

# 深海绿色采矿技术与装备：研究进展和突破方向

刘莉红<sup>1,2</sup>, 罗祎<sup>3</sup>, 魏定邦<sup>1,2</sup>, 夏建新<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083; 2. 极地地质与海洋矿产教育部重点实验室, 北京 100083;  
3. 中国大洋事务管理局, 北京 100032)

**摘要:** 本文系统分析了深海绿色采矿面临的技术挑战并提出发展路径, 旨在构建面向商业化开发的技术体系, 为我国深海资源开发战略提供理论支撑。研究基于“探-采-输-冶”全流程技术指标与绿色范式, 从环境扰动控制、智能系统协同、能源结构优化与系统集成验证 4 个维度, 深入研判深海绿色采矿的关键突破方向与工程实现路径。研究提出了覆盖绿色、经济、可靠、智能、安全 5 类指标的全流程技术评价体系, 构建了基于资源效率、环境影响与能源结构的采矿绿色范式分级模型, 同时识别出深海采矿在技术集成、环境适应性、能源供应与监测评估方面存在的系统性挑战。在此基础上, 研究进一步明确了精细化采集、数字孪生系统、深海混合供能、模块化集成等未来重点突破方向。研究表明, 深海绿色采矿的实现亟需在绿色化、智能化与系统化三大方向协同推进, 通过陆试与中试验证平台加速技术集成和工程转化, 并加强国际标准协同与数据共享, 从而推动深海采矿从技术探索迈向绿色、安全、可持续的商业化开发新阶段。

**关键词:** 深海矿产资源开发; 多金属结核; 环境挑战; 全流程; 绿色范式

**中图分类号:** P744.3 **文献标识码:** A

## Deep-Sea Green Mining Technology and Equipment: Research Progress and Breakthrough Directions

Liu Lihong<sup>1,2</sup>, Luo Yi<sup>3</sup>, Wei Dingbang<sup>1,2</sup>, Xia Jianxin<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Polar Geology and Marine Mineral Resources, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. China Deep Ocean Affairs Administration, Beijing 100032, China)

**Abstract:** This study analyzes the technological challenges and development pathways of deep-sea green mining, aiming to construct a technology system oriented toward commercial development and provide theoretical support for China's deep-sea resource development strategy. Based on the whole-process technical indicators and green paradigm of “prospecting – mining – transportation – processing,” the study investigates key breakthrough directions and engineering paths for deep-sea green mining from four dimensions: environmental disturbance control, intelligent system coordination, energy structure optimization, and system integration verification. The research proposes a whole-process technical evaluation system covering five categories of indicators—green, economic, reliable, intelligent, and safe—and constructs a green mining paradigm classification model based on resource efficiency, environmental impact, and energy structure. It also identifies systematic challenges in technology integration, environmental adaptability, energy supply, and monitoring and evaluation for deep-sea mining. Furthermore, the study clarifies future key breakthrough directions such as precision collection, digital twin systems, deep-sea hybrid energy supply, and modular integration. The findings indicate that achieving deep-sea green

收稿日期: 2025-11-05; 修回日期: 2025-12-26

通讯作者: \*夏建新, 中国地质大学(北京)海洋学院教授, 研究方向为深海矿产资源开发; E-mail: jxxia@vip.sina.com

资助项目: 国家自然科学基金项目(52394252, U25A6020)

本刊网址: [sscae.engineering.org.cn](http://sscae.engineering.org.cn)

mining urgently requires coordinated advancement in three major directions: green, intelligent, and systematic development. This can be accelerated through land-based and pilot-scale testing platforms to promote technology integration and engineering transformation, alongside strengthened international standardization and data collaboration, thereby advancing deep-sea mining from technological exploration toward a new stage of green, safe, and sustainable commercial development.

**Keywords:** deep-sea mineral resource exploitation; polymetallic nodules; environmental challenges; whole-process; green paradigm

### 一、前言

深海蕴藏着丰富的矿产资源，尤其是富含钴、镍等关键金属的多金属结核。这些金属是新能源储能设备与大容量电池等工业产品不可或缺的原料，对推动社会经济绿色转型具有重要战略意义<sup>[1]</sup>。然而，我国钴、镍资源对外依存度高，资源安全供给形势严峻<sup>[2]</sup>。在此背景下，开发深海多金属结核资源，已成为缓解关键金属短缺、保障国家资源安全的迫切需求。我国通过积极参与国际海底区域资源勘探，已在国际海域拥有多块矿区，在勘探领域具备显著先发优势<sup>[3]</sup>。当前，将这一勘探优势有效转化为绿色开发能力，是实现“深海进入、深海探测、深海开发”战略目标的关键环节。

随着国际海底管理局（ISA）加快推进深海开发规章的制定，深海采矿的环境影响与绿色标准已成为国际规则博弈的焦点<sup>[4]</sup>，在此过程中贯彻绿色低碳理念，推动其与“双碳”目标相协调显得尤为重要<sup>[5,6]</sup>。国际学界在相关生态环境影响评估方面已取得重要进展。例如，由欧盟联合规划倡议资助、德国亥姆霍兹基尔海洋研究中心（GEOMAR）协调的“MiningImpact”项目，系统调查了未来深海采矿的潜在环境影响<sup>[7]</sup>。研究表明，采矿作业产生的沉积物羽流影响范围远超预期，重新沉积的沉积物层厚度可达约3 cm，能完全覆盖附近的结核栖息地<sup>[8]</sup>。这类定量化发现为准确评估采矿活动的生态足迹、定义可测量的环境基线及损害阈值提供了直接科学依据，对制定基于实证的环境保护标准至关重要。我国近期研制成功的全球首台套设计水深6000米级的深海采矿非金属非粘结智能柔性混输管，代表了装备绿色化、智能化的重要发展方向<sup>[9]</sup>。

然而，深海采矿在国际社会仍引发激烈争议。多国研究表明其可能造成长期生态损害，且目前对深海的科学认识尚不足以全面准确评估其风险与影响<sup>[10]</sup>。这凸显了在保障资源供给的同时实现环境友好开发的极端重要性，并使其成为当前技术路线与政策设计的核心问题。综上所述，尽管现有研究在

特定环境效应评估和单项技术装备上取得了进展，但对多种绿色采矿工艺与装备的系统性梳理与对比分析仍显不足，更缺乏一套能够衔接技术参数、环境影响与经济可行性的综合性绿色评价指标体系。这种不足导致在应对国际环境争议与参与未来规则制定时，常缺乏以坚实技术方案和量化标准为基础的精准策略。

为此，本文旨在系统梳理深海绿色采矿涉及的关键技术装备，并构建一个覆盖“探-采-输-治”全流程的绿色采矿指标体系，以期为我国绿色采矿技术的路径选择、深度参与并引领国际绿色标准制定，提供系统的理论框架与决策参考。

### 二、深海绿色采矿发展的新形势与新需求

#### （一）深海采矿技术迭代加速

国际上先后提出拖斗式、连续线斗式、自动穿梭艇式和管道提升式四类采矿系统<sup>[11,12]</sup>，其中管道提升式被认为是最有商业开采前景的采矿系统<sup>[12-14]</sup>，如图1所示，主要包括海底采矿车、水中管道提升和水面支撑平台<sup>[15]</sup>。深海采矿车包含水力式、机械式、水力-机械混合式等采集技术和履带式、滑行式、悬浮式等采矿车行走技术，管道提升装备涉及水力提升和气力提升方式，深海采矿船主要包括协同控制系统、定位导航系统、矿石输运以及布放回收系统等<sup>[16-20]</sup>。

针对多金属结核开采，早在20世纪七八十年代，海洋管理公司（OMI）等多个国际财团在太平洋约5000 m海底成功采集多金属结核<sup>[21]</sup>，随即德国、俄罗斯、日本、韩国、印度等海试均验证了管道提升式深海采矿系统的可行性<sup>[22,23]</sup>。近年来，欧盟通过“Blue Nodules”等项目推进多金属结核开采系统研发<sup>[15]</sup>，比利时全球海洋矿产资源公司（GSR）于2021年在太平洋完成全球首次商业化采矿系统海试，验证了集矿机-扬矿管-水面支撑平台的协同作业能力。2022年，加拿大金属公司（TMC）在东太平洋成功采上来3500 t结核，进一步验证了商业规

