Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Views & Comments

海洋新兴产业和基础设施的技术发展与挑战

李华军[a]，曾昕萌[a]，Torgeir Moan[b]，徐琨[a,*]

[a] State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Ocean University of China, Qingdao 265300, China
[b] Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim 7491, Norway

1. 引言

海洋作为人类生存的重要空间，涵盖了海面、海面以上空域以及海床等不同的空间区域。海洋蕴藏着极为丰富的资源，包括石油和天然气、可再生能源、矿产资源以及多样的海洋生物，是全球生命支撑系统的重要组成部分，也是人类生存与发展的宝贵财富[1]。此外，如图1 [2]所示，海洋相关产业为实现联合国提出的17项可持续发展目标中的多项内容提供了关键途径[3]。

图1. 海洋产业与联合国可持续发展目标[2]。

现代海洋工程活动可追溯至约80年前开始的海上油气勘探。多年来，油气行业在技术与方法上的突破，为其他海洋工程领域的发展奠定了重要基础[4]。为应对当代社会挑战，新兴海洋产业正不断发展，其核心聚焦于可服务性、可生产性、安全性和可持续性。图2展示了海洋空间与资源开发利用的一个典型示例[5]。海洋新兴产业包括海上可再生能源（如风能和太阳能）、海洋农业、海底采矿、海上基础设施建设、海洋生物技术，以及深海和极地的油气勘探[6]。这些创新产业不仅有效利用海洋资源，构建多元化资源基础，更推动了可持续的社会经济发展。它们还创造了大量就业机会，既提升了社会整体福祉，又蕴含着巨大的发展潜力[7–8]。

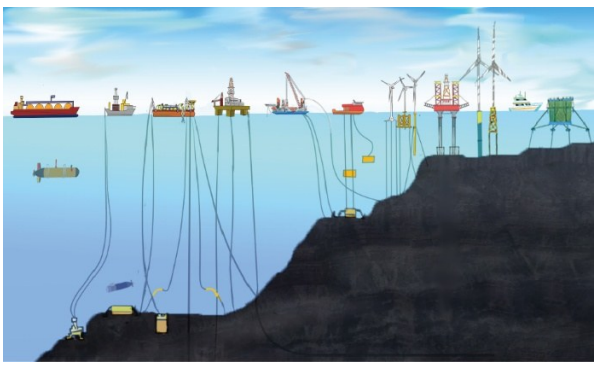

图2. 海洋空间与资源的开发利用[5]。

以中国海洋相关国内生产总值为例，其总体规模持续增长（图3 [9]），尽管在2020年疫情期间增速有所放缓。

* Corresponding author.
E-mail address: xukun@ouc.edu.cn (K. Xu).

2095-8099/© 2025 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
英文原文：Engineering 2025, 55(12): 14–20
引用本文：Huajun Li, Xinmeng Zeng, Torgeir Moan, Kun Xu. Technological Development and Challenges in Emerging Ocean Industries and Infrastructures. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.08.022

从2010年至2020年，海洋相关GDP约翻了一番，并预计在当前平均增长趋势下，到2035年将再次翻番。

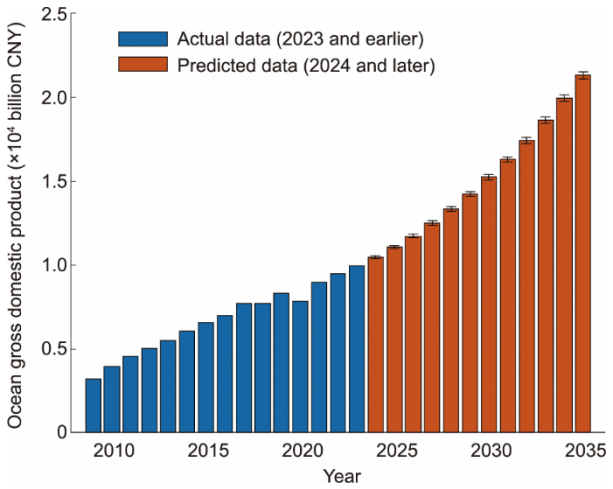

图3. 截至2023年的中国海洋国内生产总值统计数据及至2035年预测[9]。

除渔业、旅游业和交通运输等传统海洋产业外，可再生能源、水产养殖、化工、制药及海水淡化等新兴海洋产业也正快速发展（图4 [9]）。这些产业的发展旨在提升海洋生态系统服务的价值并实现整合，尽管这些服务尚未直接货币化，却为经济和人类活动带来显著效益，包括碳汇、海岸防护、废弃物管理以及生物多样性保护。根据世界自然基金会（WWF）2015年的一份报告[10]，当前渔业资源已被过度开发，水产养殖和海上风电展现出巨大的增长潜力。本文将重点讨论海洋新兴产业相关的技术发展与挑战。

