

深海采矿与碳封存协同发展的新型作业模式及技术探讨

陈旭光^{1,2*}, 张弦¹, 马宁¹, 刘茜茜¹, 解安琪¹, 张凤鹏¹, 吕瑞¹

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266000; 2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东青岛 266100)

摘要: 海洋蕴藏着丰富的固体矿物, 也是世界上最大的碳汇体且碳封存潜力巨大, 探索深海采矿与碳封存协同发展, 对助力我国深海采矿绿色低碳转型、提升在海洋开发与治理领域的话语权具有重要意义。本文总结了深海采矿作业模式的发展现状及趋势, 以深海矿产资源高效、绿色、低碳开发为切入点, 提出了深海采矿与海洋碳封存协同作业技术, 将深海采矿单一作业体系拓展至产业双向协同开发模式, 从可行性、协同性、经济性3个维度剖析了这一新型作业模式在实施与推广方面的竞争力, 并从深海采矿与碳封存体系的高效集成、环境影响监测、碳足迹追溯、协同作业装备等方面提出了突破方向和技术发展路径。研究发现, 深海矿区环境中的CO₂射流表现出不亚于水射流的采集性能、具有较好的环境友好性且碳封存泄露风险较低。深海采矿与海洋碳封存在作业装备、作业空间上具有高度的互补性, 作业周期上也互不干扰; 产业协同开发模式不仅可以改善海洋碳封存的盈利情况, 还可以提升采矿的整体利润。为推动深海采矿与碳封存产业协同发展, 研究建议, 加快深海核心技术与装备攻关, 形成完整的产业链条和产业集群, 加强复合型人才队伍建设。

关键词: “双碳”战略; 深海采矿; 海洋碳封存; 技术协同; 技术发展路径

中图分类号: P751 **文献标识码:** A

Exploration of New Operational Models and Technologies for the Synergistic Development of Deep-Sea Mining and Carbon Sequestration

Chen Xuguang^{1,2*}, Zhang Xian¹, Ma Ning¹, Liu Xixi¹, Xie Anqi¹, Zhang Fengpeng¹, Lyu Rui¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, Shandong, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: The ocean harbors abundant solid minerals and is the world's largest carbon sink with vast carbon sequestration potentials. Exploring the synergistic development of deep-sea mining and carbon sequestration is of significant importance for supporting China's green and low-carbon transformation in deep-sea mining, as well as enhancing its influence in the field of ocean development and governance. This study summarizes the development status and trends of deep-sea mining operational models, focusing on the efficient, green, and low-carbon development of deep-sea mineral resources. It proposes synergistic operations that integrate deep-sea mining with marine carbon sequestration, creating a dual-industry collaborative development model. From the perspectives of

收稿日期: 2024-12-24; **修回日期:** 2025-01-16

通讯作者: *陈旭光, 中国海洋大学工程学院教授, 研究方向为海洋工程; E-mail: chenxuguang1984ouc@163.com

资助项目: 国家自然科学基金项目(52225107, U1906234); 中国工程院咨询项目“水下工程技术装备与产业链发展战略研究”(2023-XZ-32); 国家重点研发计划项目(2021YFC2801503)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

feasibility, synergy, and economic viability, the competitiveness of a “deep-sea mining + carbon sequestration” model is analyzed. Breakthrough directions and technology development pathways are proposed, including efficient integration of deep-sea mining and carbon sequestration systems, environmental impact monitoring, carbon footprint tracing, and collaborative operation equipment. Research findings indicate that CO₂ jets in deep-sea mining environments exhibit a collection performance comparable to water jets, along with better environmental friendliness and lower risks of carbon sequestration leakage. Deep-sea mining and marine carbon sequestration show high complementarity in terms of operational equipment and space, with no interference in their operational cycles. This industrial collaborative development model can improve the profitability of both marine carbon sequestration and deep-sea mining. To promote the synergistic development of these two industries, it is essential to accelerate breakthroughs in core deep-sea technologies and equipment, establish a complete industrial chain and clusters, and foster the comprehensive development of compound talent teams, technical equipment, and economic benefits in deep-sea mining and marine carbon sequestration.

Keywords: carbon peaking and carbon neutrality; deep-sea mining; marine carbon sequestration; technical synergy; technology development pathway

一、前言

深海蕴藏着丰富的多金属结核、多金属硫化物、富钴结壳等固体矿物，其中，多金属结核的资源量达数百亿吨，折合铜、镍、钴金属量超过 2×10^9 t，可供规模化开采多年^[1]。铜、钴、镍等金属资源是光伏、风电、电动汽车等新能源产业发展不可或缺的关键原材料^[2]，是推动产业转型升级的战略物质基础。开发深海矿产资源对保障我国高质量发展具有深远的战略意义^[3]。

深海多金属结核赋存于稀软底质中，受扰动后极易形成羽状流，这是深海矿产资源开发面临的主要环境制约因素。同时，大量沉积物跟随结核被提取到海面船舶，处理后形成矿物泥并被排放回海洋。目前，深海采矿在环境监测、环境治理修复方面仍面临诸多挑战，尽管国际海底管理局（International Seabed Authority, ISA）一直在努力推进深海采矿的可持续发展，并积极完善环境保护的措施，但其潜在的环境风险依然是国际社会和环保组织关注的重点。深海采矿工程存在难以估测的潜在环境危害^[4]，解决资源开发与环境保护之间的矛盾，迫切需要构建兼顾经济效益和环保效益的技术路径，促进深海资源开发的可持续发展。

海洋是世界上最大的碳汇体，海洋碳库的碳储量约为 3.9×10^{13} t，是陆地碳库储量的20倍、大气碳库储量的50倍^[5]。深海空间利用及碳汇功能是推动可持续发展、分享全球海洋利益的重要领域。一方面，现阶段我国碳捕集、利用与封存（CCUS）项目的部分装备已基本成熟，并进行了小规模的海上应用^[6]，但深海CCUS装备尚不成熟，仍需研发海洋碳封存水面、水下及输送装备。另一方面，随着海洋工程逐渐由近海走向深海，我国深海采矿已拥

有初具规模的水面及水下开发装备，正在攻克水下输送装备，是最具潜力与海洋碳封存相结合的产业，也是推动我国海洋碳封存产业发展的新路径。因此，可以考虑利用CO₂进行深海矿产资源开采与海洋碳封存装备共用，即利用CO₂的深海低黏度、高冲击力特性来实现深海矿产资源的高效率和低能耗开采，利用CO₂的低表面张力、减少羽流颗粒扩散、水合物成核特性来实现深海环境低扰动，并依托深海6000米级采矿装备实现深海碳封存，构建一种深海采矿与碳封存协同作业的新模式。在新模式基础上，结合碳交易机制，有助于增加经济效益，降低深海采矿经济成本，带动相关产业发展，推动深海采矿与碳封存技术的双向发展，实现深海矿产资源的高效、低碳、经济开发，增强我国海洋战略资源开发及经济回报与可持续发展能力。

