



深海重要矿产资源开发研究进展

李鑫海, 孙治雷, 曹红, 耿威, 张喜林, 翟滨, 张现荣, 徐思南, 张栋, 周渝程, 吕泰衡, 李世兴, 黄威

Research progress on exploitation of key deep-sea mineral resources

LI Xinhai, SUN Zhilei, CAO Hong, GENG Wei, ZHANG Xilin, ZHAI Bin, ZHANG Xianrong, XU Sinan, ZHANG Dong, ZHOU Yucheng, LV Taiheng, LI Shixing, and HUANG Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023122901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

世界大洋金属矿产资源勘查开发现状及问题

Current status and problems of exploration and development of world ocean metal mineral resources

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 160–170

利用微区XRF技术的大洋固体矿产成分快速无损检测

Application of micro-XRF technology to rapid and nondestructive detection of inorganic elements in ocean minerals

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 223–232

深海滑坡研究进展

A review on deepwater landslide

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 222–235

CO₂-CH₄置换水合物开采方法及其强化技术研究进展

Technological research progress on CO₂-CH₄ replacement for hydrate exploitation and enhancement

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(1): 190–204

宽拖多源双传感器拖缆多方位采集与成像技术研究进展

Research progress of multi-azimuth acquisition and imaging technology of wide-tow multi-sources dual-sensor streamer

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 194–206

基于Burger's蠕变模型的采矿车行驶海底稀软底质下陷研究

The subsidence by mining car traveling on deep-sea soft bottom based on Burger's creep model

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(1): 179–190



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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 Xinhai, SUN Zhilei, CAO Hong, et al. Research progress on exploitation of key deep-sea mineral resources [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(3): 160-172.

深海重要矿产资源开发研究进展

李鑫海^{1,2,3}, 孙治雷^{2,3}, 曹红^{2,3}, 耿威^{2,3}, 张喜林^{2,3}, 翟滨^{2,3}, 张现荣^{2,3}, 徐思南^{2,3}, 张栋^{2,3},
周渝程^{2,3}, 吕泰衡^{2,3}, 李世兴^{2,3}, 黄威^{2,3}

1. 中国地质科学院, 北京 100037

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

3. 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

摘要: 深海蕴藏了丰富的能源与矿产资源, 包括多金属结核、多金属硫化物、富钴结壳、深海稀土、天然气水合物等, 是人类社会未来可持续发展的重要储备。当前, 社会迅猛发展对能源和关键矿产资源的需求持续增长, 引发了新一轮深海矿产资源开发热潮。全球范围内, 已发现的深海矿产资源主要集中于太平洋、大西洋和印度洋的国际海底区域, 以及沿海国家专属经济区内的海底。与陆地矿床相比, 深海矿床具有品位高、种类多、开采地点远离居民生活区、且易于运输转移的优势, 但采矿又势必会影响海洋生物生存环境, 破坏深海生态系统稳定性。如不加强对环境影响的评估和开采技术的研究, 并制定相关的法律法规, 未来的深海采矿对海洋环境的破坏将无法估量。鉴于此, 本文从深海典型矿产资源开采现状、开采技术研究进展以及对深海生态系统影响等方面进行了系统梳理, 并对相关制约因素进行了讨论并提出合理性建议, 以期为未来深海采矿技术方案的制定提供有益借鉴。

关键词: 深海矿产资源; 采集技术; 提升技术; 环境影响

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023122901

Research progress on exploitation of key deep-sea mineral resources

LI Xinhai^{1,2,3}, SUN Zhilei^{2,3}, CAO Hong^{2,3}, GENG Wei^{2,3}, ZHANG Xilin^{2,3}, ZHAI Bin^{2,3}, ZHANG Xianrong^{2,3}, XU Sinan^{2,3}, ZHANG Dong^{2,3},
ZHOU Yucheng^{2,3}, LV Taiheng^{2,3}, LI Shixing^{2,3}, HUANG Wei^{2,3}

1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

Abstract: The deep sea is rich in energy and mineral resources, including polymetallic nodules, massive sulphides, cobalt-rich crusts, deep-sea rare earths, natural gas hydrates, and so on, which are important reserves for the future sustainable development of human society. Currently, the demand for energy and key mineral resources for the rapid development of society continues to grow, stimulating another round of deep-sea mineral resources development boom. In the global context, deep-sea mineral resources discovered are mainly concentrated in the international seabed areas of the Pacific, Atlantic, and Indian Oceans, as well as in the seabed within the exclusive economic zones of coastal countries. Compared with land-based mineral deposits, deep-sea mineral deposits have the advantages of high grade, variety, being far away from residential areas, and easy transportation and transfer. However, marine mining will inevitably affect the living environment of marine organisms and destabilize deep-sea ecosystems. If we do not strengthen the assessment of environmental impacts and research on mining technology, as well as formulate relevant laws and regulations, the damage to the marine environment caused by future deep-sea mining will be incalculable. Therefore, the current situation of deep-sea mining, the research progress of mining technology, the impact on deep-sea ecosystems, and the relevant constraints were systematically reviewed, and reasonable suggestions were put forward. This study provided a useful reference for the development of future deep-sea mining technology.

Key words: deep-sea mineral resources; collecting technology; lifting technology; environmental impact

资助项目: 国家自然科学基金“海洋甲烷拦截带对冷泉流体的消耗研究: 来自南海东沙海域的观测与研究”(42176057); 山东省自然科学基金“冲绳海槽冷泉-热液流体溶解碳源/汇效应及对深海碳循环的影响”(ZR2021MD049); 崂山实验室科技创新项目课题“适于海底水合物资源探测的爬行车作业平台研制”(LSKJ202203504)

作者简介: 李鑫海 (1997—), 男, 硕士生, 主要从事海洋地球化学方面的研究工作, E-mail: xinhai_li0609@163.com

通讯作者: 孙治雷 (1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事深海矿产资源调查评价和开发技术研究工作, E-mail: zhileisun@yeah.net

收稿日期: 2023-12-29; **改回日期:** 2024-03-14. 张现荣编辑

“深海”通常是指深度大于200 m的区域,约占海洋面积的95%^[1-3]。深海蕴藏着丰富的矿产资源,包括多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物、深海稀土和天然气水合物(既属于能源,亦可视为一种特殊矿产)等资源,其中部分矿产富含Au(金)、Ag(银)、Ni(镍)、Co(钴)、Cu(铜)、Mn(锰)等金属元素,是现代高科技、绿色技术或新兴技术必不可少的原材料,且与陆地相比,其金属资源总储量更高^[4]。其中,Te(碲)可用于太阳能光伏技术,Co可用于新能源汽车电池,Re(铼)可用于喷气发动机,而Ge(锗)可用于红外护目镜。稀土元素(REE)有着“工业黄金”和“现代工业的维生素”之称^[5],天然气水合物更是一度被视为21世纪常规化石能源的重要替代者,中国已于2017年将其列为第173个矿种^[6]。

当前调查表明,深海矿产资源主要集中于太平洋、大西洋和印度洋的国际海底区域,以及沿海国家专属经济区内的海底。其中,多金属结核主要位于3 000~6 500 m深处的深海平原上,富含Mn、Cu、Co、Ni及其他多种稀有金属元素,资源量可达2~3万亿t,相当于陆地储量的几十至几千倍^[7];多金属硫化物多赋存于1 000~4 000 m深处的洋中脊和弧后海盆,矿床面积约为320万km²,总储量约为6亿t,被认为是有望最先实现商业开采的深海矿产^[8-11];富钴结壳多分布于800~2 500 m的海山上,面积约170万km²,仅三大洋海山的富钴结壳中Co的金属量就达4~8亿t^[12-13];深海稀土元素则来自海平面1 000 m以下富含稀土元素的深海沉积物,是近期刚刚开始调查研究的新型深海潜力矿产资源,储量巨大^[14];天然气水合物是由烃类气体(主要是甲烷)和水在低温和高压条件下组成的笼形固态似冰状物质^[15],主要存在于海底和陆地永冻土区,其储量远远大于常规化石能源和其他非常规能源的总和^[16-17]。