2. 海洋新兴产业与基础设施的现状及发展趋势

海洋资源利用在能源、食物、稀有材料及交通基础设施等多个领域正快速发展，呈现出多元化和技术进步的趋势[11]，如图5所示。

（1）能源领域。油气产业积累的技术、工程方法和项目管理经验正被广泛应用于可再生能源开发。海上风电和海上光伏持续进步，其中海上风电已成为清洁能源供应的重要支柱。2023年全球海上风电新增装机容量为10.8 GW，同比增长24%，全球累计装机容量达到75.2 GW [12]。例如，中国已安装6680台海上风机，累计装机容量达37.69 GW [12]。同时，漂浮式海上风电示范项目[13]以及波浪能和潮汐能的发展展现了未来海洋可再生能源的巨大潜力。欧盟提出了支持该行业长期可持续发展的具体措施，设定了具有约束力的装机目标：到2030年，海上风电不少于60 GW，海洋能不少于1 GW；到2050年，海上风电和海洋能分别达到300 GW和40 GW [14]。美国海上风电市场也在快速增长，项目储备容量超过52 GW [15]，并配套提出了总计112 GW的州级目标[16]。天然气水合物是海洋能源开发的重要前沿方向，近期在开采技术方面的进展显示其作为过渡能源的潜力，但储层稳定性和可持续开发仍需深入研究[17]。除可再生能源外，碳捕集、利用与封存（CCUS）通过在源头捕集二氧化碳并将其安全封存在海底，为减排提供了另一条重要途径[18]。为满足能源市场需求并降低成本，能源装备正朝着更大功率方向发展。

（2）食物领域。世界资源研究所（World Resources Institute）预测，到2050年全球食物需求将增加70% [19]。自20世纪90年代以来，全球野生捕捞渔业产量基本稳定在每年8000万吨左右（不含海藻），而水产养殖产量已与野生捕捞相当[20]。更重要的是，与陆地肉类生产相比，海产品的温室气体排放更低，更加环保[21]。近年来，水产养殖技术取得了显著进展[22]。例如，中国黄海海域的大型海洋牧场养殖产量显著提高；挪威的深水网箱技术大