本文从国内外深海采矿作业模式发展现状及趋势出发，分析深海采矿协同碳封存技术应用的多维属性，涵盖技术协同性、可行性、经济性等方面，进一步指出深海采矿协同碳封存新型作业模式的技术实现路径，提出推进深海采矿与碳封存产业协同发展的建议，助力我国深海采矿的绿色低碳转型，以期形成解决深海采矿环境问题的“中国方案”，积极回应国际关切，提升我国在海洋开发与治理领域的话语权。

二、深海采矿作业模式发展现状及趋势

（一）深海采矿作业模式与技术发展现状

20世纪60年代，国际上开始探索深海采矿的作业模式，并于20世纪70年代开始较大规模的技术研究和工程探索，先后提出了4类采矿作业系统：拖斗采矿系统、连续索斗采矿系统、往返潜水采运车

系统、集矿机-流体提升采矿系统。目前，集矿机-管道提升采矿模式是国际上深海采矿主流的技术方向^[7]，主要装备由深海采矿船、海底采矿车、混流举升泵组成。集矿系统的核心是海底采矿车；集矿机构工作原理分为机械式、水力式、复合式3类，因机械式集矿机构的结构较为复杂，现已淘汰^[8,9]。

世界主要国家均围绕深海矿产资源开发和利用，加大资源投入、加速研发进程，力争早日实现商业化开采。加拿大、欧洲、日本、美国等国家和地区已在深海矿产资源勘探、开发装备及商业开采技术方案等方面取得阶段性成果，具有深海采矿技术输出、采矿技术标准及规则制定的能力^[10]。其中，加拿大梅塔斯（TMC）公司在深海采矿技术成熟度方面已经进入工业应用阶段，即将开始商业化应用^[11]（见表1）。我国是少数具备超大水深探测能力的国家之一，现已基本确定了“海底履带自行水力集矿机采集-水力管道矿浆泵提升-海面采矿船支持”的深海采矿技术方案^[12]，已在国际海域开展了80多个航次的资源和环境调查，基本完成了常规技术装备的体系化建设，完成了深海采矿技术与装备的实验室验证、湖试、浅海试验、千米级海试验证及相关采矿环境影响评价等工作，并利用勘探过程中获得的深海矿产资源完成了吨级规模的选冶试验^[13,14]。

（二）深海矿产资源开发的绿色发展方向

开展深海矿产资源开发与利用普遍面临着经济性和环境保护的双重制约。无论是国际还是国内的深海采矿示范项目，现有采矿模式在满足资源需求的同时，常伴随难以估量的海底生态环境扰动，难以适应绿色发展和碳中和目标的要求。从环境保护的角度来看，深海采矿势必要摆脱当下较为粗犷的开发模式，而这将会大幅削减深海采矿的经济利

益。因此，在矿产资源开发的同时兼顾经济效益和环境效益，是目前深海采矿的重点发展方向。

实现深海矿产资源开发的绿色和可持续发展，需要从提高采集效率、降低环境影响、实现低碳排放3个方面协同推进。在提升采集效率方面，降低射流能量损耗、减少作业时间是关键。国内外采用水力射流方法进行深海矿产开采时，大多依赖提高射流速度来提高采集率，但开采效率无法满足商业化开发要求，且属于高能耗、高扰动介质，与环境保护的目标不符^[15-17]。以往研究发现，流体介质的流体密度、黏度等固有特性是影响海床侵蚀、结核运动的关键因素。若能改变射流流体性质，有望实现多金属结核的高效、绿色采集。在射流切割领域、非常规油气开发中，已将CO₂用于提高射流切割效率和采油率^[18]，这为液态CO₂射流技术在深海多金属结核开采领域的应用提供了参考。

在降低环境影响、实现低碳排放方面，可以结合现有的CCUS技术，将陆地捕集的CO₂通过船舶运输至深海采矿平台，接着将CO₂输送至海底矿车并排放，以此实现大规模碳封存。此外，还可以利用液态CO₂替代传统水射流进行深海矿产开采，将大量CO₂封存至海底。液态CO₂较低的表面张力会降低对沉积物颗粒的裹挟能力，减小因采矿造成的羽流灾害；利用水合物的成核特性实现深海环境治理，将污染性海底作业转变为“自清洁式”海底作业模式，实现资源开发与环境保护的“双赢”（见图1）。国外提出过类似概念，将海底咸水层封存和采油项目联合实施，CO₂作为驱油流体来提高产油量和产油效率，同时注入到枯竭油田以实现碳封存^[19,20]。这种方式在一定程度上可以降低成本，但海底油田封存能力有限，要实现长时间碳封存则需要寻找特殊的地质结构。目前，挪威、美国、澳大利亚等国家已有多个示范项目正在运行，如挪威

表1 近年来国内外深海矿产资源开发技术利用现状

时间/年	企业 / 机构名称	技术成熟度	采集速率/ (t·h ⁻¹)	环境保护措施
2018	长沙矿冶研究院有限责任公司	基础研究	10	—
2021	比利时全球海洋矿产资源公司	基础研究、技术开发	120	环境监测
2021	中国大洋矿产资源研究开发协会	基础研究、技术开发、技术示范	30	环境评价
2022	加拿大TMC公司	基础研究、技术开发、技术示范、工业应用	86.4	环境监测、环境评价
2022	北京先驱高技术开发有限责任公司	基础研究、技术开发	20	环境监测

