DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.04.021

我国海洋退役油气平台低碳化改建方案构想

王国荣[1,2*]，黄泽奇[1]，周守为[2,3]，刘清友[4]，钟林[1]，郭欣承[1]，陈勇[5]，陈义哲[6]，黄春海[7]

（1. 西南石油大学机电工程学院能源装备研究院，成都 610500；2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室，成都 610500；3. 中海油研究总院有限责任公司，北京 100028；4. 成都理工大学，成都 610059；5. 中海油深圳海洋工程技术服务有限公司，广东 深圳 518000；6. 湘潭大学化学学院，湖南湘潭 411105；7. 中国石油天然气股份有限公司吉林油田分公司，吉林松原 138000）

摘要：海洋退役油气平台低碳化改建是集约利用资源、充分挖掘退役平台经济及生态效益的优选模式，是维护和提升海洋领域碳减排能力的重要举措；然而，我国海洋领域绿色低碳开发进程刚刚起步，退役海洋油气平台低碳化改建多停留在概念设想层面，亟需立足低碳化技术提出切实可行的综合性改建方案。本文完成了我国退役油气平台处置现状和低碳化技术水平的调研分析，提出了构建海上碳循环利用枢纽的改建主导形式以及3条低碳化改建路线，明确了平台安全评估、改建方案选取策略、全生命周期环境保护等平台改建的关键工程实施策略。针对平台改建法规及政策缺失、海洋领域低碳化技术应用存在短板、跨产业合作机制不明确等现实问题，建议健全平台改建法规及引导政策；聚焦核心技术装备的海上应用性能，优化技术理论支撑，加紧国产装备转型；优先开展退役平台的改建示范工程，以推动我国海洋退役平台低碳化改建进程。

关键词：退役油气平台；低碳化改建；碳循环利用枢纽；平台改建逻辑

中图分类号：TE99　　**文献标识码：**A

Proposal for Low-Carbon Transformation of Decommissioned Offshore Oil and Gas Platforms in China

Wang Guorong[1,2*], Huang Zeqi[1], Zhou Shouwei[2,3], Liu Qingyou[4], Zhong Lin[1], Guo Xincheng[1], Chen Yong[5], Chen Yizhe[6], Huang Chunhai[7]

(1. Energy Equipment Institute, School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610500, China; 3. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 4. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. COOEC Subsea Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China; 6. College of Chemistry, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China; 7. Jilin Oilfield Branch, PetroChina Co., Ltd., Songyuan 138000, Jilin, China)

Abstract: The low-carbon transformation of decommissioned offshore oil and gas platforms is an optimal model for intensive resource utilization and for fully exploiting the economic and ecological benefits of decommissioned platforms. It is also an important

收稿日期：2024-04-16；**修回日期：**2024-06-20

通讯作者：*王国荣，西南石油大学机电工程学院教授，研究方向为海洋油气资源装备研发、水合物及矿产资源开发技术及装备；E-mail: swpi2002@163.com

资助项目：中国工程院咨询项目“海洋碳汇贡献于碳中和战略研究”(2021-JZ-11)，“海上油气平台延寿与新能源综合利用战略研究”(2023-HZ-25)

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

measure to maintain and enhance the carbon reduction capacity of the marine sector. However, the green and low-carbon development process in China's marine sector is just beginning, and the low-carbon transformation of decommissioned offshore oil and gas platforms mostly remains at the conceptual stage, urgently requiring practical and feasible comprehensive transformation plans based on low-carbon technologies. This study completes a survey and analysis of the current status of the disposal of decommissioned oil and gas platforms in China and the level of low-carbon technologies. It proposes a main form of transformation for constructing an offshore carbon recycling hub and three low-carbon transformation routes, clarifying key engineering implementation strategies for platform transformation, including platform safety assessment, selection strategies for transformation plans, and full lifecycle environmental protection. In response to practical issues such as the lack of regulations and policies for platform transformation, shortcomings in the application of low-carbon technologies in the marine sector, and unclear cross-industry cooperation mechanisms, it is recommended to improve platform transformation regulations and guiding policies. It is also necessary to focus on the offshore application performance of core technical equipment, optimize theoretical support for technology, and accelerate the transformation of domestic equipment. Priority should be given to carrying out demonstration projects for the transformation of decommissioned platforms to promote the low-carbon transformation process of decommissioned offshore platforms in China.

Keywords: decommissioned oil and gas platforms; low-carbon transformation; carbon cycle utilization hub; platform transformation logic

一、前言

“十四五”时期是我国能源结构转型的重要窗口期，也是支撑推进“双碳”战略目标实现的关键期。在此期间，我国将持续深化可再生能源开发体量和技术革新力度，不断提高碳循环利用及封存技术的应用规模，解决我国“双碳”体系下的碳汇与国际碳配额问题，持续推进国家能源结构的优化调整。随着我国陆上新能源技术发展规模的不断扩大，受陆上空间限制、能源需求与转型升级、碳汇需求体量、技术与工程条件和能源政策导向等因素影响，我国可再生能源开发，碳捕集、利用与封存（CCUS）等低碳化技术和工程已逐渐由陆上向海上转移[1,2]，海洋绿色低碳发展路线成为减碳政策制定和“碳减排”举措实施的聚焦领域。

海洋中蕴含的可再生能源储量丰富，碳消纳前景广阔，未来海洋领域的碳循环利用及封存将成为能源利用的重要发展趋势。目前，我国已探明海洋可再生能源资源的开发总量超过3.5×10^9 kW，其中风能资源的开发总量占比超过85%，海上风电已成为推动我国能源结构低碳化转型的重点发展方向[3]。随着深海沉积层及咸水层碳封存理论的发展[4]，截至2024年1月，我国已探明海洋碳地质封存潜力为2.58×10^{13} t[5,6]。近年来，我国不断加大在海洋新能源技术应用、规模化CCUS工程技术迭代等方面的政策支持和投资导向，但仍面临技术应用成本偏高、海上搭建空间欠缺等挑战[7]，导致我国目前尚未系统开展海上碳循环利用及封存工程。为此，进一步加速海洋新能源项目的落地与发展，提高整体经济效益和环境效益，是推动海洋能源绿色转型和可持续发展的重要议题。

随着海洋油气田投产时间的推移，我国早期搭建的油气平台即将进入集中退役阶段。目前，全球退役油气平台处置方式多以异地弃置为主，意在恢复海域原有样貌或不影响海洋主体功能。我国海洋平台拆除实践较少，2011年才首次在渤海完成一座导管架平台的拆除施工；截至2023年，我国开展的退役平台拆除工程仅有9个。参考国内外已有工程案例发现，以拆除为主的传统处置方式可能对海洋环境和油气产业后期投资带来较大负担。多数退役平台及其配套装备仍有很大的再利用价值，具有共用设施容量充足、平台闲置空间和承重能力较大[8]等优势，同时海洋油气企业拥有完备的海上工程建设与后勤服务保障能力，因此，改建退役油气平台可以为海上碳循环利用及封存工程的开展提供空间和技术装备支撑，将是推动海洋油气产业低碳化发展和解决退役油气平台难处置的“双赢”方案。

近年来，我国持续推动集中、集约式用海模式发展，并强化海洋绿色能源技术产业的国家政策导向[9]。我国海洋油气产业和东南沿海地区高碳排放产业的绿色转型需求日益凸显，退役油气平台低碳化改建作为海洋碳减排的关键环节，发挥的作用日益重要。本文以我国退役油气平台低碳化改建设想多停留于概念层面、缺乏实际可行的减碳方案和产业模式为切入点，结合我国海洋油气生产平台退役趋势，同时参考国内外退役平台的处置案例以及海洋能源产业和技术的发展现状，开展以海洋油气产

业为主导，融合多种海洋新能源技术的退役油气平台改建方案探索，研究实现规模化开展海上碳循环利用和封存方案下的工程规划及改建策略，并提出相应的对策建议，旨在为我国退役平台改建领域的发展提供有价值的产业转型思路，推动我国海洋资源可持续利用和海洋生态环境保护。

