

深海商业化采矿尾水尾气绿色低碳利用新模式探索

沙飞^{1,2}, 倪立骏¹, 陈旭光^{1,2*}, 解安琪¹, 董雨龙¹, 杨凯瑞¹, 李华军¹

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266404; 2. 山东省深海采矿技术与水下装备重点实验室, 山东青岛 266404)

摘要: 深海蕴藏着丰富的矿产资源, 深海采矿商业化进程中面临尾水直排引发的中水羽流污染和母船高碳排放两大核心环境制约。针对以上痛点, 本文提出了一种基于尾水尾气绿色低碳利用的深海商业化采矿新模式, 将尾水尾气的源头控制与岛礁资源化利用进行融合创新, 形成“中水羽流控制-资源转化-协同利用”系统路径。基于尾水矿物泥理化特性, 建立“高效絮凝-压滤脱水-淋滤除盐-重金属稳定化”安全处理体系, 从源头避免中水羽流形成, 实现矿物泥固液分离、脱盐与无害化处理; 集成船载碳捕集与深海碳封存技术, 依托深海高压、低温环境, 实现基于水合物法的CO₂封存, 并结合碳交易机制提升经济可行性。研究发现, 经安全处理后, 尾水矿物泥含水率、含盐量与重金属含量显著降低, 可应用于岛礁农业用土、岛礁绿色建材、日化用品等领域, 创造显著经济价值; 尾气碳封存与采矿作业深度协同, 有效减少了作业设备和能源重复配置, 提升了系统整体运行效率, 同时为海洋工程系统向低碳转型提供了可推广的技术方案。研究提出了深海商业化采矿尾水尾气绿色低碳利用的未来技术方向, 包括以大规模商业化采矿为目标的矿物泥安全处理体系、深海采矿与岛礁农业种植协同发展、适用于岛礁环境的绿色建材制备技术、尾气处理与碳封存一体化技术和高质量尾水矿物泥日化用品制备技术。本文构建的“深海采矿-资源转化-产业协同”循环体系, 为突破深海资源商业开发的环境制约提供了系统性解决方案, 为全球蓝色经济贡献了高效技术范式。

关键词: 深海采矿; 中水羽流控制; 尾水尾气; 资源化利用; 绿色低碳

中图分类号: P751 **文献标识码:** A

New Model for Green and Low-Carbon Utilization of Tailwater and Exhaust Gas in Commercial Deep-Sea Mining

Sha Fei^{1,2}, Ni Lijun¹, Chen Xuguang^{1,2*}, Xie Anqi¹, Dong Yulong¹, Yang Kairui¹, Li Huajun¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266404, Shandong, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Deep-Sea Mining Technology and Underwater Equipment, Qingdao 266404, Shandong, China)

Abstract: Abundant mineral resources exist in the deep sea. However, in current deep-sea mining practices in China and abroad, tailwater is generally discharged directly into the middle layer of the ocean, leading to large-scale midwater plumes; and the carbon emissions of mother ships are extremely high. These have become core environmental bottlenecks restricting commercial deep-sea mining. To address these challenges, the study proposes a novel model for commercial deep-sea mining that leverages the green and low-carbon utilization of tailwater and exhaust gas. This model innovatively integrates source control with resource recovery,

收稿日期: 2025-12-02; **修回日期:** 2026-01-30

通讯作者: *陈旭光, 中国海洋大学工程学院教授, 研究方向为深海采矿; E-mail: chenxuguang1984@ouc.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(A类)(52225107); 国家自然科学基金项目(U25A6020, U1906234); 中央高校基本科研业务费专项(202442004); 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)

本刊网址: ssc.ae.engineering.org.cn

establishing a systematic pathway of “midwater plume control-resource transformation-synergistic enhancement.” Based on the physicochemical properties of tailing mineral sludge, a safe treatment system encompassing “efficient flocculation-pressure filtration and dewatering-leaching desalination-heavy metal stabilization” is developed to prevent the formation of midwater plumes at the source, achieving solid-liquid separation, desalination, and harmless treatment of the sludge. Shipboard carbon capture and deep-sea sequestration technologies are integrated, capitalizing on the high-pressure and low-temperature conditions of the deep sea to realize mineralized sequestration of carbon dioxide in the form of hydrates. Carbon trading mechanisms are further incorporated to improve economic feasibility. The results indicate that, after safe treatment, the moisture content, salinity, and heavy metal concentrations in the tailing mineral sludge are significantly reduced, enabling its use in agricultural soils of islands and reefs, eco-friendly construction materials for island-reef systems, and daily chemical products, thereby creating considerable economic values. In parallel, the deep integration of exhaust gas carbon sequestration with mining operations minimizes redundant equipment and energy allocation, enhancing the overall operational efficiency of the system. Moreover, it offers a scalable technical solution for the low-carbon transition of marine engineering systems. The study also outlines future technological directions for the green and low-carbon utilization of tailwater and exhaust gas in commercial deep-sea mining. These include a safe treatment system for tailing mineral sludge aimed for large-scale commercial mining, coordinated development of deep-sea mining and agricultural cultivation on islands and reefs, green building material preparation technologies adapted to island and reef environments, integrated technologies for exhaust gas treatment and carbon sequestration, as well as technologies for producing high-quality daily chemical products from tailing mineral sludge. By establishing a circular system that integrates deep-sea mining, resource transformation, and industrial synergy, this study provides a systematic solution to overcome the environmental constraints in the commercial development of deep-sea resources, contributing an efficient technological paradigm to the global blue economy.

Keywords: deep-sea mining; midwater plume control; tailwater and exhaust gas; resource utilization; green and low-carbon

一、前言

随着新能源与高端制造产业的快速发展，全球对铜、钴、镍等关键金属资源的需求持续增长^[1,2]。然而，受限于陆地矿产资源日益枯竭与生态环境容量逐步下降，传统矿业难以支撑未来产业链高质量发展的资源基础^[3]。在此背景下，深海矿产资源因其储量大、品位高、开发潜力突出，被视为保障国家资源安全、拓展关键金属供给的新兴战略方向。作为全球重要的固体矿产储备区，深海区域广泛赋存多金属结核、多金属硫化物及富钴结壳等资源，特别在克拉里昂-克利珀顿断裂带（CC区）等典型海域，镍、钴、锰等金属储量已超过陆地同类矿产总和，具备大规模工业化开发基础^[4]。这一趋势推动了世界主要国家加快在深海资源领域的战略布局，我国目前已获得多个国际深海矿区的专属勘探权，为推进深海商业化采矿（商采）进程提供了有力支撑。

深海采矿在商业化推进过程中正面临日益显著的环境约束，其中最关键的限制因素来自尾水直接排放导致的中水羽流。现有以管道提升式为代表的采矿系统在作业时，采矿车会扰动海底沉积物形成海底羽流^[5,6]，矿石经海面洗选与分离后产生的大量尾水也会被直接排入中层水体，形成高悬浮性、高扩散性的中水羽流^[7]。将尾水直接排入中层水体的排放方式是当前的国际主流做法，但中水羽流会显

著提升海水浊度、削弱光照传输并干扰浮游植物的光合作用，进而影响滤食性生物、底栖生态系统以及区域生物多样性^[8-10]。研究表明，尾水可能夹带重金属与放射性元素，迁移路径复杂，影响范围广泛，是制约深海采矿绿色化进程的核心技术瓶颈之一。若能够对尾水中的沉积物进行有效回收与资源化利用，可从源头避免中水羽流的形成。

采矿母船作为高功率密集运行平台，能源消耗与碳排放远高于传统近海工程装备，因当前缺乏有效的碳捕集或减排机制，致使CO₂等温室气体直接大量排放。这类尾气排放不仅削弱了深海碳汇系统的稳定性，也使深海采矿在“双碳”战略背景下面临政策合规性与国际舆论风险。2023年，国际海底管理局（ISA）明确指出，生态环境影响带来的不确定性已成为延迟深海商采许可发放的关键因素^[11]。

面对深海矿产资源商采进程中羽流干扰与高碳排放并存的工程难题，亟需构建以环境约束为导向、以工程可实现性为核心的绿色采矿技术体系。基于典型矿区尾水矿物泥与采矿母船尾气的来源特征和物质属性，本文提出了“源头控制-过程转化-协同利用”的系统化、资源化路径。在尾水方面，通过对矿物泥组成、胶体结构和环境行为的定量解析，构建由高效絮凝、压滤脱水、淋滤养分调控与重金属稳定化组成的安全处理工艺，实现对中水羽流的前置削减与可再利用矿物泥产品的规模化获取。在尾气方面，结合深海高压、低温环境特征与现有船

