

# 基于深海采矿过程的环境影响分析与 管理对策建议

刘大海<sup>1,2</sup>, 万 浏<sup>1,3</sup>, 王春娟<sup>1,2</sup>, 李成龙<sup>1,4</sup>

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 自然资源部 海岸带科学与综合管理重点实验室, 山东 青岛 266061;

3. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100;

4. 中国海洋大学 法学院, 山东 青岛 266100)

**摘 要:** 深海矿产开发所产生的环境影响是目前制约深海采矿的重要问题之一, 了解开发全过程的环境影响和生态响应是商业化开采的前提。本文以多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物三种具有代表性的深海固体矿产资源为例, 分析了开发前赋存环境、开发过程中及开发后的环境影响。结果表明: ①不同深海固体矿产资源的分布规律、深度以及生物特征等赋存环境存在较大差异, 因采矿活动带来的赋存环境改变、对环境的影响以及采矿潜在影响区域、影响时长和恢复潜力也有所不同。②多金属结核开采的环境影响着重考虑了沉积物羽流的影响, 结壳开采活动从沉积物扰动、外壳去除以及栖息地改变三个方面考虑环境影响, 多金属硫化物开采的环境影响还要增加对有毒物质的释放以及栖息地移除两个方面的考虑。③深海采矿对底栖生物种群的数量和物种组成皆会造成不同程度的影响。最后, 从持续跟进监测评估、充实数据、提升采矿技术与设备、顶层设计与决策管理、规则制定等方面提出了环境保护与可持续发展对策建议, 为深海采矿的环境影响评价及规则制定提供参考。

**关键词:** 深海矿产资源; 多金属结核; 富钴结壳; 多金属硫化物; 环境影响

中图分类号: P744

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)03-0367-12

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20211014001

**引用格式:** 刘大海, 万浏, 王春娟, 等. 基于深海采矿过程的环境影响分析与管理对策建议[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(3): 367-378. LIU D H, WAN L, WANG C J, et al. Environmental impact analysis and management countermeasures based on the whole process of deep-sea mining[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(3): 367-378.

随着社会的发展, 陆地金属矿产的储量正在减少, 深海矿物如多金属结核、锰铁壳以及热液硫化物被认为是战略金属的替代来源<sup>[1]</sup>。中国经济快速发展过程中对矿产资源的需求以及建设海洋强国的战略需求, 使勘探和开发深海矿产资源的形势愈加紧迫<sup>[2]</sup>。深海海底蕴含丰富矿产资源, 是一个复杂脆弱、恢复缓慢的生态系统<sup>[3]</sup>。底栖生态系统包括多种生境, 如沉积物深海平原、热液喷口、海山、大陆斜坡和海底峡谷等<sup>[4]</sup>, 是全球重要的生物多样性和特有性储藏库, 具有重要的生态系统服务功能(如碳固存和养分循环)<sup>[5]</sup>。深海矿产资源的勘探和开采过程对周围环境产生的干扰, 极易对上述生态系统产生影响, 大致分为 3 种: ①采矿系统对海底环境, 尤其是海底系统的影响; ②采矿船废液、废水排放对海洋环境特别是表层水域的影响; ③陆上加工处理造成的环境影响<sup>[6]</sup>。

本文以多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物三种具有开发前景和商业开采价值的深海固体矿产资源为例, 以开发全过程环境(开发前赋存的相对静态环境、开发过程中的动态扰动环境和开发后的相对静态

收稿日期: 2021-10-14

资助项目: 国家社科基金重大专项

作者简介: 刘大海 (1983—), 男, 正高级工程师, 博士生导师, 博士, 主要从事海洋空间管理规划与自然资源政策方面研究. E-mail: liudahai@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

环境)为研究对象,以深海采矿前、过程中、采矿后的环境变化状况和生态系统状态为主线,对海底矿产资源开发过程中原有海洋环境所受的影响进行整体研究(图 1),并针对如何减少深海采矿对海洋环境的扰动开展定性分析,拟为深海采矿的海洋环境影响评价及规则制定提供参考和依据,为深海矿产资源开发过程中海洋环境管理计划的制定提供参考,以促进深海矿产资源开发的可持续发展。

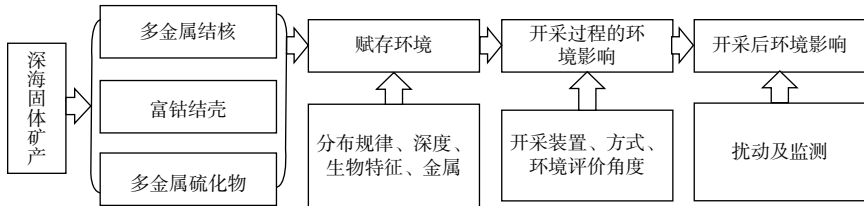


图 1 深海矿产开采对环境影响研究框架

Fig. 1 Research framework for environmental impact resulting from deep-sea mineral exploitation

## 1 深海固体矿产资源赋存环境

对深海矿产资源赋存环境的有效把握是矿产资源开采的前提,也是矿产开采环境影响评估的重要一环。本文分析了 3 种代表性深海固体矿产的分布规律、分布深度、基本环境、生物特征及主要元素(表 1)。

表 1 深海固体矿产资源(多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物)赋存环境

Table 1 Occurrence of deep sea solid mineral resources (polymetallic nodules, cobalt-rich crust and polymetallic sulfide)

| 深海矿产   | 分布位置                                    | 分布水深/m                     | 基本环境                                          | 生物特征                                      | 主要元素                           |
|--------|-----------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|
| 多金属结核  | 所有主要海洋的深海平原 <sup>[7-8]</sup>            | 4 000~6 500 <sup>[8]</sup> | 在深海沉积物表层或向下 10 cm 内形成的二维沉积物中 <sup>[7-8]</sup> | 底栖生物密度低;结核生长可能依赖于大型底栖生物的活动 <sup>[9]</sup> | Mn、Co、Ni、Cu <sup>[8]</sup>     |
| 富钴结壳   | 海山的山顶、侧翼、宽鞍状结构的坚硬岩石表面 <sup>[8-10]</sup> | 800~3 000 <sup>[8]</sup>   | 结壳大多与坚硬的基岩表面紧密相连 <sup>[8-9]</sup>             | 微生物群落参与循环;深水无脊椎动物群对机械干扰敏感 <sup>[11]</sup> | Co、Ni、Te、Pt、REE <sup>[8]</sup> |
| 多金属硫化物 | 大洋中脊、火山弧和弧后扩张中心的热液区 <sup>[12]</sup>     | 1 000~3 500 <sup>[8]</sup> | 主要分布于大洋中脊和岛弧系统的热液区 <sup>[12]</sup>            | 世界上唯一完全由化学合成的独特底栖生态系统 <sup>[13]</sup>     | Cu、Zn、Pb、Au、Ag <sup>[8]</sup>  |