二、我国海洋退役油气平台处置现状

截至2023年8月，仅中国海洋石油集团有限公司（中海油）在服役的306座固定式生产平台中，已有62座超过设计使用年限，其中有21座已超过30年，占比达到7%；预计2040年，约有77%的现有油气平台将达到设计使用年限，约有81个海洋油气田将进入生产后期，这就涉及到约有164座海上生产平台、3240 km海底管道、2310口油气井将处于闲置或退役状态[10]。在全球超过2000座退役油气平台的处置案例中，已形成多种处置方式，如表1所示。其中，多数退役油气平台选择在拆除生产设备后，对平台进行原地弃置或切割报废处理。中海油已计划在未来3年重点对锦州20-2NW平台、岐口18-2平台、绥中36-1油田原明珠号单点、丽水平台、陆丰13-2WHP平台和涠洲11-4D-A平台等海上生产设施进行弃置作业。经估算，2022—2030年，中海油在弃置退役油气平台方面的投入将超过40亿美元。到2050年，我国海上设施拆除业务的投入将达到70.5亿美元以上。退役装备拆除将花费海洋油气产业庞大资金，若对所有退役油气平台均采用整体或部分拆除后再移走的“一刀切”方式，可能带来二次环境破坏、较大的企业财力和人力负担、拆除后责任归属不明和不必要的资源浪费等问题。

随着我国待退役油气平台数量的不断增加，统一采用直接拆除的处置方式显然与海洋油气生产装备的绿色退役和弃置要求不符[11]，并将导致资源浪费、生态环境破坏、高碳排放和高处置成本等一系列问题[12~14]。经调研发现，我国多数非在役油气平台及平台原有装备在经过修复、替换等方式进行延寿后，仍具有改建后创造额外收益的潜力。目前，油气平台改建再利用已有成功案例可循，如美国、俄罗斯、挪威等国家已先后成功开展人工鱼礁[10]、旅游设施和海上试验平台等探索性工程（见图1）。我国已针对陆丰13-1等海洋油气平台开展改建研究，主要包括海洋油气平台与新能源综合利用、平台安全使用寿命预测、平台延寿等。

在利用退役油气平台闲置空间和原有基础设施建立海上碳循环利用枢纽的过程中，低碳化技术的支持至关重要。海上碳循环利用枢纽将发挥能源转型支撑、创新技术应用、海上碳消纳、环境生态保护等减少陆上资源需求和碳减排压力的综合性减碳增效作用。可再生能源发电、电解海水制氢、海上碳循环利用和海底碳封存等是研究重点，在此基础上，促进可再生能源转化与利用、海上碳循环及绿色化工、碳封存及油气驱采、海上储运等关键技术的创新与应用（见图2），并将“评估–增寿–改建–再利用”过程纳入海洋油气产业的全生命周期管理，助力构建具有中国特色的海洋综合绿色产业链，有效推动我国海洋油气产业逐步从“碳负债”向“碳收益”转变。

表1　全球退役油气平台的常用处置方式

处置方式	适用条件	成本	环境影响
资产转移	在目标油气田度过经济效益开发高峰期后，将油田资产转移给专业从事中后期油气田管理的公司	低	—
整体拆除	适合涉水深度<100 m、水下结构物重量<4000 t的海上油气平台等设施	高	影响较小
部分拆除	适合涉水深度>100 m、水下结构物重量>4000 t的海上油气平台等设施	较高	可能对海洋环境、生物及船舶运输等产生不利影响
拆除再利用	优先拆除平台已有设备后，将深水平台和导管架进行部分切割，安装到适当的浅水区域再使用	较低	视平台原址及再利用区域的海洋环境情况而定
原地弃置	通常作原地倾倒处理（需得到国家管理部门批准）	低	影响较大
另作他用	作为人工鱼礁、观测站等其他用途（需得到海洋事务管理部门、渔业和野生动物协会等批准）	低	视具体用途情况而定