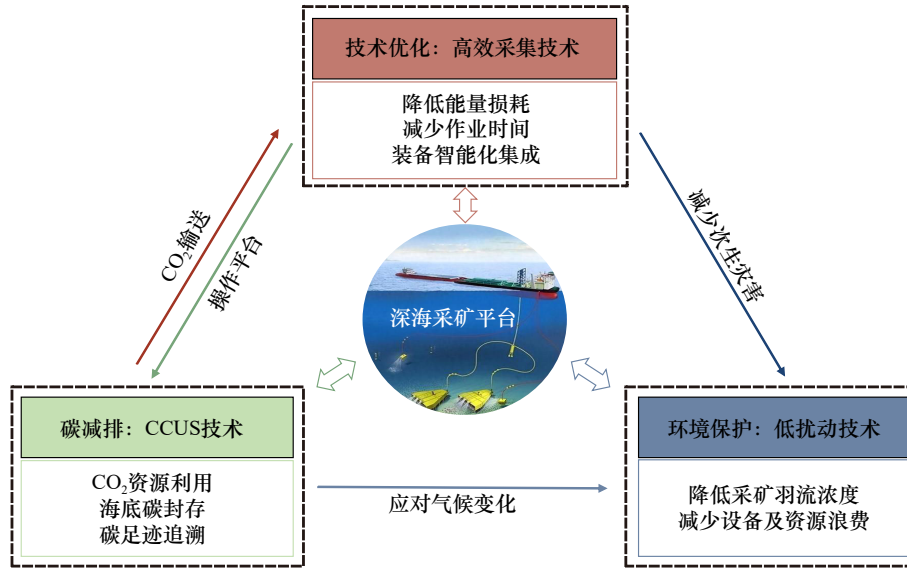


图1 多技术融合促进深海采矿可持续发展

sleipner项目的碳封存量可达 1×10^6 t/a^[21,22]。恩平15-1油田碳封存工程是我国目前唯一的海底油田碳封存试点项目，碳封存能力为 1.5×10^4 t/a^[23,24]，与国外先进水平存在较大差距。

总体来看，深海矿产资源开发的可持续发展需要技术创新、环境保护与资源利用的深度融合。通过提高采集效率、减少资源浪费、降低环境扰动、维持生态平衡、结合CCUS技术实现作业过程低碳转型，推动深海矿产资源开发走向绿色、可持续方向发展，为全球碳中和目标的实现做出积极贡献，也为资源开发行业提供新型发展范式。

三、深海采矿与碳封存协同作业的新模式

气候变化和全球变暖问题日益严峻，碳排放量的增加对全球气候系统造成了严重影响。碳封存技术尤其是海洋碳封存技术，被认为是应对气候变化的潜在解决方案之一。海洋提供了巨大的碳封存空间，能够长期储存 CO_2 ，减少其对大气的影。海洋碳封存需要将 CO_2 封存至3000 m以下的海底，避开洋底边界层的流动和板块运动，以减小底部摩擦和湍流对 CO_2 的溶解速率、垂直运移速度的影响^[25]。北太平洋与南太平洋中心区的洋流流速相对较低，通常在0.9~1.9 km/h，受副热带高压控制，海洋环流主要表现为缓慢、稳定的流动，可以为海洋碳封存提供了有利的条件^[26,27]。

实际上，大多数深海矿产资源位于平均水深超过3000 m的区域，且洋底边界层流动较为平稳，如位于北太平洋中心的克拉里昂-克利帕顿断裂带。深海矿石资源开采完成后释放出的空间，可以为海底碳封存提供广阔的区域；矿区独特的温压条件，有利于 CO_2 转化为水合物，形成稳定的封存形式；平稳的洋底流动有助于减少碳泄漏风险，从而显著提高碳封存的安全性与持久性。目前，国内外尚未提出将深海采矿和海洋碳封存项目相结合，利用深海海底高压、低温环境，在海底矿产资源高效开采的同时，完成 CO_2 原位封存，并提高各自经济性和环保性的方案。因此，本研究以深海矿产资源开发为切入点，首次提出深海采矿与碳封存一体化作业模式。区别于传统的单一采矿或独立碳封存方式，该模式将捕集的 CO_2 运输至采矿母船，并使用 CO_2 输送管道输送至海底采矿车；借由矿车外接的 CO_2 排放管或直接使用 CO_2 射流替代传统水射流开采矿石，在采矿作业过程中同步将 CO_2 封存至海底。深海采矿与碳封存一体化作业模式将单一作业方式拓展至产业双向开发模式，构建一种高效、经济、低碳的深海资源开发技术体系，可以实现 CO_2 资源高效利用和深海作业的协同增益（见图2）；还可以通过碳指标收购及出售，提高协同作业体系的经济效益。

（一）技术可行性

水力射流式开采装备是目前深海采矿系统的关

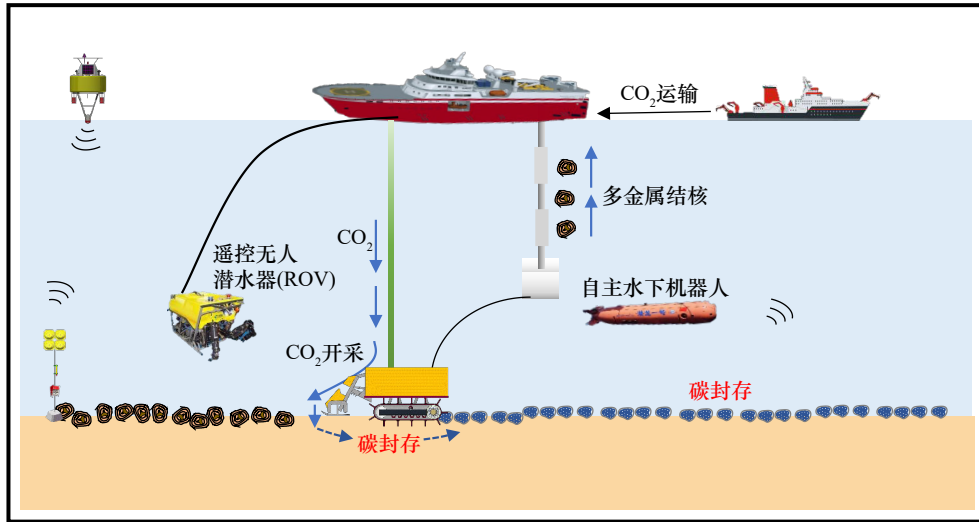


图2 深海采矿+碳封存技术的工作模式

键组成部分。开发CO₂射流技术进行矿产资源开采，首先要考虑CO₂在深海环境中的物理化学特性。在高压、低温的深海环境下，CO₂会以液态形式存在，与水相比具有密度大、流动性好等优点^[28]，甚至在一定条件下可以形成水合物。这使CO₂成为一种理想的工具，可经过射流系统在海底参与多金属结核的采集，增强结核的收集效率。如图3所示，在40~60 MPa的深海矿区环境中，CO₂呈现为液态，密度明显高于当地海水，这种差距随着压强升高而进一步扩大，使CO₂射流具有更高的射流能量。与此同时，液态CO₂的流动黏度远低于海水，约为海水的1/10，这意味着液态CO₂射流摩擦导致的能量耗散更低。CO₂可以形成更高能量、更低损耗的射流，进而实现深海多金属结核的高效采集。此外，深海沉积物颗粒电负性较强，与海水