### 1.1 多金属结核

多金属结核也称铁锰结核,是由铁的氢氧化物和锰的氧化物组成的结核状矿物集合体,主要分布在深海(水下约 4 000~6 500 m)平原上<sup>[7-8]</sup>,丰度为 5~20 kg/m<sup>2</sup><sup>[14]</sup>,在 3 种深海固体矿产资源中分布水深最深。多金属结核与海底沉积物共存在深海沉积物表层或向下 10 cm 内形成的沉积物中。结核的 Mn、Co、Ni、Cu 等元素含量较高,具有潜在的经济价值<sup>[8]</sup>。结核主要分布在太平洋,其次是印度洋。位于东北太平洋海盆的克拉里昂-克里帕顿断裂带之间的地区(Claron Clipperton Fracture Zone, CCFZ)是多金属结核经济价值最高的地区,位于热带太平洋东部和印度洋中部的结核因富含稀土元素等金属而具有特殊的经济利益<sup>[15]</sup>。

采用可预测机器模型分析结核生长环境条件,结果显示结核形成的条件重要度排序从高到低依次为:低沉降速率、中等高氧值、黏土岩性、夏季低海面生产力、较低底栖生物密度、水深>4 500 m、较低总有机碳含量<sup>[9]</sup>。尽管目前未见深海沉积物中多金属结核生成与深海生态系统之间存在关系的结论和证据,然而结核的生长依赖于底栖大型动物的活动,低密度的底栖大型动物足以通过扰动和觅食等活动进行沉积物再分配,从而达到结核再生长或不再被沉积物覆盖的效果<sup>[9]</sup>,结核反过来为固着生物提供了有价值的坚硬基质,并为缝隙居住的动物提供了栖息地<sup>[9]</sup>。

## 1.2 富钴结壳

富钴结壳又称铁锰结壳、锰结壳或钴结壳, 是通过水合氧化锰或水合氧化铁胶体沉积到大洋深部任何固结的底质上形成的<sup>[16]</sup>, 主要分布在海山的山顶和侧翼、海台以及宽鞍状结构的坚硬岩石表面(水下约 800~3 000 m)<sup>[8-9]</sup>。富钴结壳中含有 Co、Ni、Te、Pt、REE 等元素, 主要分布在太平洋、大西洋和印度洋。富钴结壳大多与坚硬的基岩表面紧密相连, 最厚和最具经济意义的结壳形成在水深 800~2 500 m 的海山峰顶的外缘和鞍状部, 其 Co 和 Ni 的含量较高<sup>[15-17]</sup>。

含有富钴结壳的海山区域可能存在底栖动物和微生物群落。底栖动物通常生长缓慢、寿命较长、对机械干扰敏感。微生物群落可能参与了富钴结壳区域的硫、氮和金属循环, 硫氧化和金属氧化是这一生态系统潜在的主要能源来源<sup>[11]</sup>。

## 1.3 多金属硫化物

多金属硫化物是海底高温热液活动的产物, 是由灼热(高达 350 ℃)的海水从海底上升并以海底烟囱(“黑烟囱”)或圆顶的形式沉淀出浸出的金属而形成的<sup>[8]</sup>。不同于多金属结核和富钴结壳, 硫化物矿床形成局部的三维体<sup>[8, 13]</sup>, 多金属硫化物含有 Cu、Zn、Pb、Au、Ag 等金属, 主要分布于大洋中脊、火山弧和弧后扩张中心的热液区。其中 2/3 的热液系统与洋中脊相连, 1/3 与岛弧系统相连<sup>[12]</sup>。最早发现的热液喷口位于东太平洋隆起的洋中脊, 且热液喷口的出现频率与其扩展速率之间存在明显的联系, 这取决于岩浆作用的强度。

富含多金属硫化物的热液矿床附近的独特生物群落, 构成了具有世界上唯一完全由化学合成的独特底栖生态系统, 生产力非常高, 具有较高的内在经济价值<sup>[13]</sup>。喷口附近的大部分底栖生物将会因采矿活动而受到影响。

# 2 开采过程可能产生的环境影响

深海固体矿产资源的开采会对其原有赋存环境产生影响。矿产提取、采集、提升、洗涤、海上处理, 及运输过程都会对原有海洋的海底、水柱和海面环境产生不同程度影响<sup>[18]</sup>。多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物三种矿产资源开发过程对海洋环境的影响具备一定程度的相似性, 共性主要体现在: ①对海底区域的影响。深海采矿活动可能会因为扰动而对海底赋存环境产生直接影响, 例如矿产开采工具工作过程对海底的影响、来自过滤水体的次表层羽流对海底区域产生的潜在影响等, 主要包括矿物与栖息地的迁移、羽流、光、噪音和振动<sup>[18]</sup>。②对水体的影响。矿产提升过程中, 来自加工机械的废物、油污和噪音污染等也会对周围环境产生影响<sup>[19]</sup>。③对海面区域的影响。输送管道向上运矿、生产支持船、矿从生产支持船运作支撑、驳船/散货船矿物转移等矿产收集过程均会对海面产生潜在影响, 包括照明、噪音、常规排放, 以及其他影响<sup>[19]</sup>。

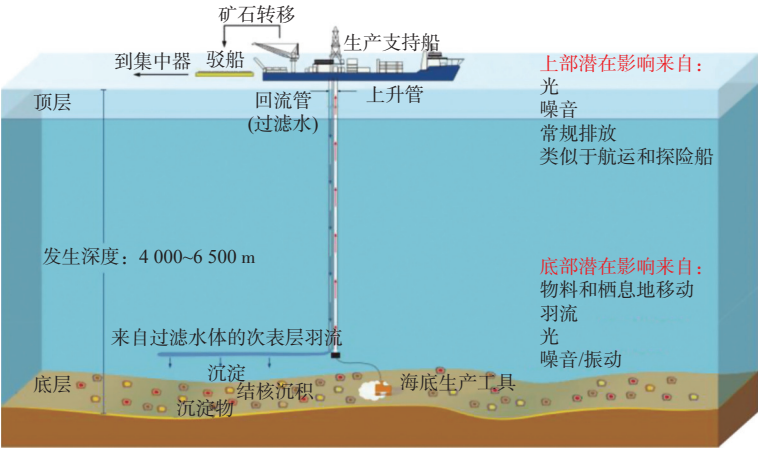
不同矿产的开采对海底区域的影响因矿产的种类、赋存环境、采矿工具和采矿方式的不同而有所差异。3 种矿产开采的开采装置、方式以及环境影响评价角度如表 2 所示。矿石采掘装备是海底矿床开采的核心装备之一, 主要用于将矿床剥离基岩或沉积物, 兼具切割和掘进的功能。结核的开采多采用水力式采掘方式, 通过高压水流在结核周围负压抽吸完成矿石采掘<sup>[2]</sup>。本文从结核提取和集矿作业两个方面对结核的开采进行环境影响分析。富钴结壳的开采一般使用螺旋滚筒采掘装置将其与基岩剥离采掘<sup>[2]</sup>, 富钴结壳与下伏岩石表面相连接, 而该表面常常不规则, 这给富钴结壳采矿机带来了技术挑战。采矿机需要确定刀具前方的地壳厚度, 并不断调整切削深度以匹配该厚度<sup>[20]</sup>。多金属硫化物的采掘装备兼具切割和掘进功能, 一般采用辅助切割机或多功能一体化采掘装备<sup>[2]</sup>。本文从表面切割、硫化物提取和集矿作业三个方面对多金属硫化物的开采进行环境影响分析。

