

付全有, 武光海, 韩沉花, 等. 浅谈深海多金属硫化物采矿的环境影响和保护措施[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(12): 1-11.

FU Quanyou, WU Guanghai, HAN Chenhua, et al. An overview on the environmental impact and protection measures of deep-sea polymetallic sulphide mining[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(12): 1-11.

浅谈深海多金属硫化物采矿的环境影响和保护措施

付全有^{1,2}, 武光海^{1,2}, 韩沉花^{1*}, 高发荣³

(1 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012; 2 自然资源部海洋生态系统动力学重点实验室, 杭州 310012;

3 杭州电子科技大学自动化学院, 杭州 310018)

摘要:深海矿产资源开发及其环境保护问题近年来重新成为一个研究热点。深海环境极其复杂, 人类对深海生物及其生态系统的了解仍十分有限, 而深海采矿不可避免会对海洋生态环境造成影响, 如不加强对采矿环境影响的研究并制定相关的保护措施, 未来的深海采矿对海洋环境的破坏将无法估量。本文从深海采矿发展由来、多金属硫化物矿区环境、深海采矿技术发展、采矿环境影响和保护措施等几方面全链条系统地梳理了前人的研究成果, 提出了深海采矿环境影响评价的发展方向, 从而为今后开展深海采矿环境监测与保护提供参考。

关键词:多金属硫化物; 深海采矿; 环境影响; 环境基线; 参照区; 生态阈值

中图分类号: P736; P744

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.266

0 引言

资源与环境都是人类生存与发展所依赖的。随着高新技术的发展, 矿产资源需求增加, 陆地资源消耗加速, 人类的目光自然而然投向地球表面最后的处女地——深海底。深海底蕴藏着铜、钴、镍、金、银、稀有金属和稀土等重要的固体战略金属矿产资源, 目前勘探研究较多的有多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物和含稀土软泥等, 均可作为人类未来发展的金属矿产储备。截至目前, 深海矿产尚未实现商业性开发, 除技术经济上尚未处于有利时期外, 深海采矿可能带来的深海生态环境问题是其最大的阻力。国际海底管理局(International Seabed Authority, ISA)明确规定, 深海矿区环境扰动实验和环境影响评价报告是深海矿产开采的前

提条件。

然而, 人类对深海生态环境的认知与研究仍很欠缺。以多金属硫化物矿产资源为例, 硫化物矿床活跃的热液喷口附近生存着大量具有特殊基因的生物, 即使是热液已停止活动的隐伏硫化物矿区, 也仍生存着一些指示性海洋生物。因此, 研究这些生物群落及其生态系统的特点并追踪深海采矿的环境影响及其保护措施具有重要意义。本文从深海采矿发展由来、深海多金属硫化物矿区生态环境特点、深海采矿技术发展、深海多金属硫化物采矿的环境影响和保护措施等几方面系统地梳理了前人的研究成果, 提出了深海采矿环境影响评价的发展方向, 以期今后开展深海采矿环境监测与保护提供参考。

1 深海采矿由来与发展

深海采矿的理念最早可追溯到 1872 年“挑战者”号科学考察船的环球海洋考察。那次考察首次发现了深海多金属结核, 之后发达国家及一些跨国公司开始探索深海采矿技术。1975 年美国矿业大会(American Mining Congress)宣称, 深海采矿的专业技术已经趋于成熟^[1], 但由于缺乏保障深海采矿利益的法律法规, 无法获得稳定投资^[2]。随着陆地

收稿日期: 2022-09-15

资助项目: 浙江省重点研发项目(2021C03183); 中国大洋协会专项课题(DY135-E2-1-01); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项资金项目(JG1521)

作者简介: 付全有(1999—), 在读硕士, 主要从事大洋矿产资源与环境等方面的研究工作。E-mail: 18181342096@163.com

* 通讯作者: 韩沉花(1984—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事海洋探测技术方面的研究工作。E-mail: hanchenhua@sio.org.cn

金属资源大量消耗,部分金属价格上涨及采矿技术的进步,深海采矿从经济学意义出发逐渐变得有可行之势。然而,国际上深海环境保护意识也日趋加强,所以商业化的深海采矿至今仍未实现。

随着越来越多的深海矿产资源被发现,为促进海洋资源的和平与公平利用,1982年《联合国海洋法公约》出台。依据该公约与1994年的《执行协定》,设立国际海底区域深海采矿的管理机构——ISA^[3]。2001年至今,ISA与部分国家或组织共签订31份深海金属矿产资源勘探合同,允许他们在指定海底区域进行资源勘探活动^[4]。为确保有效管理深海海底矿产资源的探矿、勘探和开发,有效保护海洋环境,ISA制定了环境规章,并提出区域环境管理计划(Regional Environmental Management Plan, REMP)^[4],建立了深海采矿环境数据库(Deep Data),以鼓励在采矿环境研究方面的国际合作。

由于人们对深海生态系统的认识很有限,要准确评价采矿可能产生的环境影响并不容易。鹦鹉螺矿业公司(Nautilus Minerals)的索瓦洛1项目虽然已获得深海采矿许可证,但因其采矿环境影响评

价工作不足,其拟定的采矿活动不仅可能对海洋环境造成破坏,还可能会威胁周边沿海地区的环境安全和人类健康,其采矿活动遭到周边沿海居民和国际环保组织的强烈反对,因此索瓦洛1项目至今仍未实现商业化开采^[5]。

在深海采矿技术发展过程中,一直伴随着小规模深海采矿模拟试验或海底扰动实验,如美国的DOMES(Deep Ocean Mining Effects Study)、日本的JET(Japan Deep-Sea Impact Experiment)、印度的INDEX(Indian Deep-Sea Environment Experiment)等^[6](详见表1)。近几年,中国、日本、韩国等国也在继续进行深海采矿方面的试验。但模拟采矿试验及海底扰动实验至今仍然存在一些问题:①环境基线的数据量缺乏,深海底栖生物的生长、迁移、幼虫传播等生态过程认知不足,导致深海采矿对海底生态系统影响的评估受到极大的限制;②模拟试验的空间规模、时间尺度以及采矿过程的细节模拟都不足以与真正的商业采矿规模相比,从而导致无法准确评估和预测长期的大规模深海采矿对海洋生物及其生态环境的累积影响。

表1 各国或组织进行的深海采矿环境影响或海底扰动实验的基本数据

Table 1 Basic data on deep-sea mining environmental impact and seabed disturbance experiments conducted by countries or organizations in the world