结合形成强结合水层，在水与CO₂两种流体中更倾向于在水介质中分散。射流冲刷使沉积物颗粒在海水中悬浮形成羽流，低黏度的CO₂诱发流场强度更低，羽流扩散能量更小^[29,30]，可以在一定程度上减小对环境的影响。此外，液态CO₂在矿区环境中与水接触会快速生成致密水合物膜，阻碍了CO₂向海水中的溶解扩散，很大程度上降低了CO₂泄露风险及海水酸化风险。

在深海矿区环境中，液态CO₂及其水合物的密度高于当地海水，会在重力作用下自发下沉至海底，在采集过后的矿区进行碳封存。由于CO₂与水反应生成水合物的时间大于2 s^[31]，而根据目前采矿车的行进速度来看^[32]，固定位置的单个结核射流采集时间一般不超过1 s，所以水合物的生成不影响结核的采集。此外，CO₂水合物在低温环境下的稳定性为封存CO₂提供了可靠的技术路径。CO₂水合物能够在矿区环境中稳定赋存。如图4所示，根据水合物稳定的热力学条件，CO₂水合物在约400 m水深的海洋环境中生成并稳定赋存，水合物密度为1050.1~1199.8 kg/m³，不会从深水中上浮分解。在矿区4000~6000 m水深的高压环境中，海水温度不高于4℃，CO₂以水合物形态存储，化学稳定性较高，水合物基碳封存泄露风险较小^[33]。

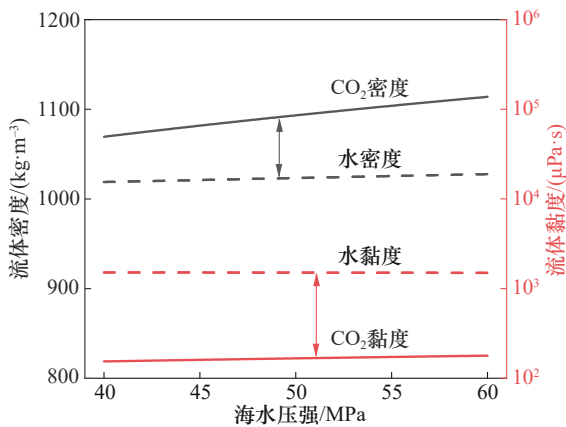


图3 水和CO₂两种射流流体的流体特性

(二) 技术经济性

以折现现金流量法构建深海多金属结核开发的经济分析模型，可以分为现金流入与流出两部分。

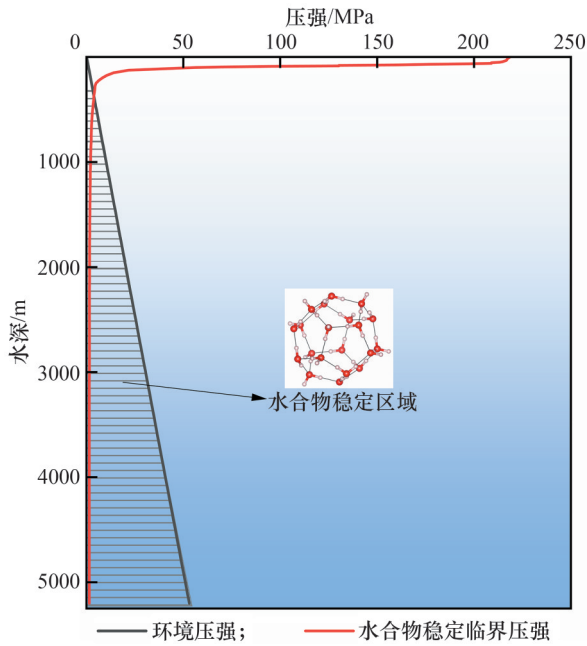


图4 CO₂水合物稳定性

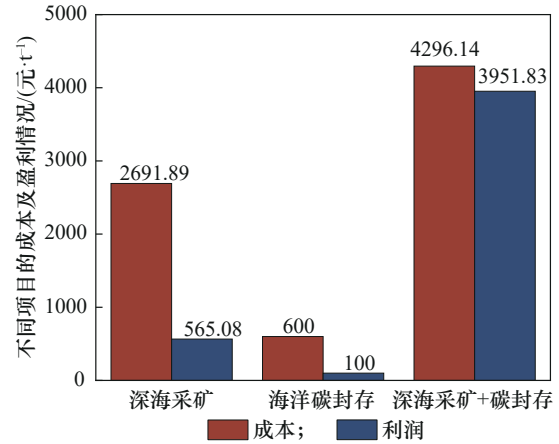


图5 不同类别项目的技术经济性

现金流入主要来自矿石的销售收入。多金属结核矿石的主要成分由镍、钴、铜、锰等组成，其销售收入取决于金属的品味、选冶回收率以及金属价格。按 2021 年的金属价格计算，每吨矿石的收益为 3256.97 元^[34]。现金流出包括预可行性研究、可行性研究、固定成本、运营成本等，其中固定成本和运营成本主要有矿石的采集、运输、冶炼 3 个方面的成本。以年产 3×10^6 t 矿石、投资周期为 30 年来估算，每吨矿石的成本在 2691.89 元。因此，现有深海采矿项目的利润约在 565.08 元/t，具备一定的投资价值（见图 5）。

目前，有关 CO₂ 封存项目的投资成本及相关效益的资料不完善。以转化单位 CO₂ 的利润为评价指标，其中海洋碳封存的成本来自于碳捕集成本、CO₂ 运输成本以及封存成本。根据 2023 年恩平 15-1 油田海上碳封存项目成本进行预估，总成本约为 600 元/t^[35]；海洋碳封存项目的收入来自于碳税抵扣和政府补贴，CO₂ 的交易价格在碳封存项目技术可

行性中起着关键作用。按 2023 年国际 700 元/t 的碳价计算^[36]，在无政府补贴的情况下，海洋碳封存项目的平均利润约为 100 元/t。

当前，单个采矿系统是实现商业化采集后，最高采集速率可达 150 t/h，泵送总流量为 1000 m³/h^[37]。如果使用液态 CO₂ 进行采集，则可以实现每采集 1 t 结核将 7.13 t CO₂ 封存至海底。2022 年，我国的 CO₂ 排放量为 1.16×10^{10} t，以当年碳捕集量为 4×10^6 t 计算^[21]，可支持约 5.6×10^5 t 矿石的开采。这些碳捕集量仅占年碳排放总量的 0.034%，可以看出深海矿产以及海洋碳封存技术的共同开发潜力巨大。