表 2 深海固体矿产资源开采装置、方式以及环境影响评价角度  
Table 2 Mining devices, methods and environmental impact assessment of deep-sea solid mineral resources

| 深海矿产   | 开采装置                            | 开采方式                         | 环境影响评价                                |                    |
|--------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
|        |                                 |                              | 矿物提取                                  | 集矿作业               |
| 多金属结核  | 水力式采掘装置 <sup>[2]</sup>          | 高压水流在结核周围负压抽取 <sup>[2]</sup> | 沉积物扰动、海底形态改变、栖息地改变 <sup>[21]</sup>    |                    |
| 富钴结壳   | 螺旋滚筒采掘装置 <sup>[2]</sup>         | 剥离采掘 <sup>[2]</sup>          | 沉积物扰动、外壳的去除、栖息地改变 <sup>[21]</sup>     | 噪音 <sup>[21]</sup> |
| 多金属硫化物 | 辅助切割机或多功能一体化采掘装备 <sup>[2]</sup> | 切削和掘进 <sup>[2]</sup>         | 沉积层表面破坏、有毒物质释放、栖息地被移走 <sup>[21]</sup> |                    |

2.1 多金属结核开采

多金属结核采矿活动发生在水深 4 000~6 500 m 的深海底平原区 (图 2)<sup>[21]</sup>。多金属结核的存在较大提升了沉积物的硬度。海底结核与沉积物的比例平均为 1 : 9<sup>[22]</sup>，这意味着当结核被提取时，占总物质 90% 的沉积物也会受到扰动<sup>[18]</sup>。同时，结核的提取可能会永久性地改变海底形态、海底群落和与之相关的特殊动物群<sup>[23]</sup>，主要风险和影响见表 3。



注：引自文献 [21]。

图 2 深海多金属结核采矿系统及潜在环境影响来源示意图

Fig. 2 Schematic diagram of deep-sea polymetallic nodules mining system and potential environmental impact sources

表 3 深海多金属结核开采的主要风险和影响<sup>[21]</sup>  
Table 3 Main risks and impacts of deep-sea polymetallic nodules mining<sup>[21]</sup>

| 采矿活动 | 赋存环境改变 | 对环境影响                            | 潜在影响范围         | 影响时长及恢复潜力                   |
|------|--------|----------------------------------|----------------|-----------------------------|
| 结核提取 | 沉积物扰动  | 含沙羽流：光穿透减少、减少浮游生物的生长、增加生产力的食物链效应 | 数千平方千米的范围      | 采矿活动期间受影响；一旦活动停止，恢复将是迅速的    |
|      |        | 颗粒载荷：可能会造成生物窒息                   | 取决于采矿过程和当地潮流   | 采矿活动期间受影响；恢复缓慢，特别是在受严重影响的地区 |
|      |        | 沉积物粒度改变：导致生物栖息地改变                | 沉积物羽流影响区域      | 影响时长受沉积物粒度分布变化的影响           |
|      | 改变海底形态 | 彻底干扰海床及其密实成型度                    | 采矿区域           | 长期 (几百至几千年) 影响；恢复极其缓慢       |
| 集矿作业 | 栖息地改变  | 种群密度和结构改变                        | 采矿区域及羽流影响区域    | 恢复可能非常缓慢                    |
|      | 噪音影响   | 对海洋哺乳动物的掩蔽效应                     | 低频噪声可传播 600 km | 一旦活动停止，恢复迅速                 |

结核提取对赋存环境的影响可分为沉积物扰动、海底形态改变以及栖息地改变三个方面。沉积物扰动产生的含沙羽流在光区 (深度<200 m) 释放可能会减少光的穿透，阻碍浮游生物的生长，或释放深海营养物质，增加生产力的食物链效应。同时，在海床附近的沉积物羽流含有颗粒载荷，尽管影响时长仅为采矿期间，但是其潜在扩散区域将取决于采矿过程和当地潮流，可能超出国际海底管理局批准的合同区域(最大

7 500 km<sup>2</sup>)边界几千米。这样的扩散会使深海底栖生物窒息, 而且其恢复可能非常缓慢, 尤其是在受影响严重的地区。根据相对于采矿和/或沉积物羽流影响的位置, 沉积物的粒度可能会向更粗或更细方向变化, 从而造成栖息地沉积物成分的改变。羽流背景沉积速率较低, 因而这种改变可能会持续很长时间。同时, 沉积物的扰动也可能导致具有生物毒性的硫化物、有机污染物和重金属的释放<sup>[24-25]</sup>。最细的颗粒在水柱中停留的时间最长, 因此被输送的距离最远。由于其具有吸附特性, 这部分沉积物可能含有最高浓度的有害物质<sup>[26]</sup>。

多金属结核的开发过程包括清除结核、彻底干扰海床并对其压实的过程(表 3), 从而改变海底形态。这个过程产生的影响是长期的, 通常为几百至几千年, 因为一个非致密的表层沉积物可能要经过几百到几千年才能重新形成。对于几百年才可以形成的沉积物和已经存在了数百万年的结核来说, 受扰动后的恢复过程是极其缓慢的<sup>[3]</sup>。

海底集矿机在水下开展集矿作业时, 海底和船舶作业的物理扰动会产生水下噪音<sup>[27]</sup>(表 3)。据估计, 海底集矿机产生的噪音输出与噪音较大的货船相当且集中在低频率(<1 kHz)<sup>[28]</sup>。低频噪声可传播 600 km, 对 15 km 以内的海洋哺乳动物产生剧烈影响。其对海洋哺乳动物产生的掩蔽效应, 可能会使其暂时离开。

综上, 对沉积物羽流影响的评估具有至关重要的意义, 因为它们可能使结核开采的影响范围远远超出开采区域, 使影响扩大。因此, 充分估计沉积物的扩散范围是估计海底矿物开采对海洋影响的关键问题。本文以深海多金属结核开采对深海沉积物的扰动为例, 定性研究了对采矿过程中因沉积物扰动而引发的潜在羽流(图 3)。由于采矿系统尚未进行商业化运作, 深海结核开采的具体配置尚不清晰, 而水力集矿结合结核收集器目前被认为是最可行的提取方法之一<sup>[29]</sup>。因此, 需考虑利用此方法时基本开采过程对环境的影响, 这一过程包括从海底收集的结核和沉积物的半液体层由液压运输泵系统提升到采矿支持船上, 含矿泥浆被脱水, 残留的沉积物被泵回大海<sup>[23]</sup>。在多金属结核的提取过程中, 沉积物会受到采矿设备的物理扰动, 导致了海底附近和水柱中沉积物柱的产生(图 3), 此外结核采集过程去除了表层沉积物, 将悬浮固体扩散到水体中, 导致水柱中羽流的产生<sup>[30]</sup>。羽流的另一个潜在来源是输送到海洋采矿平台的物质, 在平台提取的物质可以从水和沉积物中分离出来, 转移到运输容器中<sup>[31]</sup>。在集料萃取过程中, 也有类似的过程, 即通过筛选将所需物质与其余提取物分离, 多余部分释放到海面, 这可能会在更大的区域内造成更广泛的扩散效应。沉积物分散改变了水的化学性质和海底沉积物组成<sup>[32-33]</sup>。综上, 羽流的扩散程度取决于羽流释放的深度、局部海流和释放物质的量以及释放时间的长短等因素, 受其影响的潜在区域可能非常大, 可能会达到数千平方千米。