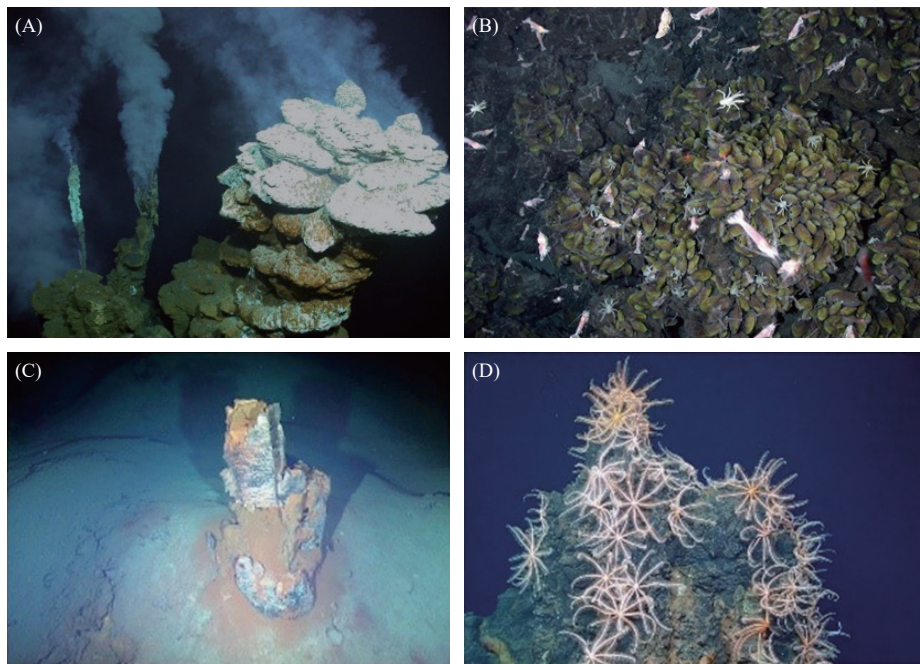
时间/年	名称	国家/组织	海底区域	持续时间	面积/距离
1978	深海采矿环境研究(DOMES)	美国	克拉里昂-克里帕顿断裂带	7 200 min	~
1989	扰动和再迁入实验(DISCOL)	德国	秘鲁盆地	12 d	10.8 km ²
1993	美国国家海洋与大气管理局底层影响实验(NOAA-BIE)	美国	克拉里昂-克里帕顿断裂带	5 290 min	141 km
1995	日本深海影响实验(JET)	日本	克拉里昂-克里帕顿断裂带	1 227 min	33 km
1997	印度深海环境实验(INDEX)	印度	中印度洋盆地	2 534 min	88 km
1995	“海金联”底层影响实验(IOM-BIE)	国际海洋金属联合组织	克拉里昂-克里帕顿断裂带	1 130 min	35 km

2 多金属硫化物资源及其生态环境

块状多金属硫化物最早于1976年由“阿尔文”号载人潜水器在加拉帕戈斯裂谷发现,是20世纪重大的海洋科学发现之一。多金属硫化物主要分布在海底热液喷口区,由热液喷涌出的富含铜、锌、铅、铂、金、银等金属元素的高温流体沉淀形成^[7-9],是一种新型多金属资源,备受关注。目前,世界上已发现超过600个活跃的热液喷口,预计资源量可达6亿t^[10],大多位于海洋专属经济区和全球洋中脊海区^[11]。非活动的硫化物矿床一般分布在较老的离轴洋壳上,其资源储量可能比活动热液区的硫化物矿床更可观(据估算为10倍),经济价值更高^[12]。

赋存多金属硫化物的洋中脊区,地形极其复杂,高压、无光,同时还伴有底层流、内波等复杂因素。活动的热液喷口附近存活有大量巨型和大型的生物群落^[13],包括贻贝、海葵、虾、螃蟹、螺等(图1A、B)。这些热液生物群落的特点是生物量大、物种多样性低^[14],其不仅能耐受高温和高浓度的重金属^[15],而且可通过摄食或共生与热液喷口周围微生物共存^[13]。非活动硫化物矿区为营固着生活的、滤食悬浮物为生的海洋底栖生物提供了栖息地,如海绵、珊瑚和刺胞动物等在失活的黑烟囱上均有发现^[16-17](图1C、D)。

通常情况下,非活动硫化物矿区的生物量较低,生长速度比热液生物慢,但大型动物的多样性比活



A、B 属于活动的热液喷口^[18]、C、D 属于非活动的热液喷口^[19], 照片 B 引自 <https://www.lifegate.com/hydrothermal-vent-mining-japan#>

图 1 深海多金属硫化物矿区生态环境

Fig.1 Ecological environment of deep-sea polymetallic sulfide mining area

动热液区高^[20]。但在同时存在活动的和非活动的热液喷口的硫化物区, 譬如索瓦洛 1 项目所在的海底存在约 40 000 个高度超过 0.25 m 的活动的和非活动的热液喷口, 在这里非活动的热液喷口位置生物量较高^[21-22]。这是因为活动热液喷口的高初级生产力既可以维持自身周围高生物量的生物生存, 还可以为附近非活动热液喷口营固着生活的、滤食悬浮物的、微型食肉性的无脊椎动物提供大部分的食物来源^[23]。