随着深海采矿与碳封存项目的推进，部分装备功能的重复性可削减额外的碳封存操作成本（见表 2）。如果可以通过技术整合节省碳封存项目中的运输成本和封存成本，则可以将碳封存项目成本缩减至碳捕集这一项。目前，我国的碳捕集成本约为 90~360 元/t^[37]，取平均值为 225 元/t。在深海采矿与碳封存项目分别进行的情况下，开采 1 t 深海多金属结核及封存 7.13 t 的 CO₂ 总成本为 6969.89 元，利润为 1278.08 元；而使用 7.13 t 液态 CO₂ 开采 1 t 矿石的成本仅为 4296.14 元，整体利润更是增长至 3951.83 元。随着 CO₂ 成交均价的持续升高以及集矿效率的增加，深海采矿与碳封存项目的利润有望进

表2 深海采矿与海洋碳封存技术的主要作业设备

项目类别	作业装备			
深海采矿	水面支持系统	移动采矿车	管道输送系统	矿石运输船
海洋碳封存	CO ₂ 排放船舶	移动 ROV	CO ₂ 排放管道	CO ₂ 补给船
设备共用性	共用	共用	可技术整合	可技术整合

一步增加。

(三) 工作模式协同性

深海采矿与海洋碳封存在工作模式上可实现有效协同（见图6）。深海采矿主要依赖海底移动的采矿车将矿石提取并完成初步处理，然后将矿石通过立管输送至水面的母船以完成采集。而海洋碳封存作业则是利用水面船舶携带CO₂至指定区域，通过管道输送至海底，在ROV等移动式装备的配合下，将CO₂进行均匀投放^[25]。两者的作业装备具有高度的重合性。如果水面母船能够同时支持深海采矿设备与CO₂注入系统的运行，然后通过同一管道或不同的输送通道进行矿产物料输送和CO₂注入，则可以实现深海采矿与海底碳封存的协同工作；同时，移动矿车也可以承担ROV等移动式装备的功能。

深海采矿作业通常集中在深海多金属结核资源丰富的海域，这些区域一般位于水深4000~6000 m；而海洋碳封存则通常选择深度大于3000 m的水域作为封存地点，将CO₂排放至负浮力区可显著增加封存效果^[38]。在深海采矿与海洋碳封存技术的作业空间中，二者的作业深度存在交叉，而且深海海床表层可作为两者共同作业的区域。这一重叠区域为两项技术提供互补空间和协同作业的机会，通过合理的空间协调和技术融合，可以实现优化布局和协同作业，减少资源浪费和环境冲击。

深海采矿主要在特定的矿区进行资源提取，作业时间一般较短，在某一固定区域通常集中作业数天到数月。与采矿作业不同，海洋碳封存是一个

长期、持续性的过程。在深海注入CO₂后，需要长时间确保CO₂的稳定性，通常需要数十年甚至更长时间的持续监测和评估。与此同时，深海采矿与海洋碳封存在同一区域内持续作业，不会导致区域的资源浪费。两者在作业周期、作业模式、长期影响方面互不干扰，通过合理的时间规划可以实现优势互补。

将采矿设备与碳封存系统集成到同一作业平台，不仅可以简化作业流程，避免了多个作业平台之间的重复建设，还可以使作业空间得到优化利用。同时，采矿作业和碳封存作业都需要大量的能源支持，但通过共享能源系统，可以降低能耗成本，有助于提高能源和资源的利用效率。深海采矿与海洋碳封存的协同作业还可以使资源调配系统能够实时根据不同作业的需求动态调整资源分配，提高协调性和效率；通过灵活的作业计划和调度，可以最大化设备的使用率，提高作业平台的生产力。

整体来看，深海采矿与碳封存技术的应用和推广，在可行性方面，关键是技术的成熟度、环境影响和政策支持；在协同性方面，设备集成、空间共享和作业时间协调可以提高作业效率；在经济性方面，通过成本控制、能源共享、碳交易等手段，在提高采矿的经济效益的同时，还能使碳封存技术实现盈利，推动可持续发展和绿色经济增长。