## 2.2 富钴结壳开采

富钴结壳的开采活动发生在水深 800~3 000 m 的深海海底矿山地区(图 4)<sup>[21]</sup>。受富钴结壳开采影响的生态系统与结核区生态系统大不相同, 由包括海山动物群(大多数附着在坚硬的基底上)以及生活在邻近沉积区等的多种物种组成。

结壳开采活动分为沉积物扰动、外壳去除以及栖息地改变三个方面(图 4), 本文结合结壳开采过程中集矿作业产生的噪音对赋存环境的影响进行分析(表 4)。开采过程对环境的部分影响与多金属结核开采相似。例如, 在富钴结壳的开采中同样会因沉积物扰动而导致含沉积物的柱状水柱、颗粒载荷以及沉积物粒度改变, 集矿作业时会产生噪音等(表 4)。不同的是, 在结壳开采中, 羽流很可能顺着海底山的侧翼流下,

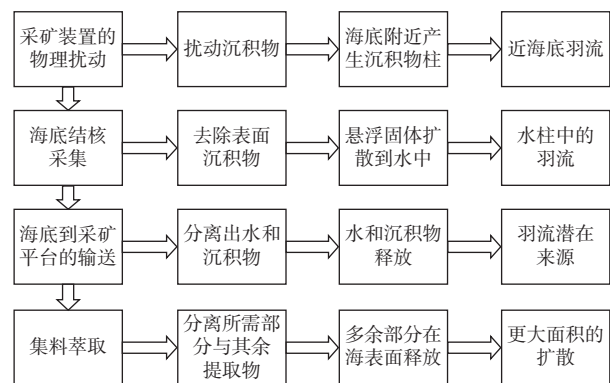
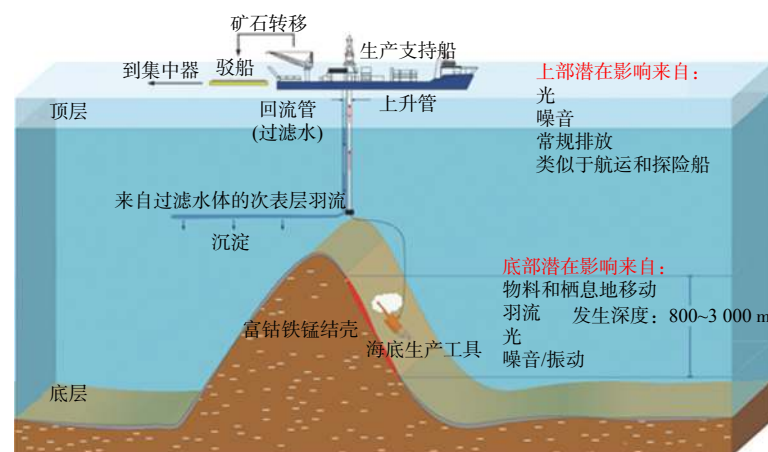


图 3 伴随多金属结核开采的羽流形成过程  
Fig. 3 Plume formation processes associated with polymetallic nodules mining

从而加大受影响的范围，甚至包括未开采区域。底部的浮游动物和捕食悬浮物的生物可能会因此而窒息死亡(表 4)。



注：引自文献 [21]。

图 4 深海富钴结壳采矿系统示意及其潜在环境影响来源示意图

Fig. 4 Schematic diagram of deep-sea cobalt-rich crust mining system and its potential environmental impact sources

表 4 深海富钴结壳开采的主要风险和影响<sup>[21]</sup>

Table 4 Main risks and impacts of deep-sea cobalt-rich crust mining<sup>[21]</sup>

| 采矿活动 | 赋存环境改变 | 对环境的影响                          | 潜在影响范围       | 影响时长及恢复潜力                |
|------|--------|---------------------------------|--------------|--------------------------|
| 结壳开采 | 沉积物扰动  | 含沉积物的柱状水柱：减少浮游生物的生长、增加生产力的食物链效应 | 数千平方千米的范围    | 采矿活动期间受影响；一旦活动停止，恢复将是迅速的 |
|      |        | 颗粒载荷：可能会造成生物窒息                  | 取决于采矿过程和当地潮流 | 采矿活动期间受影响；恢复缓慢，几十年到几百年   |
|      | 外壳的去除  | 沉积物粒度改变：导致生物栖息地改变               | 沉积物羽流影响区域    | 影响时长受沉积物粒度分布变化的影响        |
| 集矿作业 | 噪音影响   | 采矿区表面被破坏                        | 采矿区域         | 长期的影响，几百到几千年；恢复极其缓慢      |
|      |        | 附着的底栖生物栖息地被破坏                   | 采矿区域及羽流影响区域  | 可能非常缓慢                   |
|      | 栖息地改变  | 表面生物数量、种群结构和密度改变                | 采矿区域及羽流影响区域  | 一旦活动停止，恢复将是迅速的           |

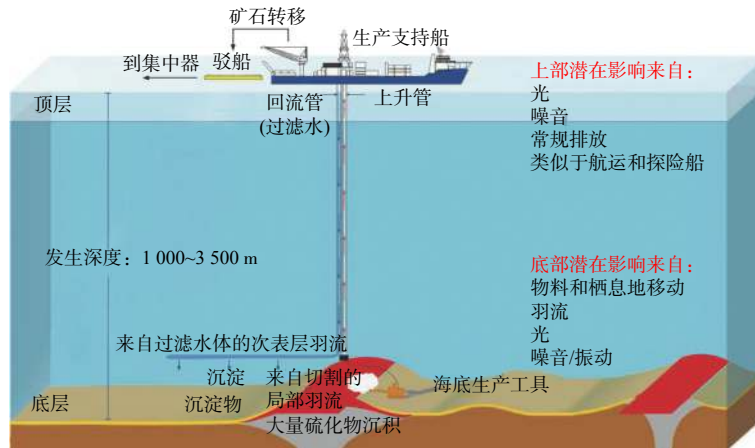
由于富钴结壳的赋存环境多为海山等坚硬岩石表面，当富钴结壳的开采去除了部分外壳时，产生的影响是长期的，可能是几百年到几千年。同时，因为这一过程会导致附着在外壳上生存的动物栖息地被破坏，从而导致表面生物数量、种群结构和密度改变，其恢复也可能很慢，通常为几十年到几百年<sup>[21]</sup>(表 4)。而且因为需要从海山表面研磨或刮掉外壳，所以与结核开采相比，富钴结壳开采时产生的海底噪音可能更大。

