海、大洋、极地等领域的自主装备和技术为中国海洋发展空间和安全空间的保障提供有力支撑,助力中国在全球海洋治理中发挥更大作用。(4)建成海底—海洋水体—海面全方位海洋监测系统,实现海洋大数据的高效利用,为中国海洋绿色开发和生态环境保护提供全方位的智能信息保障。

中国海洋工程科技总体上处于快速发展阶段,部分技术已实现并跑甚至领跑,但同时也存在核心技术不足、关键设备和装备国产化率低等诸多挑战^[2-18]。

1)海洋能源开发。深水油气勘探关键设备依赖进口,海上低渗油气田有效开发、非常规稠油及油砂有效开发等方面的技术和经验有待加强,在海外风险勘探及深水工程作业方面的技术经验积累不足,对深水、低渗、稠油、智能化等领域相关技术提出了更高的要求 and 更多应用的空间。CCUS总体处于技术研

发阶段,封存过程中的工程关键技术尚待突破。新能源方面的关键技术未成熟、产业结构不健全、标杆电价未出台、补贴机制待构建。

2)海洋与极地环境探测与装备。遥感分辨率不足,卫星成本制造偏高;海洋数据零散,标准不统一,水下观测技术受限;海洋遥感数据产业化低,实际应用少;海洋信息化缺乏顶层体系性设计和长远规划;海洋信息缺乏有效共享;缺乏高端智能化应用平台/工具及核心算法^[34]。

3)海底矿产资源勘查与开发。深海采矿起步较晚,在集矿设备、提升系统、环境保护等核心技术领域与发达国家仍有一定差距,诸多基础科学问题和工程技术问题有待进一步解决;海洋基础地质勘探落后,造成海洋矿产开发后劲不足;应用型 and 原创性专利申请和使用较少,产业链核心技术创新缺失。

4)海洋生物资源探查及开发。中国资源与环境双重约束趋紧,资源日益衰竭,渔业发展受到外部资源环境的制约越来越大,发展空间受到限制;中国海洋渔业管理措施单一,无法满足对资源的科学化和精细化管理需求;极地海洋生物资源开发利用起步较晚。

5)海水资源和海洋能综合利用。大型海水淡化工程核心技术难以突破,反渗透膜元件、高压泵、海水淡化药剂等关键设备、核心部件还主要依靠进口。超大型海水冷却装备的设计建造能力还不能完全适应技术发展的需要。在海水化学资源利用方面,仍处于以盐田为依托的大宗初级产品生产水平。波浪能和潮流能发电装置大都处于工程样机阶段。

6)海洋环境安全保障。中国海洋绿色开发起步较晚,前期主要集中于资源和能源开采技术和开采效率,环境生态影响研究起步较晚。随着海洋能源的逐步开发,环境生态保护亟须补位,才能保证资源和能源的可持续利用。相关的探测、监测、模拟技术都相对落后,需从顶层规划和基础研究等方面突破。

3 中国海洋工程科技关键技术方向

工程科技的发展具有较强的可预见性、可规划性和可引导性。技术预见是一种将技术发展放在社会经济大系统中,对未来较长时期技术发展趋势进行预测与选择的研究方法^[35]。本文采用的是德尔菲问卷调查