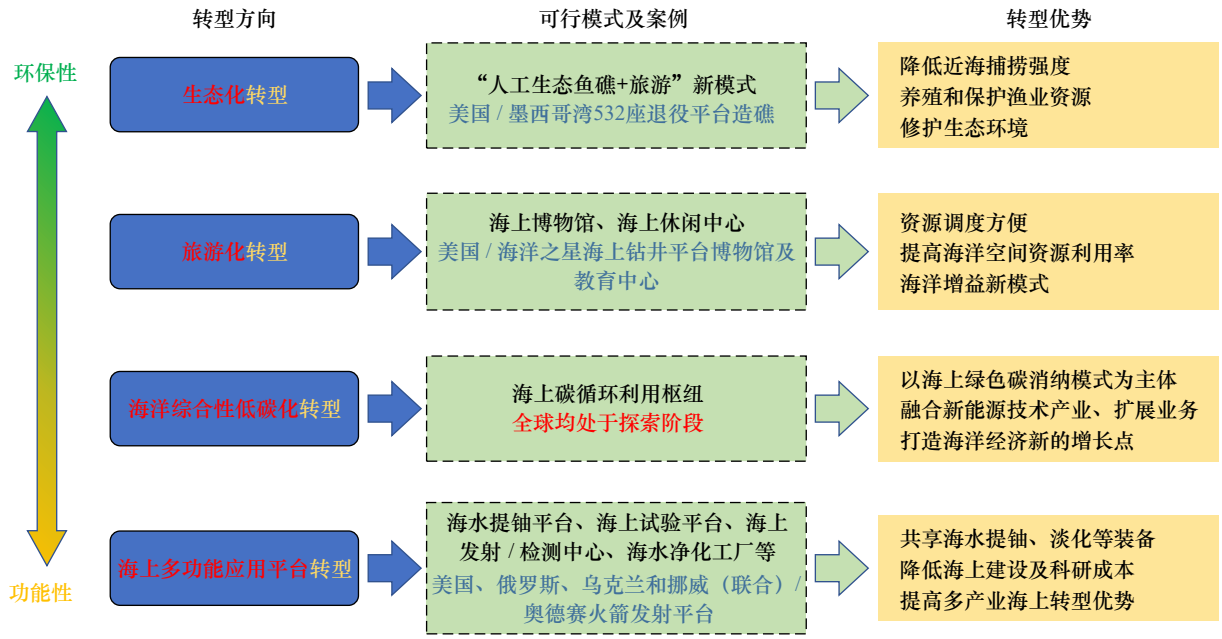

图1　全球已有海上退役油气平台改建再利用类型

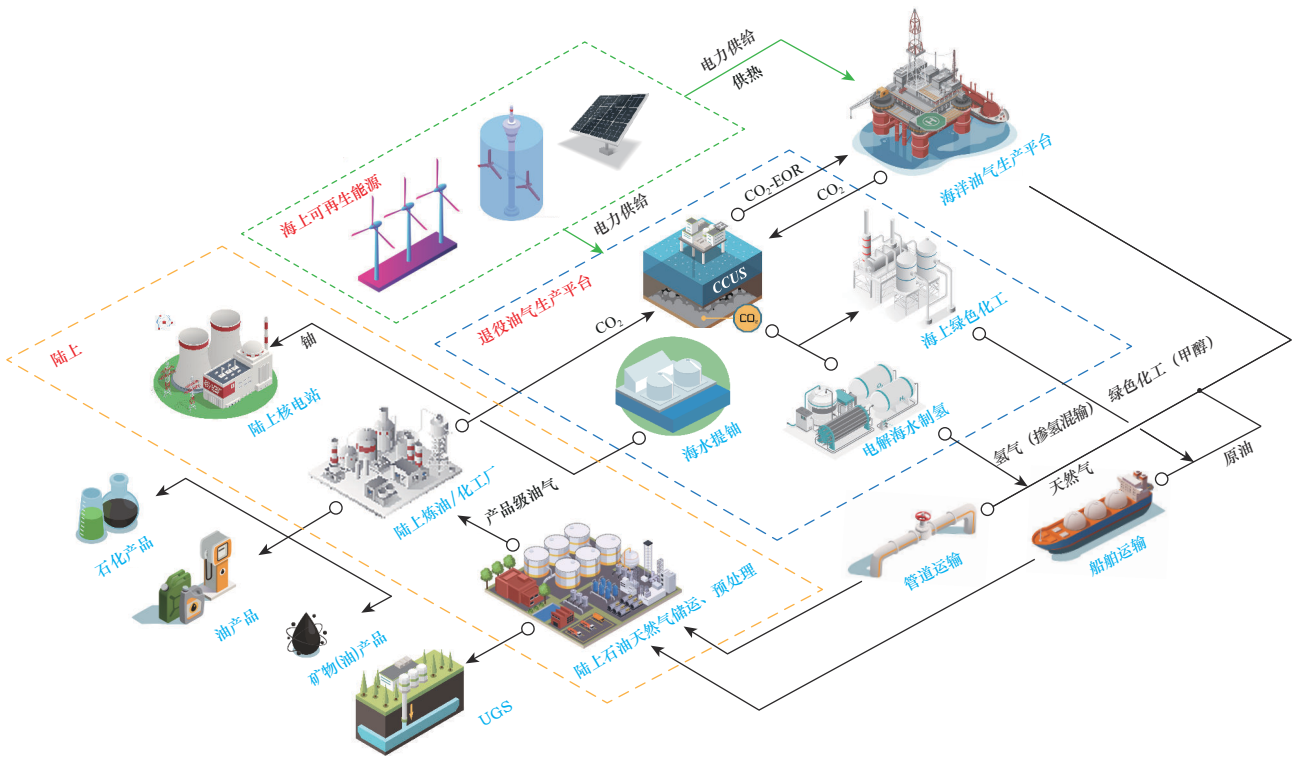

图2　退役油气平台低碳化改建构想。
注：UGS表示地下天然气储气库；CO_2-EOR表示CO_2石油驱采。

三、我国海洋退役油气平台低碳化改建的技术基础

退役油气平台的低碳化改建是基于平台服役现状，运用相应的改造和再利用技术来实现平台功能转型、最大化利用油气平台等海洋基础设施，使其在新的领域继续发挥作用。结合当前我国海洋能源领域的国家政策和产业趋势来看，改建后的退役油

气平台应优先解决当前海洋油气生产的碳减排难题及新能源技术的海洋化转型难点，并发挥资源高效节约与循环利用、海洋环境保护、降低新能源技术海洋应用成本等重要作用（见图3）；同时，还要推动海洋能源领域的绿色转型和“碳中和”目标的实现，确保多产业及技术在整合利用方案下的经济效益和可持续发展。

（一）可再生能源供能是实现低碳化的基础

近年来，我国以海上风电为主的海洋可再生能源开发势头迅猛[15~17]，已初步具备规模化“绿电”供应能力。截至2023年，我国连续5年居全球海洋风电累计装机规模首位，已有114座海上风电场实现并网投产，涵盖海上风机近5700台，累计装机量达28.6 GW[18]。当前，我国已拥有完备的国产化风电产业链，自主研发的全球首台16 MW海上风电机组成功装机并网、18 MW海上风电机组研制成功以及20 MW半直驱永磁风力发电机顺利下线。此外，我国形成了以环渤海地区、长江三角洲地区、珠江三角洲地区为中心的三大海上风电产业集群[19,20]，临近我国东南沿海工业中心，与油气产业具备地理空间重叠条件，可有效实现与“源网”的紧密耦合，为海上风电与海洋退役油气平台低碳化改建的融合奠定基础。

目前，我国海洋风电产业在“技术研发–原材料供给–装备制造–运营维护”各环节均形成了技术优势。国内研究机构及企业不断提高风电核心技术及装备实力，新增装机量快速上升，以广东、浙江、山东等省份为主的海上风电大基地建设逐渐成形，可全面支撑我国开展退役平台改建的多样化能源需求，推进产业融合进程。此外，我国还采取优化审批流程和用海政策措施，促进海洋新能源产业的跨行业融合发展，这些努力不仅有助于提高海上新能源项目的开发效率，还将稳健和持续增强以海上风电为主的可再生能源供能水平。总体而言，海上可再生能源领域在技术快速迭代和国家政策的支持下，必将结合以海洋油气产业为主的多种先进技术领域融合发展模式，助力海上固碳及减碳。

（二）海水电解制氢是绿电稳定消纳的保障

电解水制氢作为新能源领域的核心技术之一，面临绿色用能要求提高、原料需求增长、陆上土地占用限制等诸多挑战，许多海洋强国已逐步将氢能

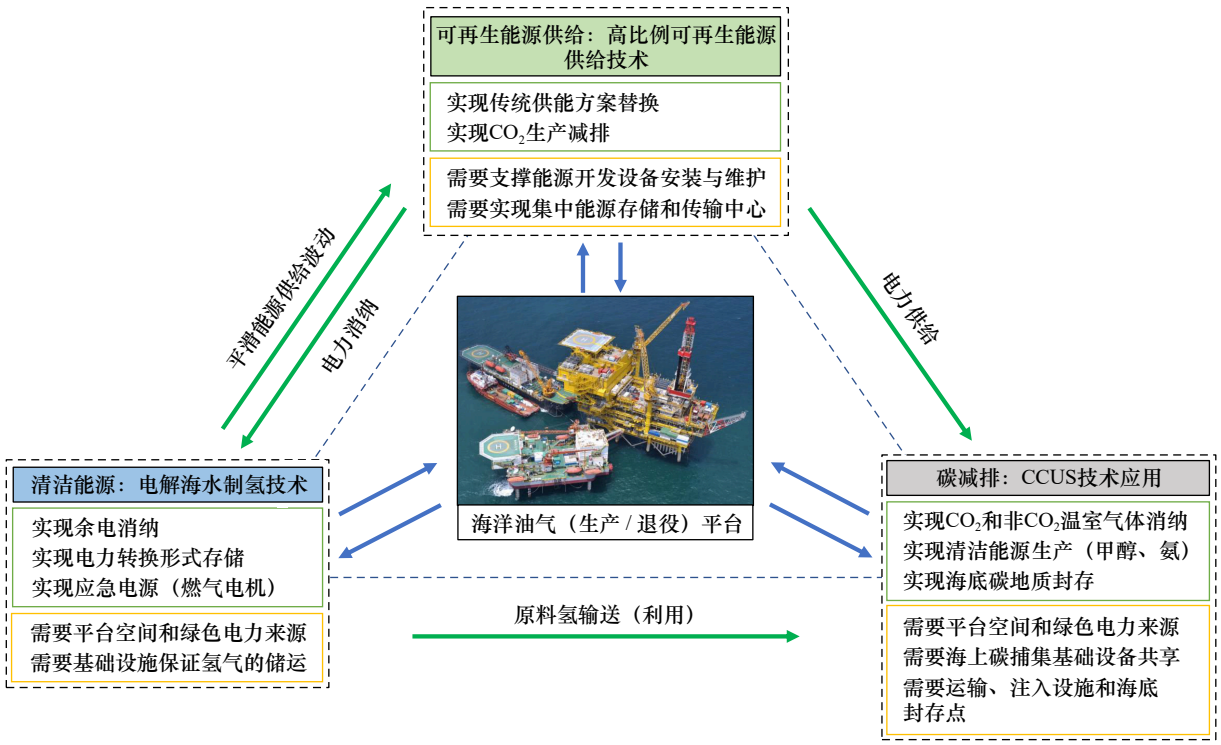

图3　退役油气平台低碳化改建可实现多产业共赢

产业向海上转移。我国是全球最大的氢气生产国，主要以灰氢生产为主。随着国内钢铁、化工、交通等工业用户对绿氢需求的不断增加，以及航运领域对绿色甲醇和氨气等绿氢下游产品需求的日益扩大，开展“海上风电+海水制氢”成为实现海洋氢能产业经济价值的重要途径。

2022年，我国研究人员在海水无淡化原位直接电解制氢技术研究方面取得突破[21]，解决了氢能与可再生能源间的适配性和能效低难题，有效推动了我国海洋领域高碳排放产业的低碳化进程。一方面，海水电解制氢可以有效平抑风电供能波动[22]，提高供能稳定性及电力系统的安全性和灵活性；有效解决海上绿电消纳难题，将余电转化为氢气进行储存，在能源需求波动或紧张时提供备用能源，进而实现多元化能源供应[23]。另一方面，利用退役油气平台作为海上绿氢制备和应用的重要支撑空间[24]，可以丰富退役平台低碳化改建中的化学固碳[25]、海洋多产业融合策略[26]等方案。因此，海水电解制氢在实现供能保障的基础上，能够形成实现海上风电消纳降本、氢气产业平稳快速发展和油气产业提效降碳的“三赢”局面，促进海洋能源产业结构平衡和低碳转型。