载碳捕集、深海封存与利用 (CCUS) 技术, 形成“船载CO₂捕集-深海封存”一体化工程方案, 并引入碳交易机制以提升低碳运行的经济可行性。上述路径将尾水、尾气从被动排放物转化为可利用资源单元, 为构建深海采矿“零直排”工程体系提供了技术基础, 具体技术路径如图1所示。基于此, 本文进一步系统评述现有尾水尾气处理模式及其工程瓶颈, 提出深海采矿尾水尾气绿色低碳利用的新模式, 以支撑深海绿色商业化采矿的长期发展需求。

二、深海商业化采矿尾水尾气绿色低碳利用背景

(一) 深海采矿技术体系与全球发展态势

20世纪50年代末, 国际上开始大规模探索深海采矿系统研发, 先后提出了拖斗式、连续链斗式、自动穿梭艇式和管道提升式等多种技术路线。经过多年验证与工程实践, 目前国内外的主流方案均趋向于成熟度较高、作业效率更稳定的管道提升式深海采矿系统。此系统一般由集矿系统 (海底采矿车)、提升系统和海面处理系统 (海面采矿船) 三部分组成^[12,13]。

当前, 全球深海矿产资源开发已形成多元竞争格局。美国、欧洲、日本等发达国家和地区率先在商采领域取得进展。我国虽起步较晚, 但经过多年技术攻关, 已基本确立“海底采矿车开采-管道提升-海面采矿船支持”的采矿技术体系^[14], 具体包括: ① 通常选用水力式履带采矿车对目标海域进行远程操控与开采; ② 通过混流泵或气举方式, 将矿石与海水混合后输送至海面支持平台, 常见为水力

提升或气力提升; ③ 在海面, 采矿船对采集物进行筛选、冲洗、破碎、研磨等预处理, 再将多余的尾水废物 (如矿物泥、矿物碎屑、废水等) 进行合适的深度排放^[15]。然而, 在全球现有工程实践中, 即便是技术最为先进的国家和企业, 其处理策略仍集中于简单排放尾水尾气, 相关排放过程基本处于“被动接受”状态, 缺乏系统性环境管控思路。

(二) 环境问题对深海采矿商业化的制约

在现有的深海采矿模式下, 主要产生两类羽流: 海底采矿车在推进与切割过程中扰动表层沉积物形成的沉积物羽流^[16]和海面预处理尾水在中层水体排放后形成的中水羽流^[17]。羽流产生带来的影响包括但不限于: 水体浊度增加, 削弱光合作用对光的利用率, 导致初级生产率下降, 辐射至其他营养级更高的生物^[18]; 羽流所携带的颗粒物堵塞海洋生物呼吸系统造成窒息^[19]; 破坏原有海底地形地貌, 影响底栖生态系统; 羽流中的有毒有害物质随海流扩散^[20], 对生态系统造成累积性或不可逆损害。特别是具备高悬浮、强扩散特征的中水羽流, 对海洋中层生态系统的持续性扰动与累积性损害最为显著。如何有效控制甚至从源头避免中水羽流形成, 成为决定深海采矿能否实现商业化的关键环境问题。

需要指出的是, 深海采矿过程中产生的大量尾气排放同样是制约其商业化发展的一大因素。深海采矿母船作为典型的大型海洋工程船舶, 其排放的尾气不仅含有高浓度温室气体CO₂, 还伴有硫氧化物 (SO_x)、氮氧化物 (NO_x) 及颗粒物 (PM) 等大气污染物^[21]。一方面, 深海采矿设备持续排放的尾气, 加剧了碳足迹与环境敏感区的生态压力。另一

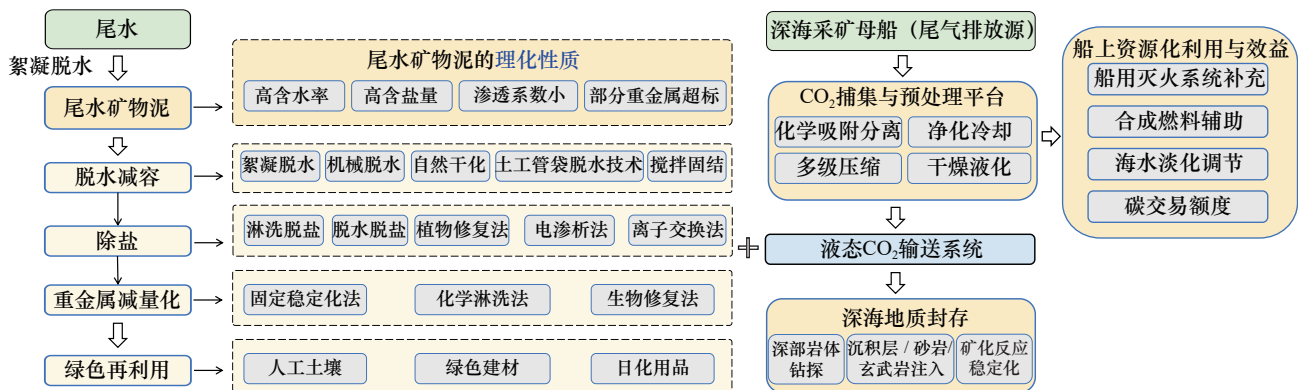


图1 深海采矿尾水尾气绿色低碳利用技术路径

方面, ISA 及各国对深海活动的环境监管日趋严格, 对尾气排放监测、评估和减排提出了更高要求, 显著提高了企业的开采成本。尾气扩散行为在深海环境中具有不确定性, 可能引发的跨区域环境影响尚缺乏充分研究, 使商业化开发面临环境风险评估不足的阻力。

三、深海商业化采矿尾水尾气绿色低碳再利用新模式

(一) 深海商业化采矿尾水绿色低碳再利用

深海采矿尾水是伴随多金属结核提取到海面船舶的固液混合物, 由底层海水、矿物泥、矿石碎屑等组成。其中, 矿物泥是深海沉积物, 为矿石的自然伴生物和赋存介质。在我国太平洋CC专属勘探区内以粉质土和有机黏土为主, 粒径范围为0.06~76.32 μm , 呈现蜂窝絮凝状结构和片层骨架状结构, 具有高含水率(312%~577%)、高液限、高塑性、低有机质等特性^[22]。特殊的赋存环境以及采矿过程中多金属结核碰撞破碎, 导致尾水矿物泥部分重金属含量超标。本文针对我国太平洋CC专属勘探区(西部区块: 10.1°N, 154.3°W附近)、西北太平洋麦哲伦海山(19.3°N, 153.7°E附近)及西菲律宾盆地(18.0°N, 133.3°E附近)3个典型海洋矿区的尾水矿物泥样品, 开展了系统的重金属含量分析。采用可视化重力活塞式多管取样器在各矿区代表性站位进行采集, 采集得到的沉积物样品呈柱状, 高度约为40 cm, 直径约为12 cm。通过对3个典型矿区样品进行对比分析, 发现不同海域样本在相关参数数值上存在差异, 本文重点对取自西菲律宾盆地多金属结核矿区的尾水矿物泥样品开展研究。样品全盐量参照《土壤检测 第16部分: 土壤水溶性盐总量的测定》(NY/T 1121.16—2006), 采用水浸提-蒸发残渣重量法测定(在液固比为5:1, 25 °C下振荡30 min、静置30 min, 滤液于105 °C烘至恒重); 主要重金属元素含量按照《固体废物金属元素的测定电感耦合等离子体质谱法》(HJ 766—2015)进行测定。研究表明, 西菲律宾盆地矿区的尾水矿物泥样品全盐量高达65.45 g/kg, Cd、Cu含量超出《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)中提及的土壤环境质量要求。总体而言, 鉴于沉积环境、结核破碎、海水混合过程, 尾水矿物泥具有极细粒径、超高含水率、高含盐量、部分重