查技术预见法,主要以工程科技愿景分析为背景,以德尔菲问卷调查为主体,以文献计量、专利分析等手段为技术支撑,识别优先发展的技术领域和技术项。

技术预见活动是面向 2040 年的中长期发展战略研究中提出关键性、颠覆性技术发展方向的一个重要途径^[5]。通过将技术预见与需求分析、战略研究相结合,可进一步提高战略研究的前瞻性、系统性和科学性。技术预见工作的总流程包括前期研究与工程科技发展愿景分析、确定备选技术清单、德尔菲专家调查及集成分析论证等阶段。前期通过广泛的征集与筛选,确立了包含 81 项前沿技术的备选技术清单。之后实施了 2 轮德尔菲专家问卷调查,邀请行业内的权威专家参与评估。基于这 2 轮问卷调查的详尽结果,通过运用科学的方法论,从众多备选技术中精心凝练出了 10 项关键技术、10 项关键共性技术、3 项具有颠覆性潜力的技术清单。这些技术的确定不仅体现了海洋工程科技发展的趋势与热点,也凸显了中国在未来科技竞争中的战略重点。紧接着,对这些技术进行了全面的对比分析,包括技术实现的预期时间框架、当前的技术发展水平以及可能面临的约束条件等。旨在深入了解每项技术的成熟度、挑战与机遇,为后续的战略规划提供有力支持。

3.1 实现时间分析

主要分析海洋科学技术的世界范围内技术实现时间、中国范围内技术实现时间,以及中国范围内的社会实现时间等(图 1),所有技术项的预期世界技术实现时间为 2024—2031 年,预期中国技术实现时间为 2025—2032 年,预期中国社会实现时间为 2029—2036 年。

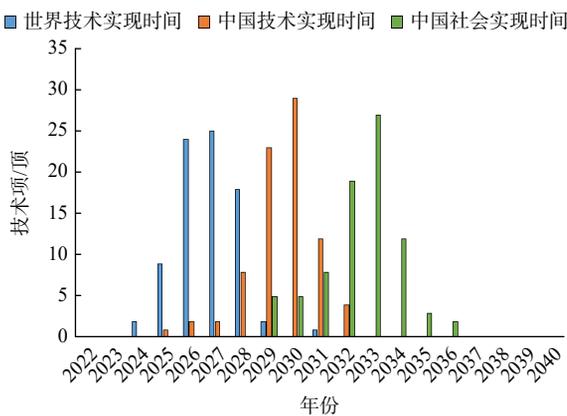


图 1 预期实现时间分布

3.2 技术实现时间与社会实现时间跨度分析

对技术项进行比较分析发现,中国海洋工程科学技术实现时间与社会实现时间跨度平均约 3 年,最长 5 年(图 2)。海洋生物资源探查及开发子领域近海生物资源养护与提质增效工程技术社会实现时间较短,1 年基本可以实现社会应用;海底资源勘查及开发子领域的深海矿物高效率、低能耗、环境友好的绿色开采工艺技术社会实现时间最长,达到 5 年;其他子领域社会实现时间大多集中在 2~4 年(图 3)。

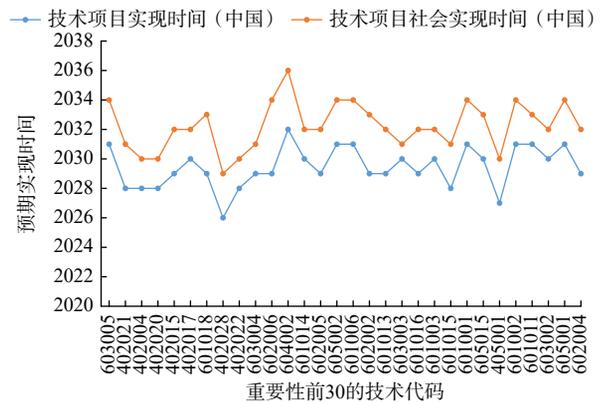


图 2 技术实现时间与社会实现时间差距

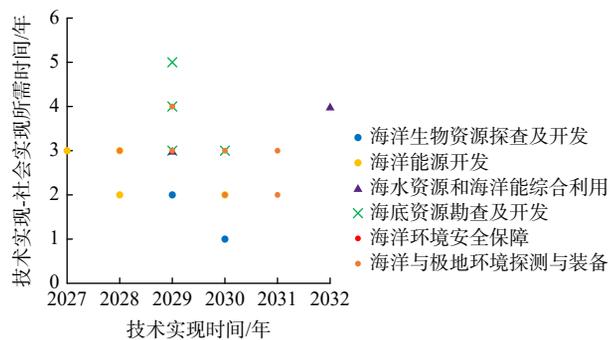
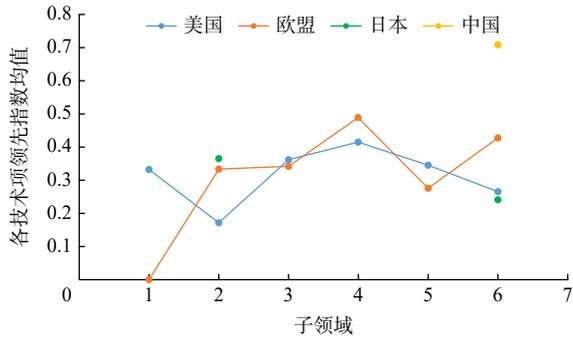