（三）海上碳循环利用是实现碳中和的重要途径

“十一五”时期以来，我国在CCUS技术领域依托国家自然科学基金、863计划、973计划、国家重点研发计划等项目，开展了大量基础研究，为大规模碳捕集、输送和规模化应用奠定了基础[27]。截至2023年，我国已规划和投运约56个CCUS示范项目，以地质利用实现能源资源增采为主，如CO_2-EOR、煤层气强化开采等[28]。随着碳中和进程的加快推进，我国碳循环利用正逐渐向化工利用和生物利用方向拓展（见图4），在实现高附加值化学品合成、生物产品转化等绿色碳源利用的同时，满足我国当前基础化学原料及生物产品的应用需求。

近年来，将低成本、高效率的碳捕集技术与碳循环利用技术耦合集成是重点攻关方向，如碳捕集–化学及生物固碳转化一体化、碳捕集–驱采封存一体化等。一方面，我国化学固碳利用技术与国际发展基本同步，尤其在碳重整制备合成气和光伏制甲醇、绿电合成工业氨等技术方面处于领先地位，如甘肃省千吨级太阳能燃料合成示范项目可以实现年产1500 t甲醇并消纳2000 tCO_2，减碳潜力显著。因此，我国现有技术能够在不同尺度上实现能量集约利用，可有效降低碳循环利用成本，并应用于退役油气平台的低碳化改建。另一方面，我国CO_2-EOR和CO_2地浸采铀技术已接近或达到商业应用水平，加之海洋油气产业经过多年勘探开发，已经拥有丰富的海上设施和地质数据资料，这进一步为运用退役油气平台开展规模化CO_2综合利用提供了条件。因此，海上碳循环利用正在成为推动海洋能源产业低碳转型和效益增长的关键。

（四）海底碳封存技术是碳中和的载体

在海洋油气产业绿色转型的背景下，海底碳封存技术已成为全球各大油气公司的重要攻关领域[29]。海洋碳封存是减少沿海地区碳排放的有效途径，我国已对近海盆地的地质封存能力进行初步评价和技术攻关，初步形成了封存选址与注入评价、海上驱油封存评价、配套工程与钻完井和海上封存监测等系列关键技术[30]。2023年6月，我国投用了首个海上百万吨级碳封存工程——恩平15-1油田碳封存示范工程[27]，建立了从地层构造勘探到封存监测的完整自主化技术体系，初步具备了海底碳封存技术能力。

开展规模化海底碳封存需要着重考虑封存成本和泄漏风险对海底生态环境的影响。近年来，我国已掌握的近海地质数据不断丰富，为开展海底咸水层和油气储层的碳封存提供了重要支撑与研究基础。目前，我国对海底咸水层的碳封存机制尚未完全明确，需要深化地层内多变量CO_2运移数值模拟的研究，确保开展规模化封存的有效性和安全性。此外，还需要关注和优化封存空间选定与注入策略，以提高封存效率和降低环境风险；强化海上CO_2相态管理技术，确保CO_2运移在输送、注入过程以及地层中的相态稳定性；完善低成本的长期监测预警系统以更好地跟踪封存效果和开展潜在泄漏监测等。我国在常规地质封存、液态CO_2直接注入（“碳湖”）和CO_2置换天然气水合物封存等方面的研究刚刚起步，需聚焦封存机理、优化封存技术、增强监测预警能力等，并在科研验证中不断积累经验，以实现碳封存技术的商业化和规模化应用。

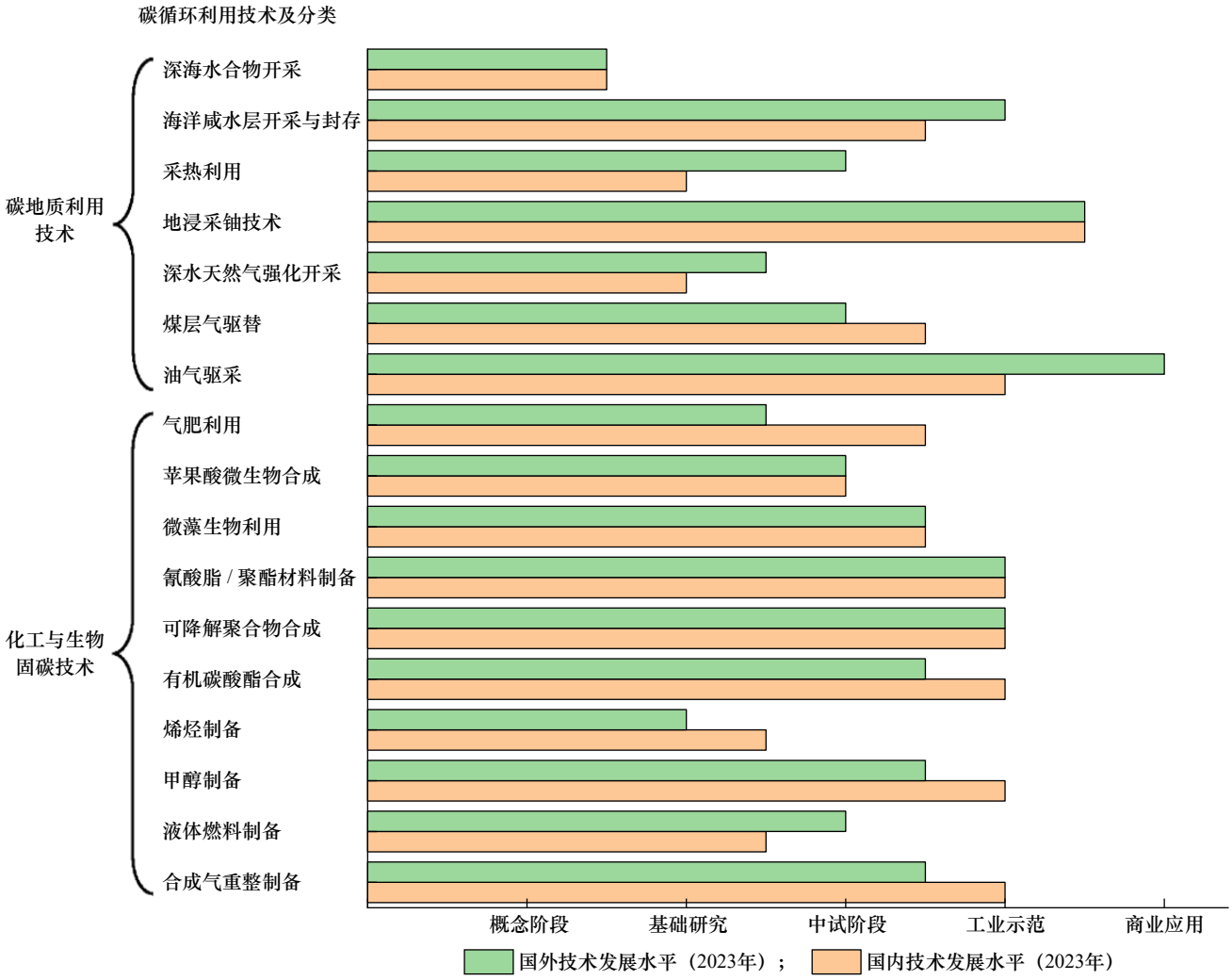

图4 国内外碳循环利用技术发展水平

四、我国海洋退役油气平台低碳化改建主导形式——海上碳循环利用枢纽

海上碳循环利用枢纽作为退役油气平台功能转型与多种能源融合发展的主要方案，可以充分发挥各能源系统的资源优势，促进能源相关产业突破现有壁垒，实现海洋油气等高碳产业的绿色低碳循环发展。基于我国海洋油气和新能源产业的特性、发展现状和技术水平，本研究提出了一种以海上退役油气平台为中心、集成多种能源技术的碳循环利用及封存方案，并分析该方案中的低碳化路线（见图5）和驱动因素（见图6）。

路线 1：低碳、智能的多能源综合供能系统。对海洋退役油气平台集群周边的可再生能源（如风能、波浪能等）进行资源评估，选择适合规模化供能的可再生能源；运用多种能源开发与融合技术、先进监测与控制技术等，自底向上实现各种能源的智能管理、调度和优化以及可再生能源的按需存储及释放，确保供能的连续性、系统的稳定性和高效性；利用可再生能源替代传统供能模式，如利用风电降低对油气燃烧发电的需求、利用太阳能替代部分天然气供热需求，保留部分传统供能设施以构建混合能源系统，根据能源需求变化智能切换电力来源，实现最佳能源供给效果及应急保障；部署传感器和监测设备，实时监测能源系统的运行状况（如生产、储存和消耗等数据），并利用大数据、人工智能技术进行数据分析和预测，优化能源分配利用，提高供能系统能效，实现安全运行保障和潜在风险规避。