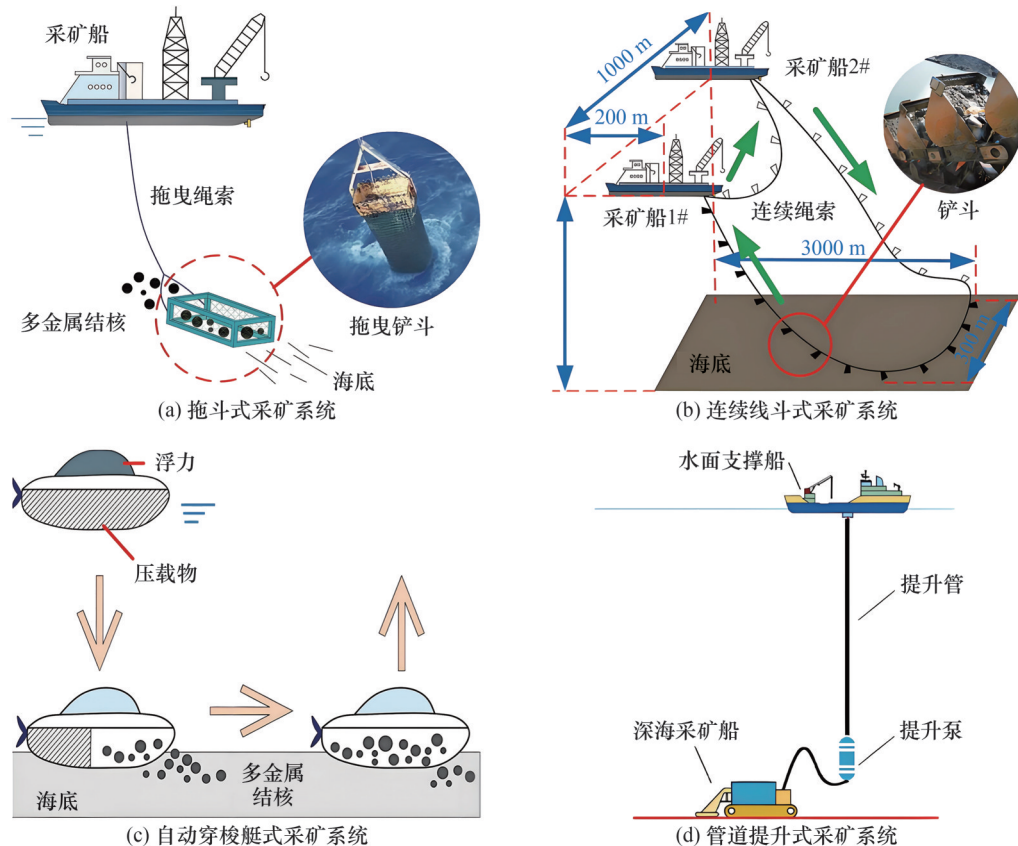


图1 现有的深海采矿系统

模开采技术的可行性。在多金属硫化物开采方面，2007年，加拿大鸚鵡螺矿业公司（NM）启动了全球首个商业勘探和开采计划；2012年，日本国家石油天然气和金属公司（JOGMEC）成功进行1/5商业规模采矿试验，并于2017年完成1600 m水深多金属硫化物的采集和提升海试<sup>[3,24]</sup>，标志着多金属硫化物开发技术又向前迈进一步。此外，面对富钴结壳开采，JOGMEC于2020年在日本专属经济区成功实施了世界首次富钴结壳采矿试验，测试了不同海底条件下采矿车的采矿效率和运行性能，并在试验海域开展环境监测，评估环境影响。

2021年，依托“十三五”国家重点研发计划“深海多金属结核采矿试验工程”项目，中国大洋矿产资源研究开发协会联合全国优势力量，在南海成功开展我国首次1300米级系统联动海试，取得了打通深海采矿系统流程的重大科技进展。2022年，由北京先驱高技术开发有限责任公司与上海交通大学联合国内多家单位研制的“曼塔号”，在西太平洋先驱多金属结核矿区圆满完成了海试任务，在国际上首次实现了基于浮游行进方式的多金属结核采

集。2024年，由上海交通大学自主研制的深海采矿车“开拓二号”成功完成4000米级海试，并获得了200 kg的深海矿产样品；同年，招商局集团有限公司研制的深海采矿车“深海探索1号”顺利在西太平洋矿区完成原位海试，取得大量深海多金属结核样品。

## （二）深海开发将面临更为严苛的环境标准

深海生态脆弱，环境基线尚未建立，环境保护要求严苛。随着2022年保护海洋的“3030”目标被各国公认，2023年《海洋生物多样性协定》通过，公海生物多样性保护受到了更多国际社会关注。在此背景下，越来越多的国家、社会组织和企业公开表达对开启深海采矿的担忧。截至2025年7月，共有37个国家呼吁暂停或反对深海采矿，环境议题成为深海采矿的核心问题<sup>[25]</sup>。ISA环境阈值标准研讨会于2024年6月27日—29日在牙买加召开线下会议，就采矿环境影响阈值专门成立了三个研究组，分别研究了采矿过程中噪声和光污染、重金属释放毒性、沉积物扰动后羽流浊度和再沉积厚度等指标

阈值，识别了用于指定阈值的合适指标，环境成为当前深海采矿国际标准规则制定争夺的焦点，采矿技术必须满足日益苛刻的环境保护要求，未来环境阈值指标很有可能颠覆现有采矿技术，亟需构建绿色的采矿模式。

### （三）面向商采的绿色示范工程势在必行

2001年的首批勘探合同即将到期，商业开采许可问题亟待解决<sup>[26]</sup>。ISA正加速推进深海开发规章制定，围绕草案条款已展开多轮磋商并发布两年期工作日程<sup>[27]</sup>。TMC已与ISA签订三份多金属结核勘探合同，其瑙鲁海洋资源公司矿区于2021年启动两年倒计时申请开发计划，并通过2023年现场施压推动规章进程。TMC在ISA推进开发规章不利的情况下，转向美国政府，2025年美国拟批准TMC和另外一家公司开展深海采矿。

在技术层面，TMC于2021年已完成3000 t结核试采，我国同年实现南海千米海试，但装备和技术水平仍有显著差距<sup>[25]</sup>。据研判，开发规章有望2027年前后出台，首批商采申请者或于2035年出现<sup>[28]</sup>。我国虽拥有最多的勘探合同区和最大的国际海底矿区面积，但如何将勘探优势转化为资源优势成为核心任务。为此，亟需通过跨国技术合作、强化装备研发、搭建深海开发平台，力争进入首批深海商业采矿行列，占据全球战略资源竞争主动。

## 三、深海绿色采矿关键技术与装备

### （一）深海绿色采矿工艺设计

深海绿色采矿工艺设计旨在开发高效、安全、环保的采矿工艺，最大限度降低采矿活动对海洋环境的影响，同时实现资源的可持续利用。目前，国内外发展了多种采矿模式，其中穿梭采运车式和采集车+管道式具有商业前景。通过管线采矿系统与单体穿梭采矿工艺的优化与创新，深海采矿可在减少生态扰动的同时提高作业效率，主要技术难点为超大深度、绿色指标以及高风险。管线采矿系统是深海采矿中常用的矿石输送方式，其工艺设计需要综合考虑输送效率、环境影响以及设备可靠性，如采矿管线结构优化、矿浆输送工艺优化、环境友好型输送材料、动态监控与智能控制系统；单体穿梭采矿工艺通过利用独立的穿梭设备在海底与水面平

台之间进行矿石转运，减少对海底环境的扰动并提高转运效率，如自主穿梭设备设计、多任务协同作业、低扰动推进系统。

### （二）深海采矿水面支撑平台设计

深海采矿水面支撑平台是连接海底采矿设备与地面基础设施的核心枢纽，其设计需兼顾长期作业稳定性、紧急状况应对能力、设备布放回收效率以及矿石转运能力，从而确保整个采矿系统的安全高效运行，技术难点主要包括大深度布放回收和极端海况紧急避险，如图2所示。