图 3 社会实现时间跨度与子领域分布

3.3 技术发展水平与约束条件

通过分析技术领先国家和地区分布可知(图 4),美国在海洋与极地环境探测与装备、海底资源勘查及开发和海洋环境安全保障子领域拥有技术优势,欧盟在海水资源和海洋能综合利用子领域优势明显,日本在海洋生物资源探查及开发子领域具有优势,而中国在海洋能源开发子领域优势明显。

在技术预见中,针对每个技术项,设置工业基础能力及科技资源、人才队伍、研发投入、协调与合作、标准规范、法律法规政策、科学原理突破、经济可行



1 为海洋与极地环境探测与装备; 2 为海洋生物资源探查及开发; 3 为海底资源勘查及开发; 4 为海水资源和海洋能综合利用; 5 为海洋环境安全保障; 6 为海洋能源开发

图4 技术领先国家和地区分布

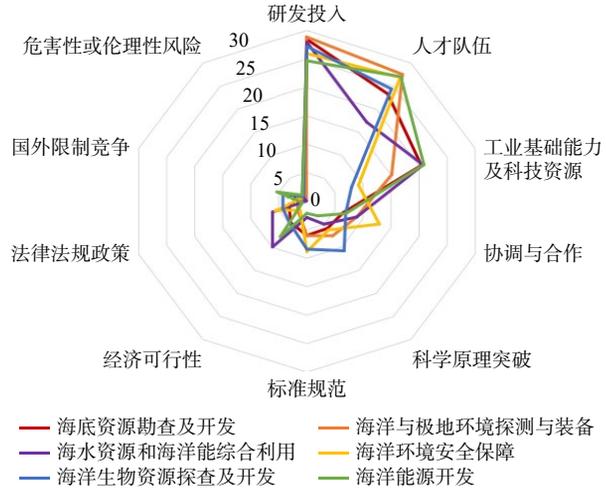


图5 海洋领域制约因素情况

性、危害性或伦理性风险、国外限制竞争等选项, 结合专家熟悉程度, 计算每个因素对技术项的制约程度。整体来看, 当前研发投入和人才队伍是中国海洋工程科技发展的主要制约因素(图5), 危害性或伦理性风险、国外限制竞争、法律法规政策等对海洋领域发展的制约性较小。

3.4 海洋领域关键技术方向

通过技术预见调查结果, 以及院士和技术专家的研判, 提出海洋领域的关键技术方向、关键共性技术方向以及颠覆性技术方向。关键技术方向和共性技术方向按照重要程度指数排序, 选取了前10项技

术。颠覆性技术方向在颠覆性指数排序的基础上, 结合专家研判, 最终筛选出3项技术(表2~表4)。

4 海洋工程科技发展的总体战略构想及重大工程

4.1 海洋工程科技发展战略构想

当前, 中国经济对海洋资源、空间的依赖性显著增强, 海洋经济已成为驱动国民经济增长的关键力量。为此, 中国需要在发展海洋工程科技的同时, 以“发展海洋经济、保护海洋生态环境、加快建设海洋