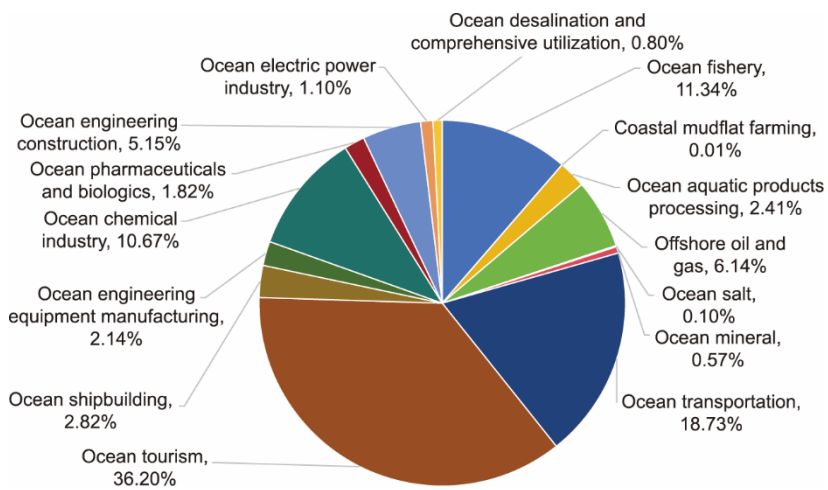

图4. 2023年中国海洋产业产值分布[9]。

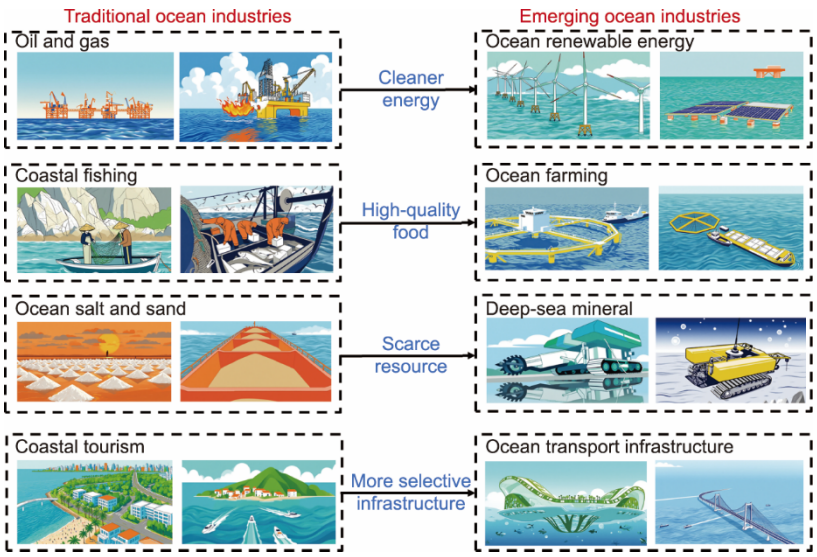

图5. 海洋产业发展趋势。

幅提升了大西洋鲑鱼的产量。未来渔业养殖正向规模化、可持续化和技术密集型方向发展，自动投喂、实时监测和环境友好型技术成为重要驱动力。实现可持续发展还需要减少环境影响、防止海洋污染和垃圾问题，以更好地协调技术发展与生态保护。

（3）稀有材料开发领域。近年来，深海矿产勘探已成为海洋新兴产业的重要方向。例如，太平洋多金属结核被多个国家视为关键战略矿产资源，引发了广泛的勘探活动。随着技术创新和资源需求增长，海洋资源开采正不断向更深海域推进，使多金属结核、硫化物和富钴结壳等海底资源的开发成为可能[23]。与此同时，在资源开发过程中，保护脆弱的深海生态系统也日益受到重视。

（4）交通基础设施领域。跨海大桥和海底隧道的建设显著提升了区域连通性，成为海洋新兴产业经济增长的重要支撑。例如，中国港珠澳大桥以及挪威用于峡湾跨越的浮式桥梁技术，均代表了现代海洋工程的重大突破[24]。未来海洋基础设施将更加注重韧性、可持续性和先进技术，尤其需要应对极端天气和海平面上升等挑战。智能技术和生态友好材料将在提高效率、安全性和环境共存方面发挥关键作用。

此外，当前规模相对较小但具有潜力的领域还包括海洋生物技术、生物勘探、海水淡化、二氧化碳与废弃物处置以及海岸防护。总体而言，海洋新兴产业在能源、食物、资源和交通基础设施等方面取得了显著成果，但在环境保护和社会可持续性方面仍存在不足。未来发展须在经济收益与生态保护之间实现更好平衡[25]，而技术创新将是关键驱动力。

3. 海洋新兴产业与基础设施的需求与挑战

3.1. 对人类社会未来可持续福祉的贡献

当前人类社会正面临资源枯竭、气候变化、环境退化以及能源和食物需求增长等一系列挑战。以化石能源高度依赖和不可持续资源消耗为特征的传统发展模式，已导致严重的生态失衡并对自然系统造成巨大压力。因此，迫切需要一种环境可持续、安全且具有韧性的新发展模式，在减少碳排放、保护生态系统和保障资源长期可用性的同时，满足社会经济发展需求。

海洋新兴产业以可持续和创新方式开发广阔而尚未充分利用的海洋资源，为实现这一目标提供了重要路径。通过发展海上风能、太阳能等可再生能源，以及海洋水产养殖以保障粮食安全，这些产业能够直接应对资源短缺和环境可持续性问题。深海矿产开发则支撑高价值技术和绿色能源发展，使经济增长不以牺牲生态平衡为代价。技术创新与负责任资源管理的结合，使海洋新兴产业在提升人类福祉和推动迈向可持续未来方面发挥关键作用。

3.2. 海洋新兴产业的资源管理——可持续的海洋利用

海洋新兴产业的技术创新必须在推动经济增长的同时优先考虑环境保护，实现经济效益与生态效益的平衡。例如，海上风电的发展增加了清洁能源供应，减少了对化石能源的依赖，智能化深海采矿技术有望提高资源开采效率并降低成本，但其环境影响必须经过严格评估。海洋资源开发必须伴随健全的环境保护措施，以确保其可靠的利用[26]。

当前海洋生态环境较为脆弱，深海生态系统尤为敏感，不当开发可能造成不可逆损害。因此，技术创新必须与生

态保护紧密结合。先进的海洋监测和生态修复技术，以及监测和预警系统的部署，有助于及时发现并减缓环境风险。

另一个重大挑战在于缺乏全面且科学设计的海洋空间规划与产业布局，这给海洋资源的可持续利用和海洋生态系统的健康带来了重大风险[27]。图6展示了典型案例。通过科学规划，航运、渔业、能源开发和生态保护等海洋活动可得到合理管理，从而避免资源冲突并最大限度降低环境影响。此外，采用多功能设备通过单一综合设施提取多种海洋资源的趋势日益明显，这种模式有望提升各功能的运营效率、降低成本并减少环境足迹。科学构建的海洋空间规划不仅能提高资源利用效率，还能保护脆弱的海洋生态系统，在经济发展与环境保护之间取得平衡，进而推动海洋产业的可持续发展，为人类长远福祉作出贡献。