通过分析不同水面支撑平台的性能（见表1），发现要满足深海采矿的长期稳定运行需求，支撑平台的设计需采用多平台优化组合方式，如模块化平台组合、平台间协同运行、深海环境适应性设计。在应对紧急状况方面，深海采矿作业面临恶劣天气、设备故障等不可预见的风险，平台需具备快速脱开与紧急避险能力。相关技术包括研发水上平台应急脱离系统、攻克水下平台快速分离技术，以及开发相应的避险策略与自动化响应系统。在采矿系统布放与回收方面，为克服海洋环境影响，实现设备安全、快速投撤，需重点发展自动布放系统、回收辅助设备以及快速连接与断开技术。此外，高效的矿石转运技术能够显著提升采矿作业的整体效率，降低成本并减少环境影响，主要包括自动化矿石装卸系统、高效分离与储存技术、智能调度与转运优化等。

### （三）长距离粗矿石输运技术与装备

长距离粗矿石输运技术作为深海采矿作业的核心环节，需实现海底至水面平台乃至岸基的全流程高效输送。其核心目标聚焦于输送效率提升、能耗控制及系统安全性保障，而技术挑战集中体现

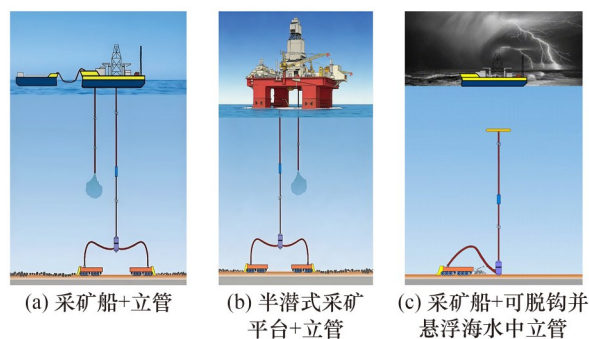


图2 现有的水面支撑平台

表1 不同水面支撑平台优缺点

研发机构	名称	性能	优点	缺点
NM	“鹦鹉螺新纪元”号 (MW301-1#)	可在2500 m深海作业, 矿货装载量达39 000 t	全球首制大型综合采矿船, 集成采矿、动力定位、智能控制等系统	首制船技术验证周期长, 初期成本高昂, 复杂系统维护难度大
TMC	“Hidden Gem”号	总长228 m, 宽42 m, 排水量达97 500 t, DP3动力定位, 加装4 500 m扬矿管道, 搭载矿物处理系统(尾水排放深度1200 m), 布放回收装置载荷90 t, 计划升级后年产能达3 000 000 t湿结核	技术风险低, 适应深水环境	改造方案受原船结构限制, 采矿系统集成度较低, 作业效率可能受限
GSR	“MV Normand Energy”号与“MV Island Pride”号	“MV Normand Energy”号: 排水量14 000 t, 甲板面积2000 m <sup>2</sup> ; “MV Island Pride”号: 容纳6台AUV	由常规船舶改装, 方案灵活, 成本可控, 适合中短期试验或小规模开发	作业深度和持续能力有限, 缺乏一体化设计, 综合效率较低
中国大洋协会	“梦娜公主”号	完成核心系统研发, 形成“采输储”一体化、半潜式试验平台及分布式开发平台等工程化设计方案		仅完成概念方案研究, 工程化作业平台船型研制缺失, 且重型装备布放能力显著不足, 最大负载<50 t, 仅在单一科考设备布放领域成熟

在长距离输送、粗颗粒介质和高浓度工况三大维度。海底提升系统是深海采矿系统的重要组成部分, 占采矿活动总能耗的50%以上<sup>[29,30]</sup>。根据提升介质的不同, 可分为气力和液力提升方式, 各有优劣。气力提升在可靠性和维护性上更具优势, 适合对设备稳定性要求较高的场景; 而液力提升在能效和输送效率上表现更优, 适用于对能耗和输送量要求严格的作业环境。由于气力提升尚存在低能效的缺陷, 液力提升法在深海采矿中仍得到广泛应用。目前, 典型的液力提升系统主要由浆液泵、提升管(包括柔性管和硬管)、中继模块以及上浮模块等组成。浆液泵作为系统的核心, 负责驱动海底采集到的矿物通过提升管输送至海面。在这一过程中, 柔性管和硬管的协同作用确保了矿物在极端海底环境下的顺畅运输, 而中继模块和上浮模块则负责调节提升过程中的压力和浮力, 以适应深海的复杂条件。

根据矿石输送过程中是否依赖泵体作用, 该技术体系可分为“过泵”与“不过泵”两类主流工艺。具体而言: 过泵工艺通过泵体直接输送矿浆, 适配于细颗粒、中浓度场景。其技术突破点在于耐磨泵体的优化设计、压力动态调控及智能调节系统的构建。不过泵工艺则另辟蹊径, 通过气动输送或水力提升等间接方式实现大粒径、高浓度矿浆的输送, 其核心在于多相流态控制及能量转换效率优

化。在系统集成层面, 扬矿泵与管道系统的参数匹配至关重要。这要求实现流量-压力的智能匹配、管道材质与直径的流体力学优化, 以及基于实时反馈的闭环调节机制。气-固-液三相混合流动是深海输送的典型特征, 其流动规律解析与控制成为效率提升的关键突破口, 如图3所示。通过建立多相流数学模型, 实施流态主动优化, 并发展涡流抑制与紊流控制技术, 可有效改善输送效能。在实践应用中, 需根据输送距离、矿浆特性及海洋环境差

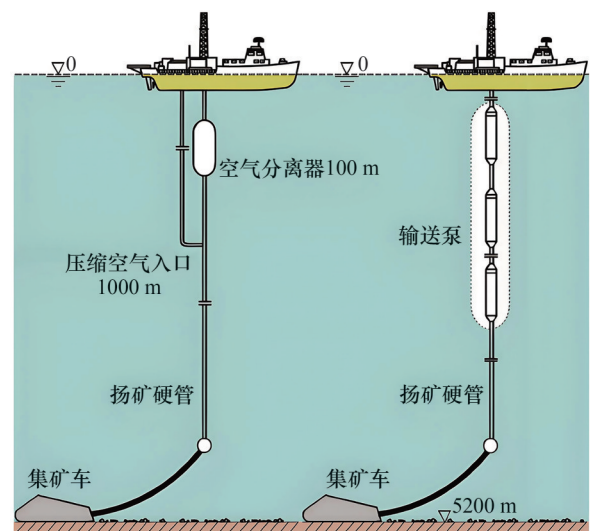


图3 气力提升与水力提升示意图

异，针对性选择扬矿方案。对于中短距离高浓度输送场景，可采用直驱式扬矿系统；长距离输送则宜采用气泡驱动提升工艺；特殊地质条件需配套专用粗颗粒提升装置。

#### (四) 高效低扰动矿石采集技术与装备

深海矿石采集技术旨在高效获取多金属资源的同时，尽量减少对海底环境的扰动，保护海洋生态系统。针对多金属结核、多金属硫化物和富钴结壳等不同矿物类型，需开发特定的采集技术与装备，存在低扰动和高效采集两方面的技术难点。在深海采矿主流采集技术中，水力抽吸式通过高压水流破碎并抽取沉积物，具有效率高、适应软质矿床的优势，但易造成细颗粒扩散污染，且扬矿系统能耗大；机械耙式采用旋转耙齿刮取海底结核，结构简单且处理量大，但对复杂地形适应性差，耙齿易磨损并引发底栖生物大规模破坏，生态扰动显著；机械手拾取通过无人遥控潜水器搭载抓取器精准采集目标矿物，选择性高、环境扰动小，但作业速度慢、成本高昂，且依赖高精度导航与实时操控，技术复杂度高<sup>[31-33]</sup>。目前不同研发机构的行走和采集方式见表2。

针对多金属结核的采集需求，其分布于深海海底表层或浅层沉积物中，采集技术需要在保持海底环境稳定的前提下实现高效收集，主流采集技术有水力式、机械式和混合式，均需突破环境扰动的控制，如图4所示。采矿车行走技术作为核心模块，需适应不同海底地形、沉积物性质及结核分布情况，目前的悬浮行走技术、履带行走技术以及滑撬行走技术仍需结合智能路径规划与导航算法，实现