表2 海洋领域关键技术方向

子领域	技术项目	重要程度指数	实现时间			研发水平	目前领先国家和地区	制约因素
			技术世界	中国	社会			
海洋能源开发	深水/超深水油气勘探技术	99.27	2025	2028	2031	33.82	美国	人才队伍
海洋生物资源探查及开发	海洋生物基因与产物资源发掘利用工程技术	92.57	2027	2031	2034	15.00	美国	研发投入
海洋与极地环境探测与装备	海洋环境立体观测智能组网与互联互通技术	92.23	2026	2029	2033	38.69	美国	人才队伍
海洋能源开发	海上油田提高采收率关键技术	91.67	2026	2026	2029	76.98	中国	研发投入
海洋生物资源探查及开发	现代海水养殖绿色发展工程技术	90.43	2026	2029	2031	53.39	欧盟	研发投入
海底资源勘查及开发	深海矿物高效率、低能耗、环境友好的绿色开采工艺技术	90.02	2027	2029	2034	31.94	欧盟	工业及科技
海水资源和海洋能综合利用	深海油气、水合物多气合采与可再生能源多能协同开发技术	90.01	2031	2032	2036	53.33	美国	研发投入
海洋与极地环境探测与装备	水下导航定位与海底测绘技术	89.84	2027	2030	2032	26.06	美国	研发投入
海底资源勘查及开发	大功率远距离水下动力安全输配技术	89.08	2025	2029	2032	39.83	美国	研发投入
海洋环境安全保障	近海典型海洋生态灾害协同防控关键技术	88.76	2028	2031	2034	41.09	美国	研发投入

表 3 海洋领域关键共性技术方向

子领域	技术项目	共性技术重要性指数
海洋能源开发	深远海超深水钻完井关键技术	95.15
海洋与极地环境探测与装备	海洋环境立体观测智能组网与互连互通技术	92.08
海底资源勘查及开发	大功率远距离水下动力安全输配技术	91.22
海洋与极地环境探测与装备	水下导航定位与海底测绘技术	89.09
海洋与极地环境探测与装备	海洋环境人工智能融合认知技术	88.97
海洋环境安全保障	近海典型海洋生态灾害协同防控关键技术	88.52
海水资源和海洋能综合利用	海水淡化集成技术在传统工业升级改造中的应用示范	82.54
海水资源和海洋能综合利用	深海油气、水合物多气合采与可再生能源多能协同开发技术	78.00
海洋生物资源探查及开发	海洋生态环境观测与模拟平台技术	76.99
海洋能源开发	深远海漂浮式风电技术	72.04

表 4 海洋领域颠覆性技术方向

子领域	技术项目	颠覆性指数
海洋能源开发	水下生产系统智能工厂技术	93.25
海洋生物资源探查及开发	海洋生物基因与产物资源发掘利用工程技术	90.67
海水资源和海洋能综合利用	深海油气、水合物多气合采与可再生能源多能协同开发技术	87.75

强国”的战略目标为指引，紧密围绕建设美丽中国、推动海洋经济高质量发展、保障能源资源安全、拓展生存与发展空间及捍卫国家海洋权益等战略需求，加大技术攻关力度，显著提升自主创新能力，以技术创新带动海洋装备和产业升级，抢占海洋领域未来发展高地。

在具体实施层面，要以国家重大需求为导向，遵循“深度融合国家重大需求与科学探索前沿，基础理论研究与技术能力建设相结合”的原则。以支撑海洋强国建设作为战略目标，重点发展海洋能源开发、海洋与极地环境探测与装备、海底矿产资源勘查及开发、海洋生物资源探查及开发、海水资源和海洋能综合利用、海洋环境安全保障 6 个子领域的重大关键技术，加强深远海、大洋、极地利用和保护能力建设，推动“绿色”“低碳”“智能”规模化、产业化发展，提升海洋战略高新技术与装备水平，建立全球海洋安全和治理保障体系，以推动整个海洋产业健康、快速发展。

4.2 海洋工程科技发展总体架构

到 2030 年，海洋工程科技实现高度自立自强，海洋资源开发关键技术装备自主可控，海洋能源、资源环保安全开发的保障系统基本建成。2040 年，海洋工程科技迈入强国行列，为 2050 年中国实现海洋强国