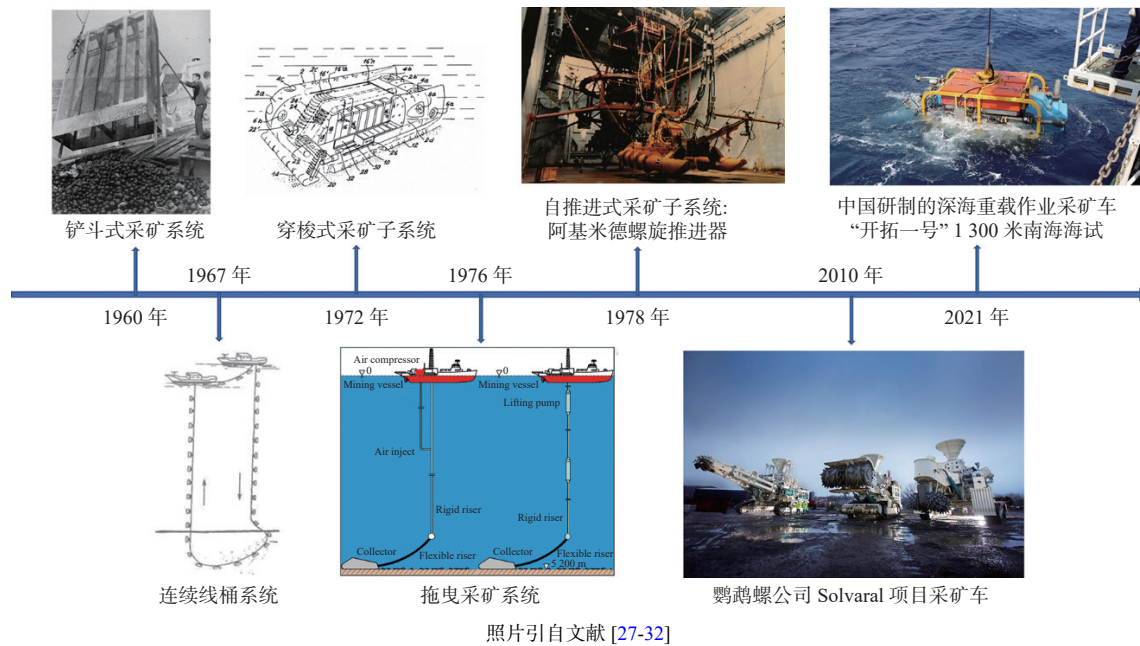
3 深海采矿技术发展

多金属硫化物矿区环境复杂且特殊, 对深海采矿作业设备的要求很高, 在采矿过程中需要多系统的协同控制和联合作业^[24-25]。面对深海高压环境, 如何从崎岖的基岩上剥离硫化物、高效地收集破碎矿物并将其运输到海面, 是硫化物开采技术的核心问题和难点所在^[26]。此外, 除了考虑到采矿效率, 环境友好型采矿技术也是未来深海采矿技术需要努力的方向。

深海采矿技术和装备经历了从简单的铲斗式采矿系统^[27-28]到连续线桶系统^[29-30]、穿梭式采矿系统^[31]、拖曳式采矿系统^[32], 最后逐渐形成了目前国际上普遍认可的履带式采矿机加水力提升的综合采矿系统(图 2), 这种采矿系统可适用于多种深

海矿产的开采要求。多金属硫化物的采矿技术和设备也是基于成熟的陆地采矿技术和履带式采矿机更新升级的, 例如索瓦洛 1 项目的采矿系统就主要分为水下采矿设备、管道提升系统以及水面采矿船。水下采矿设备有辅助采矿机、主采矿机和收集矿机 3 种。辅助采矿机用于初期开采以及为主采矿机和收集矿机准备合适的场地, 搭载采掘头可处理粗糙地形, 创建采矿工作面; 主矿机是一种高效的切割机, 在采矿工作面上进行主要的开采工作, 其采用螺旋滚筒组成的截割部连续切割并破碎矿物; 集矿机将开采的矿石收集并以矿浆形式泵送至海面采矿船^[32-33], 矿浆在海平面脱水后装入货船并转运至岸上^[34], 其中, 管道提升设备输送矿浆主要靠水力提升^[35-36]。

2007 年, 澳大利亚深海采矿商业公司海王星矿业公司(Neptune Minerals)的“Trident”工程提出了一个由动力定位采矿船、提升软管、空气输送泵组、海底硫化物矿石破碎机、海底采矿机等部分组成的适合商业开采的概念性系统。2010 年, 鹦鹉螺矿业公司(Nautilus Minerals)发布了全球首套商业深海采矿装备^[37]。2014 年, 欧盟启动了蓝色采矿项目(Blue Mining), 研究海底多金属硫化物的可持续开采、资源高效利用、垂直输送等采矿技术与方法^[38]。2016 年, 荷兰代尔夫特理工大学设计了双槽掘进头, 预计能实现 2 000 m 水深海



照片引自文献 [27-32]

图 2 深海采矿技术发展简史

Fig.2 The brief history of the development in deep-sea mining technology

底多金属硫化物的垂直采矿^[39]。2017年,日本采用隧道式掘进机和双蜗壳潜水泵系统,将硫化物矿浆从1600m深通过立管泵送至海面船,采得共计16t硫化物矿石^[40]。

中国深海多金属硫化物开采技术发展较晚,20世纪90年代深海采矿技术研发才正式启动。通过3个“五年计划”的努力,确定了“海底履带自行水力集矿机采集-水力管道矿浆泵提升-海面采矿船支持”的深海采矿技术方案,并于2001年在云南抚仙湖完成了130m湖试,设计了中试采矿系统1000m海试总体方案。2021年,中国研制的深海重载作业采矿车“开拓一号”在南海完成1300m深海实验。2021年,李艳等^[26]以绿色高效采集为目标,提出了一种深海硫化物采-集一体化采矿车的总体设计方案。总的来讲,中国关于深海采矿技术的研究主要为切削掘进头仿真、优化、集矿车方案设计和水力提升系统等,相关的试验研究报道较少^[41-42]。

4 多金属硫化物采矿对海洋环境的影响

多金属硫化物采矿过程中的海底集矿、管道提升输送、水面船上选矿和尾矿废水中深层排放,不仅会破坏海底地貌和底栖生态环境,还会影响水体环境和海洋生物(图3)。此外,采矿系统运行产生的噪声、光和磁对海洋生物的影响也不可忽视,尤

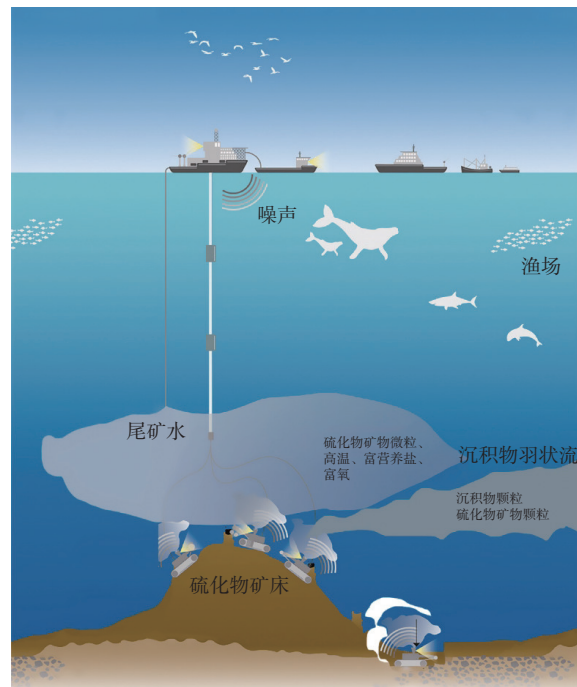


图 3 深海多金属硫化物采矿对水体环境与海洋生物的影响示意图^[41]