金属含量超标、低强度等特性, 难以直接利用。因此, 需要对矿物泥进行安全处理, 如脱水除盐、重金属减量。

目前, 高含水率沉积物的脱水减容技术主要包括机械脱水技术、絮凝法、自然干化法、干燥技术、土工管袋脱水技术、搅拌固结法等^[23,24]。其中, 单一自然干化、土工管袋脱水、干燥等技术具有占地面积大、耗时长、存在二次污染等问题, 不适宜在面积有限的海上船舶或者浮动城市使用。而机械脱水技术的主要原理是离心机、带式压滤机等机械设备通过离心力或挤压力脱水, 具有占地面积小、不受天气影响等特点。絮凝法是利用絮凝剂电荷中和作用、架桥作用、网捕-卷扫作用使沉积物絮凝沉降, 从而达到固液分离的脱水目的。常见的絮凝材料有聚合氯化铝(PAC)、聚丙烯酰胺等, 具有成本低、效果好等优势。絮凝剂搭配机械设备脱水等相结合的复合脱水技术, 具有脱水效果好、成本效益高、占地面积小等优势。对取自西菲律宾盆地的尾水矿物泥采用絮凝剂预处理后, 在约1 MPa压力下压滤30 min, 自然晾晒, 可将其含水率降低至38.1%。

尾水矿物泥的高含盐量会造成种植土壤板结、渗透系数低、土壤黏滞, 导致建筑材料化学腐蚀、物理性能劣化和长期耐久性风险等。因此, 矿物泥的除盐是其资源化利用的关键环节。一般来说, 除盐方法有淋洗脱盐、脱水脱盐、植物修复法、电渗析法和离子交换法等^[25]。其中, 植物修复法需要较长时间, 而电渗析法和离子交换法成本偏高。研究将尾水矿物泥塑形成约8 cm×5 cm×5 cm的坯体, 并进行7 d的自然晾晒, 当表面出现大面积盐霜时进行刮除, 并用蒸馏水冲洗, 直至水浑后停止冲洗, 将坯体继续放置在自然环境晾晒, 重复4次; 之后将坯体破碎研磨, 用0.15 g/L的腐殖酸溶液淋滤, 实现进一步高效脱盐。如图2所示, 淋滤法结合脱水脱盐法可以将全盐量从65.45 g/kg降至2.37 g/kg。

矿物泥是重金属污染物的“源”, 在成为原材料流入生产生活的过程中, 一旦环境条件发生变化, 重金属污染物就可能通过解吸、迁移等方式进入食物链中, 影响生物安全和人类健康。重金属减量化技术一般包括固化稳定化技术、化学淋洗技术、生物修复技术^[26]。其中, 生物修复技术耗时长、成本高; 固化稳定化技术和化学淋洗技术具有操作简单、成本低、可降低污染物可溶性等优点。

腐殖酸是天然有机质的重要组成部分，可以提供丰富的官能团作为结合位点，与多种重金属离子发生离子交换、络合与螯合反应，影响着重金属的赋存形态和生物可利用性^[27,28]；同时，提供酸性环境，促进金属阳离子的解吸附过程。采用腐殖酸淋洗，可以使矿物泥中的重金属解吸到液相，从而达到清洁矿物泥的目的^[29,30]。如图2所示，淋洗法可以将深海矿物泥中超标的Cd降至土壤环境质量标准以内。上述矿物泥经脱水、除盐及重金属淋洗等处理工艺后，产生的废水需安全处理，处理后的水质严格满足相应国家和行业等标准，如《海水水质标准》（GB 3097—1997）中的一级标准、《污水海洋处置工程污染控制标准》（GB 18486—2001）要求，Cd、Cu等重金属浓度均优于限值，并通过排放速率控制，使海域盐度波动维持在背景值±5%内，从源头避免二次生态污染。经安全处理后的尾水矿物泥摆脱了原有“尾水排海”的传统处置模式，可以作为一种新型资源，同工业废弃污染物（如陆域垃圾、选冶矿渣、沿海疏浚土等）一样，作为其他工业产品原料重新进入产业体系^[7]，如重新流入岛礁人工土壤、绿色建材等制备环节，替代大宗砂石土材料，减少对陆域开采和跨洋运输的依赖，显著降低工程成本；还可作为日化用品的功能粉体原料，为高附加值产品开发提供新的矿物来源。

尾水矿物泥再利用模式特别契合深海采矿作业区与周边岛国的地理格局。多数南太平洋岛国存在海水上涨、土地贫瘠、可耕地有限、建材短缺且运输成本高等瓶颈，而矿区与岛屿之间距离近、海上物流通道畅通，使尾水矿物泥在区域内循环利用具

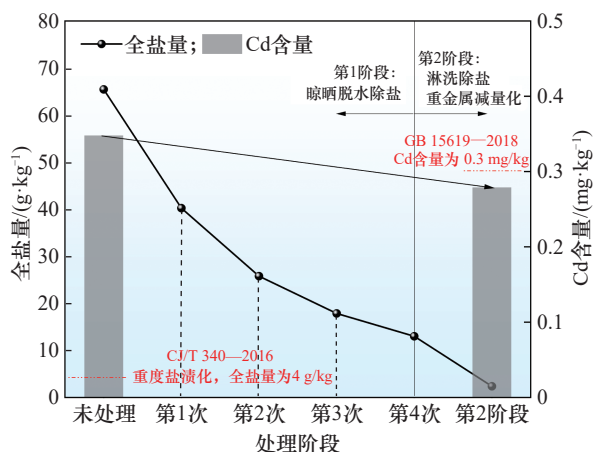


图2 尾水矿物泥安全处理结果

有独特优势。通过将矿区产生的大量尾水矿物泥转化为岛礁人工土壤、岛礁建材、功能材料以及日化用品原料，不仅可以为岛国农业增产、基础设施建设和产业多元化提供稳定的外源物料来源，还可以形成“深海采矿—尾水处理—区域消纳”的闭环利用体系。

(二) 深海商业化采矿尾气低碳封存与利用

深海采矿作业过程高度依赖能源消耗，属于典型的高碳排放活动，若不加以控制，将与当前全球绿色低碳发展趋势严重背离。尾气中的CO₂作为主要温室气体，需进行有效处理与封存。相比陆地环境，深海具备高压、低温、稳定且封闭性强的天然条件，极其适合开展基于水合物法的CO₂封存，为此，本研究提出在采矿船上集成CCUS技术。采矿母船在执行矿物采集与提升作业的同时，同步开展动力系统尾气的CO₂捕集与压缩处理；CO₂经压缩调控后，通过立管输送至海底，封存点择优布局于矿区外围或采空区，实现采矿与碳封存的无干扰协同作业；注入后，CO₂在高压低温环境中转化为稳定水合物，从而实现安全、长期的深海碳封存。部分富集CO₂还可用于船上小规模利用，如消防系统、海水淡化酸度调节、合成燃料、CO₂射流采集等过程，形成“封存为主、利用为辅”的碳资源化路径。碳封存量的逐步积累还能形成可核算的碳减排收益，为采矿企业带来碳配额和经济回报，进一步提升深海采矿的商业化可行性。

综上，本研究以深海采矿绿色发展为切入点，提出深海采矿尾水尾气绿色低碳再利用新模式（见图1）。该模式主要包括尾水矿物泥绿色再利用和尾气碳封存与低碳利用，突破了传统尾水尾气末端治理的局限，从根源上解决中水羽流、尾气污染问题（见图3）。此外，尾水矿物泥再利用可以支撑海上浮动城市、岛礁开发与建设，促进深海矿物基日化产品研发，提高深海采矿产业的资源循环和经济效益。同时，借助深海环境优势，实现CO₂有效封存并加以利用，显著降低温室气体排放。此模式将环境保护、资源回收与经济效益有机融合，解决了制约深海采矿商业化的核心环境问题，也提升了深海采矿产业的绿色竞争力，为推动深海采矿向规模化与商业化迈进提供了关键技术路径，并为全球海洋资源开发与碳中和目标实现提供了具有示范意义的新范式。