总而言之，在海洋新兴产业中平衡技术进步、经济效益与环境保护，是确保该产业长期可持续发展的重要挑战。唯有实现技术创新、经济增长与环境保护的有效协调，才能为后代守护海洋环境的健康与持久。

3.3. 全生命周期中的基础科学问题与关键技术挑战

技术创新是推动海洋新兴产业实现绿色、安全和可持续发展的核心。高效的海上风能和太阳能技术、先进的传感监测与自动控制系统，提高了装备在极端海洋环境下的安全性。然而，实现这些目标仍面临诸多技术挑战，需要大量研发投入。

海洋测绘领域的科技进步显著增进了人们对海洋资源的认知，然而当前的认识仍存在局限，尤其是在深海和极端环境中发生的动态过程与相互作用方面。高分辨率声呐、遥感技术和自主水下航行器等精密设备，能够精确绘制海底及地下构造图，助力科研人员识别和评估矿产资源与生物多样性热点等资源。然而，海洋系统具有固有的复杂性和高度可变性，其中包含多尺度物理过程以及风、浪、流等多重海洋场，这些要素彼此紧密耦合且常呈非线性特征[28–29]。海洋数据采集面临的挑战导致观测能力不足，使研究人员难以完整捕捉海洋特征的时空演变规律及深海生态系统的内在机制。这种认知的欠缺直接影响海洋新兴产业的发展，进而增加了海洋资源勘探与开发利用的风险和不确定性。关键可靠技术的可用性缺乏是造成这些认知缺口的主要因素。例如，发展基于水声通道通信的网络化海洋系统，可大幅提升海底测绘的速度与精度，助力关键水下基础设施检测，并深化对水柱及其生物群落的研究。此外，开拓新型能源供给形式对于支持水下机器人长期续航至关重要，能够拓展深海勘探与持续监测的能力。通过将先进测绘技术与强化观测手段相结合，研究人员能够深化对海洋动力学及生态系统的理解，最终推动海洋资源的可持续管理和海洋产业的蓬勃发展。

（1）诸多基础科学问题尚未解决，严重制约了技术突破与实际应用。在海洋动力学、流固耦合作用等关键领域仍存在显著的知识空白，限制了对海洋装备行为预测与建模的准确性。例如，通过现有理论往往难以完整捕捉多体浮动系统中复杂的动态响应与多尺度耦合效应，这直接影响海洋工程结构的设计与安全评估[30]。实验方法通过提供直接观测数据并对理论模型进行验证，在应对这些挑战中发挥着关键作用，有助于深化对复杂结构行为的理解。然而，在对海上风机等结构进行实验时，其黏性力与重力效应均具有重要影响，由此产生了雷诺数与弗劳德数之间难以协调的尺度冲突问题。为此，有必要发展能够补偿双尺度效应的先进实验方法[31]。智能运用实验方法的一个重要方向，在于将其与数值方法紧密结合。