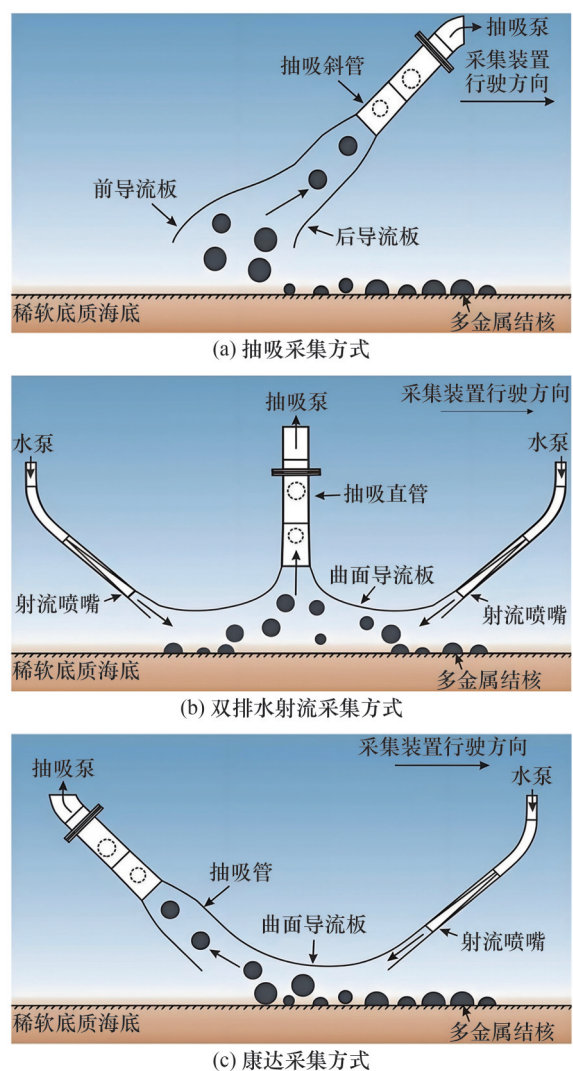


图4 多金属结核水力式采集

动态地形适应性。针对热液区多金属硫化物特性，其赋存于基岩裂隙中，需开发精准切削技术。重点

表2 不同研发机构的行走和采集方式优缺点

研发机构	行走方式	采集方式	优点	缺点
OMI	拖曳式	机械式	结构简单	轨迹控制困难
OMCO	螺旋线推进	机械式	适应稀软底质	打滑严重
长江矿山研究院有限责任公司	履带式	双喷+抽吸	可以重载，	沉积物扰动深度
GSR	履带式	康达+抽吸	载荷适应性强，	15~30 cm，
TMC	履带式	康达+抽吸	行走稳定	压实沉积物
开拓二号	履带式	射流+抽吸		
深海探索1号	履带式	射流+抽吸		
曼塔号	悬浮式，螺旋桨推进	射流+抽吸	扰动深度3~6 cm不会压实沉积物	重载有难度
IM METAL	悬浮式，螺旋桨推进	多机械手拾取	基本没有扰动	采矿能力低，大浮力困难，机械故障多
LOKE	滑行式，螺旋桨推进	机械式	低扰动	机械故障多

攻关耐高温高压的切削装置设计,通过粒径智能控制算法保障矿石质量,同步研发耐腐蚀材料体系以应对极端热液环境。针对基岩型富钴结壳的采集挑战,其紧密附着于硬质基岩表面,需在保护基岩的前提下实现矿层剥离。创新低震动切削装备,集成厚度监测与反馈控制系统,通过声学传感技术实现切削参数动态调节,确保开采过程符合生态保护要求。

#### (五) 采矿系统智能监测及维护技术与装备

智能监测与维护技术作为深海采矿系统的安全命脉,其核心在于通过技术集成构建高可靠性的运行保障体系。针对大尺度系统、全海深作业及多装备协同的技术挑战,需从三个维度构建技术支撑体系:在定位导航维度,需突破深海环境制约。传统定位手段在万米级深海面临精度衰减问题,需融合多源导航数据,发展基于人工智能算法的自适应导航策略,结合高抗干扰水声通信实现厘米级定位精度。同时,构建动态路径规划系统,实时规避海底地形障碍与热液喷口等复杂地质环境。在状态监测维度,需构建多参数感知网络。通过分布式传感器阵列实现力学状态、流场特性及装备健康度的全域感知,运用数字孪生技术建立虚拟映射模型。在此基础上,开发智能预警系统,对潜在故障进行模式识别与演化预测,实现毫米级裂纹扩展等隐患的提前干预。在协同控制维度,需发展智能决策系统。建立多装备分布式控制架构,实现采矿车、扬矿管、浮体平台的协同作业。开发预测性维护算法,结合历史数据与实时工况构建装备寿命模型,通过数字孪生体进行虚拟维护演练,最终达成“监测-预警-决策-维护”的闭环控制。

#### (六) 能源利用与新动力装备

深海采矿能源供给系统需在远离陆地的极端环境下,实现高效、安全、可持续的能源保障<sup>[34]</sup>。针对能源自给与大功率稳定供电的核心挑战,需构建“能源-电力-传输”三位一体的技术体系。在能源选择层面,需统筹技术可行性、经济性与环境效益。核能方案凭借高能量密度和稳定输出特性,适合长期深海作业,但其安全防控与废料处理需建立多重屏障体系;新能源方案依托海洋环境动能,具有清洁可再生优势,需通过混合储能系统平抑波

动,结合智能预测算法提升供能可靠性。在能效优化层面,需发展智能电力分配网络。建立装备级能耗模型与作业场景数据库,通过分布式供电架构实现动态负载匹配,运用数字孪生技术预测电力需求,结合自动化管理平台实现全局优化调度。在传输技术创新层面,需突破水下无线供电技术瓶颈。针对深海高压环境,开发高抗压电磁耦合装置,构建近距离感应式与远距离共振式复合传输系统,结合自适应功率控制技术,确保兆瓦级电力在复杂海洋环境下的稳定传输。

### 四、深海绿色采矿的技术挑战与范式构建

#### (一) 面临的技术挑战

深海矿产资源赋存在深度达数千米的海底,工程装备又面临波浪流等极端的环境条件,核心技术体系尚未完善。首先,水面支持系统亟需突破随机非稳态风浪流环境下的平台稳定性控制、动态升沉补偿技术及船-管智能连接技术,同时缺乏高效矿石预处理与存储外输方案;千米级深海提升系统面临柔性管道的多模态载荷耦合、固-液两相流非线性动力失稳、大水深输送稳定性预测等关键难题;海底作业系统需攻克复杂地形下重载采矿车的多体协同行进控制、绿色高效采集工艺,以及超深水环境的重载装备布放回收技术。其次,复杂系统安全协同难题突出,作业系统受多重耦合风险制约,恶劣海洋环境与长距离管道输送形成不可控外场扰动,采矿工艺参数与多流程作业构成可控内场变量,两者叠加产生液-固多相耦合的动态复杂场效应。超大规模系统在深远海作业时,存在多子系统时空协同困难、非线性动力学行为难以精准预测等重大安全隐患。此外,环境约束带来技术颠覆风险,现行环境监管体系存在双重不确定性。一方面,ISA尚未明确采矿环境阈值标准,若最终生态指标严苛,可能要求重构现有技术体系。另一方面,现有采矿方案的环境友好性难以满足深海生态保护要求,亟需开展绿色采矿装备的颠覆性创新研发。这要求技术研发必须建立环境适应性设计准则,形成环境指标与技术方案的动态协同机制。

#### (二) 深海绿色采矿指标构建研究

推动商业深海绿色采矿对法律环境、采矿装备、

环境认知与管理以及产业构建均提出了新要求。构建“探-采-输-冶”全流程的绿色技术评价标准是实现商业深海绿色采矿全产业链绿色化发展的重要前提，更是深海采矿商业化的先决条件。根据预测模型及开展技术可行性分析，提出了“探-采-输-

冶”全流程建议指标，具体指标要求见表3。

深海绿色采矿指标体系的构建面临系统性挑战，推动商业深海绿色采矿不仅是对技术装备的考验，更涉及法律环境、环境认知、产业协同与可持续发展理念的综合要求。构建覆盖“探-采-输-冶”