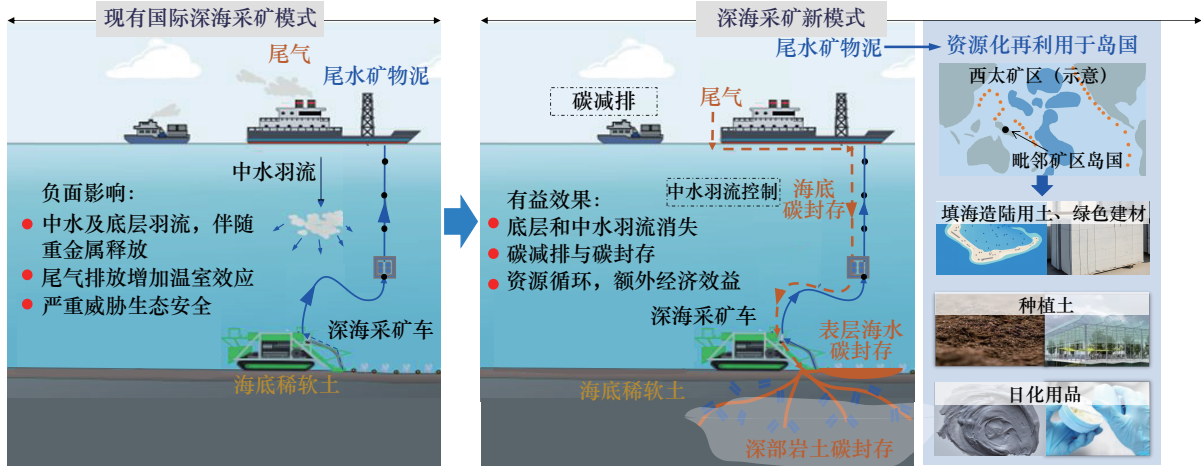


图3 深海采矿现有商采模式与绿色低碳新模式对比图

四、深海商业化采矿尾水尾气绿色低碳利用途径

(一) 支持岛国农业发展

南太平洋岛国普遍存在土地肥力低、盐分高、可耕地面积有限、作物种类单一等问题，农业体系脆弱。深海采矿活动每年会产生大量尾水矿物泥，这类固体物料经科学处理后具有作为土壤改良剂的潜力，可为岛国农业提供稳定的外源资源。尾水矿物泥在用于农业前需进行好氧堆肥，通过微生物降解其中的有机成分并促进腐殖化^[31]，提高养分有效性。堆肥产物与当地土壤按比例混合后，可提升土壤有机质、铵态氮、有效磷和速效钾等关键养分水平，从而改善土壤肥力。此外，尾水矿物泥具有较大比表面积和良好离子交换能力，有利于养分吸附与缓释。堆肥产物与岛礁土壤混合后，可提高土壤养分含量、降低干密度、增加孔隙度，改善通气性与透水性，显著优化根际环境。针对深海采矿尾水矿物泥，本研究开展了协同堆肥与人工土壤配比实验，如图4所示。以岛礁有机废弃物为辅料，通过设置不同质量比（尾水矿物泥：辅料为1：1.55~1：2）进行好氧堆肥，筛选出腐熟度最优的堆肥产物；随后，基于梯度掺配法，设计不同配比的人工土壤。实验表明，当岛礁原土与堆肥产物质量比为7：3时，可制备出密度约为1.08 g/cm³、理化性质优良的岛礁人工种植土壤。之后，可根据改良土壤的特性开展作物生长调控，选择更适应当地生态条件的作物种类。

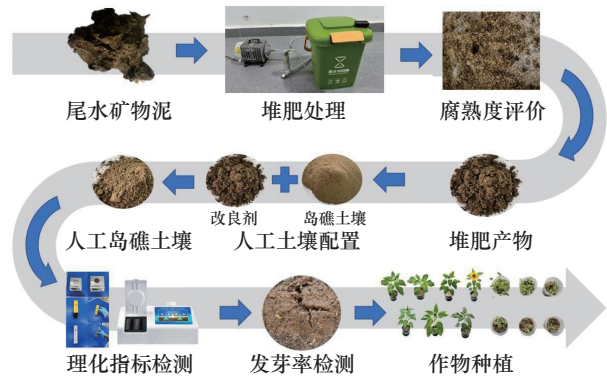


图4 尾水矿物泥在农业种植中的应用路径

南太平洋岛国属于热带雨林或热带海洋气候，常年的高温条件（26~33℃）有利于好氧堆肥，并可缩短腐熟周期。当地农业主要依赖芋头、木薯、椰子等传统作物^[32]，生产过程中产生的高有机质废弃物可作为堆肥辅料。同时，由于耕作技术落后、土壤盐分高、适宜作物有限等因素，农业产量偏低，对土壤改良和作物优化种植的需求迫切。因此，将尾水矿物泥资源化后用于南太平洋岛国发展农业，既充分利用了岛国毗邻深海采矿区的天然地缘优势，可通过短距离运输将脱盐矿物泥输送至矿区附近岛礁国家，又规避了长途回运带来的高昂成本。针对岛国特殊的“习惯法土地所有制”且自给自足或半自给自足农业占据主导地位的现状，将矿物泥制备成可直接铺设用于种植、无需依赖复杂农业设施或专业种植技术的“全营养即用型人工土壤”，不仅适配当地基础的农业技术水平，更能有

效解决岛民“有地无土”的难题。

目前，关于深海采矿与深远海岛礁农业种植协同发展的研究尚属空白，缺乏可靠的工程化应用方案。本研究首次提出“深海采矿-尾水矿物泥堆肥-人工土壤制备-农业种植”协同作业模式，实现尾水矿物泥的绿色再利用与深远海岛国农业发展的双重收益。相较于传统排海方式，此协同作业模式将尾水矿物泥通过堆肥转化为土壤改良剂，再与岛礁土壤科学配比得到岛礁人工种植土壤，用于提升作物产量并筛选适宜作物。基于典型商业采矿规模（年产结核约 $3 \times 10^6 \text{ t}^{[33]}$ ，提升尾水矿物泥约 $8.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，即尾水矿物泥总质量约为 $1.044 \times 10^7 \text{ t}$ 的量级分析结果），此协同作业模式每年至多可制备农业用土约 $8.874 \times 10^7 \text{ t}$ （折合体积约为 $8.217 \times 10^7 \text{ m}^3$ ），可在满足岛礁农业种植需求的同时，实现尾水矿物泥的规模化消纳。如图5所示，相比传统尾水直排或陆域土壤远距离运输方案，“深海采矿-尾水矿物泥堆肥-人工土壤制备-农业种植”协同作业模式在资源效率、环境效益和综合成本方面具有明显优势。

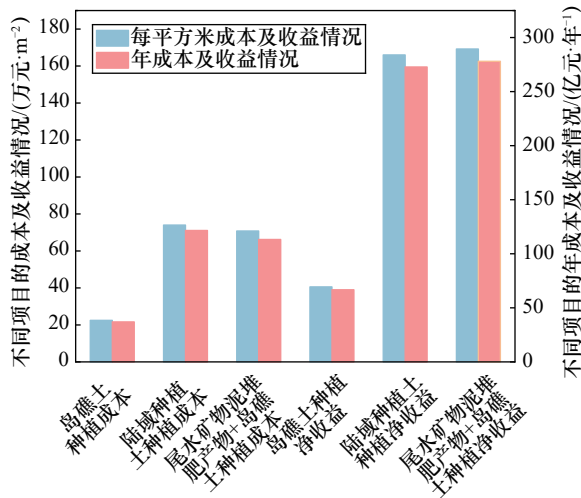


图5 岛礁农业不同土壤改良方案的技术经济性对比

(二) 岛礁绿色建材制备

岛礁绿色建材模式指以深海采矿产生的尾水矿物泥为核心，协同高炉矿渣（GGBS）与钢渣（SS）等工业固体废弃物^[34]，通过碱激发等胶凝机制，制备符合工程性能要求的岛礁绿色建筑材料。此模式突破了传统建材对天然资源的依赖^[35]，形成了集“中水羽流防控-固废资源转化-结构材料制备”为一体的绿色闭环路径；以减量化、无害化、资源化为目标，推动深海采矿尾水由“原位直排”向“源头预防”转变，有效填补了深远海岛礁绿色低碳材料体系的空白^[36]。

岛礁绿色建材模式在岛礁防护砌块、海洋地基加固及漂浮建筑构件等领域应用潜力巨大^[37,38]。如图6和表1所示，尾水矿物泥在碱激发条件下，内部活性硅铝组分部分溶解并与激发剂发生聚合反应，生成以C-(A)-S-H与N-A-S-H凝胶为主的胶结