2.3 多金属硫化物开采

海底硫化物开采活动发生在水深 1 000~3 500 m 的深海海底区域，这里聚集有丰富的海底动植物群落、噬硫细菌、无脊椎生物等，它们依靠硫矿生存，开采硫矿必然会对这些海底生物及其底栖环境造成一定的影响<sup>[34]</sup>。在海底区域，与多金属结核以及富钴结壳开采不同的是，除了用于硫化物开采的海底生产工具(例如海底泵)的使用、来自海面的管道在海底释放的过滤水体羽流会对海底地区产生潜在影响之外，多金属硫化物的开采还需对硫化物沉积层表面进行切割。切割会带来局部羽流，其范围可能非常大，可达到数千平方千米。这取决于局部海流、释放物质的量以及释放时间的长短(图 5)<sup>[21]</sup>。

多金属硫化物的开采除了表层切割导致的沉积层表面破坏，产生含沉积物的柱状水柱、颗粒载荷以及沉积物粒度改变以外，硫化物的提取还会导致有毒物质的释放以及栖息地的移除。其中，有毒物质的释放会导致周围环境受到影响<sup>[21]</sup>。该毒素可能会对底浮游动物群等有毒性作用，进一步导致食物链中所有营养

层生物体的损失(表 5)。其影响范围将取决于采矿过程和当地潮流,有可能会扩散到矿区边界外数千米处。海床上沉积物水柱及有毒金属和金属化合物的影响,可能会在采矿活动结束之后持续数年时间,在此影响中恢复可能需要几年时间。海底硫化物开采对环境的影响时长与热液喷口的活跃度有关,在不活跃的喷口,从化学污染中恢复可能需要更长的时间(表 5)。在活跃的热液喷口位置,受影响时长较短,可能在开采阶段之后的几年内受到影响,同时恢复潜力较大。但是在不活跃的喷口位置受影响时长较长,由于开采造成表面存在有毒的金属和漫长的动物群世代交替,环境恢复时间可能是数百年,而且恢复潜力较小。



注: 引自文献[21]。

图 5 深海块状硫化物采矿系统及其潜在环境影响来源示意图

Fig. 5 Schematic diagram of deep-sea massive sulfide mining system and its potential environmental impact sources

表 5 深海多金属硫化物开采的主要风险和影响汇总<sup>[21]</sup>

Table 5 Main risks and impacts of deep-sea polymetallic sulfide mining<sup>[21]</sup>

| 采矿活动  | 赋存环境改变  | 对环境的影响                           | 潜在影响范围         | 影响时长及恢复潜力                         |
|-------|---------|----------------------------------|----------------|-----------------------------------|
| 表层切割  | 沉积层表面破坏 | 含沉积物的柱状水柱: 减少浮游生物的生长、增加生产力的食物链效应 | 数千平方千米的范围      | 采矿活动期间受影响; 一旦活动停止, 恢复将是迅速的        |
|       |         | 颗粒载荷: 有毒性且可能会造成生物窒息              | 取决于采矿过程和当地潮流   | 采矿活动期间受影响; 恢复缓慢, 几十年至几百年          |
|       |         | 沉积物粒度改变: 导致生物栖息地改变               | 沉积物羽流影响区域      | 影响时长受沉积物粒度分布变化的影响                 |
| 硫化物提取 | 有毒物质释放  | 食物链中所有层次生物体的损失                   | 取决于采矿过程和当地潮流   | 在活跃喷口影响时长较短: 数年; 在不活跃喷口处: 几十年到几百年 |
|       | 生物栖息地移除 | 表面生物数量、种群结构和密度改变                 | 采矿区域及羽流影响区域    | 在活跃喷口影响时长较短: 数年; 在不活跃喷口处: 几十年到几百年 |
| 集矿作业  | 噪音影响    | 对海洋哺乳动物的掩蔽效应                     | 低频噪声可传播 600 km | 一旦活动停止, 恢复将是迅速的                   |

### 3 开采后环境影响监测分析

深海矿产开采对环境的影响不仅发生在采矿期间,在开采后较长一段时间内仍存在。已有学者对深海矿产开发后环境影响与监测进行了实验,在实验过程中,了解自然环境条件被称为基线研究,进行人工影响被称为扰动,评估海底条件的变化被称为监测<sup>[1]</sup>。

1991—1993 年,美国国家海洋和大气管理局(The US National Oceanic and Atmospheric Administration)在太平洋 CCFZ 进行了海底影响实验。在预先选定的区域进行基线研究后,在 150 m×3 000 m 的区域使用了 49 次深海沉积物再悬浮系统<sup>[35]</sup>进行扰动。扰动后的采样结果表明,该地区的动物分布发生了变化<sup>[36]</sup>。9 个月后的监测结果表明(表 6),部分小型底栖动物的丰度下降,大型底栖动物的数量增加,这可能由食物供应的增加所致<sup>[37]</sup>。

表 6 深海矿产开采对赋存环境扰动的监测结果

Table 6 Monitoring results of deep-sea mineral exploitation on occurrence environment disturbance

| 研究者          | 研究区域        | 扰动方式                                 | 监测时长                              | 监测结果                                                                                                                 |
|--------------|-------------|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 美国国家海洋和大气管理局 | CCFZ        | 深海沉积物再悬浮系统 <sup>[35]</sup>           | 9 个月 <sup>[37]</sup>              | 部分小型底栖动物丰度下降；大型底栖动物数量增加 <sup>[37]</sup>                                                                              |
| 日本金属矿业事业团    | CCFZ        | 利用深海沉积物再悬浮系统进行深海冲击试验 <sup>[38]</sup> | 2 a <sup>[39]</sup>               | 实验结束后，沉积物区小型底栖生物的丰度立即下降；2 a后恢复到原始水平，但物种组成却不一致；且某些大型和大型底栖生物类群的丰度仍低于未受干扰地区；17~18 a后沉积物的化学成分逐渐接近原始水平 <sup>[39-40]</sup> |
| 德国汉堡大学       | 太平洋<br>秘鲁盆地 | 干扰与再附着实验<br>刮擦海床 <sup>[41]</sup>     | 7 a、26 a 后<br>再监测 <sup>[42]</sup> | 某些底栖生物种群可能出现数量上的恢复；恢复后的种群组成与未受干扰的种群并不相同 <sup>[42]</sup>                                                              |
| Jones 等      | 模拟采矿        | 模拟多金属结核采矿干扰 <sup>[29]</sup>          | 预估 20 a <sup>[29]</sup>           | 很少有动物群在 20 a 后恢复到基线或控制条件 <sup>[29]</sup>                                                                             |