深海矿产资源的开发具有重要的意义,它不仅保障国家战略性矿产供应安全,还能促进洋底探测和开发技术的发展,加深对深海资源与环境的认识,从而更好地维护国家的战略利益^[18]。与陆地采矿相比,深海采矿具有单个矿区矿产品位高、金属类型多样、开采地点远离居民生活区、且容易转移等特点。然而,深海采矿对地形地貌的改变,以及沉积物羽流和声、光噪音的产生,亦会破坏海洋生物栖息地,造成海洋生物迁移或死亡,甚至导致海洋生态系统紊乱。如果不加强对环境影响评估和开采技术的研究,以及相关法律法规的制定,未

来的深海采矿对海洋环境的破坏将无法估量。本文介绍了深海典型矿产开采活动的发展现状和相关开采技术的研究进展,以及深海采矿对生态系统可能的影响,还对目前存在的问题进行了系统的梳理,并尝试提出发展方向的建议,以期对未来深海矿产资源商业化开发提供一定参考。

1 深海采矿活动发展现状

深海采矿概念最早于20世纪60年代提出。早在1975年,美国的矿业公司就曾宣称已经具备深海采矿所需的专业技术。但是由于缺乏国际法和国内法的保障而无法获得稳定的投资,商业化的深海采矿至今未能实现^[19]。当前,随着陆地金属逐渐消耗枯竭,部分金属价格的提升以及技术的进步,深海采矿在经济上可行之势逐渐凸显,致使其研究热潮又被掀起,世界各国和国际海底管理局(ISA)都在为未来的深海采矿做着准备。但同时,国际上保护深海环境的意识日盛,导致商业化的深海采矿又面临着一系列困难。

自2010年以来,在国际海床上勘探矿藏的合同数量从8个(均以多金属结核单一矿产为目标)增加到31个^[20-21](图1)。其中,19个是关于太平洋CC区、印度洋和西太平洋的多金属结核勘探合同;5个是关于西太平洋、南大西洋格兰德海隆起和太平洋麦哲伦海山的富钴结壳勘探合同;7个是关于中印度洋、西南印度洋脊和大西洋中脊的多金属硫化物勘探合同。同时,在天然气水合物和深海稀土勘探开发领域也产生了激烈的竞争^[16]。

目前,已有多个国家或组织在合同区进行了矿产资源试采,如早期OMI(Ocean Management Inc.)的CC区多金属结核海试^[22-23]和鸚鵡螺公司的索尔瓦拉项目^[24]。近年来,中国和日本在富钴结壳、天然气水合物和深海稀土方面的研究相继取得了较大进展。2020年7月,日本石油天然气金属矿物资源机构(JOGMEC)使用“白岭号”海洋资源调查船,在位于南鸟礁南部专属经济区的拓洋第5海山平顶部(水深约930 m),实施了全球首次富钴结壳的采矿试验,成功收集了649 kg样品^[25-26]。在天然气水合物试采方面,日本分别于2013年和2017年在Nankai海槽进行了两次降压开采,但最后都因出砂问题而被迫停止^[27-28]。中国地质调查局于2017年在神狐海域进行了第一次降压试采,同年中国海洋石油在南海北部荔湾进行了固态流化法试采^[29]。随后,在总结前次试采认识的基础上,中国地质调

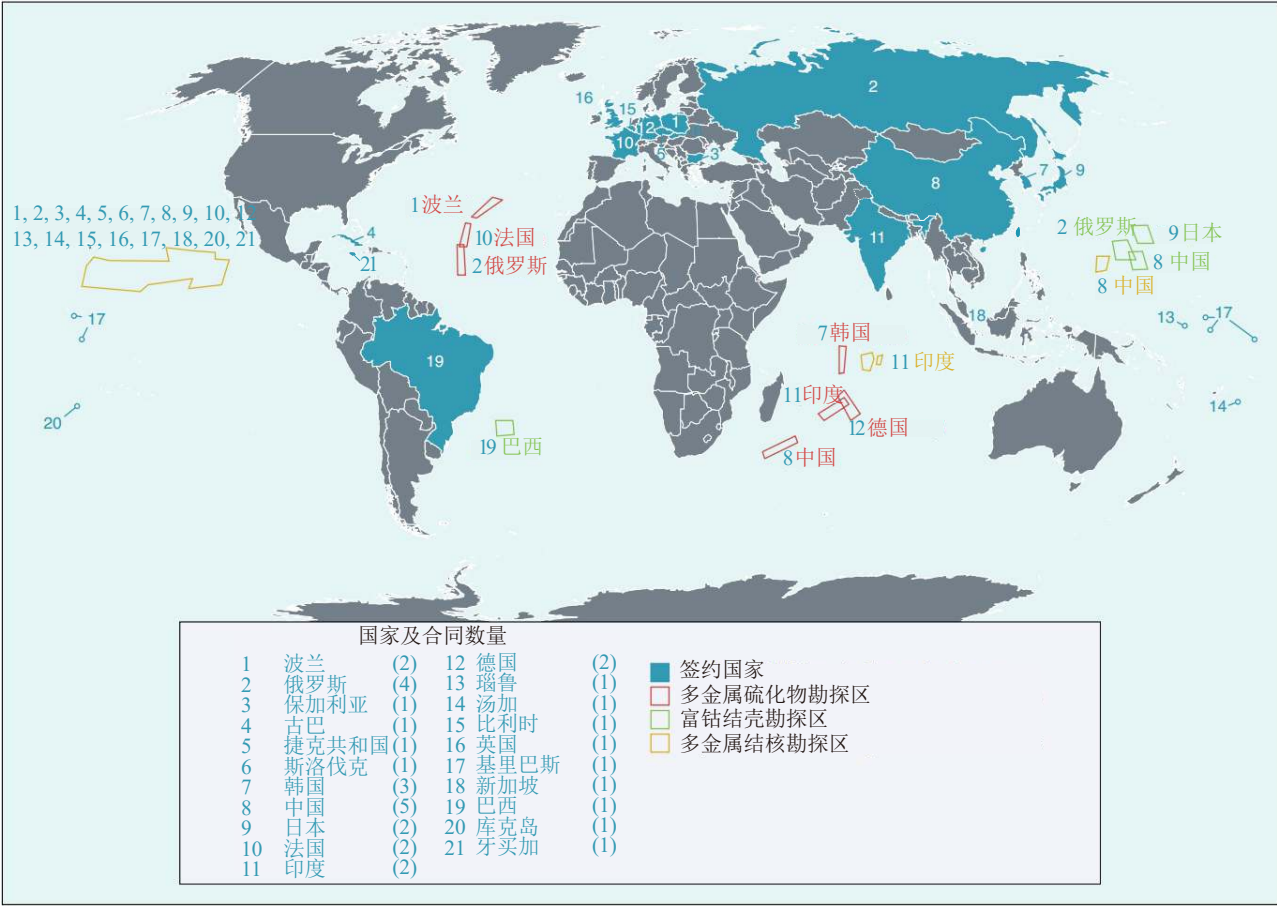


图 1 国际深海底采矿勘探合同和国家^[21]

Fig.1 International deep seabed mining exploration contracts and countries^[21]

查局于 2019 年 10 月至 2020 年 4 月在神狐海域采用水平井开采技术(图 2),进行了第二次降压试采,实现了连续 30 d 产气,刷新了日产气和首次试采日产气量的世界记录^[30]。

相比之下,深海稀土方面的研究起步较晚。日本科学家最先于 2011 年首次发现深海稀土,主要分布在南太平洋东部和北太平洋中部两个区域^[31];2013 年,在南鸟岛附近发现高稀土元素含量的富稀土沉积物,并制定规划加强对深海稀土的基础研究与资源勘查^[32];2016 年,日本 JOGMEC 初步完成南鸟岛周围海域的深海稀土的资源评估,并进一步开展开采技术研发与经济可行性研究^[32]。同时,日本已经将深海稀土试采提上日程。