表3 “探-采-输-冶”全流程建议指标

指标维度	勘探	开采	运输	选冶
绿色	绿色能源占比 $\geq 50\%$ <sup>[35,36]</sup> ； 水下噪音 $\leq 90$ dB <sup>[37]</sup> ； 光照强度 $\leq 3$ Lux <sup>[38]</sup>	再悬浮沉积物流体浊度 $\leq$ 背景浊度的10倍 <sup>[37,39]</sup> ； 采集对沉积物的扰动强度 $< 5$ kg/m <sup>2</sup> <sup>[39]</sup> ； 采集噪音 $\leq 178$ dB <sup>[37]</sup> ； 底层破坏深度 $\leq 5$ cm <sup>[39]</sup> ； 压陷影响 $\leq 5$ kPa <sup>[39]</sup> ； 提升过程中矿石粉化率 $\leq 2\%$ <sup>[40]</sup> ； 采矿车上矿石脱泥率 $\geq 90\%$ <sup>[41]</sup> ； 能源效率 $\geq 90\%$ <sup>[36]</sup> ； 绿色能源占比 $\geq 90\%$ <sup>[36,42]</sup>	船用燃料的硫含量 $\leq 0.5\%$ <sup>[35,43]</sup> ； 能源效率设计指数比基线水平低30% <sup>[35]</sup> ； 船舶碳强度指标达到C等级及以上水平 <sup>[39]</sup> ； 温室气体排放 $\leq 100$ gCO <sub>2</sub> e/h <sup>[43]</sup>	绿色能源 $\geq 95\%$ <sup>[36,42]</sup> ； 尾矿综合利用率 $\geq 95\%$ <sup>[41,42]</sup> ； 弃渣含矿石 $\leq 0.25\%$ <sup>[41]</sup> ； 污水排放100%达标； 由原料到矿石回收率 $\geq 95\%$ <sup>[41]</sup> ； 烟尘率 $\leq 3\%$ <sup>[39]</sup> ； 水循环利用率 $\geq 95\%$
经济	单位能源价格 $\leq 0.1$ 美元/(kW·h) <sup>[36]</sup> ； 能量消耗 $\leq 10$ kW·h/h <sup>[36]</sup>	采集率 $> 90\%$ <sup>[40]</sup> ； 回采率 $> 85\%$ <sup>[40]</sup> ； 矿浆提升浓度 $\geq 10\%$ <sup>[17]</sup> ； 产能 $> 1 \times 10^4$ t/d <sup>[40]</sup> ； 采矿系统生命周期 $\geq 20$ 年 <sup>[37]</sup> ； 采矿系统全年平稳可靠工作时间 $\geq 280$ 天 <sup>[37]</sup> ； 单位能耗 $\leq 5$ kW·h/t <sup>[36]</sup> ； 单位能源价格 $\leq 0.1$ 美元/(kW·h) <sup>[36]</sup>	载货能力利用率为100% <sup>[39]</sup> ； 运行时间利用率为100% <sup>[37]</sup>	设备运行效率 $\geq 85\%$ <sup>[40]</sup> ； 总效率指标(OEE) $\geq 85\%$ <sup>[40]</sup> ； 日处理量 $\geq 1200$ t <sup>[41]</sup>
可靠	视觉传感器分辨率达到1080 p <sup>[44]</sup> ； 运行时间 $\geq 1000$ h/a <sup>[37]</sup> ； 采样深度误差 $\leq \pm 0.1$ m <sup>[38]</sup> ； 采样成功率 $\geq 95\%$ <sup>[38]</sup>	设备故障率 $\leq 5\%$ <sup>[37]</sup> ； 采矿系统生命周期 $\geq 20$ 年 <sup>[37]</sup> ； 采矿系统全年平稳可靠工作时间 $\geq 280$ 天 <sup>[37]</sup>	船舶全年平稳可靠工作时间 $> 320$ 天 <sup>[37]</sup>	年工作时间 $> 7800$ h <sup>[37]</sup> ； 复杂工艺流程的工业试验应连续运转240 h以上
智能	自动化程度 $\geq 90\%$ <sup>[45]</sup> ； 数据传输率 $\geq 1$ Mbps <sup>[45]</sup> ； 定位精度达到1 m <sup>[38,45]</sup> ； 距离分辨率 $\leq 0.5$ m <sup>[38]</sup> ； 监测频率不低于1次/s <sup>[44]</sup>	控制时延 $< 120$ ms <sup>[45]</sup> ； 控制仿真平台软件连续稳定工作 $\geq 720$ h <sup>[45]</sup> ； 海底采矿定位精度达到1 cm <sup>[38,45]</sup> ； 加速度监测数据采样频率 $\geq 20$ Hz <sup>[44]</sup> ； 数据处理速度 $\geq 1$ GB/s <sup>[45]</sup> ； 智能预警时间 $<$ 应急处置时间 <sup>[37]</sup> ； 数字孪生时差 $\leq 60$ s <sup>[45]</sup>	数据传输延迟 $\leq 100$ ms <sup>[45]</sup> ； 通信可靠性 $\geq 99.99\%$ <sup>[45]</sup> ； 自动化系统响应时间 $\leq 100$ ms <sup>[46]</sup> ； 定位系统的位置偏差 $\leq 1$ m	生产装置和储存设施的自动化系统装备投用率达到100% <sup>[45]</sup> ； 人工智能准确率 $\geq 97\%$ ； 自适应能力 $\geq 95\%$
安全	耐压和耐腐蚀材料使用率为100% <sup>[37,47]</sup> ； 使用寿命 $\geq 20$ 年 <sup>[37]</sup> ； 平均故障间隔时间 $\geq 10000$ h <sup>[37]</sup>	系统满足百年一遇的台风环境条件 <sup>[37]</sup> ； 易损部件实现水下原位快速拆装 <sup>[37]</sup> ； 安全预警的准确率 $\geq 90\%$ <sup>[37]</sup>	船舶结构应能承受设计最大负载的125%； 紧急通信设备可靠性达到99.99% <sup>[37,45]</sup> ； 防火系统响应时间 $< 120$ s <sup>[37]</sup>	安全预防控制体系建设率达到100% <sup>[37]</sup> ； 企业主要负责人和安全管理人員等考核达标率为100% <sup>[37]</sup> ； 设备维护和检查合格率为100% <sup>[37]</sup>

全流程的绿色技术评价标准,是实现深海采矿从概念走向产业化的核心前提。当前尽管已基于模型预测与技术可行性分析提出了建议性指标,但在实际工程中仍面临多重挑战。

#### 1. 技术集成难度大

在深海环境中,“探-采-输-冶”各环节之间存在高度耦合关系。例如,勘探阶段的高精度定位与采样技术直接决定了开采效率与环境扰动程度;而提升系统的稳定性又影响着后续选冶工艺的连续性与能耗水平。目前,各子系统之间的接口标准、数据互通与协同控制仍缺乏统一规范,系统集成难度大。

#### 2. 极端环境适应性不足

深海高压、低温、高腐蚀等极端条件对材料、传感器、动力系统等提出极高要求<sup>[47]</sup>。例如,绿色指标中要求的“耐压和耐腐蚀材料使用率100%”“设备故障率 $\leq 5\%$ ”等,在现有材料科学与工程实践中仍难以全面实现。

#### 3. 绿色能源供应系统尚不成熟

尽管提出了“绿色能源占比 $\geq 50\%$ (勘探)”“绿色能源 $\geq 90\%$ (开采)”等目标,但深海环境中可再生能源(如海底热能、潮汐能、波浪能)的稳定获取与高效转换技术仍处于实验室或小规模试验阶段,远未达到商业化部署水平。

#### 4. 环境监测与评估体系不完善

深海生态环境本底数据匮乏,导致“再悬浮沉积物流浊度 $\leq$ 背景浊度的10倍”“采集对沉积物的扰动强度 $< 5 \text{ kg/m}^2$ ”等指标在实际监测中缺乏可靠基准。此外,深海生态系统的恢复能力与采矿影响的长期效应仍不明确,环保指标的设定缺乏充分科学依据。

### (三) 深海采矿绿色范式的分级技术路径与工程挑战

深海采矿绿色范式旨在平衡资源开发与生态保护,强调在技术应用、管理机制和产业模式中贯彻可持续发展理念,核心考量包括采矿工艺、采集技术、行走技术、提升技术、水面支撑平台以及能源利用等方面。深海采矿的“绿色范式”从资源利用效率、生态环境保护以及能源使用与排放三方面考虑绿色等级划分。例如,A级:资源利用效率极高,生态环境影响极小,采用清洁能源,技术创新显著;B级:资源利用效率较高,生态环境影响较

小,能源使用相对清洁,有一定的技术创新;C级:资源利用效率一般,生态环境有一定影响,能源使用不够清洁,技术创新有限;D级:资源利用效率较低,生态环境影响较大,能源使用不够环保,缺乏技术创新。具体范式见表4。