1994—1997 年，日本金属矿业事业团(Metal Mining Agency of Japan)利用深海沉积物再悬浮系统在太平洋 CCFZ 进行了深海环境影响评估实验，用于评估与锰结核开发相关的环境影响过程。该实验在 2 个 1 600 m 长的平行轨道上选取了 19 个横断面进行了扰动<sup>[38]</sup>，依据沉积物样品、深海成像、沉积物收集器和海流计等显示的结果对实验影响进行了评估。评估结果表明：实验结束后，沉积物区小型底栖生物的丰度立即下降，2 年后恢复到原始水平，但物种组成却不一致，且某些大型和大型底栖生物类群的丰度仍低于未受干扰地区<sup>[39](表 6)</sup>。2011—2012 年(即扰动 17~18 a 后)，深海资源开发公司(Deep Ocean Resources Development Co., Ltd.)在该区域进行了再监测。监测结果表明，尽管沉积物的化学成分因海底扰动而暂时发生变化，但这种变化仅限于 0.5 cm 以内的表层，并随着时间的推移而减少直至接近原始水平<sup>[40]</sup>。

1988—1998 年，德国汉堡大学科学家在太平洋的秘鲁盆地进行了干扰与再附着(Disturbance and Re-colonisation)实验，采集干扰前基线环境数据和在 10.8 km<sup>2</sup> 的圆形区域内使用犁耙造成扰动的数据<sup>[41]</sup>。干扰后对 6 个月、3 a 和 7 a 后的影响与再附着进行了监测。研究结果表明，经过一段时间后，虽然某些底栖生物种群可能出现数量上的恢复，但其动物种群组成与未受干扰的动物种群并不相同<sup>[42](表 6)</sup>。

Jones 等<sup>[29]</sup>提出多金属结核开采的影响可能是长期的，从他们开展的 11 个模拟或测试多金属结核采矿干扰的分析结果(表 6)来看，底栖动物群落密度和多样性会受到严重影响，而且很少有动物群在 20 a 后恢复到基线或控制条件。

尽管当前对深海采矿环境造成的影响进行了不同的实验和估计，但是研究的范围仍然有限。在研究种类上，大多深海采矿对环境的影响研究主要集中在沉积物的干扰与恢复方面，极少数研究了刮擦海床的影响。在研究规模上，与商业采矿相比，以上实验在持续时间、覆盖面积和再悬浮量方面均可视为微尺度试验。而采矿范围的不同将直接影响再沉积的面积和厚度。现在仍有许多问题未得到解答，其中一个主要问题是：今后 20 a 会出现怎样的采矿系统作为环境测试的基础<sup>[1]</sup>。现在无法确定具体的商业规模，因为采矿的规模和类型会随着矿产种类不同和生产目标的不同而改变<sup>[43]</sup>。深海固体矿产资源开采对海洋地球化学特征的改变也将间接对海洋生态环境产生影响<sup>[44]</sup>。因此，今后应该尽量尝试在较大尺度下进行实验，最好在试点采矿系统中进行环境影响的研究，以期在采矿扰动的悬浮再沉积和底栖生态系统等方面获得更加真实的环境数据。除此之外，由于深海实验对实验前后的情况需进行定量比较，而目前在指标选取、影响评估和监测生态系统恢复方面尚未就参数达成一致，因此，国际海底管理局(简称“管理局”)的环境准则应与其他环境影响评估模板保持一致<sup>[45]</sup>。

真实准确的环境数据是制定深海商业开采法律及有关规定的基础。现有海底影响实验是为了积累许多环境事实，但海底商业开采影响数据不足。尽管现有国际法律对有关深海矿产资源的探矿和勘探规章进行了有关保护和保全海洋环境内容的规定，但商业开采对环境的影响尚没有可依据的法律。未来需要在商业开采对环境影响研究的基础上，充实有关深海采矿规则和条例对商业开采环境影响的具体和可衡量的规定。作为管理“区域”内活动及资源的组织，管理局应切实发挥其在海底采矿过程中保护环境的职能。

## 4 深海采矿的环境保护及可持续发展对策建议

上文从多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物等主要深海矿产资源的采矿活动过程入手,通过分析其赋存环境、开采中扰动环境和开采后监测环境影响,总结了沉积物羽流、集矿作业的噪音等对海洋环境的影响。针对深海采矿的环境保护面临的问题与可持续发展的需求,从环境评估、数据采集、设备创新、规则制定等方面提出以下对策建议。

### 1)持续跟进开发环境预评估、实时监测及影响评估、开采后评估

深海矿产资源开采对环境影响的研究应结合采矿规模和采矿方法,依次进行预评估、实时监控及影响评估、开采后评估,将环境保护意识贯彻整个采矿过程。

由于目前对不同采矿环境下恢复研究不足,采矿实验应该在采矿规模与种类上进行充实,应更注重对采矿前后环境变化、生态系统恢复过程与时长的研究,并在开采结束后进行长期且连续的恢复监测及评价。依据不同矿产种类、海域以及海底采矿规模建立针对性监测评估体系,全方位完善环境影响监测技术体系<sup>[46]</sup>。该研究可加深对采矿系统恢复潜力的认识,为采矿预评估、采矿过程控制以及开采后恢复提供参考。

### 2)充实并加大深海采矿环境评估有关数据的采集

深海矿物开采过程环境评估仍受到多方面的限制,主要有基线数据不足、采矿作业的细节不足、数据和生态系统方法的综合性不足、评估和考虑不确定性差、对间接影响的评估不够、对累积影响的处理不够、风险评估不够以及考虑环评与其他管理计划的联系不足等<sup>[47]</sup>。

目前,关于深海采矿环境评价皆为试验性阶段。Markussen<sup>[48]</sup>提出“试验性”环境影响评价的研究应在试验采矿系统进行,以便在深海海底采矿对环境的预期影响方面提供更现实的资料。而在对深海采矿的现有数据进行工程和环境评估时,Chung等<sup>[43]</sup>认为在规模和系统上测试足以代表商业采矿规模的底栖生物扰动。不管采用何种方法,深海采矿环境数据的收集都有利于更好地评价深海采矿的潜在影响和制定减轻影响的措施。

### 3)依据环境保护需求进一步加强采矿技术与设备创新研究

深海矿产资源开采过程,即为采矿设备对相关海底及海域环境产生扰动的过程。为了使相关区域受采矿影响最小,矿产收集系统与海底环境的相互作用应该最小:从沉积物(或其他碎片)中分离矿物时,应尽可能靠近海床,以减少中层水的影响,但此举有可能增加对底栖生物和深海生物群落的影响;进行条形(或“斑块”)采矿,留下交替的未受干扰的海底条形,让邻近地区的生物重新繁殖;底水和碎屑的排放应在水柱的不同水平,最好是在含氧量最低的区域以下,因为那里的动物密度相对较低。