2 深海采矿关键技术及应用

多金属结核、多金属硫化物、富钴结壳的开采过程需要经过剥离、收集、输送等过程,但由于成矿区域地形复杂,以及海底压力、洋流扰动等客观因素的存在,增加了开采难度,对采矿技术装备具

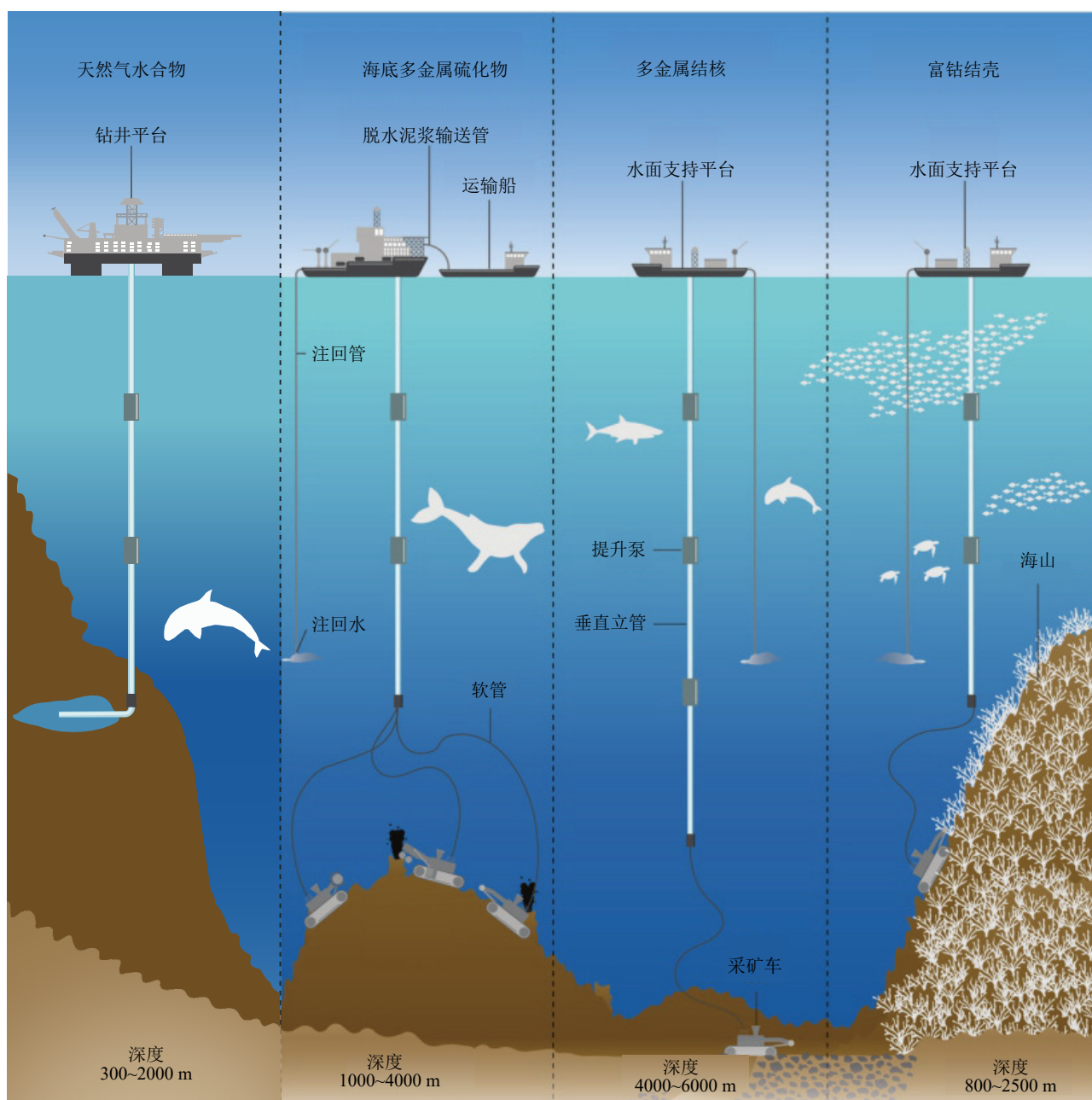
有较高的要求。尽管深海采矿技术的发展是一个相对较为漫长的过程,但目前国内外均取得了显著的进步。

2.1 国外研究进展

为了实现高效开采深海矿产资源,美国、英国、法国和日本等国家先后研制出连续链斗式、自动穿梭艇式和管道提升式等开采方法^[33]。由于连续链斗式和自动穿梭艇式系统稳定性差、开采效率低、环境影响大,目前已不再开展进一步研发和试验,所以主要采用管道提升式方案,包括海底采矿车、管道提升装备和水面支持平台^[23],且前两者研究热点也是实现深海采矿的技术难点,图 2 列出了采用管道提升方案的 4 种典型海洋矿产资源开采示意图(底图来自 Miller^[2],本文新增加了海洋天然气水合物的水平井开采模式,见图最左侧)。

2.1.1 采矿车

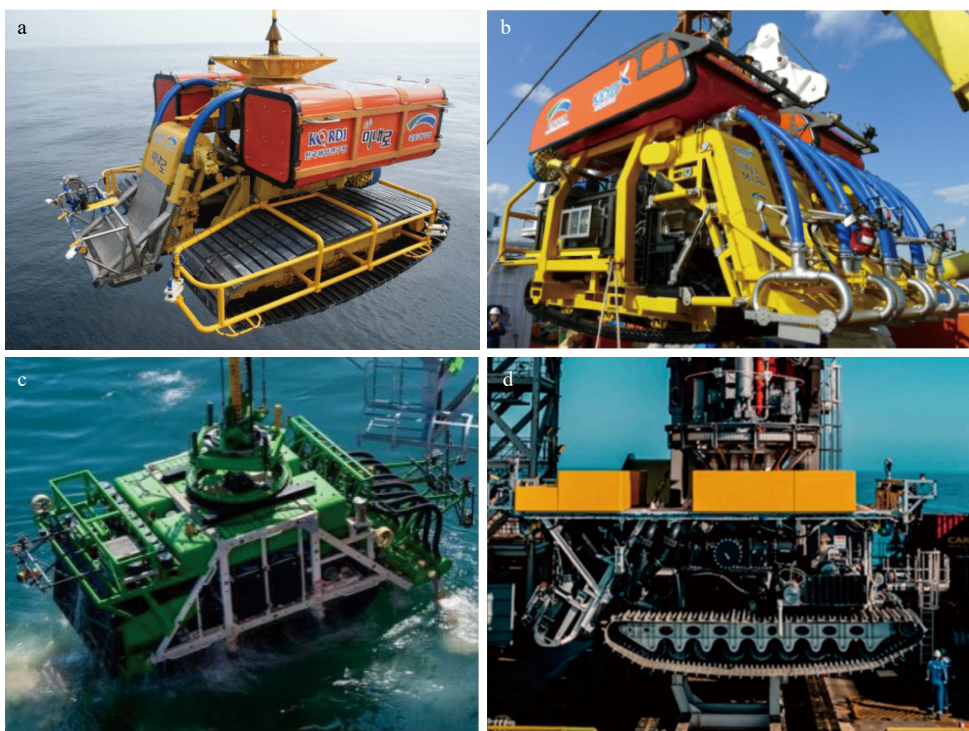
采矿车又称集矿机,是海底矿石开采的核心技术装备之一,在常见的几种深海矿产资源的开采方案中均需要应用采矿车。采矿车的研究热点主要

图 2 矿产资源开采模式图^[2]Fig.2 Mining modes of mineral resources^[2]

包括行进方式和采集方式两方面,在行进方式上,由最初的拖拽式、阿基米德螺旋式,逐渐形成了目前较多应用的履带自行式^[34],主要是因为履带可以大大增加接地面积,有效提升结构承载能力,因此更易于操作,另外该结构产生的海底扰动较小,从而对环境产生的影响也较小^[35]。

在采集方式上,由于各类矿产其形成环境的不同,因此采集方案也具有一定的差异性。对于多金属结核的采集方式,各国学者持不同的观点,目前主要采集方式包括水力式、机械式、水力-机械混合式三种。如印度提出的方案主要是由刨、铲、叉组