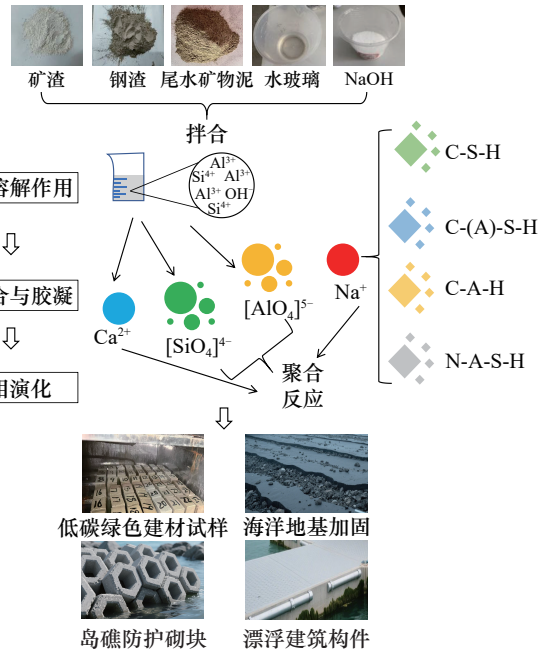


图6 碱激发尾水矿物泥的反应机理与应用途径

表1 深海采矿尾水泥应用途径汇总

应用场景	材料性能指标	工程 / 功能效益
岛礁防护砌块	抗压强度 $\geq 30 \text{ MPa}$ ，耐盐雾、耐海浪冲蚀	延长服役寿命2~3倍，提升岛礁边缘结构的抗冲刷能力
海洋地基加固	注浆固结层抗压强度 $\geq 25 \text{ MPa}$	提高深海平台、漂浮结构的基础稳定性与承载力
漂浮建筑构件	轻质、隔声、抗湿；墙体密度 $\leq 1.8 \text{ g/cm}^3$	实现轻质、隔声、抗湿的多功能墙体部件
陶瓷材料制备	烧结温度降低至 $950\sim 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ ，抗折强度 $\geq 18 \text{ MPa}$	替代部分高铝原料，适用于吸水率 $\leq 10\%$ 的工程陶瓷产品

相，构建致密骨架结构，实现尾水泥的固化与强度发展。岛礁绿色建材体系不仅具备优良的力学强度和耐腐蚀性能，还可以依据不同工程环境需求开展定向配比优化与功能化设计，为极端海洋环境下的结构构建提供绿色、可持续的材料解决方案。

如图7所示，在陶瓷材料制备方面，尾水矿物泥在经过干燥、细磨与脱杂处理后，具备一定的铝硅比和烧结活性，可作为部分高铝矿物原料的绿色替代来源。研究表明，在控制烧结温度为950~1450℃条件下，尾水矿物泥基陶瓷材料可稳定形成致密的烧结体，抗折强度可达18 MPa以上，满足吸水率≤10%的工程陶瓷应用要求，具备良好的结构稳定性与尺寸稳定性。此外，尾水矿物泥中的硅铝相和少量金属氧化物在烧结过程中可形成复合矿相结构，有助于陶瓷制品耐酸碱、抗风化性能的提升^[39]。相较于传统陶瓷原料体系，该材料体系可显著降低高温烧结过程中的能源消耗，减少碳排放，提高固体废弃物资源的综合利用率。

如图8所示，围绕外掺尾水矿物泥岛礁胶凝建材体系，可以采用单因素梯度替代法进行配比优化。以GGBS：SS=4：1为基准体系，设置尾水矿物泥外掺量梯度（10%~60%），固定液胶比为0.6，采用1.6模数的复合碱激发剂。在试件成型后，分别置于标准环境和盐渍侵蚀环境中进行养护。研究表明，当采用质量比为GGBS：SS：尾水矿物泥=8：2：2的配比方案时，制备的建材28 d抗压强度

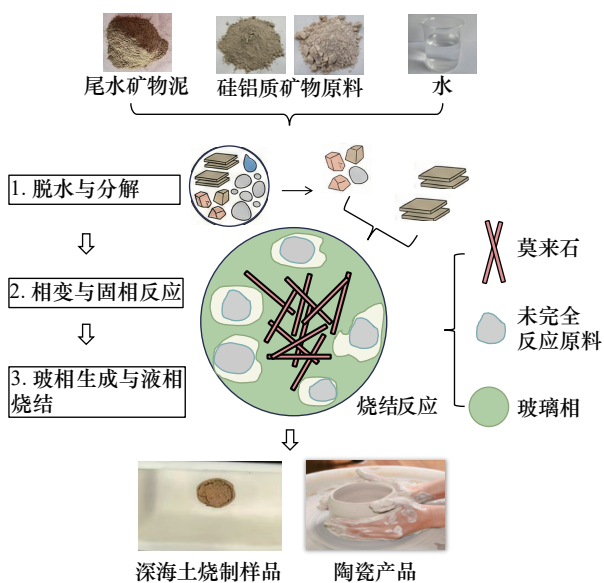


图7 陶瓷材料反应机理与应用途径

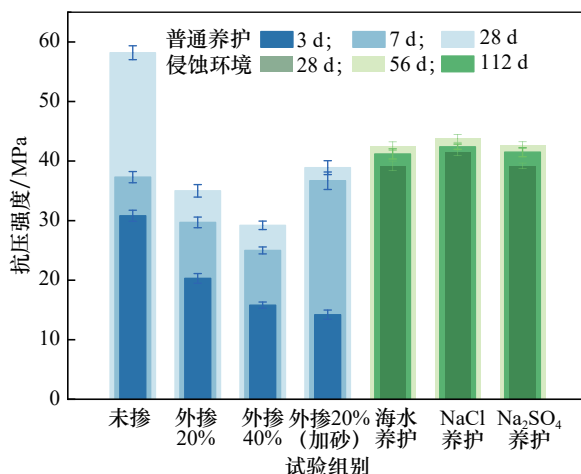


图8 深海采矿尾水泥基绿色胶凝材料抗压强度测试

可达35 MPa，满足中强度结构建材的工程应用需求^[40]。若在GGBS：SS：尾水矿物泥=8：2：4的配比下，可在强度保证要求的前提下，进一步提升尾水矿物泥的利用率。扫描电子显微镜（SEM）分析证实，反应生成的凝胶产物有效优化了孔隙结构。为进一步探究加入骨料后的力学表现，在GGBS：SS：尾水矿物泥=8：2：2的基础上引入标准砂，其抗压强度得到了进一步提升。更关键的是，该砂浆试件在海水、NaCl与Na₂SO₄等侵蚀环境下进行养护后，抗压强度仍保持在39 MPa以上，验证了其在复杂海洋服役环境下的优异耐久性。

岛礁绿色建材模式在提升深远海岛礁基础设施耐久性与功能性方面具有重要战略意义。它不仅能显著增强岛礁构筑物的抗风浪与抗腐蚀能力，还能有效解决深远海岛礁工程“无材可用”及海平面上升带来的防护难题。对于巴布亚新几内亚、图瓦卢等资源富集但气候脆弱的岛国，此模式可为其提供环境友好且资源高效的本地化建材解决方案。作为一种绿色技术范式，岛礁绿色建材模式在推动国际海洋治理、促进资源共享及技术输出方面具有广阔的发展前景。

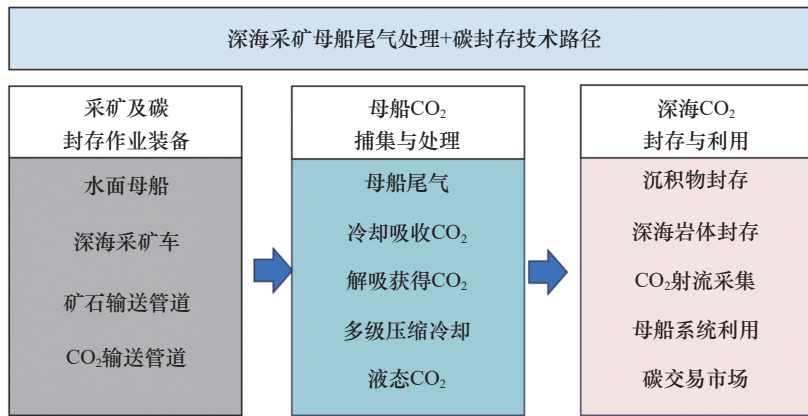
（三）采矿母船尾气封存与利用

深海采矿母船在长周期商采过程中会持续排放大量尾气，尾气中的CO₂将对全球气候变化构成潜在影响。在深海采矿作业的同时开展海洋碳封存，对母船尾气中的CO₂进行捕集与封存，可有效降低深海采矿活动对大气环境的影响，为高碳排行业实