Fig.3 Schematic diagram of the impacts of deep-sea polymetallic sulfide mining on water environment and marine organism^[41]

其是对极端脆弱的深海生态系统,其破坏性可能更严重。目前还没有商业化的硫化物矿产资源开采活动,硫化物采矿环境影响无法做到定量评估,只能通过小规模扰动试验和研究定性推测深海采矿对海洋生物的可能影响因素。

4.1 对海底地貌的影响

硫化物矿区表面通常被沉积物或岩石覆盖, 采矿作业时首先需要将表层覆盖物搬运至矿区外围, 再对硫化物进行破碎, 搬运和破碎过程会造成表层沉积物扰动再悬浮, 较重的颗粒物会在扰动区周围迅速再沉积, 偏轻的悬浮物可能随海底底流漂浮形成沉积物羽状流。例如鸚鵡螺矿业公司的索瓦洛 1 采矿项目, 其硫化物矿区上覆的沉积物最厚处达 6 m, 采矿产生的羽状流扩散影响范围达数千米^[34]。印度的 INDEX 海底沉积物扰动试验和 DOMES 采矿影响试验, 在距离扰动区 100~150 m 观测到了明显的再沉积现象, 距离采矿区 5~10 m 区域有数厘米厚的新沉降沉积物。模型结果显示, 悬浮物再沉积的速率可能比此前预估的再沉积速率更慢^[43], 也就是说这些沉积物可能会随海流被输送到更远的地方, 影响的范围更大。德国联邦地球科学和自然资源研究所的科学家通过电脑建模发现, 5 台推土机大小的采矿机同时工作, 每小时可卷起 1 000 t 沉渣, 采矿所产生的尘埃 10 d 内就能到达 12 km 外, 并覆盖那里的一切生物^[43]。深海采矿导致沉积物悬浮再沉降和羽状流的扩散会改变采矿区及其下游的海底地貌以及底栖生物栖息地的生态环境。

4.2 对水体环境的影响

沉积物被扰动和硫化物被破碎后, 沉积物间隙水的释放、沉积物中某些物质的溶解、矿物颗粒的暴露以及矿浆脱水后形成的尾矿水可能会改变海水的物理化学性质。德国的 ATESEPP (Impacts of Potential Technical Interventions on the Deep-Sea Ecosystem of the Southeastern Pacific off Peru) 实验结果显示, 深海表层沉积物被扰动后底层水中 Zn、Pb 和 Cu 等重金属的浓度稍有增加^[44]。采矿活动会引起硫化物矿物氧化释放酸性物质, 导致海水 pH 下降, 但不会影响底层流动海水的缓冲能力^[45]。然而, 尾矿水相比底层水具有高温且富含大比表面积的硫化物颗粒, 这会加快硫化物矿物的氧化速率。如果在海底排放尾矿水, 硫化物颗粒氧化引起的海水酸化, 并可能进一步导致海水的缓冲能力降低。根据模型计算, 如果在海面以下 500~3 000 m 排放尾矿废水, 其中, 90% 较细的悬浮物再沉积需要 3~10 年的时间, 而较粗的颗粒物在一个月左右就能完全再沉积^[46]。硫化物颗粒会在海水中或者海

底存在数年时间, 并随着海流扩大影响范围, 其引起的物理影响可能更值得关注^[45]。此外, 硫化物矿从海底提升的过程中, 温度较低的底层海水会被带到上层, 从而导致上层海水温度降低, 并进一步影响上层海水的生态环境。

尾矿水与表层海水的理化性质差异较大, 具有低温、高营养盐和高浊度等特点^[45], 尾矿水的排放深度也是科学界讨论的热点。如果尾矿水在海水表层排放可能会引起较多的问题, 譬如: 尾矿水中高浓度的悬浮物不仅会改变水体浊度降低透光率, 而且其中的营养元素和硫化物矿物微粒释放的铁元素等可能影响海水表层的初级生产力, 这种影响的上限深度通常是 25 m。深度超过 25 m 时, 采矿活动导致的光衰减影响可忽略不计, 且 25 m 以深的海水初级生产力因为羽状流的影响而降低了约 45%^[47]。

尾矿水排放还会造成局部海水温度降低, 目前科学界倾向于将尾矿水在中深层或者底层排放, 但仍需面对颗粒物引起的环境问题。索瓦洛 1 项目第 1 阶段的环评报告显示, 尾矿水在海床附近排放, 悬浮物浓度将会达到 6 000 mg/L, 其中大部分是硫化物微颗粒 (<10 μm)。单个采矿活动期间, 预计尾矿水以 0.3 m³/s 的速度排放, 那么每年会产生约 1 000 万 t 尾矿水, 这些尾矿水会被排放至海床上方 25~50 m 处, 并且在距离排放点 10 km 的位置仍能被检测到^[34]。

4.3 对生物的影响

深海采矿产生的噪声会显著影响海洋生物的行为和活动。许多大型海洋动物, 如鲸鱼通过声音进行交流和定位, 还有一些鱼类也通过声音进行交流, 一些生物幼虫也通过声音定位栖息地, 特别是在没有光照的深海。过多的背景噪音会干扰鱼类在距离上区分声音的能力, 影响鱼群之间交流的时间、地点和方式^[48]。索瓦洛 1 第 1 阶段的环境影响评估报告指出水下噪声可在距离源头 600 km 范围内听到, 并且在 15 km 范围内会对鲸类产生掩蔽效应^[34]。正如船舶噪音会影响珊瑚幼虫定位生存环境一样, 深海采矿的噪声也会影响海底生物幼虫对环境的定位^[49]。研究发现, 深海生物幼虫对热液喷口的定位可能是依靠热液喷口的声景 (Soundscapes)^[50]。海底采矿车对矿床的破坏可能会改变矿区的声景, 这可能会影响深海生物幼虫的传播和热液喷口之间的生物连通性。