成的机械式,通过耙-铲-扫等方式将锰结核捡起,尽管该方式回收效率高,但由于其结构复杂,难以实现高可靠性和动力效率,并且在采矿作业过程中,该装置对海底环境产生直接的机械扰动;相比而言,韩国采用了混合式,如 MineRo- I (图 3a) 和 MineRo- II (图 3b)^[36-39],主要操作是使用一对水射流来将锰结核吹起,然后通过挡板被移动到机械输送机上,最终机械输送机使用翅片刮板将结核运输到收集器内部^[40];水力式则是利用高压水射流产生的康达效应来采集锰结核,这种类型结构简单,但耗能高^[40-41]。比利时海洋全球矿产资源公司(GSR)的

图3 国外采矿车^[36,43]

a. 韩国 MineRo- I , b. 韩国 MineRo- II , c. GSR Patania II , d. TMC 采矿车。

Fig.3 Mining vehicles developed in foreign countries^[36,43]

a. South Korean MineRo- I , b. South Korean MineRo- II , c. GSR Patania II , d. TMC mining vehicle

Patania II (图 3c) 和加拿大金属公司 (TMC) (图 3d) 都采用了水力式采集方式, 并分别于 2021 年 5 月和 2022 年 11 月完成海试^[42]。

深海富钴结壳生长在海底基岩表面, 采集时需要首先将结壳从基岩上破碎分离, 然后由特定的机器或设备收集, 并通过升降系统从海底运输到海面上的船只^[44]。但由于不同结壳的硬度差异, 导致所用的切削技术存在区别。美国 Larson 等^[45]认为富钴结壳物理特性和中等强度的煤比较接近, 其机械特性应与煤较为一致; 美国的 Halkyard 在试验和整理大量资料的基础上, 认为富钴结壳及其基岩最佳的破碎方法主要有 4 种: 螺旋滚筒式截齿切削、盘刀式轧削、冲击钻冲击破碎和水射流切削^[46-47]; 日本的 Aoshika 等^[48]则根据室内模拟试验结果, 对真实富钴结壳及其模型进行了铣刀切削、滚筒切割等 6 种不同的机械切割试验, 并发现滚筒切割消耗能量最少, 因此认为其为开采的最佳破碎方法。

多金属硫化物与富钴结壳采集技术类似, 一般首先处理粗糙地形, 创建矿产开采工作面, 而后利用采矿车完成矿石采集^[23]。如鸚鵡螺矿业公司的 SMS 采矿车主要由主采矿机、辅助采矿机和集矿机三台采集设备组成。辅助采矿机负责用一个直径

2.5 m 的鼓状粉碎设备处理粗糙地形, 创建矿产开采工作面; 主采矿机是一对牵引式挂车大小的挖掘机, 其中一个配有碳化钨材料打造的 4 m 宽的对向旋转钻头, 在富含金属矿的海底狭缝处开采矿石; 集矿机负责将破碎好的矿石吸入采矿车, 并通过提升管道系统输送至海面^[49-50]。

2.1.2 提升系统

按驱动方式不同管道提升系统可分为气力提升和水力提升两类。前者是将采矿船上空气压缩机产生的压缩空气注入立管来提升结核, 后者则是通过立管上的一系列液压潜水泵输送结核。20 世纪 70 年代末, 由美国、日本、加拿大和德国等国组成的财团 OMI 提出了深海矿产管道提升系统^[51]。1978 年, OMA (Ocean Mining Associates) 采用气力提升系统在太平洋进行了深海采矿试验, 在 18 h 内共采集 550 t 矿物, 最大产量达到 50 t/h, 验证了其可行性, 但由于气泡急剧膨胀, 难以预估其耐久性和安全性^[52]; 同年, OMI 在多金属结核试采过程中采用了水力提升和气力提升两种方式, 分别输送了 650 t 和 150 t 矿物^[52], 水力提升应用了德国 KBS 公司研制的 2 台 6 级混合流离心式潜水泵^[53]。试验发现, 水力提升虽然可导致潜水泵磨损, 但效率更高, 因

此水力管道提升系统成为先驱投资者的研究重点。

OMI 成功试采后,德国 Preussag 公司与法国 Gemonod 集团合作,对采矿系统中的提升系统开展大量研究,设计了4台 KSB 泵型的深潜电泵提升,每台泵为6级,水力提升能力增大到500 t/h,扬程为2.4 MPa^[53-54]。1986年,日本荏原制作所将两级扬矿泵提高为8级,泵流量增大到450 m³/h,总扬程可达7.6 MPa,但亦发现存在停泵后海底矿物颗粒回流不顺畅的潜在问题^[4]。随后,日本、韩国、中国和印度等均采用水力管道提升系统进行了不同水深的深海采矿系统试验,1997年,印度采用了全软管提升系统,其中输送泵为正排量泵^[41]。2005年,韩国地球科学矿产研究院(KIGAM)开展了四级提升泵的基础研究^[55]。2010年,印度在阿拉伯海使用全软管提升系统进行了521 m水深海试^[56]。2016年,中国“深海多金属结核开采试点工程”正式启动,并于2021年成功完成了深海多金属结核开采全系统联动试验^[51]。

国外通过大量的海上试验,已建立起较为完善的深海矿产资源开发技术方案。在采矿车和提升系统方面,掌握了关键技术研发和核心装备研制能力,主要包括采矿车安全行走和高效采集、长距离泵管输送流动保障、水下动力输送等技术。随着国际环保意识的增强,未来深海矿产资源开发还应重视作业过程中的环境问题,结合现代大数据、互联互通和智能融合等前沿领域的成果,对采矿设备进行升级,降低海底扰动,实现智能化、绿色化开发。

2.2 国内研究进展

2.2.1 采集技术

针对海底多金属结核开采,综合国外研究进展,中国早在“八五”期间就研制出了复合式和水力式采集方式^[57]。“九五”期间确定了采矿车采用履

带行走作为行走技术方案,随后在云南抚仙湖进行了湖试^[58]。2018年,长沙矿冶研究院等单位联合研制的“鲲龙500”号采矿车(图4a)分别在中国东海和南海成功进行了70 m和500 m水深海试,完成了整体结构耐压性能测试、密封性能测试、可行性和可靠性测试^[59]。2021年,上海交通大学研制的“开拓一号”深海采矿车(图4b)在南海成功进行了1300 m深海试验,完成了重载装备海上布放回收、海底路径规划与自主行走、海底矿石采集与沉积物取样等试验^[20]。

针对富钴结壳开采,2005年,中国开始对富钴结壳采集装置开始样机试验和数值仿真研究;2016年7月,长沙矿山研究院研制的螺旋滚筒采矿头在南海完成了富钴结壳采掘试验,验证了该装置的可行性;2018年,长沙矿山研究院研制的富钴结壳采矿车“鲲龙2000”在大西洋开展2000 m海试;2018年,中国科学院深海科学与工程研究所在南海完成了富钴结壳规模采样车试验,验证了布放回收、海底矿石破碎等功能;2020年,由中国科学院深海科学与工程研究所和招商局工业集团有限公司共同研发的富钴结壳采矿车于1300 m水深的海山区进行海试,同时“深海勇士”号载人潜水器进行了原位监测与环境采样^[22-23]。

当前,世界各国提出的海底多金属硫化物的开采方法主要参照陆地上成熟的矿产开采技术,我国科学家根据海底成矿规律的最新研究成果,提出了一种新颖的海底热液硫化物原位种植采集的方案^[61]。该方案根据海底自然生长的热液硫化物烟囱体的“二阶段模式”和热液矿物沉淀动力学的规律,通过控制流体与海水的交换速率、范围,从而控制成矿温度,并有效减少热液流体中成矿物质的逃逸,使硫化物矿床能快速在原地生长。具体来说,当确定海底靶区之下存在热液活动,并且通过地球物理手

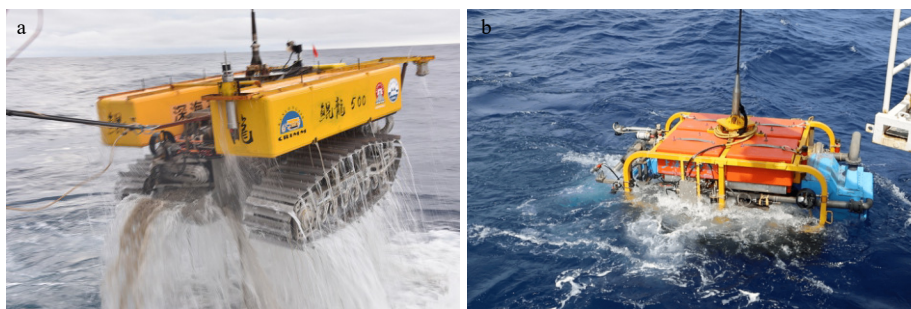


图4 中国采矿车^[60]

a. 鲲龙500, b. 开拓一号。

Fig.4 Mining vehicles made in China^[60]

a. Kunlong 500, b. Kaituoyihao.