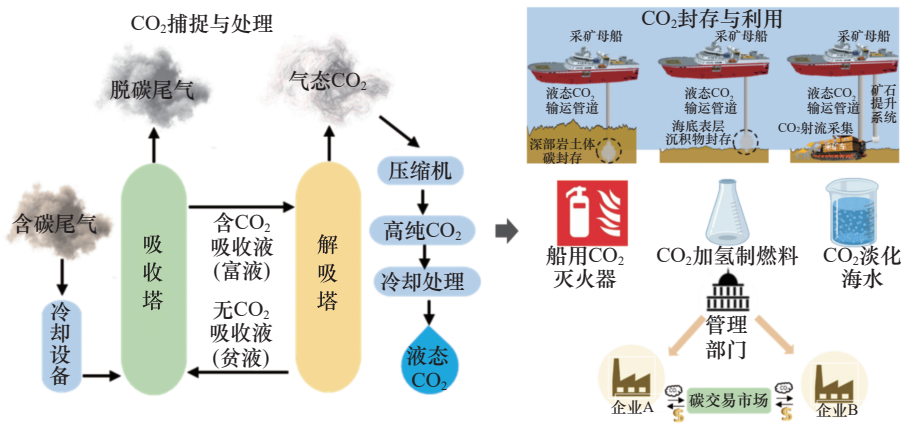
现近零排放提供可行路径。海洋碳封存方法主要有间接法和直接法两种，前者通过向上层海域投放营养物质以促进浮游植物等海洋生物的生产，从而吸收大气中的CO₂；后者则是将工业源捕集所得的相对纯净的CO₂注入深海水体或深部地层中。相较而言，直接法在封存位置、封存规模以及长期可控性方面具有更明确的工程边界条件，更具备开展工程化示范与规模化应用的潜力^[41]。直接法通常利用水面船舶，将从碳排放工业源捕集的高纯度CO₂携带至指定区域，通过管道输送直接注入至深度超3000 m的海底^[42]。直接碳封存作业水深与深海多金属结核的赋存区域（4000~6000 m）水深有高度的重复性^[43]，因此，将CO₂直接注入与深海采矿作业系统相结合，在技术实现层面展现出较强的可行性和应用潜力。

如图9所示，在深海采矿母船尾气处理与碳封存一体化模式中，采矿母船可作为CO₂捕集平台。

考虑到尾气组分复杂性，首先要通过预处理工艺，去除SO_x、NO_x、PM等杂质，避免对碳捕集系统造成腐蚀或带来吸附剂中毒。因此，可以借鉴燃煤电厂烟气捕集技术，通过化学吸附等方法对尾气中的CO₂进行高效捕集分离^[44,45]。采矿母船尾气经净化和冷却后，利用吸收剂将CO₂选择性分离并富集，通过热交换和升温过程释放出高纯度CO₂气体。解吸得到的CO₂经过多级压缩和干燥除水后进入冷却环节，最终被转化为具备高压输送稳定性的液态形态。随后，液态CO₂通过专用输送管道，沿采矿母船脐带缆及矿石输运路径输送至海底，并依托采矿系统的钻探作业能力，将其直接注入矿区及周边海域的沉积层、砂岩孔隙带或玄武岩裂隙等适宜地质构造中，从而实现高压条件下的稳定封存。需要指出的是，上述捕集、压缩与液化过程在船载条件下对能源供给与系统集成提出了更高要求，其整体能效和经济性仍是制约大规模应用的关键因素之一，



(a) 流程图



(b) 示意图

图9 深海采矿母船尾气处理与碳封存新模式

但随着船用能源系统的不断发展，有望实现具有逐步优化的现实路径。

在满足封存需求的同时，为提升系统整体利用效率并降低初期示范阶段的运行成本，部分富集CO₂亦可用于船上系统的小规模资源化利用，如补充船用CO₂灭火系统、参与合成燃料的加氢过程，或作为海水淡化工艺中的酸度调节介质，为船舶系统提供辅助性的碳循环途径。此外，CO₂捕集与封存量的逐步累积还能形成可量化的减排收益，在国际碳减排机制逐步完善的背景下，有望使采矿母船、采矿企业在区域或国际碳交易市场中获得相应的碳配额与碳额度，带来一定的经济激励效应。需要指出的是，任何工程碳封存技术均伴随不确定性，在国际监管与治理框架范围内，深海碳封存在CO₂水合物稳定性、注入地层稳定性、对深海生物环境影响等方面有待进一步深入研究。总体而言，采矿母船尾气封存与利用不仅使得深海资源开采与碳封存过程在空间和时间上高度协同，有效减少了作业设备和能源重复配置，提升了系统整体运行效率，同时为海洋工程系统向低碳转型提供了可推广的技术方案。尤其是在深海高压、低温环境下，CO₂的物理稳定性增强，迁移与泄漏的风险相对较低，部分区域还具备促进矿化反应的天然条件，有助于提高封存的长期安全性。

（四）日化用品研发

深海尾水矿物泥在日化用品领域，特别是硅藻泥型化妆品中的潜在应用正引起关注。由于深海尾水矿物泥中富含硅、铝、镁、铁等元素，并具有类似天然黏土矿物的微观片状结构和比表面积。深海尾水矿物泥经无机脱杂与表面改性处理后，表现出良好的吸附性、遮盖性与亲肤性能，可作为功能型粉体原料用于多类型化妆品的载体基质。研究发现，经微波活化或低温焙烧后的深海尾水矿物泥颗粒可形成多孔结构，具有与硅藻土类似的孔隙率与吸附性能^[46]，具有皮肤油脂吸附与杂质清除功能。同时，通过与高岭土、膨润土等天然矿物粉体复配，深海尾水矿物泥在化妆品体系中可提供一定的矿物微量元素释放能力，具备温和清洁、轻度磨砂与皮肤调理等多重功效。对于深海尾水矿物泥的pH稳定性与重金属控制，可以通过精细分级和改性处理，从而满足化妆品行业标准。

相比传统硅藻土，利用深海尾水矿物泥用于制备日化用品，不仅能缓解高品质天然矿物资源的紧缺问题，还具备显著的成本与环保优势。将尾水利用延伸至高附加值功能材料领域，完善了从岛礁建材、岛礁农业种植到日化产品的全价值链体系，为深海资源的全生命周期利用提供了新突破。

五、深海商业化采矿尾水尾气绿色低碳利用的技术发展方向

深海商采尾水尾气绿色低碳利用的发展路径可概括为：以资源化理论与环境约束机制为基础、以关键装备与工艺体系构建为核心、以区域消纳与工程化应用为落脚点，通过深化尾水矿物泥物质特性、CO₂深海封存过程等基础研究，推动高效安全处理装备、船载碳捕集系统与深海注封技术的集成化开发。构建面向岛礁农业、岛礁绿色建材、日化用品等多场景的资源化利用体系，强化全过程环境监测、碳足迹追踪和生态风险评估，实现从小规模试验验证、工程示范到体系化推广的技术递进演化。通过源头减排、过程稳定与末端价值化协同推进，逐步形成一套支撑深海采矿绿色、低碳、规模化发展的全流程技术体系。深海商采尾水尾气绿色低碳利用的技术发展方向具体如下。

（一）以大规模商采为目标的矿物泥安全处理体系

针对深海采矿尾水矿物泥高含水率、高盐、重金属含量超标等问题，重点研究高效絮凝压滤脱水技术、淋滤除盐技术、重金属稳定技术，实现矿物泥脱水除盐、重金属减量化。围绕岛礁农业种植、岛礁绿色建材、陶瓷、化妆品等矿物泥再利用方向，探究矿物泥再利用产品的浸出特性，评估其长期环境影响。围绕矿物泥安全处理过程中的废水等废弃物，开展试点排放并评估环境影响。针对商采，结合成本效益分析与环境效益分析，制定大规模矿物泥絮凝脱水除盐、重金属稳定化方案，研发集成化、高效化安全处理装备，实现大规模矿物泥的安全处理。