四、深海采矿与碳封存的技术发展方向

如图7所示，深海采矿与碳封存技术的发展路

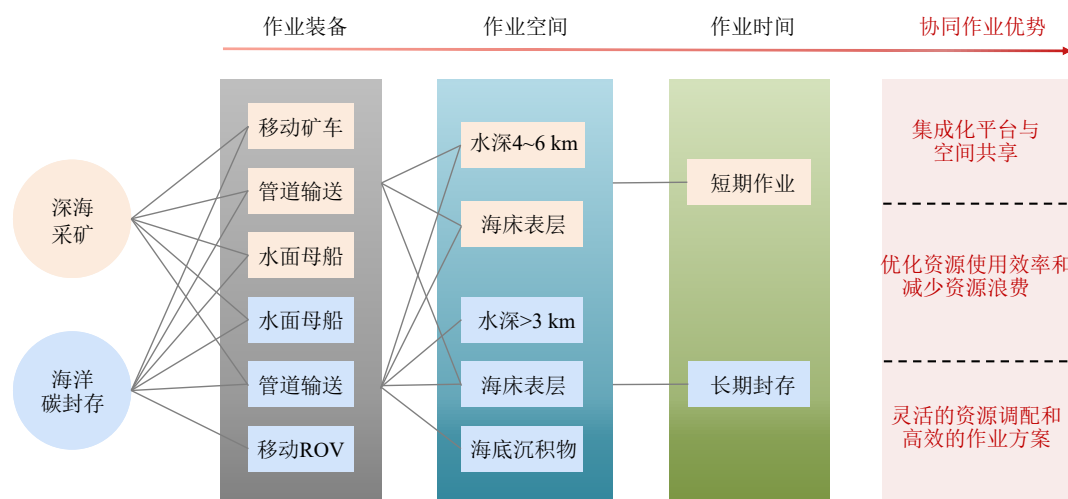


图6 深海采矿与碳封存的协同作业优势

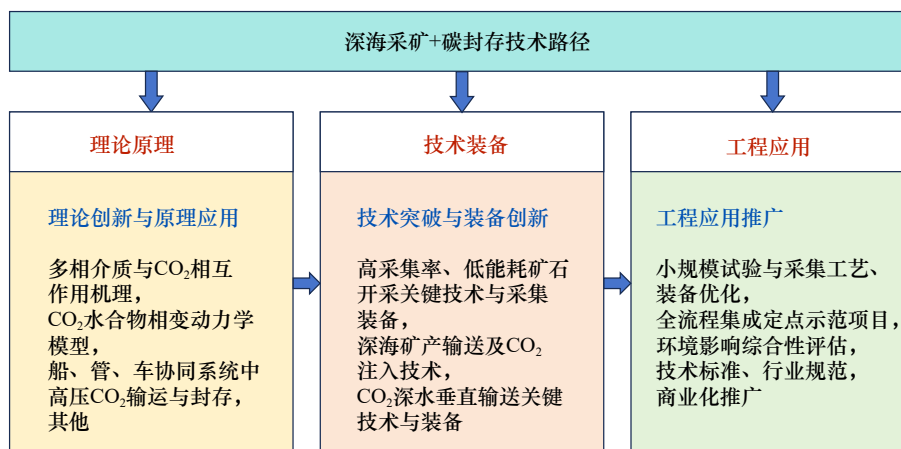


图7 深海采矿与碳封存的技术发展路径

径为：以理论研究为基础、装备开发为核心、工程应用为落脚点，重点研究资源分布规律和碳封存机制并形成系统集成、开发具备多功能的智能采矿装备与CO₂高效输送系统、强化实时环境监测与反馈功能、研发协同作业模式下的碳足迹追溯技术，实现小规模试验验证、示范项目建设和全流程集成，逐步实现技术优化与规模化推广，为实现绿色低碳的深海资源开发提供支撑。深海采矿与碳封存的技术发展方向具体如下。

（一）深海矿产开发协同碳封存技术体系的高效集成

加快集成化、高效化深海采矿系统研发，提升深海多金属结核采集效率和固碳能力，实现高采集率结核开采与长效碳封存协同作业。在深海多相介质与CO₂相互作用机理研究方面，综合环境因素完善模型，提出深海采矿协同碳封存的高效、低扰动作业理论方法；开展深海碳封存区环境扰动与地质稳定性评估，建立监测系统，并分析相关影响，提出应对策略与修复方案；针对船、管、车协同系统的高压CO₂运输与封存，形成深海采矿车搭载CO₂开采结核及CO₂依托深海采矿车输送排放封存（非开采阶段、共用采矿车）高效集成作业技术；开展多相介质碳封存的技术环境效益分析，提升深海碳封存技术的综合水平，保障其安全、高效、可持续发展。

（二）深海采矿与碳封存协同作业装备

针对深海采矿与碳封存协调作业采矿车，重点解决其高效、低扰动采矿作业与碳封存联动作业装

备协同问题，研发海底多功能作业智能采矿车，为海底水合物、硫化物进一步开发提供通用型装备。研发搭载深海采矿船的深海矿产输送及CO₂注入装备，突破深水CO₂垂直输送关键技术，建设高效稳定的输送系统。重点考虑CO₂对海底采矿车、驻留设备和管道等的腐蚀效应，优化耐腐蚀材料和装备结构设计，增强装备防护能力，延长其服役寿命。加强对水下装备的实时监测及韧性调控，及时发现漏损等问题，确保其稳定运行。升级深海采矿与CCUS装备体系共性部分，并在深海全链条装备体系中测试和优化装备性能，实现产业化，建立售后支持体系，从而全面提升深海碳封存与采矿协同的技术水平与应用能力。实现CO₂输送与采矿作业的同步进行，提升系统的整体作业效率与运行稳定性。通过技术示范和工程试点，探索输送技术的规模化应用路径，为深海碳封存与采矿行业协同发展提供可靠的技术支撑。

（三）深海采矿与碳封存系统的环境治理和影响监测技术

针对深海采矿环境污染，重点研究CO₂射流低扰动开采技术、水合物成核促进环境治理，针对性制定深海矿产开发方案，实现利用深海碳封存技术下的深海矿产开采环境治理技术。加强深海环境实时监测平台的研发，开发多维参数综合监测技术，实现对深海环境的全面感知。开展深海采矿与碳封存的环境影响分析，在立体监测技术方面，结合声学探测、化学传感与遥感技术，构建全方位的动态监测系统，通过优化网络、开发智能平台及国际合

作以不断提升监测水平；在环境影响模拟与预测方面，整合数据与模型构建平台，开展长期模拟并参与国际标准制定；开展作业区环境影响评估和阈值研究，不断完善技术体系、确定合理阈值并开展示范应用；对于地质环境灾害，建立监测预警体系、研究防控技术并推广培训；在环境治理技术与装备方面，积极推动技术及装备优化，开展产业化推广，同时建立评估体系以促进技术持续改进，整体推动深海碳封存与资源开发的科学、安全、可持续发展，不断提升国际竞争力。

（四）深海采矿与碳封存协同碳足迹追溯技术

围绕深海采矿与海洋碳封存协同碳足迹追溯技术，多维度推进研究与实践。开发深海碳足迹动态响应系统，建立基于实时监测数据的反馈机制，实现碳封存过程中的主动调节与优化。结合深海环境模型与封存过程模拟，预测可能的泄漏风险或异常情况，并通过动态响应系统快速启动应急预案。通过长期跟踪和评估，建立封存点的风险管理与维护机制，确保碳封存工程的长期安全性与生态友好性。在碳足迹方法学方面，应用核算体系，评估优化项目，完善方法学并推动国际认可；在深海碳封存方法学方面，总结优化形成体系与规范，开展示范应用及国际合作；在全链条协同理论方面，完善理论建立模型，通过案例验证并推广培训；在全链条技术体系方面，优化和提高集成与协同效率，开展工程示范，推动制定相关的标准规范。

（五）碳交易市场与盈利模型技术架构设计

深海采矿与碳封存的技术布局不仅包括生产技术的优化，还要围绕碳交易市场建立盈利模型，将碳交易与深海采矿的经济效益紧密结合。深海采矿技术与碳封存技术的结合需以“碳封存增值”作为核心目标，通过先进的数据建模与算法，计算深海采矿过程中碳封存量的经济价值，并根据封存的碳量在碳交易市场上进行交易；建立海洋碳汇信息管理体系，使深海采矿企业能够在碳排放成本上实现优化，降低生产成本，最终提高利润。在此基础上，开发出多模式碳交易机制，让深海采矿企业能够在全球范围内的碳市场中出售其产生的碳汇，进一步提升企业利润。

五、推进深海采矿与碳封存产业协同发展的建议

（一）整合传统产业技术，实现海洋装备配套供给

紧密围绕深海矿产资源特性、碳封存要求以及复杂海域状况，以核心技术创新为引擎、企业升级及可迁移技术为基础，多渠道扩充传统制造业力量，促进深海技术链的搭建与完善，塑造新形势下我国在深海矿产资源开发领域的独特优势。凭借国家科技专项的引领作用，提升技术装备自主创新水平，着重关注传统石油领域CCUS装备、大型船舶水面支持船、水下输送技术向深海采矿与深海碳封存领域的技术迁移与升级，打造国内深海装备产业链闭环，强化国产装备在深海矿产开发与碳封存体系中的关键支撑效能。