发展目标打下坚实基础，为全方位建设海洋强国体系提供工程科技的有力支撑。基于此，提出具备先进的自主的海洋装备和技术体系、提升海洋能源和资源绿色开发能力、建立海洋安全和战略利益技术保障体系“三位一体”的中国 2040 年海洋工程科技发展战略框架(图 6)，以保障中国海洋工程科技的跨越式发展。

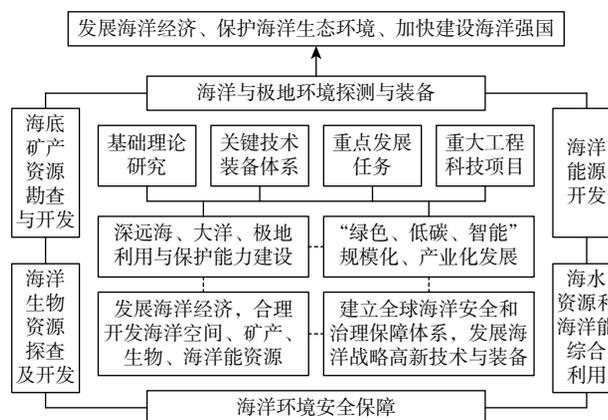


图 6 面向 2040 年的海洋工程科技发展战略框架

4.3 海洋工程科技重大工程

针对面向 2040 年的中国海洋工程科技发展战略，提出了 6 项重大工程：海上能源综合开发示范工程、全球智能空天地海一体化海洋信息组网工程、海洋矿产资源绿色开发工程、海洋环境全方位监测组网

建设工程、极地与大洋公海生物资源开发工程和中国海洋专属经济区渔业绿色开发工程。通过实施这些工程,中国将有力推动海洋科技事业的蓬勃发展,为实现海洋强国目标奠定坚实基础。

1) 海上能源综合开发示范工程。以国家能源需求为导向,围绕南海超浅层天然气领域勘探、渤海稠油规模化热采/提高采收率、南海深水与渤海受限区油气、北极海域油气、琼东南海域天然气水合物、海洋 CO₂ 水合物法固态封存、深远海漂浮式风电等勘探开发示范工程,推动在南海形成 1 万亿 m³ 以上的天然气探明地质储量,在渤海与南海形成 6000 万 t 原油、400 亿 m³ 天然气的产能,在大亚湾封存 1000 万 t 以上规模的 CO₂, 推动打造海上能源示范区建设,为国家能源安全提供坚强保障。

2) 全球智能空天地海一体化海洋信息组网工程。立足全球视野,以构建保障国家安全和战略利益的海洋信息精准服务体系为目标,重点突破涵盖天基-岸基-水下-深海的智能化海洋观(监)测传感器、观测平台、立体观测组网、海洋大数据应用及信息服务等新技术;研发深海矿产、能源、生物资源、海水和海洋能源资源信息化探查技术及应用示范系统;推动探测海洋水中、水面目标与海底资源的大功率、极低频主动探测试验及示范系统研究;研制具有自主知识产权的,包含海洋环境、生态、资源、灾害多要素综合的数值预报体系并实现有效运行。

3) 海洋矿产资源绿色开发工程。以海洋资源勘查及开发利用为主题,通过关键技术研发和示范系统建设,推进海洋新兴产业的商业化发展。以集约开发和优化利用沿岸与近海资源,加强开发利用公海及国际深远海资源为目标,建立全面的海洋资源勘查和开发装备研发体系,形成海底矿产资源勘查和开发的综合应用示范平台,实现海洋矿产资源的深入开发,培育海洋新兴产业,促进中国产业结构调整,推动海洋经济为国家经济保持中高速增长作出重大贡献。

4) 海洋环境全方位监测组网建设工程。以海洋能源、资源开发绿色安全为目标,突破涵盖海底、海洋水体多层位以及海面的多种智能化海洋环境监测传感器、观测平台、立体观测组网、海洋大数据应用及信息服务等新技术,研制具有自主知识产权的装备体系,提高监测装备国产化率,实现海洋环境生态全