通过深海固体矿产资源开采过程中相关设备对环境影响的研究,对采矿设备在开采过程中的布局和技术提出进一步的要求。在确立深海矿产资源开发发展理念的基础上,明确关键技术装备研发任务,实施深海多金属结核开采示范工程<sup>[2]</sup>。在多金属结核开采中,通过开发低扰动行走、精确采集结核的设备,减少对深海沉积物的扰动。从开采后恢复潜力角度考虑,在多金属硫化物的开采方面,应多研发适于在活跃海底火山口使用的设备,减少在非活跃火山口的开采。除此之外,控制海底固体矿产开采中废水废物的排放过程,例如通过设定合适的排放高度尽量减少羽流沉积物的扩散范围。在现代信息技术、人工智能等新兴技术的支持下,深海矿产资源开发系统可以在提高精准作业、协同控制、长期运维和实时调控等方面,进行高精度和智能化的开采装备研究<sup>[2]</sup>。

### 4)深海采矿环境保护规则应与自然科学和社会科学紧密结合

《联合国海洋法公约》第十一部分第145条授权管理局制定适当的规则和规章,以保护海洋环境不受“区域”内矿产勘探和开发活动的影响<sup>[49]</sup>。为了更好地对深海环境进行保护,深海采矿环境保护规则需要同时从自然科学和社会科学方面考虑。从自然科学的角度分析深海采矿对环境的影响,为深海采矿区环境保护政策的制定提供科学依据;从社会科学角度考虑平衡利益相关者,分析矿业利益和环境保护之间的平衡。

### 5)推进深海固体矿产资源开采环境保护相关法律制定进程

基于海底矿产资源开发与海洋环境保护和保全并重的理念<sup>[50]</sup>, 相关规则和法律制度制定对海洋环境的保护与完善有极大意义。在进行海底资源开发时应始终坚持海洋环境保护原则, 坚持先评估后开采, 遵守深海底环境保护第一、合理开发海底资源第二的原则。应健全深海矿产资源开采相关环境问题的责任制度, 规范深海底资源开发行为, 进而实现可持续发展的目标。

### 参考文献 (References):

- [1] RAHUL S. Deep-sea mining: resource potential, technical and environmental considerations[M]. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 483-506.
- [2] 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, LV H N, et al. Deep-sea mining equipment in China: current status and prospect[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 1-9.
- [3] 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): 1 286-1 298.
- [4] RAMIREZ-LLODRA E, BRANDT A, R DANOVARO R, et al. Deep, diverse and definitely different: unique attributes of the world's largest ecosystem[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(9): 2851-2899.
- [5] THURBER A, SWEETMAN A, NARAYANASWAMY B, et al. Ecosystem function and services provided by the deep sea[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(14): 3 941-3 963.
- [6] 李日辉, 侯贵卿. 深海采矿对大洋生态系统的影响[J]. *地质论评*, 1998(1): 52-56. LI R H, HOU G Q. Deep ocean mining: its effects on the oceanic ecosystem[J]. *Geological Review*, 1998(1): 52-56.
- [7] KUHN T, WEGORZEWSKI A, RÜHLEMANN C, et al. Correction to: Composition, formation, and occurrence of polymetallic nodules[M/OL]//SHARMA R. Deep-Sea Mining. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. [2021-10-08][https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0_19).
- [8] 石学法, 符亚洲, 李兵, 等. 我国深海矿产研究: 进展与发现(2011—2020)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(2): 305-318, 517. SHI X F, FU Y Z, LI B, et al. Research on deep-sea minerals in China: progress and discovery (2011—2020)[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(2): 305-318, 517.
- [9] DUTKIEWICZ A, JUDGE A, MÜLLER R. Environmental predictors of deep-sea polymetallic nodule occurrence in the global ocean[J]. *Geology*, 2020(48): 293-297.
- [10] HEIN J R, KOSCHINSKY A, BAU M, et al. Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific[M]//CRONAN D S. Handbook of Marine Mineral Deposits, Boca Raton: CRC PRESS, 2000: 239-279.
- [11] LIAO L, XU X W, JIANG X W, et al. Microbial diversity in deep-sea sediment from the cobalt-rich crust deposit region in the Pacific Ocean[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2011, 78(3): 565-585.
- [12] CHERKASHOV G. Seafloor massive sulfide deposits: distribution and prospecting[M]//SHARMA R. Deep-Sea Mining: Resource Potential, Technical and Environmental Considerations. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 143-164. DOI: [10.1007/978-3-319-52557-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0_4).
- [13] HALFAR J, FUJITA R M. Precautionary management of deep-sea mining[J]. *Marine Policy*, 2002, 26(2): 103-106.
- [14] АНДРЕЕВ С И, АНИКЕЕВА Л И, КАЗАКОВА В Е. Минерально-сырьевые ресурсы мирового океана и перспективы их освоения//Минеральные ресурсы России[Z]. Экономика и управление, 2011, (6): 7-18.
- [15] HEIN J R, KOSCHINSKY A. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules[M]//HOLLAND H D, TUREKIAN K K. Treatise on geochemistry: 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2014: 273-291. DOI:[10.1016/B978-0-08-095975-7.01111-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01111-6).
- [16] 何高文, 陈圣源. 试谈富钴结壳的成矿机制[J]. 南海地质研究, 2001: 35-40. HE G W, CHEN S Y. Trial discussion on the metallogenic mechanism of cobalt-rich crust[J]. Research of Geological South China Sea, 2001: 35-40.
- [17] HALBACH P E, JAHN A, CHERKASHOV G. Marine co-rich ferromanganese crust deposits: description and formation, occurrences and distribution, estimated world-wide resources[C]//SHARMA R. Deep-Sea Mining. Springer, Cham, 2017: 65-141. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0_3).
- [18] SHARMA R. Deep-sea mining: economic, technical, technological, and environmental considerations for sustainable development[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2011, 45(5): 28-41.
- [19] 屈广清, 曲波. 海洋法[M]. 4版. 北京: 中国人民大学出版社, 2005. QU G Q, QU B. Law of the sea: 4th ed[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2005.
- [20] 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.
- [21] WEAVER P P E, BILLETT D S M, DOVER C L V. Handbook on marine environment protection: science, impacts and sustainable management[M]. Cham,