硫化物附近的贻贝、海葵、虾、海绵、珊瑚^[66-67],富钴结壳周围海山上的鱼类、珊瑚、棘皮动物^[2, 68],以及天然气水合物丘上特有的“多毛虫”或“冰虫”^[69]等。深海采矿活动对海洋生物造成的影响(图6)主要包括:①地形地貌的变化导致海底生物栖息地丧失;②海底扰动和尾矿水排放造成的沉积物羽状物,可能使水体浊度增加或使未开采地区生物发生窒息;③声音和光的增加会改变海洋生物的行为^[21, 70]。

3.1 海底地貌改变对海洋生物的影响

多金属结核一般直径为4~10 cm,为深海平原提供了大量的硬基质,可供底栖生物固着^[71-72]。进行结核采集后会直接破坏海底硬质基底,对结核周围底栖生物产生巨大影响,而且结核生长速度十分缓慢,平均约为10~20 mm/Ma,因此生态恢复能力极低^[71]。例如,2004年在CC区开展了试采区域环境恢复情况调查,调查发现经过26 a后采矿车辆足迹仍然清晰可见,与周围未受干扰的地区相比,该区域线虫的多样性和生物量都有所减少^[73]。多金属硫化物和富钴结壳的采集,会改变栖息地的三维

结构,降低栖息地之间的差异性,并改变基底特征(如孔隙度、粒度分布、矿物成分),以及地球化学过程和水动力机制,从而导致影响范围扩大。例如,最近日本进行的富钴结壳试验性开采,已经造成开采区的高活动性海洋动物(如鱼和虾)的密度下降43%,邻近区下降56%^[74]。对于多金属硫化物的开采,相比于活跃的喷口,不活跃的喷口其恢复能力较弱,因此采矿给周围生物带来的影响有可能是永久性的^[75]。另外,采矿车的行驶过程也会改变海底地貌,可能会扰乱或压陷约15~40 cm的深海沉积物,这些沉积物则是部分海底生物食物来源,因此会阻碍生物生长发育^[76]。

3.2 沉积物羽流对海洋生物的影响

沉积物羽流是一种细粒悬浮物质,主要由采矿车切割和收集过程产生的收集器羽流^[77],以及矿产提取后尾矿水排放过程产生的中水羽流两部分组成^[78],具有扩散距离大和消散时间久的特性,是当前深海采矿主要的环境影响因素^[79-81]。收集器羽流中的沉积物,可能堵塞某些底栖生物的呼吸气管以及用来摄食的过滤性器官,妨碍幼虫的生长,甚至

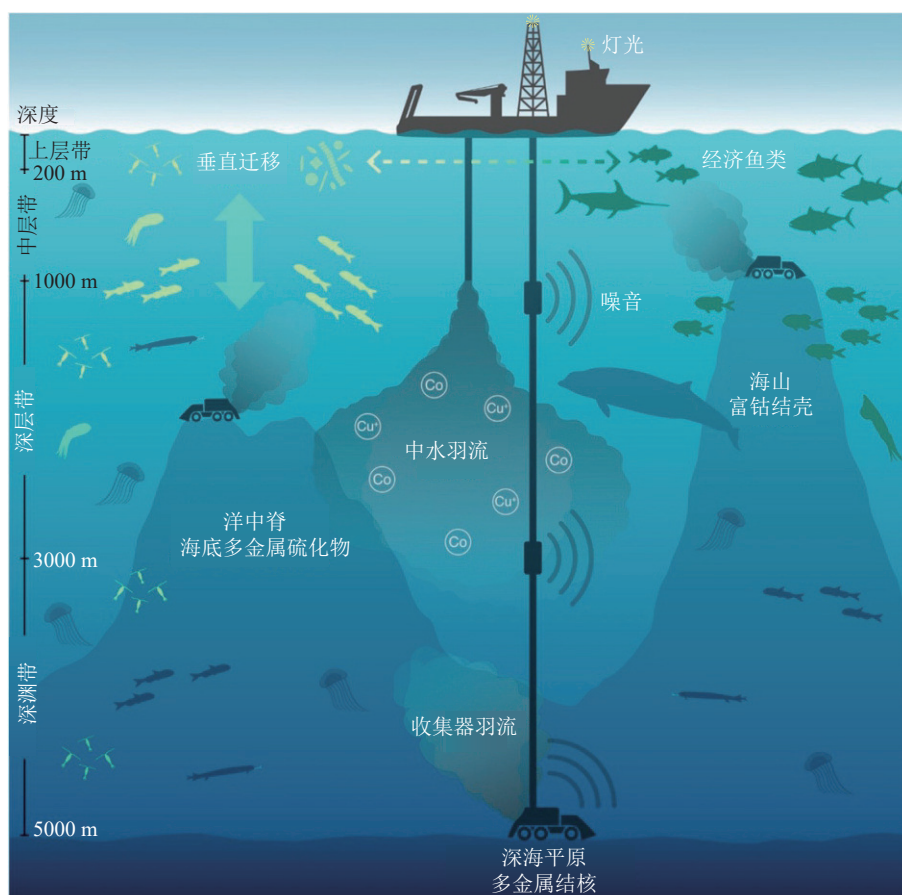


图6 深海采矿对海洋生物的影响^[70]

Fig.6 Impacts of deep-sea mining on marine life^[70]

造成死亡。中水羽流中的悬浮颗粒会降低光的透射深度,影响海洋生物的视觉和光合作用^[82]。除此之外,尾矿水中的有毒化学物质(如重金属),被低等生物摄入后,可能会通过食物网进入人类海鲜食品,危害人类健康,并对渔业发展造成不利影响^[83]。

3.3 声音和光对海洋生物的影响

在作业期间,船舶、采矿车和提升管道产生的噪音会显著影响海洋生物的行为和活动。众多鱼类或海洋哺乳动物(如鲸鱼)通过声音进行交流和定位,还有一些海洋生物通过声音进行捕食或规避危险。因此,较大的背景噪音会改变海洋动物的生活规律和种群迁移,高强度的噪音还可能导致暂时性或永久性听觉缺失或灵敏度减弱^[84-85]。除了声音之外,采矿作业产生的光会改变深海的光线强度,使生物失明,如大洋中脊的深海海虾遇到探照光后视网膜会永久性损伤^[86]。这种人为光还会吸引和误导生物,改变它们的交流能力、寻找配偶或躲避猎物的能力,如船舶照明灯会吸引海鸟并使之迷失方向^[2,76]。

4 讨论

目前,无论哪种深海矿产资源,其相关采矿试验都面临着如下问题:一是缺乏在空间和时间与真正商业采矿活动接近的试验研究,这意味着一旦开启大规模采矿,其影响强度、持续时间和后果仍然未知;二是当前研发的一系列开采技术、仪器装备的稳定性和可靠性是否能满足长期开采所需,结果难以评估;三是国际法律框架不完善,未出台与开采相关的条款,对于深海采矿引发的新问题,国际法律框架层面还存在着诸多的不确定性和空白。下面分别进行讨论。