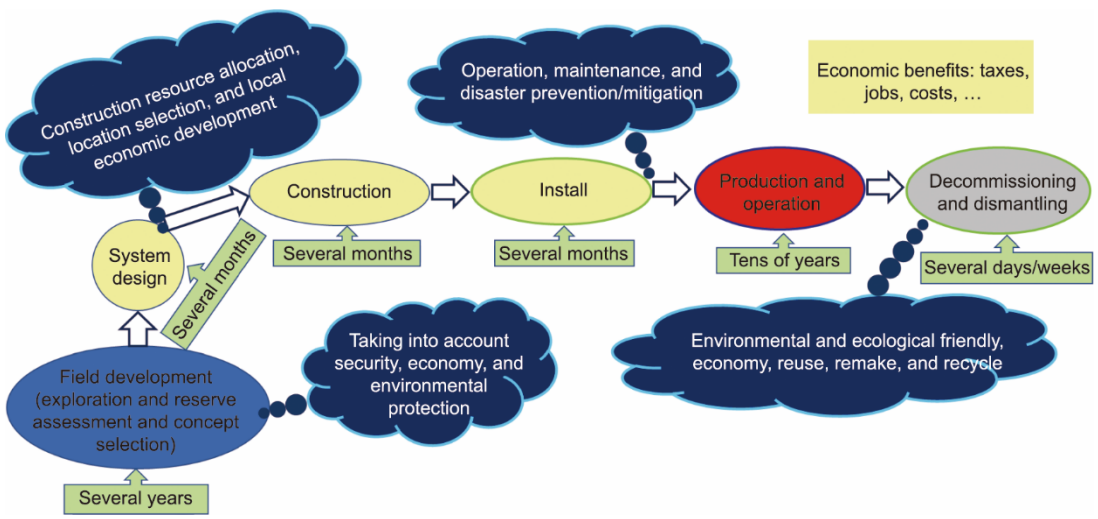

图6. 综合海洋空间与产业规划的贡献。

（2）海洋新兴产业的安装、运行与维护技术仍不成熟，严重制约了其在复杂海洋环境中的应用与发展。由于海工装备常须部署于深远海区域，采用传统安装维护方法不仅成本高昂，且在强风大浪等恶劣条件下实施难度极大[32]。区域性海洋特征进一步加剧了这些挑战。例如，在南海等浑浊水域进行遥控无人潜水器检测时须强化声学导航系统，而波罗的海的维护作业则以光学传感器为主导。潮汐模式亦带来差异化需求：芬迪湾16 m的潮差要求维护船舶配备抗风暴系泊系统；潮差微弱的地中海则更需关注沉积物淤积问题。目前仍有若干关键技术亟待研发以弥补这些不足。例如，高性能安装船舶与尖端抗风浪安装装备的进步，对于提升复杂海况下的布设效率和可靠性至关重要。此外，远程监测与自动化维护技术尚未完全成熟，难以及时发现和处理设备故障，严重影响了整体运行效率与经济可行性。为实现海洋新兴产业的长期稳定运营，亟须研发适配极端海洋环境的智能化维护与自动化解决方案。

（3）新兴海洋工程结构的设计标准、设计技术与装备研发体系仍不健全。当前针对复杂海洋结构的设计框架须进一步研究多物理场耦合效应，特别是在极端气候条件下的动态响应特性。同时，新一代数字设计技术尚未得到全面应用。此外，仍须进一步发展现有计算机辅助设计与虚拟仿真方法，以满足新型海洋工程装备的建模和协同仿真需求，从而支持其在极具挑战性的海洋环境中的高效设计与优化[33]。

（4）社会对海洋开发的制约正日益受到气候变化、生物多样性丧失与污染构成的“三重地球危机”影响[34]。这些相互关联的挑战构成了必须克服的重大科技障碍，以推动海洋可持续管理。气候变化导致海平面上升、海洋酸化及海洋生态系统改变，使资源开采与海洋产业运营趋于复杂化。生物多样性丧失进一步加剧了这些挑战，物种数量下降破坏了生态平衡，削弱了海洋环境的生态韧性。塑料污染、化学污染物及营养盐径流等污染问题，对海洋健康构成额外威胁，加大了环境影响的监测与缓解难度。现有技术往往难以提供关于污染范围与影响的全面数据，导致有效解决方案的制定受阻。此外，围绕海洋资源利用的社会观念和政策可能阻碍技术创新与实施，因为公众对环境恶化的关切常与经济利益产生冲突。要应对这些社会制约，需要协同整合先进技术与健全的环境治理体系，确保海洋开发与生态可持续性及社会福祉相协调。

3.4. 海洋新兴产业的未来——数字化与智能化

数字技术已在海上油气平台及设备监测中得到应用，能够对运行状态提供实时反馈。此外，智能海洋观测浮标实现了环境数据的自动化收集与传输，为精准环境监测与预警系统提供了支撑。未来，海洋新兴产业将通过更深层次的技术融合突破现有局限，从而为人类开启前所未有的发展机遇。海洋将成为全球智能网络的重要组成部分，人工智能（AI）、数字孪生、先进传感器和创新材料等赋能技术将彻底革新资源开采与管理模式。图7 [35]展示了从设计到运营全过程的数字孪生概念示例。无人系统、自动化船舶与水下机器人将在极端环境中自主作业。尽管自主性可能带来新型风险，但若运用得当，这项技术有望显著降低作业风险与成本[36]。

依托数字化基础设施，AI驱动的解决方案正在革新海洋工程领域。先进AI模型显著提升了复杂海洋过程的预测能力（如波浪动力学[37]和流固耦合分析），而高性能计算技术则能实现快速大规模模拟，为实时环境分析和优化工程设计提供支持。AI技术通过整合智能数据分析，持续发挥补充作用，从而提升海上作业的运行可靠性与效率[38]。

两种前景广阔的AI应用凸显了这种变革潜力。物理信息神经网络[39]将基础物理定律融入其框架，能以更高的计算效率和精度求解偏微分方程，同时也有益于水动力建模[40]、结构完整性评估及能源系统优化。此外，AI智能体通过处理海量传感器数据、预测环境变化[41]并自主调整系统参数以优化海上作业，在海洋工程领域展现出巨大潜力。这增强了海上平台的自适应控制能力，并借助为物理智能体开发的语言智能体提升了实时风险评估水平。另一方面，数字化技术（尤其是AI）的应用，也为通过蓄意破坏等方式干扰行业运营和社会功能提供了可乘之机，这需要通过预防性措施加以应对。