深海采矿的“绿色范式”不仅是技术路线的选择,更是系统工程的综合优化。从工艺选择到能源结构,从装备设计到运营管理,均需在“资源效率-环境影响-能源消耗”三者之间寻求最优平衡<sup>[48,49]</sup>。表4所示的绿色等级划分,为技术路线提供了初步评价框架,但在工程实践中需进一步细化与量化。

#### 1. 低标准环保技术方案

低标准环保技术方案主要采用传统采矿工艺与设备,对环境保护的考虑较少。采矿工艺可能采用开放式管线或机械式采集,对海底生态扰动大,且缺乏有效的环境监测与应对措施。在能源利用方面,依赖化石燃料,排放高,能效低。此方案虽成本低、技术成熟度高,但其环境代价显著,难以适应未来愈发严格的国际环保法规。此类方案在短期内或可适用于资源富集、生态敏感度较低的区域,但长期来看不具备可持续性。

#### 2. 中标准环保技术方案

中标准环保技术方案在采矿工艺上采用半封闭或局部优化的管道提升系统,减少对中上水体的影响。采集技术结合水力与机械式,在提高采集效率的同时,通过一定的技术手段降低对海底环境的扰动。在能源利用上,开始引入清洁能源如液化天然气(LNG),并尝试实施能效优化措施。此方案在成本与环保之间寻求平衡,是当前技术迭代的重要方向。该方案适用于多数商业化试点项目,具备较强的工程可实现性。

#### 3. 高标准环保技术方案

高标准环保技术方案全面贯彻绿色采矿理念,采用封闭管线采矿系统,确保对海洋环境的最小化影响。采集技术采用机械手拾取或低扰动水力采集,行走技术以悬浮式为主,最大限度减少海底沉积物扰动。在能源利用上,主要依赖核能或可再生能源,实现零排放或低排放。此方案虽初期投资大,但长期来看,符合可持续发展的战略需求,是未来深海绿色采矿的发展方向,然而现阶段仍面临技术瓶颈与高昂成本。例如,悬浮式行走技术虽对沉积物扰动极小,但其动力控制与稳定性在复杂海底地

表4 采矿工艺绿色范式和绿色等级

工艺环节	绿色范式	方案特征	绿色等级
采矿工艺	管线连续采矿系统	封闭管线，对中上水体环境无影响	B
	穿梭式单体采矿系统	机械手拾取：减少海底扰动	A
采集技术	机械式采集	机械手拾取	A
		水平旋转耙式+链板提升	B
	链板提升式	C	
	水力式采集	双射+抽吸	C
	水力+机械混合式采集	水力抽吸+耙式提升	B
行走技术	悬浮式	沉积物扰动小，压陷低	A
	滑行式	沉积物扰动中等，压陷程度中	B
	履带式	沉积物扰动大，压陷大	C
提升技术	管道式提升+尾水排放	水力提升	B
		气力提升（效率低）	C
	管道式提升+尾水回用	水力+尾水回用	A
		气力+尾水回用	B
		管线+链斗式	
水面支撑平台	多平台（水上+水下）组合	效率高，能量利用率高	A
	单平台功能单一	—	B
能源利用	化石	原油	D
		柴油	C
		LNG	B
		核能	A

形中仍难以保障，其重载下的稳定控制与精确定位和高压深海环境下的长期可靠性是目前的核心工程挑战。在成本方面，为实现精确控制所需的高精度推进与控制系统造价不菲，同时，频繁的深海维护与回收作业也将带来持续的运营开支。根本性的落地瓶颈在于目前该技术严重缺乏长期、大规模的海底实地作业验证数据，这使得对其真实性能、环境影响和经济效益的评估仍停留在理论或小规模试验阶段。“核能驱动”虽能实现零排放，但其安全性与公众接受度仍是推广障碍。该方案的实现需依赖材料、能源、控制、通信等多领域的技术突破，且核心工程挑战涉及小型化、模块化反应堆在海洋工程场景下的实现，以及构建一套能在海上极端环境中提供绝对安全保障的完备体系。成本极具特殊性，不仅包括高昂的初始安全设施投入，还涵盖极其严格的国际合规审查与专项保险费用，加之项目固有的漫长投资回报周期，构成了巨大的经济门槛。更深层次的技术落地瓶颈已远超单纯的工程技术范畴，深度牵涉国际政治协调、全球核安全治理等复杂系统性问题，使其推进路径充满挑战。

## 五、深海绿色采矿未来技术突破方向

为持续推进深海绿色采矿从技术探索迈向工程实践与商业开发，需系统研判关键环节的技术瓶颈与发展路径，聚焦未来具备突破潜力的重点方向，构建面向绿色化、智能化、可持续化的技术体系。

### （一）绿色化与环境扰动控制技术的突破方向

未来深海采矿绿色化的核心在于实现对海底微环境扰动的最小化控制与实时修复。当前技术对沉积物再悬浮、底层破坏、噪声传播等影响的控制能力仍显不足，亟需发展精细化采集与行走控制技术，研发具备主动悬浮与姿态自适应调节的采矿机器人，实现“轻触式”采集，并开发基于实时感知的路径规划与压陷控制算法，将沉积物扰动强度控制在 $5 \text{ kg/m}^2$ 以下，底层破坏深度 $\leq 2 \text{ cm}^{[50]}$ 。同时，应构建原位监测与生态评估体系，建立海底环境参数实时感知网络，形成基于大数据与生态模型的扰动阈值动态评估方法，为绿色采矿提供精准的环境基线及调控依据。此外，还需研发沉积物抑制与生态修

复技术, 包括环保型絮凝剂与物理屏障技术以抑制羽状流扩散, 并探索海底人工礁体构建与生物群落原位培育技术, 实现“开采-修复”同步。

## (二) 智能化与自主系统协同的技术路径

深海采矿系统的智能化是提升作业效率、降低人为风险、实现绿色目标的关键支撑。未来应构建全流程数字孪生系统, 形成覆盖“探-采-输-冶”全链路的数字孪生平台, 实现设备状态、环境参数与工艺过程的实时映射与预测调控, 并将数字孪生时差控制在 30 s 以内<sup>[51]</sup>。同时, 需发展群体智能与协同控制技术, 研发多自主潜水器/无人遥控潜水器协同勘探与作业系统, 使其具备任务自主分配、避碰与集群决策能力, 从而实现勘探效率提升 50% 以上, 定位精度达到厘米级。智能故障诊断与预警系统的建设也至关重要, 应基于深度学习与多源传感数据构建设备健康状态预测模型, 实现关键部件故障提前 24 h 预警, 推动系统可靠性提升至 99.5%<sup>[51]</sup>。

## (三) 能源系统绿色化与深海原位供能方案

深海采矿的绿色转型高度依赖能源结构的优化, 未来需从依赖水面供能向深海原位、低碳供能方向发展<sup>[52]</sup>。重点包括研发深海混合能源系统, 形成适用于深海环境的“海上风电+液化天然气+储能”混合供能方案, 逐步提升绿色能源在总能耗中占比至 70% 以上。同时应探索深海原位能源利用技术, 如海底热液发电、压力差能转换、深海生物燃料电池等新型能源获取路径, 推动实现能源供给的深海本地化。此外, 开发高效动力与能量回收系统也极为关键, 包括高密度深海动力电池的研制, 以及提升系统中液压与势能回收效率的技术, 力争将单位能耗降至 3 kW·h/t 以下<sup>[53]</sup>。

## (四) 系统集成与工程验证路径设计

深海绿色采矿是典型的复杂系统工程, 任何单一技术的突破都需在系统集成与工程验证中接受检验。应推动模块化与接口标准化发展, 促进采矿装备、控制系统、能源模块的标准化与互换性设计, 从而降低系统集成难度与全生命周期成本。同时要构建陆试与中试系统, 建设覆盖全流程的陆基试验场与浅海中试平台, 模拟深海环境开展连续不少于 500 h 的可靠性测试, 为深海示范工程奠定基础。在

此基础上, 推进商业化示范工程, 在具备条件的海区开展每年万吨级的绿色采矿示范工程, 全面验证技术经济性与环境合规性, 推动深海采矿从“技术可行”走向“工程可用”。