路线 2：高效清洁能源技术产业链。构建以

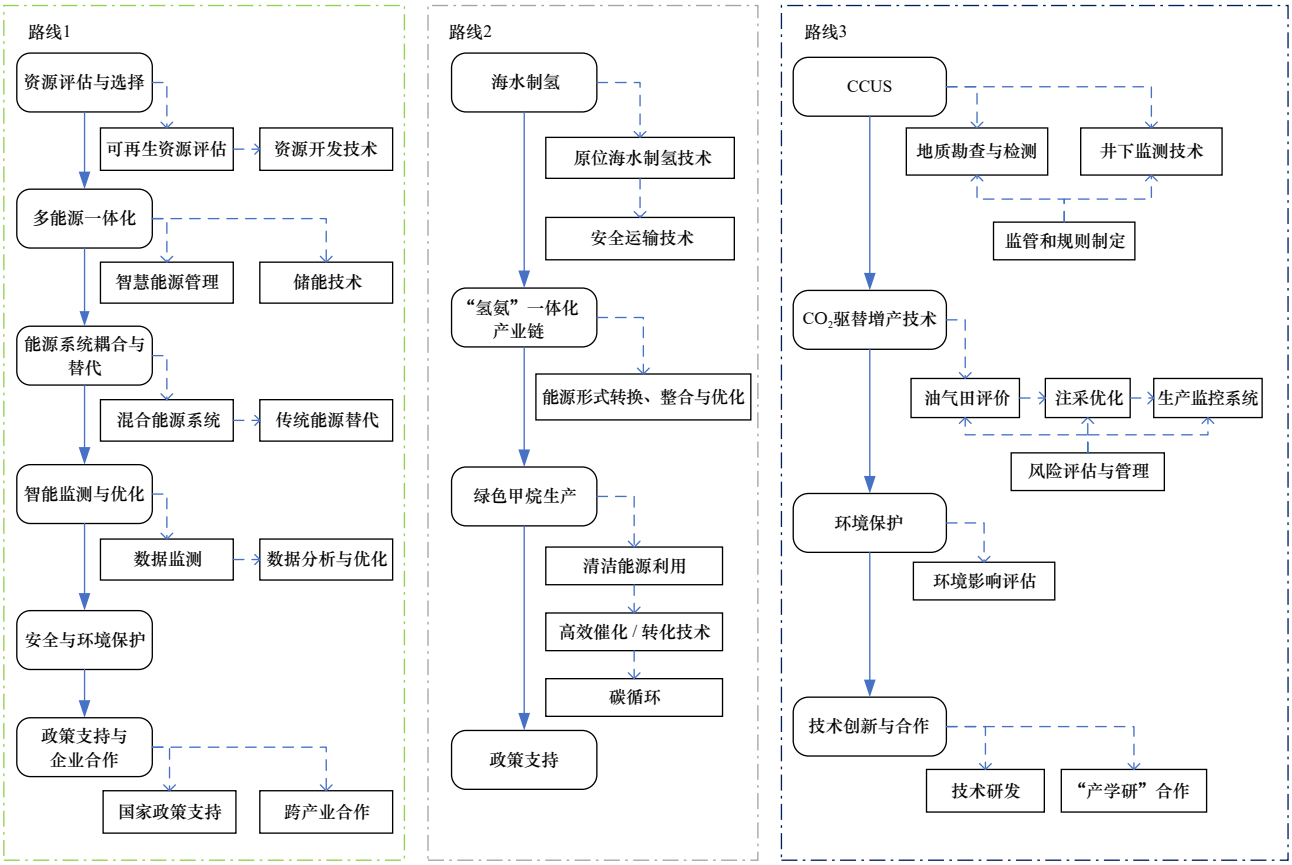

图5　构建海上碳循环利用枢纽的低碳化路线

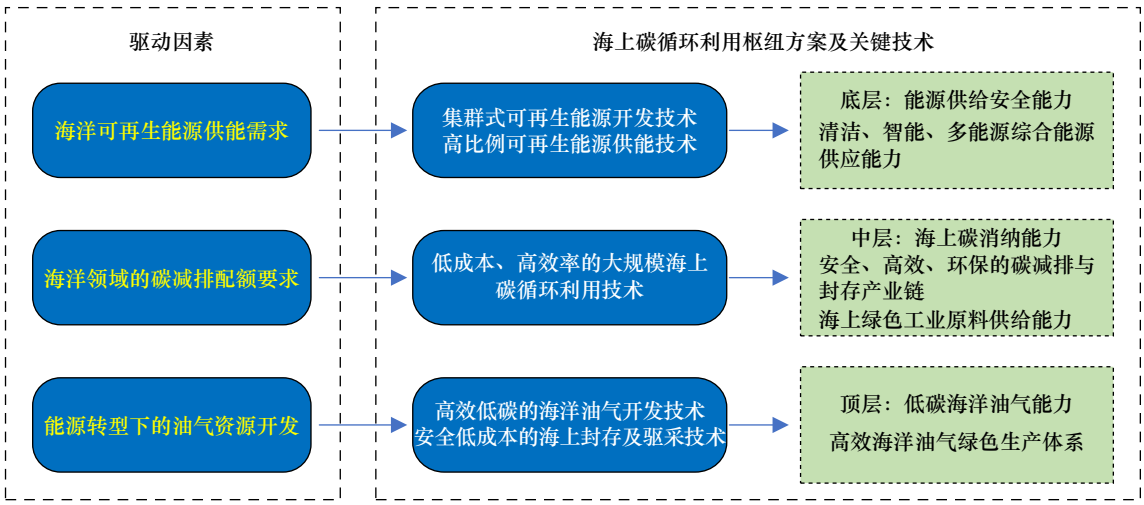

图6　海上碳循环利用枢纽方案的驱动因素

“海水制氢+绿色甲醇+氢氨融合”为主的高效一体化技术产业链。一方面，生产甲醇、烯烃等石化产品实现海上固碳，利用多种能源供能系统实现平台（原位）电解海水制氢，同时将CO_2转化为甲醇燃料，通过海上现有油气管道 / 运输船 / 甲醇动力船舶完成绿色甲醇输送上岸和消纳；通过海底管道将生产平台预处理尾气或陆上捕集的CO_2输送至退役平台，构建由可再生能源驱动的海上“负碳”枢纽。另一方面，氢气可就地转化为氨燃料，通过氨运输船（已有）或氨燃料船舶（未来）完成液氨运输和

消纳，有效降低海上氢气输送的危险性，构建由海上可再生能源驱动的“以氨载氢”高安全性输送上岸途径，从而形成可为燃料动力车、合成纤维、塑料、农药、燃料、合成蛋白等提供重要载体的海上技术产业链。

路线 3：海底碳封存及增产支持。利用退役油气平台及其废弃井开展碳封存，并为周边在役生产平台提供CO_2-EOR 增产技术支持。借助海洋油气产业丰富的地质勘探数据，指导碳封存储层选取和可行性评估；同时，利用已成型的海底管道网络将CO_2输送至退役油气平台，利用井下监测系统实时监测CO_2的储存情况，包括压力、温度和封存效果等，以确保CO_2的长期安全储存。此外，根据中海油 2018 年提出的海洋石油高效开发模式，对于平均生产年限约为 25 年的油井，采用 EOR 技术以突破三次与二次采油界限。CO_2-EOR 技术作为提高石油采收率的主导技术，有望增加海上石油产量、延长油气田的生产寿命，推动海上碳中和进程。

海上碳循环利用枢纽方案旨在有效整合和优化多种能源资源，提升海上“绿电”开发和消纳体量，同时保障综合能源系统的连续性和稳定性，提高海洋碳汇和海上碳消纳能力。该方案将能源生产、增产收益、含碳副产品收益纳入海洋能源板块（见图 7），将成为我国海洋领域的新经济增长点。因此，在技术、装备水平满足退役油气平台低碳化改建的前提下，还需结合退役平台的实际剩余价值，从改建投资与运营支出、能源产业收益与减碳效益、方案风险评估与市场响应、环境与社会效益等方面综合开展技术经济可行性分析，并对改建方案进行评估和调整，在最大化利用现有资源的同时，为海洋油气等高碳产业的绿色低碳转型提供保障，实现可持续发展。