此外,海底采矿引起的悬浮物微小颗粒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,其中硫化物微粒还可能毒害耐受高金属浓度的贻贝^[51-52]。同时,悬浮物排放到中上层水体形成羽状流,不仅会破坏水体透光性,妨碍海洋浮游植物的光合作用,还可能毒害浮游生物,甚至通过食物链累积作用对生物物种的生存造成威胁。特别是许多硫化物矿区分布在一些国家的专属经济区,与某些经济渔场有空间上的重叠,或者是邻近渔场^[53],对于鱼卵孵化率、幼鱼存活率等也会产生一定的影响。

深海采矿还会在海底产生巨大的涡流,将矿床上所有的覆盖物、生物全部剥离,切断热液喷口之间的生物连通性,破坏底栖生物栖息地,甚至杀死或者掩埋某些运动能力弱的底栖生物。因此,一旦深海采矿开始实施,矿床上的海洋生物很可能会遭受灭顶之灾,导致难以挽回的生物多样性缺失和无法预估的深海生态系统破坏。因此,原则上不允许在活动的热液喷口矿区进行采矿作业。

海底沉积物扰动试验 INDEX 结果发现,短时间内扰动区的大型底栖生物丰度减少了 68%,小型底栖生物丰度减少了 40%^[54]。对于不同物种的大型底栖生物来讲,受扰动的影响情况及其程度各不相同^[55],例如海金联(海洋金属联合组织)在东北太平洋克拉里昂-克利珀顿断裂带内进行的底栖影响实验(IOM-BIE, InterOceanmetal Joint Organization-Benthic Impact Experiment)中,扰动后大型底栖生物数量增加^[56],这可能是由于扰动导致深层沉积物悬浮上涌,提供了底栖生物生存所需的有机质^[56-58]。通过对比 INDEX 试验前后的表层沉积物(0~2 cm)的有机物含量发现,再沉积的表层有机物含量增加了 30%~45%^[59]。有研究认为羽流可能是中上层水体中海洋生物的重要能量来源,然而目前关于硫化物开采对与羽流相关的中上层水体生物的潜在影响研究极少^[60]。

5 多金属硫化物采矿的环境保护措施

目前海底多金属硫化物矿产资源仍未有商业开采先例,而且硫化物矿区附近存在特定的化能合成生态系统和独特的生物群落,为了避免或尽量减少对海洋生态系统的有害影响,根据 ISA 制定的环境规章和区域环境管理计划以及目前国际上开展的有关深海采矿环境影响评估方面的研究,多金属

硫化物采矿环境影响评估亟待开展相关方面的重点研究。

5.1 进一步加强环境基线研究

ISA 要求深海硫化物勘探合同承包商在矿区勘探阶段,必须开展物理、化学、生物和沉积等四大类环境基线调查,通过充分的环境基线调查了解深海海洋生物及其栖息地的生态环境,为进一步评估采矿对海洋生物的潜在环境影响提供支撑^[61],同时为环境综合评价体系的生态阈值设定提供参考价值。此外,由于深海矿区环境决定了采矿的装备及其作业流程,环境基线数据在深海采矿系统设计及采矿作业规划过程中也发挥着关键作用^[62]。然而,现有的环境评估报告仍存在环境基线数据类型不完整、时间尺度不够长等问题,从而导致采矿环境影响评估工作滞后^[34,63]。

由于环境基线调查缺乏具有针对性的系统的科学设计,基础信息不完整、关键环境因子的长周期监测数据欠缺,导致现有的环境基线数据基本无法支撑完成任何一个采矿区的环境影响评价。因此,需要制定一套标准或方法帮助实现采矿环境影响评价。ISA 此前发布的报告提供了多金属硫化物矿区的环境基线调查和长时间监测涉及的研究内容、数据类型和所需样品的性质^[64]。2015年,在 JPI OCEANS(Joint Programming Initiative Healthy and Productive Seas and Oceans)项目资助下,由德国主导、多个欧盟国家参与,启动了深海采矿生态效应研究项目,尝试应用多学科参数指标评价深海采矿对生态系统的长期影响。

深海生态环境保护至关重要,深海采矿前必须了解深海开采的风险,再决定是否开采以及在何种条件下允许采矿。

5.2 选划“参照区”

参照区选划旨在对深海采矿造成的海洋环境影响进行更加准确和定量的评估。ISA 要求采矿前期环境基线调查需选划影响参照区(impact reference zones)和保全参照区(preservation reference zones),并对实施采矿的区域和受采矿影响的区域进行环境影响评价。影响参照区是指用于评估“区域”内活动对海洋环境的影响,并且该参考区能代表“区域”的环境特性。保全参照区是指不得进行采矿的“区域”,并确保海底生物群落的代表性和稳定性,以便比较和评估其与采矿区的海洋环境生物

多样性的任何变化^[65]。

硫化物保全参照区选划时, 要求必须与采矿区具有相似的环境要素特征(包括流速、光强、压力、浊度等)和生态系统群落结构(包括生物组成、丰度、多样性和遗传特性), 并且硫化物保全参照区必须是生物连通网络的一部分, 与其他的生物群落具有高度的连通性^[66-67]。此外, 不同的采矿规模需要不同规模和数量的参照区。结合采矿影响关键环境要素和采矿规模, 才能选划适合于试采阶段、开采阶段和闭矿阶段等不同采矿阶段的参照区。并且, 参照区选划的空间尺度和数量也需要有科学的理论依据支撑。

深海采矿活动结束后, 硫化物矿区的生物群落结构就需要依赖硫化物保全参照区的环境要素特征和生态系统群落结构进行一定程度的生物连通性恢复。

5.3 建立海底环境监测系统

传统的调查船现场采样-实验室分析方法已不能满足海洋生态环境监测和预警对数据质量的要求, 急需一种高度自动化、运行时间长、多方位立体化的海洋监测系统^[68-69]。未来的商业深海采矿, 需要长时间、多类型的环境基线数据用于采矿环境影响评估, 还需要实时的环境数据来支持采矿环境影响评估模型和预警系统。目前欧美及日本等国纷纷投入巨资构建并成功运行海底观测系统, 如美国 OOI(Ocean Observatories Initiative)观测网、加拿大 ONC(Ocean Networks Canada)观测网、欧洲 ESONET(European Sea Floor Observatory Network)观测网、日本 DONET(Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis)观测网等。这些观测系统可搭载多种类型的传感器, 实现海面到海底的长期连续实时原位高精度的综合性海洋生态环境观测。从而对海洋动力过程、海洋生态环境、海底矿产资源和海底地质活动进行立体观测和预警^[70]。