方位长期监测。开发深海甲烷泄漏应急削减技术,突破深远海油气钻采井控安全保障及应急救援技术瓶颈,形成保障 3000 m 以上水深天然气资源安全勘探开发配套装备体系和工艺技术,助力天然气水合物的稳定、绿色开采。

5) 极地与大洋公海生物资源开发工程。建立适应气候变化背景下极地海洋生态系统变动趋势、南极海洋生物资源国际共同治理变化趋势的南极磷虾渔业生态评价方法与体系;发展北冰洋公海渔业资源潜力评价与动态演变评估技术;建立适应北冰洋公海国际治理新机制的潜在渔业生态评价指标、方法与体系;适应大洋公海国际治理的渔业活动生态影响评价方法体系;推动大洋海洋生物资源探测、捕捞、加工、转运装备技术升级与自主化。

6) 中国海洋专属经济区渔业绿色开发工程。建立规模化生态健康养殖技术与新生产模式,水产养殖容量评估与管理;发展养殖环境实时监测技术、生物资源数字化、智能管理与收获技术;海水养殖经济动植物原种保护与利用,水产良种培育核心技术;建立近海生物资源调查与评估新技术,渔业捕捞种类配额评估技术与管理。

5 中国海洋工程科技发展建议

面对海洋能源开发、深海探测、海洋环境保护及海洋安全等多方面的挑战和机遇,加快海洋工程科技自主创新,提升核心竞争力,深化国际交流与合作,加强人才培养和科技成果转化,已成为中国海洋事业发展的迫切需求。为此,提出以下 6 点建议。

1) 加强海洋工程科技领域的顶层设计,做好统筹规划。面向国家战略资源对外依存度高的痛点、难点,以核心技术创新为驱动,把握世界科技前沿,加强海洋工程科技发展的顶层设计和海洋科技项目的统筹布局。梳理科研院所、高校、企事业单位各自优势,凝心聚力,实现海洋工程科技的跨越式发展,全面支撑海洋强国建设。

2) 发挥体制机制优势,实现产学研用一体化集成应用。充分发挥“集中力量办大事”的新型举国体制优势,以国家立项研发为宏观牵引,实施科研院所、高校与企业的联合攻关,努力推动海洋资源开发的人才

队伍、技术装备和经济效益的综合发展。培育和共建科研创新平台,支撑重大工程和基础研究项目的开展,进一步实现优势互补和协同创新。聚焦关键核心技术攻关,全面推进“产-学-研-用”一体化建设,促进中国海洋工程行业的持续高质量发展。

3) 强化自主创新,形成技术装备高质量发展。以国家科技专项为牵引,重视基础性、共性的科技研究发展,构建国内海洋装备产业链,提升国产装备在海洋资源能源开发中的主体作用。充分发挥中国北斗定位与通信、第5代移动通信(5G)网络和大数据等技术优势,并以生态理念为指导,满足海洋资源能源开发过程中的绿色、高效、智能等高新技术需求,发展新型技术,降低深海环境影响,提高经济效益,形成海洋资源能源开发技术装备的高质量发展。

4) 深化国际交流与合作,提升国际话语权。积极参与国际大洋和极地协会相关组织,通过“联合国海洋十年”等活动提高海洋领域的国际合作程度,提升中国在国际事务中的话语权。制定国际合作科学计划,凝聚国际科研力量,增进对海洋生态系统以及海洋资源能源开发潜在影响的科学知识的交流,不断提高国际认可度。

5) 创新海洋人才体制机制,加强人才培养和成果转化。强化海洋科技人才的核心作用,完善海洋人才建设顶层设计,探索适宜中国海洋科技创新发展的人才队伍建设和培养的体制机制,形成各类海洋人才衔接有序、合理分布的良好格局,打造具有创新能力的海洋人才队伍。加强科技成果转化机制建设,促进创新成果转移、转化和产业化^[36]。