（二）深海采矿与岛礁农业种植协同发展

依托尾水矿物泥的颗粒结构优势与岛礁有机废

弃物的高养分特性,发展协同堆肥与人工土壤制备技术,使其具备良好的保水性、通透性和养分缓释能力,从而构建适宜热带作物生长的土壤环境。人工土壤在改善耕层结构、降低盐分与提升肥力方面表现出的综合效应,有助于提高岛礁农业的生产稳定性,并减轻淡水和外源化肥依赖。农业对尾水矿物泥的吸纳将进一步减少采矿尾水的排放压力,使两者在资源利用效率、生态环境保护与降本增效方面形成正向联动,推动形成集人工土壤制备、农业生产和农产品加工于一体的区域化产业链。

(三) 适用于岛礁环境的绿色建材制备技术

未来,绿色建材研发应聚焦于深海尾水矿物泥与多类工业固体废弃物的胶凝反应机制、颗粒级配演化及界面结构调控等基础科学问题,构建适用于高盐、高湿、腐蚀性强等海洋极端环境的多尺度材料设计理论。通过系统解析矿物泥中的硅铝铁体系与活性组分的相互作用机理,推动海洋固废化、功能化和高耐久性建材的开发。在工艺层面,应推进碱激发、微波活化、低温固化等低碳制备工艺的产业化,构建面向海洋工程的材料服役数据库。结合物联网与人工智能技术,发展结构健康监测、性能预测与寿命评估体系,形成适用于岛礁长期服役环境的智能化绿色建材全生命周期管理技术。

陶瓷技术的核心发展方向在于构建低温、高致密度、高功能化的深海尾水陶瓷制备体系。未来,应深化“尾水矿物泥矿物组成-烧结行为耦合机制”研究,发展低温烧结助剂、可控晶相结构调控与烧结动力学调节方法,实现节能制备与力学性能、抗腐蚀性能的协同提升。在功能陶瓷方面,应面向海洋特殊环境需求,开展抗腐蚀、耐磨损、自修复、屏蔽与吸附等多功能复合陶瓷的结构设计及界面工程研究,构建材料多场耦合响应调控技术。与此同时,建立从尾水矿物泥预处理、陶瓷基体调配、成型与烧结到检测评价与工程化应用的完整绿色陶瓷产业链技术体系,实现标准化、模块化与规模化发展。

(四) 尾气处理与碳封存一体化技术

未来,围绕深海采矿母船尾气处理与碳封存的一体化路径,相关关键技术的发展主要集中在5个方面。① 碳捕集与净化工艺需进一步适配船载环

境,通过小型化、模块化设计,提升系统在空间、重量及运行稳定性方面的适应能力,尤其是需要增强对高盐高湿尾气中 CO_2 的选择性捕集效率。② 在深海高压、低温环境下, CO_2 相态控制和高密度输送对工艺连续性与封存效率至关重要,未来需发展低能耗的多级压缩、深冷液化及高压管输技术,确保液态或超临界 CO_2 在长距离输送中的物理稳定性。③ 深海地质构造复杂多变,封存区域的识别与评估需结合沉积层、砂岩孔隙及玄武岩裂隙等不同类型构造的渗透性与封存能力特征,需发展多尺度耦合模拟与数据反演技术,提升封存选址的科学性。④ 采矿系统与封存系统在时间节奏、能源使用与输送路径上高度耦合,亟需构建协同调控机制,实现多系统高效协同运行。⑤ CO_2 封存过程具有较强的隐蔽性与长期性,需部署深海适应性的智能监测系统,集成多源传感、环境响应识别与风险预警功能,以实现全过程动态评估与生态安全保障。整体而言,“深海采矿-碳封存”一体化路径的未来技术发展,将以高集成度、强适应性与智能管控为核心目标,推动高碳排放作业系统向绿色低碳深海工程模式转型。

(五) 高质量尾水矿物泥日化用品制备技术

日化用品作为尾水矿物泥应用的重要延伸方向,其技术突破需聚焦于尾水矿物粉体的表面化学改性、纳米结构调控与复配界面构建。应发展精细化粉体改性技术,提高其分散性、稳定性与生物相容性,构建满足化妆品行业对安全性、亲肤性及功能性的高质量原料体系。在安全性方面,亟需建立规范化的毒理学评估、金属元素迁移评价、皮肤相容性与功能验证体系,与国际标准体系实现接轨。在材料设计方面,通过与天然矿物粉体、高分子基体的协同复合,发展控油吸附、杂质捕获、矿物修护等功能材料。

六、结语

本文围绕深海采矿商业化开发面临的中水直排羽流污染与高碳排放两大核心环境瓶颈,立足典型矿区尾水矿物泥与采矿母船尾气的来源特征,提出了一种“源头控制-过程转化-协同利用”的绿色低碳利用新模式。研究识别了现有“采后直排”模

式的生态痛点，构建了“高效絮凝-压滤脱水-淋滤除盐-重金属稳定化”的尾水安全处理体系，以及船载碳捕集与深海地质封存一体化技术路径。此模式打破了传统末端治理的局限，实现了尾水矿物泥向岛礁农业用土、岛礁绿色建材、日化用品原料的资源化利用，以及尾气碳排放的深海封存与利用，降低了废弃物的处理成本，增加了经济效益，有效缓解了岛礁建设中“无材可用、有地无土”的发展瓶颈，为破解深海商采的环境制约、构建“深海采矿-资源转化-产业协同”的循环经济体系提供了技术指引。

展望未来，深海商采尾水尾气资源化技术走向规模化应用仍面临诸多挑战。一方面，应从产业化与应用场景出发，针对不同海域及矿物种类尾水矿物泥理化特性的差异，研发具有适配性的处理与改性工艺；统筹资源化路径与区域条件的匹配性，突破深远海岛礁运输受限、日化产品毒理安全评价及标准衔接等瓶颈。另一方面，深入解析“深海采矿-碳封存”协同作业流程及关键装备强腐蚀、高水压条件下服役可靠性，系统评估潜在环境风险。针对商业化开发面临的经济不确定性，需加强对产量波动、市场价格及国际合作政策等关键变量的敏感性分析，构建基于商采动态工况的经济效益评估体系。进一步，通过多类型工程示范与跨区域技术验证，主动对接ISA治理体系，探索关键技术支撑下的国际标准协同与监管规则演进路径，为全球深海资源的绿色、低碳、可持续商采提供科学与技术支撑。

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: December 2, 2025; **Revised date:** January 30, 2026

Corresponding author: Chen Xuguang is a professor from the College of Engineering, Ocean University of China. His major research field is deep-sea mining engineering. E-mail: chenxuguang1984@ouc.edu.cn

Funding project: The National Natural Science Foundation of China (NSFC) Young Scientists Fund Project (Category A) (52225107); The National Natural Science Foundation of China Projects (U25A6020, U1906234); Fundamental Research Funds for the Central Universities (202442004); Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of Underwater Engineering Technology Equipment and Industry Chain” (2023-XZ-32)

参考文献

[1] Miller K A, Thompson K F, Johnston P, et al. An overview of sea-

bed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 4: 418.

[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] 沈义俊, 陈敏芳, 杜燕连, 等. 深海矿物资源开发系统关键力学问题及技术挑战 [J]. *力学与实践*, 2022, 44(5): 1005-1020.

Shen Y J, Chen M F, Du Y L, et al. Key mechanical issues and technical challenges of deep-sea mining development system [J]. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(5): 1005-1020.

[4] 王淑玲, 白凤龙, 黄文星, 等. 世界大洋金属矿产资源勘查开发现状及问题 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(3): 160-170.

Wang S L, Bai F L, Huang W X, et al. Current status and problems of exploration and development of world ocean metal mineral resources [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(3): 160-170.

[5] Oebius H U, Becker H J, Rolinski S, et al. Parametrization and evaluation of marine environmental impacts produced by deep-sea manganese nodule mining [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(17/18): 3453-3467.

[6] 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.

[7] Sharma R. *Deep-sea mining: Current status and future considerations* [M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.

[8] Levin L A, Amon D J, Lily H. Challenges to the sustainability of deep-seabed mining [J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(10): 784-794.

[9] Vonnahme T R, Molari M, Janssen F, et al. Effects of a deep-sea mining experiment on seafloor microbial communities and functions after 26 years [J]. *Science Advances*, 2020, 6(18): eaaz5922.

[10] 陈旭光, 栾鲁宝, 张宁, 等. 深海多金属结核采矿车与底质相互作用机制及其环境影响研究进展 [J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(6): 1173-1190.