超越工程范畴，综合数字化与智能化革命将把海洋转变为宜居的栖息地与资源枢纽。漂浮城市和水下研究基地或将为人口压力提供创新解决方案，而海洋农业与生物技术则能通过开发利用海洋资源应对粮食安全和医疗健康挑战。借助大数据、气候模型和先进环境传感器，未来海洋产业不仅能优化资源管理、预测气候变化对沿海区域的影响，还将在全球气候调节、缓解环境变化及保护地球生态系统方面发挥关键作用。

3.5. 价值创造潜力与社会影响

要充分释放海洋工程领域创造价值与促进就业的潜力，需要实施多项关键举措。投资人力资本至关重要，重点在于培养具备相应技能与能力的劳动力队伍，以满足新兴领域的发展需求。这需要加强教育投入并持续推动学

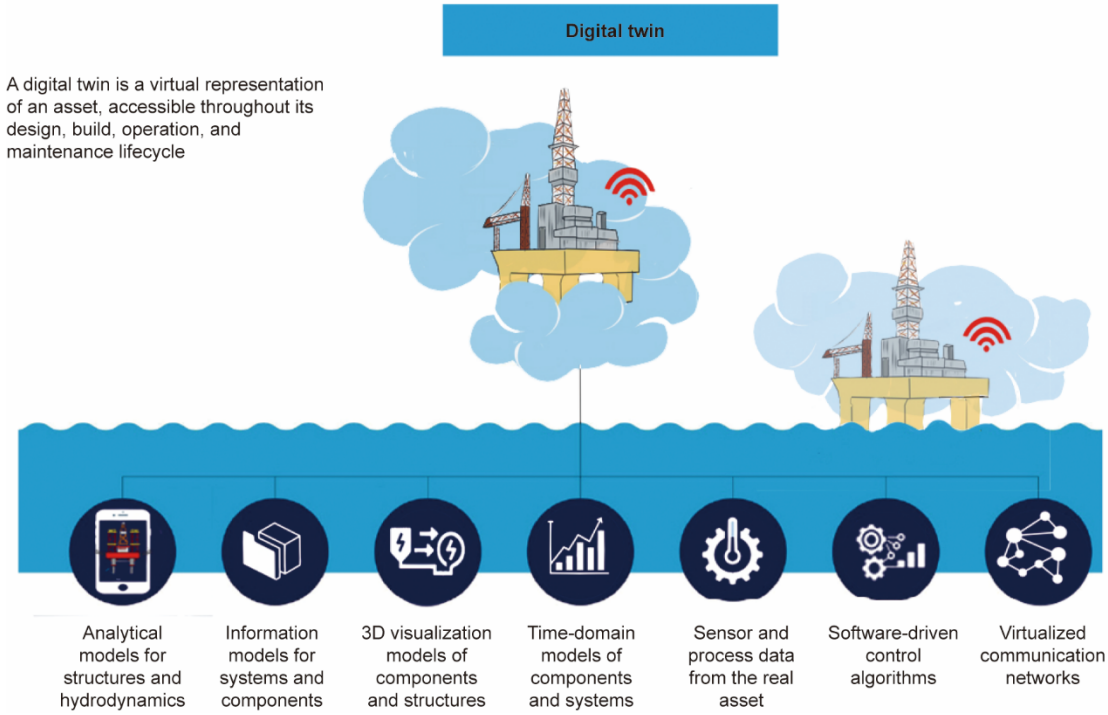

图7. 从设计到运营的数字孪生概念示意图[35]。此图阐释了数字孪生的概念，即一项资产在其全生命周期（从设计到运营）的虚拟映射。图中展示了包括分析模型、三维（3D）可视化、实时数据传感器以及软件驱动的控制算法在内的多种组成部分，这些要素相互连接，共同实现对资产性能的监控与优化。

习，同时与科研创新工作保持紧密协作。随着这些领域不断发展，许多从业者在相关独特技术方面经验有限，凸显了专业培训的重要性。此外，发展数字化与实体实验室基础设施对促进创新和确保实际应用至关重要。同时，推动政府、产业界、社会及研究机构等各方利益相关者之间的开放合作也势在必行。这种国内外协同合作有助于协调法规制定、价值创造、公共利益以及海洋工程领域知识与技能的提升。

新兴海洋产业为沿海社区和全球经济带来了变革机遇与复杂挑战。海洋活动的日益增多加剧了对海洋生态系统和海域健康的压力，引发了政治与公众的双重关注。2023 年东南亚国家联盟（ASEAN）海洋空间规划公约要求原住民参与海上许可决策以避免争议，这进一步说明了针对性政策框架有助于解决社会经济差异问题。绿色和平组织（Greenpeace）及众多关注气候挑战与污染的机构已采取多项行动，阻止新型海洋产业的开发。