## 六、结语

本文系统梳理了深海绿色采矿在技术指标、工艺范式及系统集成等方面面临的现实挑战, 指出当前深海采矿虽在“探-采-输-冶”各环节初步建立了绿色评价框架, 但在技术成熟度、环境适应性、能源系统稳定性与系统协同性等方面仍存在显著差距。采矿绿色范式的分级体系虽为技术路径选择提供了依据, 但高标准方案在工程可实现性与经济性方面仍受限于材料、控制、原位供能等关键技术瓶颈。研究表明, 深海绿色采矿的实现不仅依赖于单一技术突破, 更需在系统设计、跨链协同和生态评估等方面实现整体优化。

面向未来, 深海绿色采矿的研究与应用应进一步聚焦绿色化、智能化和系统化三大方向: 突破沉积物扰动控制、原位生态修复等关键技术, 构建基于数字孪生与群体智能的自主采矿系统, 研发深海混合能源与原位供能解决方案; 同时, 亟需通过陆试与中试验证平台推进技术集成和工程转化, 并在标准制定、数据共享与国际治理方面深化协作, 以推动深海采矿从技术探索迈向绿色、安全、可持续的商业化开发新阶段。

### 利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** November 5, 2025; **Revised date:** December 26, 2025

**Corresponding author:** Xia Jianxin is a professor from the School of Marine Sciences, China University of Geosciences (Beijing). His major research field is deep-sea mineral resource development. E-mail: jxxia@vip.sina.com

**Funding project:** The National Natural Science Foundation of China Projects (52394252, U25A6020)

### 参考文献

- [1] Zhang Q, Chen X G, Luan L B, et al. Technology and equipment of deep-sea mining: State of the art and perspectives [J]. *Earth Energy Science*, 2025, 1(1): 65-84.
- [2] 李鑫海, 孙治雷, 曹红, 等. 深海重要矿产资源开发研究进展 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(3): 160-172.  
Li X H, Sun Z L, Cao H, et al. Research progress on exploitation

- of key deep-sea mineral resources [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2024, 44(3): 160–172.
- [3] 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.  
Li J B, Wang Y J, Liu L, et al. Current status and prospect of deep-sea mining technology [J]. *Science and Technology Foresight*, 2022, 1(2): 92–102.
- [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] 陈旭光, 张弦, 马宁, 等. 深海采矿与碳封存协同发展的新型作业模式及技术探讨 [J]. *中国工程科学*, 2025, 27(2): 148–158.  
Chen X G, Zhang X, Ma N, et al. Exploration of new operational models and technologies for the synergistic development of deep-sea mining and carbon sequestration [J]. *Strategic Study of CAE*, 2025, 27(2): 148–158.
- [6] 苑雪燕. 基于绿色矿山采矿技术的金属矿山开采 [J]. *有色金属设计*, 2025, 52(1): 31–34.  
Yuan X Y. Metal mine excavation based on green mining technologies [J]. *Nonferrous Metals Design*, 2025, 52(1): 31–34.
- [7] JPI Oceans. MiningImpact: Assessing the long-term impacts of polymetallic nodule mining on the deep-sea environment [EB/OL]. (2015-01-01)[2025-12-16]. <https://www.jpi-oceans.eu/en/miningimpact>.
- [8] Gazis I Z, de Stigter H, Mohrmann J, et al. Monitoring benthic plumes, sediment redeposition and seafloor imprints caused by deep-sea polymetallic nodule mining [J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 1229.
- [9] 刘天森, 张峤伟, 周碧乾, 等. 海南省深海装备配套产业数字化绿色化协同发展路径研究 [J]. *中国市场*, 2023 (10): 28–31, 51.  
Liu T S, Zhang Q W, Zhou B Q, et al. Research on the digital and green coordinated development path of deep-sea equipment supporting industry in Hainan Province [J]. *China Market*, 2023 (10): 28–31, 51.
- [10] United States Congress. H.R.663—Congressional bills 119th Congress [EB/OL]. (2025-01-23)[2025-12-16]. <https://www.congress.gov/119/bills/hr663/BILLS-119hr663ih.htm>.
- [11] 刘少军, 刘畅, 戴瑜. 深海采矿装备研发的现状与进展 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(2): 8–18.  
Liu S J, Liu C, Dai Y. Status and progress on researches and developments of deep ocean mining equipments [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(2): 8–18.
- [12] Chung J S. Deep-ocean mining technology: Development II development II [R]. Cupertino: Sixth ISOPE Ocean Mining Symposium, 2005.
- [13] 肖业祥, 杨凌波, 曹蕾, 等. 海洋矿产资源分布及深海扬矿研究进展 [J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(4): 319–326.  
Xiao Y X, Yang L B, Cao L, et al. Distribution of marine mineral resource and advances of deep-sea lifting pump technology [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(4): 319–326.
- [14] 李家彪, 安恩梅尔沃德. 海底资源开发 [M]. 北京: 海洋出版社, 2021.  
Li J B, Myhrvold N. Development of subsea resources [M]. Beijing: China Ocean Press, 2021.
- [15] 刘磊. 深海采矿水力提升固液两相流动力学特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学(博士学位论文), 2019.  
Liu L. Research on the hydrodynamic characteristics of solid-liquid two-phase flow in deep-sea mining hydraulic lift [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (Doctoral dissertation), 2019.
- [16] 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.
- [17] 康娅娟, 刘少军. 深海采矿提升系统研究综述 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(20): 232–243.  
Kang Y J, Liu S J. Summary of research on lifting system of deep sea mining [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(20): 232–243.
- [18] 刘峰, 刘予, 宋成兵, 等. 中国深海大洋事业跨越发展的三十年 [J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(10): 2613–2623.  
Liu F, Liu Y, Song C B, et al. Three decades' development of China in deep-sea field [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(10): 2613–2623.
- [19] 何高文, 杨永, 韦振权, 等. 西太平洋中国富钴结壳勘探合同区矿床地质 [J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(10): 2649–2664.  
He G W, Yang Y, Wei Z Q, et al. Mineral deposit characteristics of cobalt-rich Fe-Mn crusts in COMRA contract area, Western Pacific Ocean [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(10): 2649–2664.
- [20] 刘建浩. 深海采矿系统的运动响应研究 [D]. 上海: 上海交通大学(硕士学位论文), 2012.  
Liu J H. The motion response of deep-sea mining systems [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (Master's theses), 2012.
- [21] 唐达生, 阳宁, 金星. 深海粗颗粒矿石垂直管道水力提升技术 [J]. *矿冶工程*, 2013, 33(5): 1–8.  
Tang D S, Yang N, Jin X. Hydraulic lifting technique with vertical pipe for deep-sea coarse mineral particles [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2013, 33(5): 1–8.
- [22] 阳宁, 陈光国. 深海矿产资源开采技术的现状综述 [J]. *矿山机械*, 2010, 38(10): 4–9.  
Yang N, Chen G G. Status quo and development tendency of deep sea minerals mining technology [J]. *Mining & Processing Equipment*, 2010, 38(10): 4–9.
- [23] 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.
- [24] 李江海, 宋珏琛, 洛怡. 深海多金属硫化物采矿研究进展及其前景探讨 [J]. *海洋开发与管理*, 2019, 36(11): 29–37.  
Li J H, Song J C, Luo Y. Research progress and prospect of deep sea polymetallic sulfide mining [J]. *Ocean Development and Management*, 2019, 36(11): 29–37.
- [25] 李雪威, 李佳兴. 国际社会深海采矿反对之声的演变、根源与应对 [J]. *太平洋学报*, 2024 (8): 76–89.