五、我国退役油气平台改建的关键工程实施策略

退役油气平台改建是海洋油气产业复杂且重要的趋势和决策，因而制定适宜的改建工程实施策略至关重要。基于上述提出的海上碳循环利用枢纽方案，本研究从改建方案对平台的环境保护可持续性、安全可靠性、技术创新性、多功能性等方面入手，制定平台改建流程策略，如图 8 所示。其中，

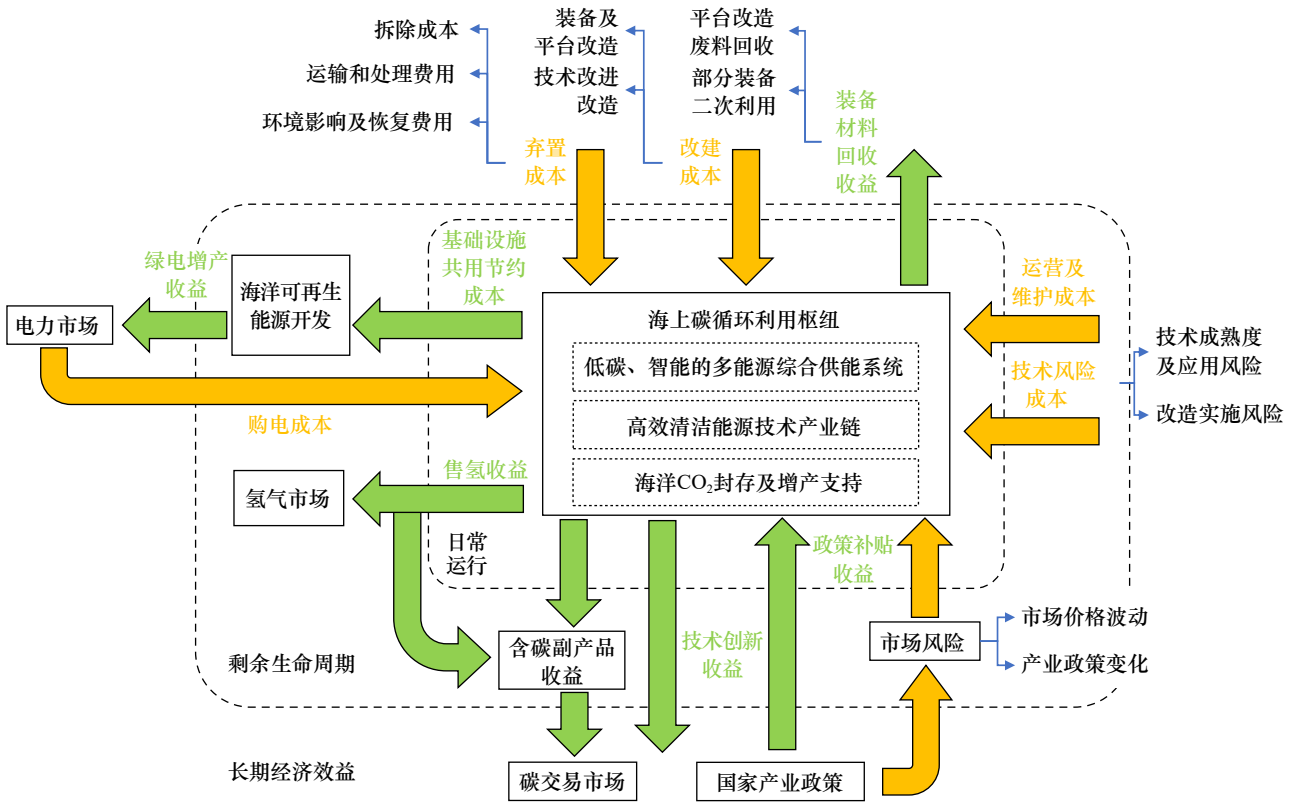

图 7　构建海上碳循环利用枢纽的关键成本及收益构成

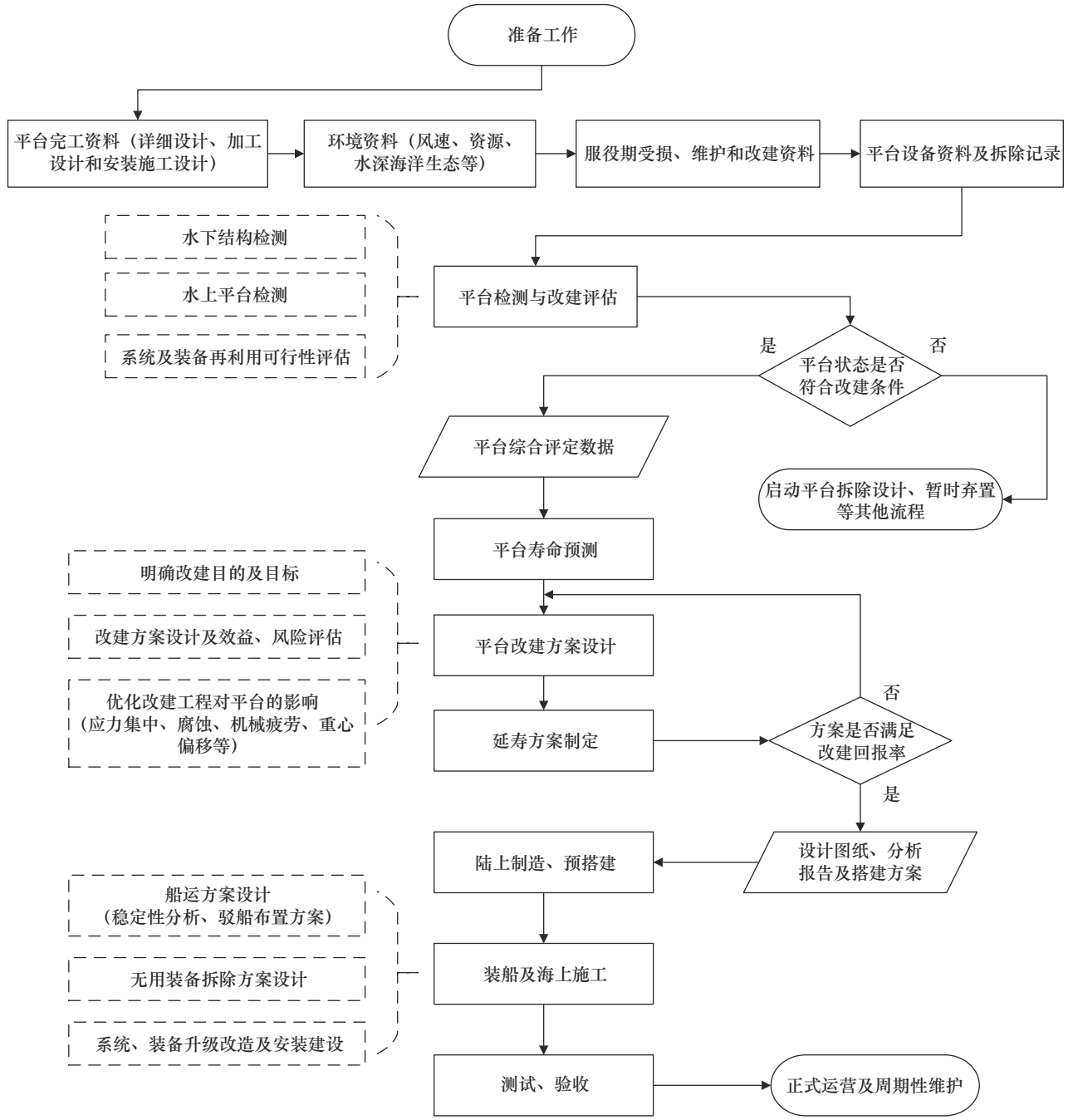

图8　我国海洋退役油气平台的改建逻辑策略

平台安全性评估和检测、改建方案制定策略和全生命周期的环境保护等是推动平台改建再利用过程中不可忽视的关键环节。此外，平台改建不能完全参考新平台的安装建设过程，也不是拆除设计的逆过程，需要考虑更多的影响因素和施工工况。

（一）平台安全评估与检测

退役油气平台安全检测是开展平台改建工作的前提，包括水下结构损伤及稳定性检测、水上平台物理化学性能检查与评估、系统及装备再利用可行性评估、平台寿命预测与延寿方案制定和改建后风险抵抗能力评价；需着重提升耐腐蚀、结构承重强度和抵御极端环境如风浪载荷的能力，确保改建后平台可承受新增功能的操作压力以及相关的环境影响。