推进海洋素养建设已成为全球海洋治理的基石，通过创新的公众参与模式跨越了传统学术边界。联合国教育、科学及文化组织（UNESCO）倡导的“海洋十年”计划[42]等开创性倡议，正是这一转变的典范。倡议通过互动式公众科学项目，利用休闲海洋设备开展海岸带数据采集，将科学研究与基层参与紧密结合。区域性实践进一步扩大了这一趋势：沿海城市正建立科技赋能的海洋教育中心，整合增强现实模拟与参与式测绘工具，将学生和居民转化为积极的海洋守护者。这种多维方法不仅消融了专业技术与公共认知之间的壁垒，更培育出技术创新与公民责任协同发展的新范式，以共同维系海洋生态系统的可持续未来。

4. 结论与未来展望

实现海洋利用的巨大价值潜力，依赖于加强科学与政策之间的互动，推动产业政策与能力建设在科研、教育和创新中的协同发展，并提供必要的数字化和物理实验基础设施。通过在资源开发、环境保护和经济可行性之间实现协调，发展能够适应极端海洋环境的先进技术体系，海洋新兴产业有望安全、高效、可持续地发展，从而为应对气候变化、资源枯竭等全球性挑战作出长期贡献。

CRediT authorship contribution statement

Huajun Li: Writing-review & editing, Writing-original draft, Supervision, Funding acquisition, Data curation. **Xinmeng Zeng:** Writing-review & editing,

Writing-original draft, Resources, Formal analysis. **Torgeir Moan:** Writing-review & editing, Writing-original draft, Validation, Supervision, Investigation. **Kun Xu:** Writing-review & editing, Writing-original draft, Validation, Investigation, Formal analysis.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