4.1 加强深海矿产资源开发环境基线研究

环境影响评估是对某项目可能对环境产生重大影响的评估,是评估开发效果的重要过程,有助于有效管理深海采矿的决策。进一步了解关于海洋环境基线和采矿影响的信息对于这个新兴行业至关重要。填补与深海海底采矿有关的科学空白是一项艰巨的任务,对于履行防止“严重损害”和确保“有效保护海洋环境”的首要任务至关重要,这需要明确的方向、大量的资源以及强有力的协调与协作,并进一步采取措施来弥补主要科学信息差距^[13]。每个地点的资源类型和生态系统都有较大差异,因

此支持环评的基线研究必须量身定制,以确保它们的有效性。有效的监测也需要长时间的观察,这造成环境影响评估需要巨大的资金和人力资源,而联合资助可能成为最佳的可行之路,由ISA协调和管理,任何利益相关团体都可以向其支付资金,以更有效的利用时间、精力和资源。

4.2 提升开采设备性能,提高智能化开采程度

在采集技术方面,应遵循绿色环保的理念,降低环境破坏,还应结合现代大数据、互联互通和智能融合等前沿领域的成果,向智能化方向发展,进一步提升路径规划、导航定位、运动性能等。在提升系统方面,需满足长距离,粗颗粒,大产能,高能效和低污染等要求。近期在中国、韩国开展的海试作业中,“离心泵液压管道提升+履带自行式采矿车”系统表现出良好的机动性和控制性,因此该采集系统可能将是未来一段时间内深海矿产开采系统的主流技术方案^[51]。若要实现商业化开采,如何提升开采效率也将是考虑的首要问题之一。

4.3 制定并完善深海矿产资源开发相关法律法规

ISA是根据1982年《联合国海洋法公约》(UNCLOS)成立的一个自治国际组织,负责组织和管理国家管辖范围以外地区海底矿产资源的勘探和开发。目前,ISA正在拟订开采条例,并取得了一定进展。2021年6月下旬,瑙鲁共和国援引了一项被称为“两年规则”的法律条款。该条款规定,如果一个国家申请在某区域进行深海采矿,ISA则需要在两年内制定一份开采规则;如果没有,则可依照现有法律开始采矿。这迫使ISA必须在两年内2023年7月之前完成开采条例的制定,否则理事会将不得不在没有规章的情况下审议开发申请^[87]。为此,2023年2月20日至3月3日,在联合国总部召开了《联合国海洋法公约》BBNJ第五届政府间会议续会,讨论了就国家管辖范围以外区域海洋生物多样性的养护和可持续利用问题,如何拟订一份具有法律约束力的国际文书。2023年7月10日至21日,在牙买加召开了ISA第28届会议第二期理事会,就《“区域”矿产资源开发规章草案》进行了谈判,以期在深海区域矿产资源开发建立一个强有力的法律框架,同时确保有效保护海洋环境^[88]。由于20多个成员国表示反对深海采矿,大会决定2024年7月将再推进该议程,继续探讨深海采矿相关条例。

在完善开采条例的同时,各国还应建立公平的分享机制,以及对以陆地资源为基础的发展中国家

制定相应的补偿制度,以推进世界共同发展和进步。在刚刚召开的ISA第28届会议中,已提出开采方应向ISA缴纳税金,以及如何将税金进行分配的问题,但仍未制定出合理的解决方案。在国际法律框架之外,各国内部也应建立与ISA相对应的区域准则,对其管辖范围内的海底采矿活动实行管控,但仍有一些积极参与勘探活动的国家(如印度、法国、韩国、巴西、俄罗斯和波兰等)尚未制定相关的法律制度,因此ISA还应督促和监督这些法律制度的制定和实施。总之,目前深海矿产资源开采领域法律制度的不完善已经对深海采矿计划和活动造成了实质性的阻碍,各项制度的完善已迫在眉睫。

5 结论

(1)深海蕴藏着丰富的矿产资源,被认为是人类21世纪最重要的替代资源,其开发利用关乎国家可持续发展和战略利益。

(2)面向深海资源的开发技术已经取得重大进展,“离心泵液压管道提升+履带自行式采矿车”已成为主流技术方案,但是目前在该领域仍处于理论研究和探索阶段,还需加强智能化采矿技术的研究,进一步提高采矿装备在深海特殊环境下的作业能力。

(3)深海采矿会对海洋环境及对海洋生物造成显著影响。但关于深海采矿对生态系统潜在的短期和长期影响的认知仍然有限,目前很难准确预测采矿活动对生物多样性和物种地理分布的影响,对人类居住环境、经济发展的影响亦需要进一步研究。

(4)在进行海底采矿前,需结合不同学科的认识和观点,制订全面的开采条例,制定完善的法律法规制度,有效利用时间和资源,以保障各国合法权益,实现可持续发展。

参考文献 (References)

- [1] Danovaro R, Snelgrove P V R, Tyler P. Challenging the paradigms of deep-sea ecology[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(8): 465-475.
- [2] Miller K A, Thompson K F, Johnston P, et al. An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 4: 418.
- [3] 宋宪仓, 杜君峰, 王树青, 等. 海洋科学装备研究进展与发展建议[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 76-83. [SONG Xianchang, DU Junfeng, WANG Shuqing, et al. Research progress of marine scientific equipment and development recommendations in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 76-83.]
- [4] 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*, 2014, 50(2): 8-18. [LIU Shaojun, LIU Chang, DAI Yu. Status and progress on researches and developments of deep ocean mining equipments[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(2): 8-18.]
- [5] 王晖, 王毓明, 解文丽. 话战略金砖之稀土[J]. *广东化工*, 2022, 49(14): 69-71, 100. [WANG Hui, WANG Yuming, XIE Wenli. Talk about rare earth: strategic bricks[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49(14): 69-71, 100.]
- [6] 祝有海, 张永勤, 方慧, 等. 中国陆域天然气水合物调查研究主要进展[J]. *中国地质调查*, 2020, 7(4): 1-9. [ZHU Youhai, ZHANG Yongqin, FANG Hui, et al. Main progress of investigation and test production of natural gas hydrate in permafrost of China[J]. *Geological Survey of China*, 2020, 7(4): 1-9.]
- [7] Hein J R, Mizell K, Koschinsky A, et al. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: comparison with land-based resources[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 51: 1-14.
- [8] Yamazaki T. Past, present, and future of deep-sea mining[J]. *Journal of MMIJ*, 2015, 131(12): 592-596.
- [9] Jamieson J W, Hannington M D, Petersen S. Seafloor massive sulfide resources[M]//Carlton J, Jukes P, Choo Y S. *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*. Chichester: John Wiley & Sons, 2017: 1-10.
- [10] 曹亮, 杨振, 廖时理, 等. 现代海底多金属硫化物矿床控矿因素分析研究进展[J]. *现代矿业*, 2019, 35(7): 6-11, 42. [CAO Liang, YANG Zhen, LIAO Shili, et al. Analysis on ore-controlling factors of submarine hydrothermal polymetallic sulphide deposits[J]. *Modern Mining*, 2019, 35(7): 6-11, 42.]
- [11] 沈芳, 韩喜球, 李洪林, 等. 海底多金属硫化物资源预测: 方法与思考[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(10): 2682-2695. [SHEN Fang, HAN Xiqiu, LI Honglin, et al. Prediction of seafloor polymetallic sulfide resources: methods and consideration[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(10): 2682-2695.]
- [12] Hein J R. Co-rich manganese crusts[M]//Harff J, Meschede M, Petersen S, et al. *Encyclopedia of Marine Geosciences*. Dordrecht: Springer, 2014: 1-7.
- [13] Amon D J, Gollner S, Morato T, et al. Assessment of scientific gaps related to the effective environmental management of deep-seabed mining[J]. *Marine Policy*, 2022, 138: 105006.
- [14] 于莹, 刘大海. 日本深海稀土研究开发最新动态及启示[J]. *中国国土资源经济*, 2019, 32(9): 46-51. [YU Ying, LIU Dahai. The latest dynamics and enlightenment of research and development of deep-sea rare-earth in Japan[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2019, 32(9): 46-51.]
- [15] Kvenvolden K A. Gas hydrates-geological perspective and global change[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(2): 173-187.
- [16] Chong Z R, Yang S H B, Babu P, et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: prospects and challenges[J]. *Applied Energy*,