Chen X G, Luan L B, Zhang N, et al. A review on interacting mechanisms of the deep sea mining vehicle-the marine sediment and its environmental effects [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(6): 1173-1190.

[11] 康妮娟, 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.

[12] 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.

[13] Nishi Y. Determining the grounding length of an axially moving

- cable in a two-ship continuous line bucket system [J]. *Applied Ocean Research*, 2013, 40: 42–49.
- [14] 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.
- [15] 丁忠军, 孙永福, 高伟, 等. 深海采矿潜在环境影响因素及监测技术体系研究 [J]. *海洋开发与管理*, 2021, 38(7): 73–83.
Ding Z J, Sun Y F, Gao W, et al. Study on potential environmental impact factors and monitoring technology system of deep-sea mining [J]. *Ocean Development and Management*, 2021, 38(7): 73–83.
- [16] Weaver P P E, Aguzzi J, Boschen-Rose R E, et al. Assessing plume impacts caused by polymetallic nodule mining vehicles [J]. *Marine Policy*, 2022, 139: 105011.
- [17] Ouillon R, Muñoz-Royo C, Alford M H, et al. Advection-diffusion-settling of deep-sea mining sediment plumes. Part 1: Midwater plumes [J]. *Flow*, 2022, 2: E22.
- [18] Szeligowska M, Trudnowska E, Boehnke R, et al. Dark plumes of glacial meltwater affect vertical distribution of zooplankton in the Arctic [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 17953.
- [19] Dijkstra J A, Mello K, Sowers D, et al. Fine-scale mapping of deep-sea habitat-forming species densities reveals taxonomic specific environmental drivers [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2021, 30(6): 1286–1298.
- [20] 王翠, 丁一, 罗阳, 等. 深海采矿沉积物羽流环境影响研究现状与展望 [J]. *应用海洋学学报*, 2024, 43(3): 473–484.
Wang C, Ding Y, Luo Y, et al. Status and perspectives of environmental impact studies on deep-sea mining sediment plumes [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2024, 43(3): 473–484.
- [21] Le Berre L, Temime-Roussel B, Lanzafame G M, et al. Measurement report: In-depth characterization of ship emissions during operations in a Mediterranean port [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2025, 25(12): 6575–6605.
- [22] 马雯波, 饶秋华, 吴鸿云, 等. 深海稀软底质土宏观性能与显微结构分析 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(6): 1641–1646.
Ma W B, Rao Q H, Wu H Y, et al. Macroscopic properties and microstructure analyses of deep-sea sediment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1641–1646.
- [23] 张景辉. 湖库重金属污染底泥安全处置成套技术开发及工程应用 [D]. 天津: 天津大学 (博士学位论文), 2017.
Zhang J H. Development and large scale application of the key techniques for the treatment of lake sediments contaminated by heavy metals [D] Tianjin: Tianjin University (Doctoral dissertation), 2017.
- [24] 王远东. 无机矿物絮凝剂对疏浚底泥絮凝快速分离的研究 [D]. 天津: 天津科技大学 (硕士学位论文), 2021.
Wang Y D. Study on rapid separation of dredged sediment by inorganic mineral flocculant [D] Tianjin: Tianjin University of Science and Technology (Master's thesis), 2021.
- [25] 于阳. 泥质滨海盐渍土快速脱盐改良剂的筛选研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学 (硕士学位论文), 2015.
Yu Y. Screening of amendments for quick desalination of heavy-textured coastal saline soil [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University (Master's thesis), 2015.
- [26] Xu L, Zhao F F, Xing X Y, et al. A review on remediation technology and the remediation evaluation of heavy metal-contaminated soils [J]. *Toxics*, 2024, 12(12): 897.
- [27] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响 [J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2011, 34(4): 82–87.
Sun H, Tan C Y, Huang D Y, et al. Effects of soil organic matter on the accumulation availability and chemical speciation of heavy metal [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2011, 34(4): 82–87.
- [28] Bertin C, Bourg A C M. Trends in the heavy metal content (Cd, Pb, Zn) of river sediments in the drainage basin of smelting activities [J]. *Water Research*, 1995, 29(7): 1729–1736.
- [29] Eggleton J, Thomas K V. A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events [J]. *Environment International*, 2004, 30(7): 973–980.
- [30] Jain C K, Sharma M K. Adsorption of cadmium on bed sediments of river hindon: Adsorption models and kinetics [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 137(1/2/3/4): 358515.
- [31] 陈俊, 陈同斌, 高定, 等. 城市污泥好氧发酵处理技术现状与对策 [J]. *中国给水排水*, 2012, 28(11): 105–108.
Chen J, Chen T B, Gao D, et al. Current status and countermeasures of aerobic fermentation technologies for sewage sludge treatment in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(11): 105–108.
- [32] 邹轶, 彭英, 亢志华, 等. 加强江苏与太平洋岛国农业领域交流合作的对策 [J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(21): 275–279.
Zou Y, Peng Y, Kang Z H, et al. Suggestions for strengthening agricultural exchanges and cooperation between Jiangsu and Pacific Island countries [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(21): 275–279.
- [33] 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.
- [34] 戴蕾, 李战国, 黄新. 利用工业废渣制备软土固化剂的可行性探讨 [J]. *中国工程科学*, 2010, 12(3): 56–60.
Dai L, Li Z G, Huang X. Feasibility of soil stabilizer production with industrial wastes [J]. *Strategic Study of CAE*, 2010, 12(3): 56–60.
- [35] 蔡嗣经, 杨鹏. 金属矿山尾矿问题及其综合利用与治理 [J]. *中国工程科学*, 2000, 2(4): 89–92.
Cai S J, Yang P. Tailings problems and tailings utilization and treatments in the metal mines [J]. *Strategic Study of CAE*, 2000, 2(4): 89–92.
- [36] 罗时明, 焦依, 王琳, 等. 深海采矿尾水羽流状流扩散的数值模拟 [J]. *船舶工程*, 2023, 45(8): 159–163, 181.
Luo S M, Jiao N, Wang L, et al. Numerical simulation of plume diffusion in deep-sea mining tailwater [J]. *Ship Engineering*, 2023, 45(8): 159–163, 181.
- [37] 顾晓薇, 张延年, 张伟峰, 等. 大宗工业固废高值建材化利用研究现状与展望 [J]. *金属矿山*, 2022 (1): 2–13.
Gu X W, Zhang Y N, Zhang W F, et al. Research status and pros-

- pect of high value building materials utilization of bulk industrial solid waste [J]. *Metal Mine*, 2022 (1): 2–13.
- [38] 王晓丽, 李秋义, 陈帅超, 等. 工业固体废弃物在新型建材领域中的应用研究与展望 [J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(11): 3456–3464.
- Wang X L, Li Q Y, Chen S C, et al. Application research and prospect of industrial solid waste in new building materials [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(11): 3456–3464.
- [39] Liu Y F, Huang J H, Zhang X Y. Progress of lightweight and robust ceramsite from solid waste: Preparation, properties and applications [J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 482: 141601.
- [40] Fu Y, Qiao H X, Feng Q, et al. Review of new methods for resource utilisation of electrolytic manganese residue and its application in building materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 401: 132901.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 杨亚利, 胡治平, 蔡子建, 等. 煤电化学吸收法碳捕集系统水平衡试验 [J]. *热力发电*, 2025, 54(6): 113–118.
- Yang Y L, Hu Z P, Cai Z J, et al. Experiment on water balance of the carbon capture system using chemical absorption method in coal-fired power plants [J]. *Thermal Power Generation*, 2025, 54(6): 113–118.
- [45] 朱文韬, 杜振, 张杨, 等. 燃煤烟气固体吸附二氧化碳捕集技术研究进展 [J]. *热力发电*, 2025, 54(6): 64–78.
- Zhu W T, Du Z, Zhang Y, et al. Research progress on solid adsorption carbon dioxide capture technology for coal-fired flue gas [J]. *Thermal Power Generation*, 2025, 54(6): 64–78.
- [46] 史明明, 刘美艳, 曾佑林, 等. 硅藻土和膨润土对重金属离子 Zn²⁺、Pb²⁺ 及 Cd²⁺ 的吸附特性 [J]. *环境化学*, 2012, 31(2): 162–167.
- Shi M M, Liu M Y, Zeng Y L, et al. Study on adsorption of Zn²⁺, Pb²⁺ and Cd²⁺ on diatomite and bentonite [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(2): 162–167.