致谢

本研究由国家自然科学基金（52088102）和山东省重点研发计划（2021ZLGX04）资助。

References

[1] Rudolph TB, Ruckelshaus M, Swilling M, Allison EH, Österblom H, Gelcich S, et al. A transition to sustainable ocean governance. Nat Commun 2020;11(1):3600.
[2] United Nations. The 17 goals [Internet]. New York City: Department of Economic and Social Affairs; [cited 2024 Nov 11]. Available from: https://sdgs.un.org/goals.
[3] Hoegh-Guldberg O, Caldeira K, Chopin T, Gaines S, Haugan P, Hemer M, et al. The ocean as a solution to climate change: five opportunities for action. Report. Washington, DC: World Resources Institute; 2019.
[4] Cheng B, Fu Q, Li Q, Liu Y, Zhu L, Wu Y. Development strategy of China's offshore oil and gas equipment. SSCAE 2023;25:13–21. Chinese.
[5] Holte E, Sønvisen S, Holmen I. The potential for the development of cross-cutting technologies and technological equipment for use in the marine, maritime and offshore sectors. Trondheim: SINTEF; 2016.
[6] Li H, Liu Y, Liang B, Liu F, Wu G, Du J, et al. Demands and challenges for construction of marine infrastructures in China. Front Struct Civ Eng 2022;16(5):551–63.
[7] Li B, Wu Y. On the ecological relationship between ecological conservation and green development during the 14th five-year plan. Sci Technol Rev 2021;39:88–101. Chinese.
[8] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). The ocean economy in 2030. Report. Paris: OECD Publishing; 2016.
[9] Department of Marine Strategic Planning and Economics, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2024 China ocean economy statistical bulletin. Report. Beijing: Department of Marine Strategic Planning and Economics, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China; 2024.
[10] Marjo V, Charlotte DF. The potential of the blue economy: increasing long-term benefits of the sustainable use of marine resources for small island developing states and coastal least developed countries. Report. Washington, DC: The World Bank; 2017.
[11] Yin K, Zhang K, Huang C. Institutional supply, market cultivation, and the development of marine strategic emerging industries. Mar Policy 2022;139:105045.
[12] Global Wind Energy Council. Global offshore wind report 2023. Report. Brussels: Global Wind Energy Council; 2023.
[13] Moan T, Gao Z, Bachynski EE, Nejad AR. Recent advances in integrated response analysis of floating wind turbines in a reliability perspective. J Offshore Mech Arct Eng 2020;142(5):052002.
[14] European Commission. An EU strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future. Brussels: European Commission; 2020.
[15] Musial W, Spitsen P, Duffy P, Beiter P, Shields M, Hernando DM, et al. Offshore wind market report: 2023 edition. Report. Washington, DC: US Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy; 2023.
[16] US Department of Energy. An operations and maintenance roadmap for US offshore wind enabling a cost-effective and sustainable US offshore wind energy industry through innovative operations and maintenance. Report. Washington, DC: US Department of Energy Office of Scientific and Technical Information; 2024.
[17] Gajanan K, Ranjith PG, Yang SQ, Xu T. Advances in research and developments on natural gas hydrate extraction with gas exchange. Renew Sustain Energy Rev 2024;190:114045.
[18] Dou L, Sun L, Lyu W, Wang M, Gao F, Gao M, et al. Trend of global carbon dioxide capture, utilization and storage industry and challenges and countermeasures in China. Petroleum Explor Dev 2023;50(5):1246–60.
[19] World Research Institute. Creating a sustainable food future. Report. Washington, DC: World Research Institute; 2018.
[20] Det Norske Veritas (DNV). Ocean's future to 2050 Marine aquaculture forecast. Report. Oslo: DNV; 2021.
[21] Costello C, Cao L, Gelcich S, Cisneros-Mata MÁ, Free CM, Froehlich HE, et al. The future of food from the sea. Nature 2020;588(7836):95–100.
[22] Naylor RL, Hardy RW, Buschmann AH, Bush SR, Cao L, Klinger DH, et al. A 20-year retrospective review of global mariculture. Nature 2021;591(7851):551–63.
[23] Yang B, Liu Y, Liao J. Manned submersible—a national weapon for deep sea scientific research and the development and utilization of marine resources. Bull Chin Acad Sci 2021;36:622–31.
[24] Moan T, Eidem ME. Floating bridges and submerged tunnels in Norway—the history and future outlook. In: Wang C, Lim S, Tay Z, editors. Proceedings of the World Conference on Floating Solutions; ; 2019 Apr 22 – 23; Singapore. Singapore: Springer Singapore; 2019. p. 81–111.
[25] Cisneros-Montemayor AM, Moreno-Báez M, Reygondeau G, Cheung WWL, Crosman KM, González-Espinosa PC, et al. Enabling conditions for an equitable and sustainable blue economy. Nature 2021;591(7850):396–401.
[26] Ocean governance milestone. Nat Sustain 2023;6(4):348.
[27] Foley MM, Halpern BS, Micheli F, Armsby MH, Caldwell MR, Crain CM, et al. Guiding ecological principles for marine spatial planning. Mar Policy 2010;34(5):955–66.
[28] Pryor SC, Barthelmie RJ. A global assessment of extreme wind speeds for wind energy applications. Nat Energy 2021;6(3):268–76.
[29] Young IR, Ribal A. Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height. Science 2019;364(6440):548–52.
[30] Amouzadrad P, Mohapatra SC, Guedes SC. Review of recent developments on the hydroelastic response and gap resonance of multi-body floating structures. Ocean Eng 2024;313:119398.
[31] Tavakoli S, Khojasteh D, Haghani M, Hirdaris S. A review on the progress and research directions of ocean engineering. Ocean Eng 2023;272:113617.
[32] Jiang Z. Installation of offshore wind turbines: a technical review. Renew Sustain Energy Rev 2021;139:110576.
[33] Wu W, Zhao Y, Gou Y, Lyu B, Lu Q, Lu Z, et al. An overview of structural design, analysis and common monitoring technologies for floating platform and flexible cable and riser. China Ocean Eng 2022;36(4):511–31.
[34] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin III FS, Lambin EF, et al. A safe operating space for humanity. Nature 2009;461(7263):472–5.
[35] DNV GL. Digital twin report for DMA-digital twins for blue Denmark. Report. Oslo: DNV GL; 2018.
[36] Majidi Nezhad M, Neshat M, Sylaios G, Astiaso Garcia D. Marine energy digitalization digital twins approaches. Renew Sustain Energy Rev 2024;191:114065.
[37] Eeltink D, Branger H, Luneau C, He Y, Chabchoub A, Kasparian J, et al. Nonlinear wave evolution with data-driven breaking. Nat Commun 2022;13(1):2343.
[38] Xia J, Zou G. Operation and maintenance optimization of offshore wind farms based on digital twin: a review. Ocean Eng 2023;268:113322.
[39] Karniadakis GE, Kevrekidis IG, Lu L, Perdikaris P, Wang S, Yang L. Physics-informed machine learning. Nat Rev Phys 2021;3(6):422–40.
[40] Cao Q, Goswami S, Tripura T, Chakraborty S, Karniadakis GE. Deep neural operators can predict the real-time response of floating offshore structures under irregular waves. Comput Struc 2024;291:107228.
[41] Buster G, Benton BN, Glaws A, ing RNK. High-resolution meteorology with climate change impacts from global climate model data using generative machine learning. Nat Energy 2024;9(7):894–906.
[42] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Implementation of the United Nations decade of ocean science for sustainable development (2021–2030). Report. Paris: UNESCO; 2021.