（二）加强跨学科研究，推动“产学研”合作

深海采矿与碳封存技术涉及多个学科，如海洋工程、环境科学、化学工程等，推动跨学科的深海采矿与碳封存研究团队建设，促进跨学科的合作，培养一批兼具深海采矿以及碳封存技术的高素质人才，为技术发展带来新的突破和解决方案。加强科研院所、高校和企业的合作，设立专门的技术孵化器和加速器，支持新兴创新型企业或初创企业的发展，推动技术的快速转化和应用。通过联合研发、成果共享和人才培养，推动关键技术的进步，解决深海采矿与碳封存中的技术难题。

（三）积极推动示范工程与试点项目建设

示范工程和试点项目是推动深海采矿与碳封存技术协同发展的关键步骤，通过这些项目可以验证技术的有效性，积累实践经验，并为后续的大规模应用提供技术支持和优化方向。明确示范工程的规模，在可控的范围内进行试验，根据试点项目获得的数据反馈，优化采矿和碳封存实际操作参数，改进操作流程并提升整体效率，然后根据试验结果逐步扩大规模。在完成试点项目后，总结经验教训，形成详细的报告，提供对未来大规模应用的建议，并为政策制定者、行业从业者提供技术参考和数据支持。

(四) 聚焦产业化发展, 拓展市场化路径

发展完整的深海采矿与碳封存产业链, 包括设备制造、技术服务、环保监测、运输储存等环节, 通过不断完善产业链, 降低成本, 提升整体技术的经济性和可持续性。鼓励企业开展技术商业化, 探索经济效益和社会效益的平衡。通过资本市场的支持吸引更多投资, 缓解技术开发的资金压力, 加速技术的产业化进程。制定相应的行业标准和技术规范, 推动深海采矿与碳封存设备的标准化、模块化生产, 提升设备的可重复性和可靠性, 降低生产成本, 提高市场竞争力。

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: December 24, 2024; **Revised date:** January 16, 2025

Corresponding author: Chen Xuguang is a professor from the College of Engineering, Ocean University of China. His major research field is ocean engineering. E-mail: chenxuguang1984ouc@163.com

Funding project: National Natural Science Fund Project (52225107, U1906234); Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of Underwater Engineering Technology Equipment and Industry Chain” (2023-XZ-32); National Key R&D Program of China (2021YFC2801503)

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王国荣, 黄泽奇, 周守为, 等. 我国海洋退役油气平台低碳化改建方案构想 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 245–258.
Wang G R, Huang Z Q, Zhou S W, et al. Proposal for low-carbon transformation of decommissioned offshore oil and gas platforms in China [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 245–258.
- [3] 陈旭光, 寇海磊, 牛小东, 等. 深海水下技术装备发展研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 1–14.
Chen X G, Kou H L, Niu X D, et al. Development of deep-sea underwater technology and equipment [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(2): 1–14.
- [4] 康娅娟, 刘少军. 深海采矿技术与装备研究进展及系统方案综述 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 325–337.
Kang Y J, Liu S J. Review on the technology and equipment progress and the system scheme of deep-sea mining [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20): 325–337.
- [5] 董敬明, 刘子飞, 陈丽梅. 我国海洋碳汇交易政策、实践及展望 [J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(3): 519–527.
Dong J M, Liu Z F, Chen L M. Trading policy, practice and prospect on marine carbon sequestration in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(3): 519–527.
- [6] 王科, 黄杰, 陈召, 等. 海上 CCS/CCUS 技术进展与分析 [J]. 石油化工应用, 2024, 43(10): 4–8.
Wang K, Huang J, Chen Z, et al. Progress and analysis of offshore CCS/CCUS technology [J]. Petrochemical Industry Application, 2024, 43(10): 4–8.
- [7] 国际深海矿产资源的开发技术装备发展概况 [J]. 金属材料与冶金工程, 2015, 43(4): 58–60.
General situation of international deep-sea mineral resources development technology and equipment development [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2015, 43(4): 58–60.
- [8] 田先德, 杨锦坤, 韩春花, 等. 国际海域矿产资源勘探与开采技术现状与展望 [J]. 海洋信息, 2021, 36(2): 28–32.
Tian X D, Yang J K, Han C H, et al. The progress and prospects of deep-sea mineral resources exploration and exploitation [J]. Marine Information, 2021, 36(2): 28–32.
- [9] 杨高胜, 陈丹东, 李文豪, 等. 基于管道水力提升式采矿系统的深海采矿船总体设计研究 [J]. 船舶工程, 2019, 41(1): 23–27, 33.
Yang G S, Chen D D, Li W H, et al. Study on the overall design of deep-sea mining vessel based on pipeline hydraulic lifting mining system [J]. Ship Engineering, 2019, 41(1): 23–27, 33.
- [10] Cheng Y R, Dai Y, Zhang Y Y, et al. Status and prospects of the development of deep-sea polymetallic nodule-collecting technology [J]. Sustainability, 2023, 15(5): 4572.
- [11] 中国可持续发展研究会海洋资源开发技术与装备专业委员会, 长沙矿冶研究院. 面向 2035 年的中国深海矿产资源开发及利用技术发展路线图 [M]. 北京: 中国可持续发展研究会海洋资源开发技术与装备专业委员会, 长沙矿冶研究院, 2024.
Ocean Resources Development Technology and Equipment Professional Committee of Chinese Society for Sustainable Development, China Research Institution of Mining and Metallurgy Co., Ltd. Roadmap for the development and utilization technology of deep-sea mineral resources in China [M]. Beijing: Ocean Resources Development Technology and Equipment Professional Committee of Chinese Society for Sustainable Development, China Research Institution of Mining and Metallurgy Co., Ltd., 2024.
- [12] 邹丽, 孙佳昭, 孙哲, 等. 我国深海矿产资源开发核心技术研究现状与展望 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(5): 708–716.
Zou L, Sun J Z, Sun Z, et al. Deep-sea mining core technology in China: Current situation and prospects [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(5): 708–716.
- [13] 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.
- [14] 金永平, 董向阳, 万步炎, 等. 深海金属采矿装备与技术发展现状与分析 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3316–3334.
Jin Y P, Dong X Y, Wan B Y, et al. Research status and analysis of deep-sea metal mining equipment and technologies [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3316–3334.
- [15] Huijbregts M A J, Steinmann Z J N, Elshout P M F, et al. ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method