现有的海底观测网平台基本集中在各国专属经济区。若在国际海底区域加大投入并加快建设海底观测网平台系统, 不仅可以测试新的采矿技术, 监测采矿对环境的影响, 也有利于各国向国际海底管理局申请矿产资源勘探许可^[71]。

5.4 建立硫化物采矿环境影响模型

深海硫化物采矿作业时会引起沉积物扰动产

生悬浮羽状流, 并且采矿机会排放富含矿粒的尾矿形成羽状流。这些羽状流的扩散路径及其对环境影响的评估, 可通过建模的方式来预测和估算。欧盟资助的深海资源开发项目和联合规划倡议“Ecological Aspects of Deep-Sea Mining”项目通过建模研究了采矿作业时羽流扩散过程中包括近场和远场的各项参数变化, 并基于此参数化的羽流扩散建模, 测试了自然事件(例如涡流)对羽流传播的影响^[72]。日本在对专属经济区的热液硫化物矿区进行勘探时, 也建立了环境影响模型, 包括硫化物采矿活动产生的悬浮物的扩散和再沉积模型、排放水的扩散模型、生态系统的影响和恢复预测模型^[73]。SUZUKI 和 YOSHIDA^[74]基于模型的方法判定和预测矿区生物群落的敏感性及其生境的弹性, 该模型还可用于预测生物群落及其生境恢复所需时间。

通常, 羽流扩散模型需要利用调查数据进行反复验证。此外, 羽流扩散模型还需考虑时间尺度和空间规模, 若混淆不同时间尺度与空间规模的模型输入和输出, 会大大增加预测结果的不确定性^[75]。基于环境基线数据以及深海采矿对生物生境的联合影响机制, 结合羽流扩散模型, 可进一步建立深海采矿环境影响评估模型和预警系统, 用于综合评估深海采矿对生物及其栖息地的联合影响, 避免对其造成严重破坏、超越环境承载力。

5.5 确定生态阈值和灾害触发因素

随着深海采矿环境影响监测手段多样化、积累的环境基线资料足够多以及深海采矿环境影响机制研究的不断深入, 深海采矿环境影响的科学评价逐渐从定性描述转向定量分析, 并成为未来发展趋势。2019年5月, 南非比勒陀利亚环境标准和指南工作组会议讨论了制定深海采矿环境影响标准值问题, 其中提到了已有的阈值情况, 譬如: 对北大西洋冷水珊瑚有害的羽流沉积物覆盖厚度 $< 10\text{ mm}$ 。生态阈值的概念已被用于判定深海采矿对环境影响的危害程度^[76]。

生态阈值是一个临界值, 超过这个临界点, 生态系统可能发生快速且不可逆转的变化^[77]。确定硫化物矿区生态系统的生态阈值, 首先需要了解影响硫化物矿区生态系统的结构和功能的重要要素, 并确定可能影响或改变这些重要要素的关键因素^[77]。通常生态系统处于非线性的动态变化, 不同的时空尺度有多种控制因素, 因此分析并确定生态阈值难度较大。然而, 生态阈值在环境管理的应用方面很

有潜力, 尽管目前还没有生态阈值应用于实际的硫化物采矿环境管理的先例, 但随着对生态阈值的研究不断深入, 相信未来的商业化硫化物采矿的环境管理中, 生态阈值会作为辅助决策者做决定的一项重要指标。

6 小结

深海金属硫化物采矿过程采用的海底采矿机、管道提升输送和水面选矿等工艺和装备可能会对海洋环境造成严重的破坏, 海底采矿机会直接破坏海底地貌, 改变底栖生态环境, 采矿搬运的沉积物会形成羽状流, 其影响会扩散到数千米外, 尾矿水的排放会影响水体环境, 这些都会威胁到海洋生物的生存。为进一步避免深海多金属硫化物采矿对海洋环境造成严重破坏, 采矿前需要在矿区及其周边充分开展环境基线调查及研究, 并根据基线数据选出影响参照区和保全参照区, 确定生态阈值和灾害的触发因素。通过建立有效的海底环境监测系统和硫化物采矿环境影响模型, 提前预判硫化物采矿引发的环境灾害和其他影响, 及时止损, 从而有效地保护海洋环境。

参考文献:

- [1] United States, Congress, Senate, Committee On Interior And Insular Affairs, Subcommittee On Minerals, Materials, And Fuels. Current developments in deep seabed mining: Hearing before the Subcommittee on Minerals, Materials, and Fuels of the Committee on Interior and Insular Affairs[M]. University of Michigan Library, 1975: 1-3.
- [2] MURPHY J M. Deep ocean mining: beginning of a new era[J]. Case Western Reserve Journal of International Law. 1976, 8(1): 46.
- [3] DUNN D C, VAN DOVER C L, ETTER R J, et al. A strategy for the conservation of biodiversity on mid-ocean ridges from deep-sea mining[J]. *Science Advances*, 2018, 4(7): 4313.
- [4] International Seabed Authority (ISA). Environmental Management Plan for the Clarion-Clipperton Zone(ISBA17/LTC/7) [EB/OL].[2022-9-10]. https://isa.org.jm/files/documents/isba-17ltc-7_1.pdf.
- [5] JOHAN F. Solwara 1 Deep Sea Mining Project: [R/OL]. Bank Track. 2016.
- [6] SHARMA R. Deep-sea mining: resource potential, technical and environmental considerations[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 3-21.
- [7] VON DAMM K L. Evolution of the hydrothermal system at East Pacific Rise 9°50'N: Geochemical evidence for changes in the upper oceanic crust[J]. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 2004, 148: 285-304.
- [8] HERZIG P M. Economic potential of sea-floor massive sulphide deposits: ancient and modern[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1999, 357(1753): 861-875.
- [9] BAKER M, GERMAN C. Going for gold! who will win the race to exploit ores from the deep?[J]. *Ocean Challenge*, 2008, 16(1): 10-17.
- [10] HANNINGTON M D, JAMIESON J, PETERSEN S. Seafloor massive sulfide deposits: continuing efforts toward a global estimate of seafloor massive sulfides[C]//OCEANS 2015-Genova. Genova, Italy: IEEE, 2015: 1-3.
- [11] MONECKE T, PETERSEN S, HANNINGTON M D, et al. The minor element endowment of modern sea-floor massive sulfides and comparison with deposits hosted in ancient volcanic successions[J]. *Society of Economic Geologists*, 2016, 18: 245-306.
- [12] MURTON B. Seafloor mining: the future or just another pipe dream?[J]. *Underwater Technology*, 2013, 31(2): 53-54.
- [13] VAN DOVER C L. The ecology of hydrothermal vents[M]. Princeton New Jersey: Princeton University Press, 2000: 424.
- [14] GRASSLE J F. Hydrothermal vent animals: distribution and biology[J]. *Science*, 1985, 229(4715): 713-717.
- [15] RINKE C, LEE R W. Pathways, activities and thermal stability of anaerobic and aerobic enzymes in thermophilic vent paralvinellid worms[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 382: 99-112.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] FLORES G E, WAGNER I D, LIU Y, et al. Distribution, abundance, and diversity patterns of the thermoacidophilic “deep-sea hydrothermal vent euryarchaeota 2” [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 47.
- [19] VAN DOVER C L. Inactive sulfide ecosystems in the deep sea: a review[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 461.
- [20] 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 and Coastal Management*, 2013, 84: 54-67.
- [21] GOLLNER S, MILJUTINA M, BRIGHT M. Nematode succession at deep-sea hydrothermal vents after a recent volcanic eruption with the description of two dominant species[J]. *Organisms Diversity and Evolution*, 2013, 13(3): 349-371.
- [22] LEVIN L A, MENDOZA G F, KONOTCHICK T, et al. Macrobenthos community structure and trophic relationships within active and inactive Pacific hydrothermal sediments[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2009,