在平台改建期间，需严格遵守我国海洋和工业安全相关施工标准，在陆上预制、吊装、驳船、施

工等环节进行定期安全审查，建立防火、防爆和防泄漏等风险监测预警机制，确保施工作业设备处于安全运行状态。平台改建后，在平台能源互联、智能调度和监测系统等中应用传感器和通信设备，在保障能源系统安全稳定运行的同时，提升对科研数据、能源使用和个人资料等敏感信息泄漏风险的应对能力，加大在大数据、机器人、人工智能等智能监控技术的研究和应用。此外，在改建和运营期间，员工应接受安全培训，并制定紧急响应及疏散计划，以确保人员安全。总之，安全性评价需贯穿平台改建的全生命周期，确保所有操作符合我国与国际安全标准。

（二）平台改建的方案策略

在进行油气平台改建方案策略的规划时，需要综合考虑多个方面。① 平台类型和寿命是决定退役油气平台是否适合改建、改建策略制定、技术选择和投资回收期限的关键因素；② 能源需求和碳排放曲线是明确绿色改建策略的关键指标，直接影响平台的碳减排效果和长期的环境可持续性；③ 海域清洁能源可用性决定了改建方案的多样性和可行性；④ 平台至清洁能源的距离关系到能源运输成本和供能效率；⑤ 原有设施状况和新增设备需求共同决定了改建技术的复杂性与投资成本，这是由于部分设施使用寿命结束后，仍存在进一步促进或刺激价值链发展的可能性。综上，在结合已有设备进行退役油气平台改建方案选择时，不仅要考虑即时效果，还要考虑长期的经济和环境影响。

上述因素对于退役油气平台改建方案的选取至关重要，建议结合油气平台退役情况建立多属性决策模型，通过专家评测、层次分析法等方法对影响因素进行定性或定量评估，再提出具体的改建方案及计划。此外，退役油气平台的改建还要求决策者具备跨学科的知识和综合决策能力，同时需要充分运用数据支持和专业分析工具，以确保方案安全可行和效果最优。

（三）全生命周期环境保护

环境保护是平台改建可行性需要考虑的重要关键因素。在改建前，需要优先评估拟开展的改建活动（污染物泄漏、排放、噪声等）对海洋生态系统的影响，如水质、海底生态以及周边生物多样性等；在改建过程中，对产生的污染物需采取有效措施进行处理，防止这些物质对海洋环境造成二次污染；在改建后，应制定长期的管理计划，并实施定期海洋环境监测，确保改建后的平台在运营过程中持续遵守环境保护标准，及时应对可能出现的环境问题。此外，改建计划还应考虑如何有效利用已有设备、资源和材料，以减少对新建材料的需求，减少对环境的影响。通过综合考虑安全性和环境保护因素，对退役海洋油气平台进行有效改建，既能利用现有资源，又能确保人类活动与海洋环境和谐共存。

六、我国退役油气平台低碳化改建的难点及建议

（一）我国退役油气平台低碳化改建的难点

近年来，我国陆续开展了可再生能源耦合供能、海洋碳地质封存、“Power-to-X”技术、海上设施延寿等前置示范工程和技术储备，有效推动了以油气产业为主的海洋领域低碳化进程；海上固定式风电场供能集群的建立、多座深远海浮式风电机组的成功并网，以及HL3型起重船、海上及水下工程船、多功能运维支持船等海洋工程服务船舶装备的不断增加，标志着我国在供能调配、工程建设、维护保障等方面已初步具备支撑低碳化改建所需的核心技术、海事工程和服务保障能力。然而，迄今为止，我国尚未真正开展具有综合减碳能力的退役油气平台改建工程，其改建面临的难点具体如下。

1. 与平台改建相关的法律法规和支持政策缺失

通过对国内外退役平台拆除案例分析发现，退役油气平台等海上设施的处置项目工程涉及国家海洋行政、能源、税务、海洋监测等管理部门，整体流程冗余繁杂；开展退役平台低碳化改建还需要增加海洋工程建设部门、新用途管理部门等，易出现相关管理部门职责不明确，使平台改建在申请、审批、执行、监察等阶段面临阻碍。加之，我国目前在退役油气平台改建的相关法律法规不健全、改建前后责任主体及义务不清晰，可能造成再利用难以开展或在执行过程中产生大量复杂问题。

此外，我国有关海洋低碳化的支持政策还不完善，制约了我国退役油气平台的改建研究及其进程

的发展。尚没有可供参考的再利用方式和标准，导致系统性技术标准的空白，使得有再利用意愿的企业或者法人在选择如何再利用退役油气平台的阶段面临困难，难以做出科学合理的再利用决策，无法充分发挥退役油气平台的最大利用价值，难以真正实现因地制宜的变废为宝。

2. 低碳化技术的海洋领域应用存在短板

近年来，我国低碳化技术总体上取得了关键进展，但多数技术及装备尚未得到海试验证；许多海洋领域低碳化方案仍处于概念或实验室阶段，亟需在实际应用中进行检验，并评估各方案下的技术及装备在真实环境中的表现和潜在价值，以明确当前技术及装备的不足并优化改进方向。目前，我国尚未建立独立于岸电系统的可再生能源应用模式，多种能源综合供能管理及监控系统在复杂海洋条件下的可靠性和有效性仍待验证，而这是构建海上碳循环利用枢纽的关键所在。此外，绿色甲醇技术在海洋环境中的实际可行性和效率还需论证，海上高效用能技术有待提升，低能耗、低成本的海洋规模化碳封存技术成熟度不足；可再生能源还存在波动性和规模化应用难题，能源效率提升技术应用普及程度低、生物能源生产技术不成熟以及清洁化工资源的市场推广力度不足等问题，制约了低碳化技术和装备在退役油气平台改建中的应用。

3. 退役平台改建的跨行业合作经验缺乏

退役油气平台的低碳化改建涉及多个行业和部门间的跨领域合作，涵盖能源（包括可再生能源开发企业、石油和天然气公司、能源设备制造商等）、化工（包括化工企业、甲醇生产企业、CO_2转化技术研发企业等）、海洋工程（包括海洋工程设计公司、海洋结构制造企业、海洋管道建设公司）以及船舶与运输等领域。退役油气平台低碳化改建在我国属于全新领域，存在跨行业合作经验不足、合作模式不清晰、合作范围不明确等问题，可能导致不同领域的企业和机构存在“信息孤岛”现象，缺乏有效的信息共享机制。而不同领域的企业和机构可能存在不同的技术标准和规范，缺乏统一的标准体系，可能在合作过程中出现技术对接困难、技术集成不顺畅等问题；同时，跨行业合作需要具备多领域知识的专业人才进行协同配合，合作经验缺乏将导致复合型人才资源匮乏，进而影响退役油气平台改建进程的推进。

（二）我国退役油气平台低碳化改建的发展建议

1. 加强政策引导，健全平台改建相关法律法规

建议为退役油气平台向海上碳循环利用枢纽、科普文旅、海洋科研等方面的低碳化转型提供政策支持。探索并制定适合退役油气平台改建的科技创新扶持机制、激励机制和专业人才培养机制，发布资金补贴、税务减免和市场准入等激励政策。鼓励企业采用清洁能源技术、节能设备和环保等措施，降低改建过程的碳排放和环境污染，增强平台改建企业的投资热情，推动技术创新和产业升级，促进低碳经济的发展。

推动与退役油气平台改建有关的法律法规的出台，是推动改建工作顺利进行、确保项目举措合法、安全环保和可持续发展的重要前提。一方面，在现有油气设施弃置相关法律法规的基础上，健全平台改建法规，为改建项目提供明确的法律依据和管理边界，同时激发企业投入、加快技术创新、促进行业健康发展。另一方面，健全平台改建法规，制定完善的行业规范、制度框架及改建运营标准体系，助力改建项目的规范化、科学化和可持续发展，为我国海洋领域低碳化发展提供法律保障，促进海洋经济的健康发展。