- at midpoint and endpoint level [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22(2): 138–147.
- [16] Heinrich L, Koschinsky A, Markus T, et al. Quantifying the fuel consumption, greenhouse gas emissions and air pollution of a potential commercial manganese nodule mining operation [J]. *Marine Policy*, 2020, 114: 103678.
- [17] Ramboll I M S. Analysis of the economic benefits of developing commercial deep sea mining operations in regions where Germany has exploration licences of the international seabed authority, as well as compilation and evaluation of implementation options with a focus on the performance of a pilot mining test [R]. Hamburg: Hamburg Institute of International Economics, 2016.
- [18] 何林漪, 付旭辉, 罗媛媛, 等. 液态 CO₂ 射流与水射流相变特征对比分析 [R]. 重庆: 第三十三届全国水动力学研讨会, 2022.
He L Y, Fu S H, Luo Y Y, et al. Comparative analysis of phase change characteristics of liquid CO₂ jet and water jet [R]. Chongqing: The 33rd National Symposium on Hydrodynamics, 2022.
- [19] 周守为, 李清平, 朱军龙, 等. CO₂ 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 CO₂ marine storage and exploration of new paths [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(4): 1–10, 199.
- [20] Luo J S, Xie Y C, Hou M Z, et al. Advances in subsea carbon dioxide utilization and storage [J]. *Energy Reviews*, 2023, 2(1): 100016.
- [21] Furre A K, Eiken O, Alnes H, et al. 20 years of monitoring CO₂-injection at Sleipner [J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 3916–3926.
- [22] Baklid A, Korbol R, Owren G. Sleipner vest CO₂ disposal, CO₂ injection into a shallow underground aquifer [R]. Denver: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1996.
- [23] Xinhua. China's first million-ton offshore carbon capture and storage project goes into operation [EB/OL]. (2023-06-01)[2024-07-01]. https://english.www.gov.cn/news/202306/01/content_WS647822e3c6d0868f4e8dc8d6.html.
- [24] Hua X. China focus: China achieves breakthrough as million-tonne offshore carbon storage project begins operations [EB/OL]. (2023-06-02)[2024-06-11]. <https://english.news.cn/20230602/b3abe474eb164449a1c4dbb2b4e3c576/c.html>.
- [25] 柳波, 高硕, 许振强, 等. 海洋直接注入 CO₂ 封存技术方法综述 [J]. *地质论评*, 2023, 69(4): 1449–1464.
Liu B, Gao S, Xu Z Q, et al. A review of CO₂ sequestration technology by direct injection in the ocean [J]. *Geological Review*, 2023, 69(4): 1449–1464.
- [26] Sval'nov V N, Alekseeva T N. Characteristics of the grain-size composition of deep-water oceanic sediments [J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2006, 41(3): 201–214.
- [27] Tabata S. The general circulation of the Pacific Ocean and a brief account of the oceanographic structure of the North Pacific Ocean part I—Circulation and volume transports [J]. *Atmosphere*, 1975, 13(4): 133–168.
- [28] 杨旅涵, 施泽明, 吴蒙, 等. 碳封存技术研究进展 [J]. *中国煤炭地质*, 2023, 35(6): 44–50.
Yang L H, Shi Z M, Wu M, et al. Research progress of carbon sequestration [J]. *Coal Geology of China*, 2023, 35(6): 44–50.
- [29] Nasr-Azadani M M, Meiburg E. Turbidity currents interacting with three-dimensional seafloor topography [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 745: 409–443.
- [30] Wang H Z, Li G S, Tian S C, et al. Flow field simulation of supercritical carbon dioxide jet: Comparison and sensitivity analysis [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2015, 27(2): 210–215.
- [31] Teng H, Yamasaki A, Shindo Y. Effect of hydrates on instability of liquid CO₂ jets in the deep ocean [J]. *Energy*, 1997, 22(2/3): 273–278.
- [32] Deepak C R, Ramji S, Ramesh N R, et al. Development and testing of underwater mining systems for long term operations using flexible riser concept [R]. Lisbon: the Seventh ISOPE Ocean Mining Symposium, 2007.
- [33] Gu Y H, Liu X J, Li Y, et al. Feasibility analysis of liquid CO₂ injection and sequestration as hydrates in South China Sea marine sediments over 100 years [J]. *Applied Energy*, 2025, 380: 125068.
- [34] 边琳尧. 深海矿产资源开发的技术经济分析——以南太平洋彭林海盆多金属结核开采为例 [D]. 厦门: 厦门大学(硕士学位论文), 2021.
Bian L Y. Techno-economic analysis on exploitation of deep-sea mineral resources—Taking the exploitation of polymetallic nodules in Peng Lin basin of south Pacific as an example [D]. Xiamen: Xiamen University (Master's thesis), 2021.
- [35] 何亮. 将二氧化碳“扣”在海底“巨碗”下 [N]. *科技日报*, 2023-07-03(08).
He L. Capture carbon dioxide under the underwater “giant bowl” [N]. *Science and Technology Daily*, 2023-07-03(08).
- [36] 费龙, 郑成荣, 金强, 等. 深海多金属结核开采装备技术发展综述 [J]. *船舶*, 2024, 35(6): 1–14.
Fei L, Zheng C R, Jin Q, et al. Overview of the development of equipment and technology for deep-sea polymetallic nodule mining [J]. *Ship & Boat*, 2024, 35(6): 1–14.
- [37] 河北省节能协会. 浅谈“双碳”背景下的二氧化碳捕集利用与封存 [EB/OL]. (2024-08-28)[2025-01-13]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzIzMDEzNjg1MQ==&mid=2247569664&idx=5&sn=0ee3d72740c36f01f3425a65174a4a7e&chksm=e8bb9c7cdfcc156a73d171de02b37436b03aa7e0a5518a134ec5b51f26efbaaf495e5a8d801c&scene=27.
Hebei Energy Conservation Association. A brief discussion on carbon dioxide capture, utilization, and storage under the background of “dual carbon” [EB/OL]. (2024-08-28)[2025-01-13]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzIzMDEzNjg1MQ==&mid=2247569664&idx=5&sn=0ee3d72740c36f01f3425a65174a4a7e&chksm=e8bb9c7cdfcc156a73d171de02b37436b03aa7e0a5518a134ec5b51f26efbaaf495e5a8d801c&scene=27.
- [38] 张海滨, 卢迪, 王永昌, 等. 二氧化碳海洋封存的技术和研究现状 [J]. *海洋科学*, 2024, 48(4): 108–121.
Zhang H B, Lu D, Wang Y C, et al. Technology and research progress with regard to CO₂ ocean storage [J]. *Marine Sciences*, 2024, 48(4): 108–121.