- 2016, 162: 1633-1652.
- [17] 付强, 王国荣, 周守为, 等. 海洋天然气水合物开采技术与装备发展研究[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 32-39. [FU Qiang, WANG Guorong, ZHOU Shouwei, et al. Development of marine natural gas hydrate mining technology and equipment[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 32-39.]
- [18] 周平, 杨宗喜, 郑人瑞, 等. 深海矿产资源勘查开发进展、挑战与前景[J]. *国土资源情报*, 2016(11): 27-32. [ZHOU Ping, YANG Zongxi, ZHENG Renrui, et al. Development progress, challenge and prospect of mineral resources exploration and exploitation in deep sea[J]. *Land and Resources Information*, 2016(11): 27-32.]
- [19] Sparenberg O. A historical perspective on deep-sea mining for manganese nodules, 1965–2019[J]. *The Extractive Industries and Society*, 2019, 6(3): 842-854.
- [20] 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 Yijun, CHEN Minfang, DU Hailian, et al. Key mechanical issues and technical challenges of deep-sea mining development system[J]. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(5): 1005-1020.]
- [21] Levin L A, Amon D J, Lily H. Challenges to the sustainability of deep-seabed mining[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(10): 784-794.
- [22] 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 Jianmin, LIU Lei, LYU Haining, et al. Deep-sea Mining equipment in China: current status and prospect[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 1-9.]
- [23] 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 Jiabiao, WANG Yejian, LIU Lei, et al. Current status and prospect of deep-sea mining technology[J]. *Science and Technology Foresight*, 2022, 1(2): 92-102.]
- [24] 贾凌霄, 马冰, 于洋, 等. 基于SWOT分析的深海采矿发展策略研究[J]. *中国矿业*, 2021, 30(7): 15-22. [JIA Lingxiao, MA Bing, YU Yang, et al. Research on deep sea mining development strategy based on SWOT analysis[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(7): 15-22.]
- [25] Heinrich L, Koschinsky A. Deep-sea mining: can it contribute to sustainable development?[M]//Ekau W, Hornidge A K. *Transitioning to Sustainable Life Below Water*. 2021: 109.
- [26] Japan Oil, Gas & Metals National Corporation. JOGMEC conducts world's first successful excavation of cobalt-rich seabed in the deep ocean[EB/OL]. 2020[2023-06-20]. http://www.jogmec.go.jp/english/news/release/news_01_000033.html.
- [27] Konno Y, Fujii T, Sato A, et al. Key findings of the world's first offshore methane hydrate production test off the coast of Japan: toward future commercial production[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(3): 2607-2616.
- [28] Yamamoto K, Wang X X, Tamaki M, et al. The second offshore production of methane hydrate in the Nankai Trough and gas production behavior from a heterogeneous methane hydrate reservoir[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(45): 25987-26013.
- [29] 周守为, 陈伟, 李清平, 等. 深水浅层非成岩天然气水合物固态流化试采技术研究及进展[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(4): 1-8. [ZHOU Shouwei, CHEN Wei, LI Qingping, et al. Research on the solid fluidization well testing and production for shallow non-diagenetic natural gas hydrate in deep water area[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(4): 1-8.]
- [30] 叶建良, 秦绪文, 谢文卫, 等. 中国南海天然气水合物第二次试采主要进展[J]. *中国地质*, 2020, 47(3): 557-568. [YE Jianliang, QIN Xuwen, XIE Wenwei, et al. Main progress of the second gas hydrate trial production in the South China Sea[J]. *Geology in China*, 2020, 47(3): 557-568.]
- [31] Kato Y, Fujinaga K, Nakamura K, et al. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(8): 535-539.
- [32] 石学法, 毕东杰, 黄牧, 等. 深海稀土分布规律与成矿作用[J]. *地质通报*, 2021, 40(2): 195-208. [SHI Xuefa, BI Dongjie, HUANG Mu, et al. Distribution and metallogenesis of deep-sea rare earth elements[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(2): 195-208.]
- [33] 童波, 刘学勤, 任铁. 新型深海矿产开发模式的探讨[J]. *船舶*, 2021, 32(3): 1-7. [TONG Bo, LIU Xueqin, REN Tie. Discussion on development mode of new deep-sea mineral[J]. *Ship & Boat*, 2021, 32(3): 1-7.]
- [34] 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 Li, SUN Jiazhao, SUN Zhe, et al. Deep-sea mining core technology in China: current situation and prospects[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(5): 708-716.]
- [35] 徐俊杰, 孔德博, 吴鸿云, 等. 深海多金属结核集矿机铝合金履齿结构设计与分析[J]. *采矿技术*, 2019, 19(6): 116-118, 129. [XU Junjie, KONG Debo, WU Hongyun, et al. Design and analysis of aluminum alloy shoe structure of deep-sea polymetallic nodule collector[J]. *Mining Technology*, 2019, 19(6): 116-118, 129.]
- [36] Yoon S M, Hong S, Park S J, et al. Track velocity control of crawler type underwater mining robot through shallow-water test[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(10): 3291-3298.
- [37] Hong S, Kim H W, Choi J S, et al. A self-propelled deep-seabed miner and lessons from shallow water tests[C]//Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai: ASME, 2010: 75-86.
- [38] Hong S, Kim H W, Yeu T, et al. Technologies for safe and sustainable mining of deep-seabed minerals[M]//Sharma R. *Environmental Issues of Deep-Sea Mining: Impacts, Consequences and Policy Perspectives*. Cham: Springer, 2019: 95-143.
- [39] Cho S G, Park S, Oh J, et al. Design optimization of deep-seabed pilot miner system with coupled relations between constraints[J]. *Journal of Terramechanics*, 2019, 83: 25-34.
- [40] Kim S, Cho S G, Lee M, et al. Reliability-based design optimization of a pick-up device of a manganese nodule pilot mining robot using the Coandă effect[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(8): 3665-3672.
- [41] 康娅娟, 刘少军. 深海多金属结核开采技术发展历程及展望[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(10): 2848-2860. [KANG Yajuan, LIU Shaojun. Development history and prospect of deep sea polymetallic nodules mining technology[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(10): 2848-2860.]