- 56(19/20): 1632-1648.
- [23] ERICKSON K L, MACKO S A, VAN DOVER C L. Evidence for a chemoautotrophically based food web at inactive hydrothermal vents (Manus Basin) [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2009, 56(19/20): 1577-1585.
- [24] 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.
- [25] 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, 2019.
- [26] 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.
- [27] International Seabed Authority (ISA). Polymetallic nodule mining technology-current trends and challenges ahead[M]. International Seabed Authority, 2008: 54-81.
- [28] THIEL H. From MESEDA to DISCOL: a new approach to deep-sea mining risk assessments[J]. *Marine Mining*, 1991, 10(4): 369-386.
- [29] YAMAKADO N, HANDA K, USAMI T. Model tests on continuous line bucket mining system[C]. Offshore Technology Conference, OnePetro, 1978.
- [30] MASUDA Y, CRUICKSHANK M J, MERO J L. Continuous bucket line dredging at 12000 feet[C]. Dallas: Offshore Technology Conference, 1971: 873-841.
- [31] LEMERCIER P, MARCHAL P, MOREAU J P, et al. Submarine vehicle for dredging and raising minerals resting on the seabed at great depths[J]. United States Patent, 1982, 9: 21-56.
- [32] BROCKETT F H, HUIZINGH J P, MCFARLANE J A R. Updated analysis of the capital and operating costs of a polymetallic nodule deep ocean mining system developed in the 1970s[J]. *Polymetallic Nodule Mining Technology: Current Trends and Challenges Ahead*, 2008: 46-65.
- [33] 田先德, 杨锦坤, 韩春花, 等. 国际海域矿产资源勘探与开采技术现状与展望[J]. *海洋信息*, 2021, 36(2): 28-32.
- [34] STEINER R. Independent review of the environmental impact statement for the proposed nautilus minerals Solwara 1 seabed mining project, Papua New Guinea[J]. Bismarck-Solomon Indigenous Peoples Council. 2009.
- [35] FAIRLEY P. Robot miners of the briny deep[J]. *IEEE Spectrum*, 2016, 1(53): 44-47.
- [36] 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): 2848-2859.
- [37] SNELGROVE P V R, SMITH C R. A riot of species in an environmental calm: the paradox of the species-rich deep-sea floor[M]. *Oceanography and Marine Biology*, 2002: 319-320.
- [38] BOOMSMA W, WARNAARS J. Blue mining[C]. *IEEE Underwater Technology (UT)*, 2015: 1-4.
- [39] SPAGNOLI G, MIEDEMA S A, Herrmann C, et al. Preliminary design of a trench cutter system for deep-sea mining applications under hyperbaric conditions[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 41(4): 930-943.
- [40] OKAMOTO N, SHIOKAWA S, KAWANO S, et al. Current status of Japan's activities for deep-sea commercial mining campaign[C]. *OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)*. Kobe, Japan: IEEE, 2018: 1-7.
- [41] 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.
- [42] USUI A, SOMEYA M. Distribution and composition of marine hydrogenetic and hydrothermal manganese deposits in the north-west Pacific[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1997, 119(1): 177-198.
- [43] GILLARD B, PURKIANI K, CHATZIEVANGELOU D, et al. Physical and hydrodynamic properties of deep sea mining-generated, abyssal sediment plumes in the Clarion Clipperton Fracture Zone (eastern-central Pacific) [J]. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2019, 7(1): 1-14.
- [44] SCHRIEVER G, KOSCHINSKY A, BLUHM H, et al. Cruise Report ATESEPP: Auswirkungen technischer Eingriffe in das Ökosystem der Tiefsee im Sued-Ost-Pazifik vor Peru (Impacts of potential technical interventions on the deep-sea ecosystem of the southeast Pacific off Peru): Sonne cruise 106: January 1-March 9, 1996, Balboa/Panama-Balboa/Panama[M]. Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft, 1996.
- [45] BILENKER L D, ROMANO G Y, MCKIBBEN M A. Kinetics of sulfide mineral oxidation in seawater: implications for acid generation during in situ mining of seafloor hydrothermal vent deposits[J]. *Applied geochemistry*, 2016, 75: 20-31.
- [46] ROLINSKI S, SEGSCHEIDER J, SÜNDERMANN J. Long-term propagation of tailings from deep-sea mining under variable conditions by means of numerical simulations[J]. *Oceanography*, 2001, 48(17/18): 3469-3485.
- [47] BURNS R E. Assessment of environmental effects of deep ocean mining of manganese nodules[J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, 33(1): 433-442.
- [48] LOBEL P S, KAATZ I M, RICE A N. Acoustical behavior of coral reef fishes[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2010: 307-386.
- [49] LECCHINI D, BERTUCCI F, GACHE C, et al. Boat noise prevents soundscape-based habitat selection by coral planulae[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-9.
- [50] LIN T H, CHEN C, WATANABE H K, et al. Using soundscapes to assess deep-sea benthic ecosystems[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2019, 34(12): 1066-1069.
- [51] JOHN S P. Ocean Floor Mining[M]. USA: Noyes Data Corp., 1975: 201.
- [52] MARTINS I, GOULART J, MARTINS E, et al. Physiological impacts of acute Cu exposure on deep-sea vent mussel *Bathymodiolus azoricus* under a deep-sea mining activity scenario[J]. *Aquatic Toxicology*, 2017, 193: 40-49.
- [53] VAN DER GRIENT J M A, DRAZEN J C. Potential spatial intersection between high-seas fisheries and deep-sea mining in international waters[J]. *Marine Policy*, 2021, 129: 104564.
- [54] INGOLE B S, ANSARI Z A, MATONDKAR S G P, et al. Im-