6) 加大研发投入,把握跨越式发展新机遇。应对当前的环境保护与资源竞争形势,要坚持系统思维,加大研发投入力度,强化和突出技术创新主体地位,系统梳理关键技术,重点布局基础性、前瞻性较强的技术,提升核心竞争力。同时,通过引进已有先进技术,推动资源整合,吸收再创新,创造发展海洋能源资源开发的核心技术、颠覆性技术等超越发展的新机遇。

参考文献(References)

[1] 周守为,李清平. 构建自立自强的海洋能源资源绿色开发技术体系[J]. 人民论坛·学术前沿, 2022(17): 12-28.

- [2] 王国荣,黄泽奇,周守为,等. 深海矿产资源开发装备现状及发展方向[J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 1-12.
- [3] 匡立春,刘合,任义丽,等. 人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 1-11.
- [4] 李清平,周守为,赵佳飞,等. 天然气水合物开采技术研究现状与展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 214-224.
- [5] Yin Z Y, Linga P. Methane hydrates: A future clean energy resource[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(9): 2026-2036.
- [6] He J, Li X S, Chen Z Y, et al. Sustainable hydrate production using intermittent depressurization in hydrate-bearing reservoirs connected with water layers[J]. Energy, 2022, 238: 121752.
- [7] Yang L, Zhao J F, Wang B, et al. Effective thermal conductivity of methane hydrate-bearing sediments: Experiments and correlations[J]. Fuel, 2016, 179: 87-96.
- [8] Sharma R. Deep-sea mining: Resource potential, technical and environmental considerations[M]. Cham: Springer, 2017.
- [9] Collins J, Vanagt T, Huys I, et al. Marine bioresource development-stakeholder's challenges, implementable actions, and business models[J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 62.
- [10] Avkhadeev V R. Legal Regulation of Arctic Marine Bioresources Development: International Law and State Cooperation Mechanisms[J]. Journal of the Higher School of Economics, 2020(4): 216-239.
- [11] Chen M B, Xu Z B, Wang Y H. Entry barriers and tripartite evolutionary game analysis of seawater desalination under the government regulation in China[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1309515.
- [12] 李志川,胡鹏,马佳星,等. 中国海上风电发展现状分析及展望[J]. 中国海上油气, 2022, 34(5): 229-236.
- [13] 化蓉,段晓峰,郭越,等. 我国海洋信息产业现状、问题及有关建议[J]. 海洋经济, 2023, 13(3): 58-62.
- [14] 陈毓川,毛景文. 加大矿业开发科技投入 国内找矿大有可为[J]. 中国科技产业, 2022(8): 6-10.
- [15] 冯景春,谢炎,唐丽,等. 水合物形成显著增强海底渗漏的甲烷在深海环境的捕集效率[J]. 2023, 68(24): 3149-3153.
- [16] 李晓敏. 美国海洋科学技术未来十年发展重点及对我国的启示[J]. 全球科技经济瞭望, 2020, 35(9): 1-8.
- [17] National Research Council. Critical infrastructure for ocean research and societal needs in 2030[EB/OL]. [2024-02-01]. http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=13081.
- [18] 何正标. 我国海洋信息化新型基础设施建设研究[J]. 江苏海洋大学学报(人文社会科学版), 2020, 18(4): 9-17.
- [19] 米立军,周守为,谢玉洪,等. 南海北部深水油气勘探进展与未来展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 58-65.
- [20] 麻常雷. 中国海洋能产业进展2020[M]. 北京: 海洋出版社, 2020.
- [21] 吴立新,陈朝晖,林霄沛,等. “透明海洋”立体观测网构建[J]. 科学通报, 2020, 65(25): 2654-2661.
- [22] 栗鸿强,管云恺,周锋,等. 海水淡化发展与趋势研究[J].