- [42] 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.
- [43] Global Sea Mineral (GSR). Metal-rich nodules collected from seabed during important technology trial[EB/OL]. 2021[2023-06-20].<https://deme-gsr.com/news/metal-rich-nodules-collected-from-seabed-during-important-technology-trial/>.
- [44] Xie C, Wang L, Yang N, et al. A compact design of underwater mining vehicle for the cobalt-rich crust with general support vessel part A: prototype and tests[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(2): 135.
- [45] Larson D A, Tandanand S, Boucher M L, et al. Physical properties and mechanical cutting characteristics of cobalt-rich manganese crusts[R]. Spokane: US Department of the Interior, 1987.
- [46] Halkyard J. Technology for mining cobalt rich manganese crusts from seamounts[C]//Proceedings of the OCEANS'85-Ocean Engineering and the Environment. San Diego: IEEE, 1985: 352-374.
- [47] 江敏, 吴鸿云, 陆新江, 等. 基于螺旋截齿切削技术的深海富钴结壳切削参数计算与试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(11): 162-167. [JIANG Min, WU Hongye, LU Xinjiang, et al. Experimental research and calculation on cutting parameters of the deep-sea cobalt-rich crust based on helical cutting technology[J]. *Mining R&D*, 2021, 41(11): 162-167.]
- [48] Aoshika K, Zaitsu M. An experimental study of cutting the cobalt-rich manganese crusts[J]. *NKK Technical Review*, 1990(59): 61-67.
- [49] 方陵生. 海底采矿机器人热液喷口挖金: 海底采矿机器人测试将在2016年揭开序幕[J]. *世界科学*, 2016(3): 23-24. [FANG Lingsheng. Seabed Mining robot Hydrothermal vents for gold - Seabed mining robot testing will begin in 2016[J]. *World Science*, 2016(3): 23-24.]
- [50] 李艳, 梁科森, 李皓. 深海多金属硫化物开采技术[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(10): 2889-2901. [LI Yan, LIANG Kesen, LI Hao. Mining technology of deep-sea polymetallic sulfide[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(10): 2889-2901.]
- [51] Hu Q, Li Z F, Zhai X Y, et al. Development of hydraulic lifting system of deep-sea mineral resources[J]. *Minerals*, 2022, 12(10): 1319.
- [52] Kang Y J, Liu S J. The development history and latest progress of deep-sea polymetallic nodule mining technology[J]. *Minerals*, 2021, 11(10): 1132.
- [53] 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 Yexiang, YANG Lingbo, CAO Lei, 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.]
- [54] Kuntz G. The technical advantages of submersible motor pumps in deep sea technology and the delivery of manganese nodules[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston: OTC, 1979: OTC-3367-MS.
- [55] Choi J S, Hong S, Chi S B, et al. Probability distribution for the shear strength of seafloor sediment in the KR5 area for the development of manganese nodule miner[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(17-18): 2033-2041.
- [56] Ramesh N R, Thirumurugan K, Raphael D C, et al. Development and subsea testing of polymetallic nodule crusher for underwater mining machine[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2021, 55(6): 65-72.
- [57] 阳宁, 夏建新. 国际海底资源开发技术及其发展趋势[J]. *矿冶工程*, 2000(1): 1-4. [YANG Ning, XIA Jianxin. Development techniques for international sea-floor resources and their future trend[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2000(1): 1-4.]
- [58] 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 Ning, CHEN Guangguo. Status quo and development tendency of deep sea minerals mining technology[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2010, 38(10): 4-9.]
- [59] 陈秉正. “鲲龙 500”采矿车履带行驶机构的研制与试验研究[J]. *采矿技术*, 2019, 19(5): 125-128. [CHEN Bingzheng. Development and experimental study of track driving mechanism of "Kunlong 500" mining truck[J]. *Mining Technology*, 2019, 19(5): 125-128.]
- [60] 长沙矿冶研究院有限责任公司. 我国首次海底多金属结核集矿系统 500 米海试通过专家验收[EB/OL]. (2018-09-30)[2023-07-31]. http://www.crimm.com.cn/xwzx/qyxw/202303/t20230315_298514.html. [Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., LTD. China's first submarine polymetallic nodule ore collection system 500 meters sea test passed the acceptance of experts[EB/OL]. (2018-09-30)[2023-07-31]. http://www.crimm.com.cn/xwzx/qyxw/202303/t20230315_298514.html.]
- [61] 孙治雷, 尚鲁宁, 曹红, 等. 深海热液金属硫化物矿床原位种植系统: 中国, 107100627A[P]. 2017-08-29. [SUN Zhilei, SHANG Luning, CAO Hong, et al. In situ planting system of deep-sea hydrothermal metal sulfide deposit: CN, 107100627A[P]. 2017-08-29.]
- [62] 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 Dasheng, YANG Ning, JING Xing. Hydraulic lifting technique with vertical pipe for deep-sea coarse mineral particles[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2013, 33(5): 1-8.]
- [63] Wedding L M, Reiter S M, Smith C R, et al. Managing mining of the deep seabed[J]. *Science*, 2015, 349(6244): 144-145.
- [64] Gilbert N. Deep-sea mining could soon be approved - how bad is it?[J]. *Nature*, 2023, 619(7971): 684.
- [65] Rabone M, Wiethase J H, Simon-Lledó E, et al. How many metazoan species live in the world's largest mineral exploration region?[J]. *Current Biology*, 2023, 33(12): 2383-2396. e5.
- [66] Galkin S V. Megafauna associated with hydrothermal vents in the Manus Back-Arc Basin (Bismarck Sea)[J]. *Marine Geology*, 1997, 142(1-4): 197-206.
- [67] Boschen R E, Rowden A A, Clark M R, et al. Megabenthic assemblage structure on three New Zealand seamounts: implications for seafloor massive sulfide mining[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2015, 523: 1-14.
- [68] Morato T, Miller P I, Dunn D C, et al. A perspective on the importance of oceanic fronts in promoting aggregation of visitors to seamounts[J]. *Fish and Fisheries*, 2016, 17(4): 1227-1233.
- [69] Fisher C R, MacDonald I R, Sassen R, et al. Methane ice worms: *Hesiocaeca methanicola* colonizing fossil fuel reserves[J]. *Naturwissenschaften*, 2000, 87(4): 184-187.

- [70] Drazen J C, Smith C R, Gjerde K M, et al. Midwater ecosystems must be considered when evaluating environmental risks of deep-sea mining[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(30): 17455-17460.
- [71] Von Stackelberg U. Growth history of manganese nodules and crusts of the Peru Basin[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1997, 119(1): 153-176.
- [72] Vanreusel A, Hilario A, Ribeiro P A, et al. Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26808.
- [73] Miljutin D M, Miljutina M A, Arbizu P M, et al. Deep-sea nematode assemblage has not recovered 26 years after experimental mining of polymetallic nodules (Clarion-Clipperton Fracture Zone, Tropical Eastern Pacific)[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2011, 58(8): 885-897.
- [74] Washburn T W, Simon-Lledó E, Soong G Y, et al. Seamount mining test provides evidence of ecological impacts beyond deposition[J]. *Current Biology*, 2023, 33(14): 3065-3071. e3.
- [75] Nakajima R, Yamamoto H, Kawagucci S, et al. Post-drilling changes in seabed landscape and megabenthos in a deep-sea hydrothermal system, the Iheya North field, Okinawa Trough[J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0123095.
- [76] Levin L A, Mengerink K, Gjerde K M, et al. Defining “serious harm” to the marine environment in the context of deep-seabed mining[J]. *Marine Policy*, 2016, 74: 245-259.
- [77] Ouillon R, Muñoz-Royo C, Alford M H, et al. Advection - diffusion settling of deep-sea mining sediment plumes. Part 2. Collector plumes[J]. *Flow*, 2022, 2: E23.
- [78] 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.
- [79] Boschen R E, Rowden A A, Clark M R, et al. Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: a review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks and management strategies[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 84: 54-67.
- [80] Van Dover C L. Impacts of anthropogenic disturbances at deep-sea hydrothermal vent ecosystems: a review[J]. *Marine Environmental Research*, 2014, 102: 59-72.
- [81] Gollner S, Kaiser S, Menzel L, et al. Resilience of benthic deep-sea fauna to mining activities[J]. *Marine Environmental Research*, 2017, 129: 76-101.
- [82] Muñoz-Royo C, Peacock T, Alford M H, et al. Extent of impact of deep-sea nodule mining midwater plumes is influenced by sediment loading, turbulence and thresholds[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 148.
- [83] Amon D J, Palacios-Abrantes J, Drazen J C, et al. Climate change to drive increasing overlap between Pacific tuna fisheries and emerging deep-sea mining industry[J]. *npj Ocean Sustainability*, 2023, 2(1): 9.
- [84] Gomez C, Lawson J W, Wright A J, et al. A systematic review on the behavioural responses of wild marine mammals to noise: the disparity between science and policy[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2016, 94(12): 801-819.
- [85] Nedelec S L, Radford A N, Pearl L, et al. Motorboat noise impacts parental behaviour and offspring survival in a reef fish[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2017, 284(1856): 20170143.
- [86] Herring P J, Gaten E, Shelton P M J. Are vent shrimps blinded by science?[J]. *Nature*, 1999, 398(6723): 116.
- [87] Singh P A. The two-year deadline to complete the International Seabed Authority's Mining Code: key outstanding matters that still need to be resolved[J]. *Marine Policy*, 2021, 134: 104804.
- [88] ISA. The 28th session of the international seabed authority[EB/OL]. 2023[2023-07-31]. <https://www.isa.org.jm/sessions/28th-session-2023/>.