- mediate response of meio and macrobenthos to disturbance caused by a benthic disturber[C]. Third ISOPE Ocean Mining Symposium, OnePetro, 1999.
- [55] RODRIGUES N, SHARMA R, NATH B N. Impact of benthic disturbance on megafauna in Central Indian Basin[J]. *Oceanography*, 2001, 48(16): 3411-3426.
- [56] TKATCHENKO G, RADZIEJEWSKA T, STOYANOVA V, et al. Benthic impact experiment in the IOM pioneer area: testing for effects of deep-sea disturbance[C]. Int Seminar on Deep Seabed Mining Tech, China Ocean Mineral Resources R&D Assoc, Beijing, 1996.
- [57] RAGHUKUMAR C, BHARATHI P A L, ANSARI Z A, et al. Bacterial standing stock, meiofauna and sediment-nutrient characteristics: indicators of benthic disturbance in the Central Indian Basin[J]. *Oceanography*, 2001, 48(16): 3381-3399.
- [58] FOELL E J, SCHRIEVER G, BLUHM H, et al. Disturbance and recolonization experiment in the abyssal South Pacific Ocean (diseol): an update[C]. Offshore Technology Conference, OnePetro, 1992: 25-34.
- [59] SHARMA R, NATH B N, PARTHIBAN G, et al. Sediment redistribution during simulated benthic disturbance and its implications on deep seabed mining[J]. *Oceanography*, 2001, 48(16): 3363-3380.
- [60] PHILLIPS B T. Beyond the vent: new perspectives on hydrothermal plumes and pelagic biology[J]. *Oceanography*, 2017, 137: 480-485.
- [61] 高岩. 国际海底区域环境管理计划进程、挑战与中国参与[J]. *环境保护*, 2021, 49(23): 71-76.
- [62] SHARMA R. Deep-sea mining: Economic, technical, technological, and environmental considerations for sustainable development[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2011, 45: 28-41.
- [63] Environmental Protection Authority of New Zealand. Trans-Tasman Resources Ltd Marine Consent Decision[R]. New Zealand and Government, 2014.
- [64] International Seabed Authority. Standardization of environmental data and information-development of guidelines[C]//Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop. Kingston, Jamaica: International Seabed Authority, 2001.
- [65] International Seabed Authority. Regulations on prospecting and exploration for polymetallic sulphides in the area International Seabed Authority[C]//130th Meeting of the Assembly of the International Seabed Authority. Kingston, Jamaica: International Seabed Authority, 2010: 49.
- [66] ARDRON J, ARNAUD-HAOND S, Beaudoin Y, et al. Environmental management of deep-sea chemosynthetic ecosystems: justification of and considerations for a spatially based approach[R]. Kingston, Jamaica: International Seabed Authority.
- [67] VAN DOVER C L, SMITH C R, ARDRON J, et al. Designating networks of chemosynthetic ecosystem reserves in the deep sea[J]. *Marine Policy*, 2012, 36(2): 378-381.
- [68] MOORE T S, MULLAUGH K M, HOLYOKE R R, et al. Marine chemical technology and sensors for marine waters: potentials and limits[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 91-115.
- [69] QAZI H H, MOHAMMAD A B, AKRAM M. Recent progress in optical chemical sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 16522-16556.
- [70] FENGHUA L, YANGUO L, HAIBIN W, et al. Research progress and development trend of seafloor observation network[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*, 2019, 34(3): 321-330.
- [71] 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): 8.
- [72] ALEJNIK D, INALL M E, DALE A, et al. Impact of remotely generated eddies on plume dispersion at abyssal mining sites in the Pacific[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-14.
- [73] NARITA T, OSHIKA J, OKAMOTO N, et al. Summary of environmental impact assessment for mining seafloor massive sulfides in Japan[J]. *Journal of Shipping and Ocean Engineering*, 2015, 5: 103-114.
- [74] SUZUKI K, YOSHIDA K. Mining in hydrothermal vent Fields: predicting and minimizing impacts on ecosystems with the use of a mathematical modeling framework[M]. *Environmental Issues of Deep-Sea Mining*, 2019: 231-253.
- [75] CLARK M R, DURDEN J M, CHRISTIANSEN S. Environmental Impact Assessments for deep-sea mining: can we improve their future effectiveness?[J]. *Marine Policy*, 2020, 114: 1-9.
- [76] LE J T, LEVIN L A, CARSON R T. Incorporating ecosystem services into environmental management of deep-seabed mining[J]. *Oceanography*, 2017, 137: 486-503.
- [77] GROFFMAN P M, BARON J S, BLETT T, et al. Ecological thresholds: the key to successful environmental management or an important concept with no practical application?[J]. *Ecosystems*, 2006, 9(1): 1-13.

An overview on the environmental impact and protection measures of deep-sea polymetallic sulphide mining

FU Quanyou^{1,2}, WU Guanghai^{1,2}, HAN Chenhua^{1*}, GAO Farong³

(1 Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 2 Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 3 School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The exploitation of deep-sea mineral resources and its environmental protection have become a research hotspot in recent years. The deep-sea environment is extremely complex and human's understanding of deep-sea organisms and their ecosystems are still very limited, while deep-sea mining will inevitably cause damage to the marine ecological environment. If the research on the impact of mining on the environment is not strengthened and relevant protection measures are formulated, the damage to the marine environment from deep-sea mining would be immeasurable in the future. Therefore, previous research results on the origin of deep-sea mining, the environment of polymetallic sulfide mining areas, the development of deep-sea mining technology, the impact of mining environment, and protection measures were studied systematically, and puts forward the development direction of deep-sea mining environmental impact assessment, so as to provide a reference for the monitoring and protection of deep-sea mining environment in the future.

Key words: polymetallic sulfide; deep-sea mining; environmental impact; environmental baseline; reference zones; ecological thresholds