2. 优化技术理论支撑，加快国产装备转型升级

为推动退役油气平台的改建进程，需要开展相关关键技术优化和“陆上高新技术下海”适应性研究。一是全面评估平台结构与安全性分析，发展更精确、可靠的结构评估方法，运用有限元、结构力学和计算流体力学等技术理论，对复杂载荷下的平台结构进行精细模拟与分析；同时，结合人工智能和大数据技术，建立智能化的结构健康监测系统，实时监测平台结构状态，预测可能出现的问题并及时采取措施。二是在能源利用与节能技术方面，深入研究海洋能源开发技术，了解多元化海洋应用需求下的技术要求，提高能源开发利用效率，优化供需匹配、强化跨学科合作，推动节能技术的创新，提供更全面、综合的技术解决方案。进一步，对环境影响评估应建立完善的模型，考虑水文学、海洋地质学等更多因素，同时深入研究环境保护技术，为改建后的平台提供更有效的环境保护措施。三是在智能化与自动化控制方面，加强对智能传感器、机器学习和自动化控制技术的应用研究，解决海洋环境下的技术挑战，确保智能化系统在复杂海洋环

境中的可靠运行。

3. 优先开展退役平台的改建示范工程

建议优先聚焦我国已掌握的关键低碳化技术的真实海洋环境可行性验证工作，明确构建海洋碳循环利用枢纽对技术和装备性能的特殊要求，促进该领域的技术创新和成果转化，提高技术的适应性和稳定性；探析平台改建技术方案对海洋环境的影响，明确改建工程所需的环境保护措施，确保未来项目的可持续发展。明晰平台改建所涉及的技术门槛和投资风险，为多产业的顺利合作积累宝贵经验，有效提高后续平台改建项目的成功率；为相关政策的制定提供参考，促进政策的完善和落实，为海洋技术领域的发展提供良好的政策环境，进而推动我国建立科学合理的退役油气平台再利用模式。

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: April 16, 2024; **Revised date:** June 20, 2024

Corresponding author: Wang Guorong is a professor from the School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University. His major research fields include R&D of offshore oil and gas resources and equipment, technology and equipment for the development of hydrates and mineral resources. E-mail: wanggr@swpu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Contribution of Marine Carbon Sinks to the Carbon Neutrality” (2021-JZ-11), “Strategic Research on the Life Extension and Comprehensive Utilization of New Energy for Offshore Oil and Gas Platforms” (2023-HZ-25)

参考文献

[1] Al Baroudi H, Awoyomi A, Patchigolla K, et al. A review of large-scale CO_2 shipping and marine emissions management for carbon capture, utilisation and storage [J]. Applied Energy, 2021, 287: 116510.

[2] Marouani I, Guesmi T, Alshammari B M, et al. Integration of renewable-energy-based green hydrogen into the energy future [J]. Processes, 2023, 11(9): 2685.

[3] 刘吉臻, 马利飞, 王庆华, 等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 149–159.
Liu J Z, Ma L F, Wang Q H, et al. Offshore wind power supports China’s energy transition [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 149–159.

[4] 周守为, 李清平, 朱军龙, 等. CO_2海洋封存的思考与新路径探索 [J]. 天然气工业, 2024, 44(4): 1–10, 199.
Zhou S W, Li Q P, Zhu J L, et al. Consideration on CO_2 marine storage and exploration of new paths [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(4): 1–10, 199.

[5] Musa S D, Tang Z H, Ibrahim A O, et al. China’s energy status: A critical look at fossils and renewable options [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2281–2290.

[6] 中海油能源发展股份有限公司. 2022 年可持续发展报告 [R]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
CNOOC Energy Technology & Services Limited. Sustainability report 2022 [R]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.

[7] 中国海洋石油有限公司. 中国海洋石油有限公司 2022 年年度报告 [R]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
China National Offshore Oil Co., Ltd. Annual report of China National Offshore Oil Co., Ltd. (2022) [R]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.

[8] 中国海油集团能源经济研究院. 中国海洋能源发展报告 2023 [R]. 北京: 石油工业出版社, 2023.
CNOOC Institute of Energy Economics. China marine energy development report (2023) [R]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023.

[9] 盛朝迅. 新时代推动海洋制造业高质量发展的思路与对策 [J]. 经济纵横, 2023(5): 38–49.
Sheng C X. Research on ideas and countermeasures for promoting high-quality development of marine manufacturing industry in the new era [J]. Economic Review Journal, 2023 (5): 38–49.

[10] 张茂东. 我国海上退役油气平台再利用研究 [J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(7): 62–67.
Zhang M D. Research on the reuse of decommissioned offshore oil and gas platforms in China [J]. Ocean Development and Management, 2021, 38(7): 62–67.

[11] 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 财政部, 等. 海上油气生产设施废弃处置管理暂行规定 [EB/OL]. (2010-10-20)[2024-06-19]. https://www.gov.cn/zwgk/2010-10/20/content_1726504.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Finance of the People’s Republic of China, et al. Interim provisions on the management of abandonment and disposal of offshore oil and gas production facilities [EB/OL]. (2010-10-20)[2024-06-19]. https://www.gov.cn/zwgk/2010-10/20/content_1726504.htm.

[12] Lacey N C, Hayes P. Epifauna associated with subsea pipelines in the North Sea [J]. ICES Journal of Marine Science, 2020, 77(3): 1137–1147.

[13] Vidal P D C J, González M O A, Vasconcelos R M D, et al. Decommissioning of offshore oil and gas platforms: A systematic literature review of factors involved in the process [J]. Ocean Engineering, 2022, 255: 111428.

[14] Tan Y, Li H X, Cheng J C P, et al. Cost and environmental impact estimation methodology and potential impact factors in offshore oil and gas platform decommissioning: A review [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2021, 87: 106536.

[15] Global Wind Energy Council. Global offshore wind report 2023 [R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2023.

[16] Wu Y N, Li L, Song Z X, et al. Risk assessment on offshore photovoltaic power generation projects in China based on a fuzzy analysis framework [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 46–62.

[17] Qiu S Q, Liu K, Wang D J, et al. A comprehensive review of

ocean wave energy research and development in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 113: 109271.

[18] Roussanaly S, Aasen A, Anantharaman R, et al. Offshore power generation with carbon capture and storage to decarbonise mainland electricity and offshore oil and gas installations: A techno-economic analysis [J]. Applied Energy, 2019, 233: 478–494.

[19] Banihabib R, Assadi M. Towards a low-carbon future for offshore oil and gas industry: A smart integrated energy management system with floating wind turbines and gas turbines [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 423: 138742.

[20] Roy A, Kedare S B, Bandyopadhyay S. Optimum sizing of wind-battery systems incorporating resource uncertainty [J]. Applied Energy, 2010, 87(8): 2712–2727.

[21] Xie H P, Zhao Z Y, Liu T, et al. A membrane-based seawater electrolyser for hydrogen generation [J]. Nature, 2022, 612(7941): 673–678.

[22] Emerson B, Wu D, Lieuwen T, et al. Assessment of current capabilities and near-term availability of hydrogen-fired gas turbines considering a low-carbon future [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2021, 143(4): 041002.

[23] Kumar S, Baalisampang T, Arzaghi E, et al. Synergy of green hydrogen sector with offshore industries: Opportunities and challenges for a safe and sustainable hydrogen economy [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 384: 135545.

[24] Durakovic G, del Granado P C, Tomasgard A. Powering Europe with North Sea offshore wind: The impact of hydrogen investments on grid infrastructure and power prices [J]. Energy, 2023, 263: 125654.

[25] Schiebahn S, Grube T, Robinius M, et al. Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(12): 4285–4294.

[26] Riboldi L, Alves E F, Pilarczyk M, et al. Optimal design of a hybrid energy system for the supply of clean and stable energy to offshore installations [J]. Frontiers in Energy Research, 2020, 8: 607284.

[27] 中国21世纪议程管理中心. 中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告(2023) [R]. 北京: 科学出版社, 2023.
China Agenda 21 Management Center. Annual report on carbon capture, utilization, and storage in China (2023) [R]. Beijing: Science Press, 2023.

[28] 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.
Wang G R, Huang Z Q, Zhou S W, et al. Current status and development direction of deep-sea mineral resource exploitation equipment [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 1–12.

[29] Leonzio G, Bogle D, Foscolo P U, et al. Optimization of CCUS supply chains in the UK: A strategic role for emissions reduction [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 155: 211–228.

[30] Sun L L, Liu Q, Chen H J, et al. Source-sink matching and cost analysis of offshore carbon capture, utilization, and storage in China [J]. Energy, 2024, 291: 130137.