- Li X W, Li J X. The evolution, root causes and responses of the international community's opposition to deep-sea mining [J]. *Pacific Journal*, 2024 (8): 76–89.
- [26] 冯妮, 杨建民. 全球深海矿产资源开发进展与启示——以装备技术为核心 [J]. *太平洋学报*, 2024, 32(8): 62–75.  
Feng N, Yang J M. Development of equipment technology for exploitation of marine mineral resources [J]. *Pacific Journal*, 2024, 32(8): 62–75.
- [27] 王洋, 庞云天, 周丽娜, 等. 国际海底管理局开发规章草案制定中深海采矿相关条款浅析 [J]. *采矿技术*, 2024, 24(3): 292–295.  
Wang Y, Pang Y T, Zhou L N, et al. Analysis on the relevant provisions of deep-sea mining in the formulation of the draft development regulations of the International Seabed Authority [J]. *Mining Technology*, 2024, 24(3): 292–295.
- [28] 中华人民共和国自然资源部. ISA 将从 7 月开始受理深海采矿申请 [EB/OL]. (2023-04-03)[2025-12-16]. [https://geoglobal.mnr.gov.cn/zx/tpzx/202304/t20230403\\_8500280.htm](https://geoglobal.mnr.gov.cn/zx/tpzx/202304/t20230403_8500280.htm).  
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. International Seabed Authority to accept deep-sea mining applications in July [EB/OL]. (2023-04-03)[2025-12-16]. [https://geoglobal.mnr.gov.cn/zx/tpzx/202304/t20230403\\_8500280.htm](https://geoglobal.mnr.gov.cn/zx/tpzx/202304/t20230403_8500280.htm).
- [29] Ji L L, He X R, Li W, et al. Research progress of advanced design method, numerical simulation, and experimental technology of pumps in deep-sea resource exploitation [J]. *Water*, 2024, 16(13): 1881.
- [30] Kang Y J, Wang K L, Hu Q, et al. Research on a coupled system design for mineral lifting and wastewater drainage in deep-sea mining applications [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 299: 117260.
- [31] 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.
- [32] Zhang X Z, Zuo Y H, Wei J K, et al. A review on underwater collection and transportation equipment of polymetallic nodules in deep-sea mining [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(5): 788.
- [33] Yang L L, Luo L, Chen X D, et al. Hydraulic transportation of non-spherical coarse particles in deep-sea mining: Impact of particle shape on flow dynamics [J]. *Ocean Engineering*, 2025, 323: 120652.
- [34] 宋奕萱, 吴俊飞, 曲志平, 等. 深海装备用耐压电池模块温度场仿真分析 [J]. *机械设计与制造工程*, 2025, 54(1): 7–12.  
Song Y X, Wu J F, Qu Z P, et al. Simulation analysis on the temperature field of pressure-tolerant battery module for deep-sea equipment [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2025, 54(1): 7–12.
- [35] 交通运输部海事局. 国内新建海船能效设计指数(EEDI)实施指南 [EB/OL]. (2024-09-25)[2025-09-20]. <https://www.msa.gov.cn>.  
Maritime Safety Administration of the Ministry of Transport. Guidelines for the implementation of the Energy Efficiency Design Index (EEDI) for newly built domestic seagoing ships [EB/OL]. (2024-09-25)[2025-09-20]. <https://www.msa.gov.cn>.
- [36] 国家能源局. 石油天然气开采业低碳审核指南: SY/T 7299—2016 [EB/OL]. (2016-12-05)[2025-09-20]. <http://www.nea.gov.cn>.  
National Energy Administration. Low-carbon audit guide for petroleum and natural gas extraction industry: SY/T 7299—2016 [EB/OL]. (2016-12-05)[2025-09-20]. <http://www.nea.gov.cn>.
- [37] 应急管理部. 金属非金属矿产资源地质勘查单位安全生产标准化实施指南: AQ/T 2064—2018 [EB/OL]. (2018-05-22)[2025-09-20]. <http://www.mem.gov.cn>.  
Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. Implementation guidelines for work safety standardization of metal and nonmetal mineral resources geological exploration units: AQ/T 2064—2018 [EB/OL]. (2018-05-22)[2025-09-20]. <http://www.mem.gov.cn>.
- [38] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 大洋多金属结核资源勘查规范: GB/T 35571—2017 [EB/OL]. (2017-12-29)[2025-09-20]. <http://openstd.samr.gov.cn>.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for exploration of oceanic polymetallic nodule resources: GB/T 35571—2017 [EB/OL]. (2017-12-29)[2025-09-20]. <http://openstd.samr.gov.cn>.
- [39] 中华人民共和国生态环境部. 排污单位自行监测技术指南 陆上石油天然气开采工业: HJ 1248—2022 [EB/OL]. (2022-04-27)[2025-09-20]. <http://www.mee.gov.cn/>.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guideline for self-monitoring of pollutant discharging units-onshore petroleum and natural gas extraction industry: HJ 1248—2022 [EB/OL]. (2022-04-27)[2025-09-20]. <http://www.mee.gov.cn/>.
- [40] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 矿产资源综合勘查评价规范: GB/T 25283—2023 [EB/OL]. (2023-05-23)[2025-09-20]. <http://std.samr.gov.cn>.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification for comprehensive exploration and evaluation of mineral resources: GB/T 25283—2023 [EB/OL]. (2023-05-23)[2025-09-20]. <http://std.samr.gov.cn>.
- [41] 李健, 王涛, 李克鹏, 等. 绿色高效现代化选矿生产的实践 [R]. 太原: 第二十六届十省金属学会冶金矿业学术交流会, 2019.  
Li J, Wang T, Li K P, et al. Practice of green and high-efficiency modern ore dressing production [R]. Taiyuan: The 26th Academic Exchange Conference of Metal Science and Metallurgical Mining Societies from Ten Provinces, 2019.
- [42] 山西省市场监督管理局. 煤炭绿色开采技术指南: DB14/T 2535—2022 [EB/OL]. (2022-09-02)[2025-09-20]. <http://scjgj.shanxi.gov.cn>.  
Shanxi Provincial Administration for Market Regulation. Technical guideline for green mining of coal: DB14/T 2535—2022 [EB/OL]. (2022-09-02)[2025-09-20]. <http://scjgj.shanxi.gov.cn>.
- [43] 中华人民共和国海事局. 船舶能耗数据和碳强度管理办法 [EB/OL]. (2022-11-22)[2025-09-20]. <http://www.sh.msa.gov.cn/>.  
China Maritime Safety Administration. Measures for the management of ship energy consumption data and carbon intensity [EB/OL]. (2022-11-22)[2025-09-20]. <http://www.sh.msa.gov.cn/>.
- [44] 国家能源局. 陆上石油开采区土壤环境调查技术指南: SY/T 7465—2020 [EB/OL]. (2020-10-23)[2025-09-20]. <http://www.hnbzw.com>.  
National Energy Administration. Technical guide for soil environ-

- ment investigation in onshore petroleum mining Areas: SY/T 7465—2020 [EB/OL]. (2020-10-23)[2025-09-20]. <http://www.hnbzw.com>.
- [45] 自然资源部. 矿产资源定期调查规范 第5部分: 潜在矿产资源调查: DZ/T 0461.5—2023 [EB/OL]. (2024-01-17)[2025-09-20]. <http://www.mnr.gov.cn>.  
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Specification for periodic mineral resources survey part 5: Potential mineral resources survey: DZ/T 0461.5—2023 [EB/OL]. (2024-01-17)[2025-09-20]. <http://www.mnr.gov.cn>.
- [46] 国家标准化管理委员会. 20250688-T-469 船舶与海洋技术 深海系泊用组合索具[EB/OL]. (2025-02-28)[2025-10-31]. <http://std.samr.gov.cn>.  
Standardization Administration of China. 20250688-T-469 ships and marine technology — Composite mooring ropes for deep-sea applications [EB/OL]. (2025-02-28)[2025-10-31]. <http://std.samr.gov.cn>.
- [47] 王喜龙. 深海环境下海洋石油机械装备自适应抗疲劳方法研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(2): 34–36, 42.  
Wang X L. Research on adaptive anti-fatigue method of offshore oil machinery equipment in deep-sea environment [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2025, 61(2): 34–36, 42.
- [48] Van Dover C L, Arnaud-Haond S, Gianni M, et al. Scientific rationale and international obligations for protection of active hydrothermal vent ecosystems from deep-sea mining [J]. Marine Policy, 2018, 90: 20–28.
- [49] Sharma R. Environmental issues of deep-sea mining [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 11: 204–211.
- [50] Zhao G, Xiao L, Zhang B, et al. Experimental methods for measuring the disturbance of polymetallic nodule collecting on deep-sea sediments Ex-Situ [R]. Rhodes: The 34th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2024.
- [51] Wang J Y, Liu J L, Zou Y, et al. Digital twin system for real-time response prediction and hazard warning of a flexible hose in deep-sea mining [J]. Ocean Engineering, 2025, 324: 120676.
- [52] 段宝生, 索永兵. 深海水下装备无缆供电系统的发展趋势 [J]. 船电技术, 2025, 45(3): 57–59.  
Duan B S, Suo Y B. Design and optimization of power supply system without umbilical cables for deep-sea underwater equipment [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2025, 45(3): 57–59.
- [53] Sen P K. Exploring the use of renewable resources for processing of deep-sea minerals [R]. Cham: Springer International Publishing, 2022.