- 水处理技术, 2023, 49(12): 19–21, 45.
- [23] 唐启升. 中国式现代渔业可持续发展的过去和未来[J]. 渔业科学进展, 2023, 44(6): 1–6.
- [24] 米立军. 全球海上CO₂封存现状及中国近海机遇与挑战[J]. 中国海上油气, 2023, 35(1): 123–135.
- [25] 冯丽妃. 以“奋斗者”姿态, 勇攀深海“珠峰”[J]. 中国科学报, 2024(4): 1–4.
- [26] 王路. 亚洲首艘圆筒型海上油气加工厂启运: “海葵一号”助力油气开发挺进深水[J]. 天然气与石油, 2024, 42(3): 136.
- [27] “中国工程科技发展战略研究”项目组. 中国工程科技2035发展战略: 航天与海洋领域报告[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [28] 王富强, 郝军刚, 李帅, 等. 漂浮式海上风电关键技术与发展趋势[J]. 水力发电, 2022, 48(10): 9–12, 117.
- [29] 周守为, 李清平, 朱军龙, 等. 中国南海天然气水合物开发面临的挑战与思考[J]. 天然气工业, 2023, 43(11): 152–163.
- [30] 刘建强, 蒋兴伟, 林明森. 我国海洋卫星发展历程、现状与建议[J]. 卫星应用, 2021(9): 14–18.
- [31] 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.
- [32] 傅泽凯, 王慈云. 海水淡化技术现状及其应用探析[J]. 中国设备工程, 2023(15): 259–262.
- [33] 中国海洋学会. 2049年中国科技与社会愿景: 海洋科技与海洋资源[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2020.
- [34] 赵龙飞, 姜晓轶, 洪宇, 等. 智慧海洋数字孪生技术及其应用[J]. 科技导报, 2024, 42(4): 91–101.
- [35] 中国科学院创新发展研究中心, 中国先进能源技术预见研究组. 中国先进能源2035技术预见[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [36] 曹琴, 玄兆辉. 中国与世界主要科技强国研发人员投入产出的比较[J]. 科技导报, 2020, 38(13): 96–103.

Strategic research on the development of marine engineering technology in China for 2040

YAO Jingjie¹, FU Qiang^{1,2}, CHENG Bing^{1,2}, LI Qingping², WU Ying^{1,2}

1. CNOOC Research Institute Co. Ltd., Beijing 100028, China

2. National Key Laboratory of Marine Natural Gas Hydrates, Beijing 100028, China

Abstract The level of marine science and technology is an important indicator of a country's scientific and technological strength. Under the global trend of green energy and low-carbon transformation and the guidance of the "dual carbon goals", marine energy resources have become an important growth pole for ensuring China's energy security. This paper selects six representative subfields in the marine field, comprehensively analyzes the development trends, demands and challenges of engineering science and technology, and uses the strategic research method of technology foresight. Combined with the vision of economic and social development, it innovatively distills 10 key technologies, 10 common technologies and 3 disruptive technologies. It proposes a three-in-one strategic framework for China's marine engineering science and technology development in 2040: "possessing an advanced and independent marine equipment and technology system, enhancing the green development capacity of marine energy and resources, and establishing a technical guarantee system for marine security and strategic interests", as well as six major marine science and technology projects: demonstration of comprehensive development of offshore energy, global intelligent space-air-ground-sea integrated marine information networking, green development of marine mineral resources, construction of an all-round marine environment monitoring network, development of biological resources in polar and oceanic high seas, and green development of China's exclusive economic zone fishery. The research suggests: strengthening the top-level design in the field of marine engineering science and technology, and doing a good job in overall planning; giving full play to the advantages of the system and mechanism, and realizing the integrated application of industry-university-research-use; strengthening independent innovation, and forming high-quality development of technology and equipment; deepening international exchanges and cooperation, and enhancing international discourse power; innovating the mechanism and system of marine talents, and strengthening talent cultivation and transformation of achievements; increasing investment in research and development, seizing new opportunities for leapfrog development, and helping China realize the grand blueprint of a marine power as soon as possible.

Keywords marine energy; technology foresight; development vision; key technology; maritime power ●



(责任编辑 王微)