- Switzerland: Springer International Publishing, 2018: 215-245.
- [22] SHARMA R, SANKAR S J, SAMANTA S, et al. Image analysis of seafloor photographs for estimation of deep-sea minerals[J]. *Geo-marine Letters*, 2010, 30(6): 617-626.
- [23] KAIKKONEN L, VENESJÄRVI R, NYGÅRD H, et al. Assessing the impacts of seabed mineral extraction in the deep sea and coastal marine environments: current methods and recommendations for environmental risk assessment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018(135): 1183-1197.
- [24] LATIMER J S, DAVIS W R, KEITH D J. Mobilization of PAHs and PCBs from in-place contaminated marine sediments during simulated resuspension events[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 49(4): 577-595.
- [25] WANG F, CHAPMAN P M. Biological implications of sulfide in sediment: a review focusing on sediment toxicity[J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 1999: 2526-2532.
- [26] GRIMWOOD C, MCGHEE T J. Prediction of pollutant release resulting from dredging[J]. *Water Pollution Control Federation*, 1979, 51(7): 1811-1815.
- [27] MCKENNA M F, ROSS D, WIGGINS S M, et al. Underwater radiated noise from modern commercial ships[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(1): 92-103.
- [28] THOMSEN F, MCCULLY S R, WOOD D, et al. A generic investigation into noise profiles of marine dredging in relation to the acoustic sensitivity of the marine fauna in UK waters: phase 1 scoping and review of key issues[R/OL]. [2021-10-08]. Doi: [10.13140/RG.2.2.19118.02888](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19118.02888). [https://www.researchgate.net/publication/272740795\\_A\\_generic\\_investigation\\_into\\_noise\\_profiles\\_of\\_marine\\_dredging\\_in\\_relation\\_to\\_the\\_acoustic\\_sensitivity\\_of\\_the\\_marine\\_fauna\\_in\\_UK\\_waters\\_PHASE\\_1\\_Scoping\\_and\\_review\\_of\\_key\\_issues](https://www.researchgate.net/publication/272740795_A_generic_investigation_into_noise_profiles_of_marine_dredging_in_relation_to_the_acoustic_sensitivity_of_the_marine_fauna_in_UK_waters_PHASE_1_Scoping_and_review_of_key_issues).
- [29] JONES D O B, KAISER S, SWEETMAN A K, et al. Biological responses to disturbance from simulated deep-sea polymetallic nodule mining[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): 1-26.
- [30] THIEL H, TIEFSEE-UMWELTSCHUTZ F. Evaluation of the environmental consequences of polymetallic nodule mining based on the results of the TUSCH research association[J]. *Deep-sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(17): 3433-3452.
- [31] AMOS A F and ROELS O A. Environment aspects of manganese nodule mining[J]. *Marine Policy*, 1977, 1(2): 156-163.
- [32] NEWELL R C, HITCHCOCK D R, SEIDERER L J. Organic enrichment associated with outwash from marine aggregates dredging: a probable explanation for surface sheens and enhanced benthic production in the vicinity of dredging operations[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, 38(9): 809-818.
- [33] DESPREZ M, PEARCE B, LE BOT S. The biological impact of overflowing sands around a marine aggregate extraction site: Dieppe (eastern English Channel)[J]. *Ices Journal of Marine Science*, 2009, 67(2): 270-277.
- [34] 杜尊峰, 陈香玉, 赵羿羽. 深海多金属硫化物开采作业安全与环境影响分析及对策研究[J]. *海洋开发与管理*, 2020, 37(3): 68-74. DU Z F, CHEN X Y, ZHAO Y Y. Analysis and countermeasures of operational safety and environmental impact in deep-sea polymetallic sulfide mining[J]. *Ocean Development and Management*, 2020, 37(3): 68-74.
- [35] BROCKETT T, RICHARDS C Z. Deep sea mining simulator for environmental impact studies: 'benthic disturber' designed to assist multinational team assess impact of ocean nodule mining[J]. *Sea Technology*, 1994, 35(8): 77-82.
- [36] TRUEBLOOD D D. U.S. Cruise Report for BIE II Cruise 1[R/OL]. [2021-10-08]. NOAA Technical Memorandum NOS OCRM, 1993. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/21176>.
- [37] TRUEBLOOD D D, OZTURGUT E, PILIPCHUK M, et al. The ecological impacts of the joint U.S.-Russian benthic impact experiment[C]//Second ISOPE Ocean Mining Symposium. OnePetro, Seoul, Korea, 1997: 139-145.
- [38] FUKUSHIMA T. Overview "Japan Deep-sea Impact Experiment = JET"[C]//FUKUSHIMA T. The proceedings of the First (1995) ISOPE ocean mining symposium, 1995: 744.
- [39] SHIRAYAMA Y. Biological results of the JET project: an overview[C]//Proceeding of Third ISOPE ocean mining symposium: ISOPE, 1999.
- [40] FUKUSHIMA T, TSUNE A. Environmental issues of deep-sea mining[J]. *Environmental Issues of Deep-sea Mining*, 2019: 204-211.
- [41] FOELL E J, THIEL H, SCHRIEVER G. DISCOL: a long-term, large-scale, disturbance-recolonization experiment in the abyssal eastern tropical south Pacific Ocean[C]//Proceeding of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1990.
- [42] SCHRIEVER G, AHNERT A, BLUHM H, et al. Results of the large scale deep-sea environmental impact study DISCOL during eight years of investigation[C]//Proceeding 7th Internat Offshore and Polar Engineering Conference, 1997.
- [43] CHUNG J S, SCHRIEVER G, SHARMA R. Deep seabed mining environment: preliminary engineering and environmental assessment[M/OL]. California, USA: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002. <https://www.isopec.org/wp-content/uploads/2018/06/isopec-wksp-SpecialReport-medres.pdf>.
- [44] 郑杰文, 刘保华, 刘晓磊, 等. 深海锰结核开采对环境的影响研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(5): 163-169. ZHENG J W, LIU B H, LIU X, et al. Review on environmental impact of deep-sea manganese nodule mining[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(5): 163-169.
- [45] CLARK M R, ROUSE H L, LAMARCHE G, et al. Preparation of environmental impact assessment: general guidelines for offshore mining and drilling with particular reference to New Zealand[M/OL]. National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd, NIWA Science and Technology Series No. 81. 110, 2017. [2021-10-08] [https://niwa.co.nz/sites/niwa.co.nz/files/EMOM\\_EIAGuidelines\\_NIWA81.pdf](https://niwa.co.nz/sites/niwa.co.nz/files/EMOM_EIAGuidelines_NIWA81.pdf).

- [46] 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): 73-82. DING Z J, SUN Y F, GAO W, et al. Study on potential environmental influencing factors and monitoring technology system of deep sea mining[J]. *Ocean Development and Management*, 2021, 38(7): 73-82.
- [47] 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: 103363. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.11.026>.
- [48] MARKUSSEN J M. Deep seabed mining and the environment: consequences, perceptions, and regulations[M]. New York: Oxford University Press, 1994: 31-39.
- [49] 联合国. 联合国海洋法公约[EB/OL]. [2021-01-05]. <https://www.un.org/zh/documents/treaty/files/UNCLOS-1982.shtml>. United Nations. The United Nations Convention on the Law of the Sea[EB/OL]. [2021-01-05]. <https://www.un.org/zh/documents/treaty/files/UNCLOS-1982.shtml>.
- [50] 傅岷成, 邓云成, 蒋围, 等. 海洋法精要 [M]. 2版. 上海: 上海交通大学出版社, 2014. FU K C, DENG Y C, JIANG W, et al. Law of the sea in a nutshell[M]. 2nd ed. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014.

## Environmental Impact Analysis and Management Countermeasures Based on the Whole Process of Deep-sea Mining

LIU Da-hai<sup>1,2</sup>, WAN Liu<sup>1,3</sup>, WANG Chun-juan<sup>1,2</sup>, LI Cheng-long<sup>1,4</sup>

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management, MNR, Qingdao 266061, China;*

3. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

4. *Law School, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

**Abstract:** The environmental impact is one of important issues on restricting the exploitation of deep-sea resources. Understanding the environmental impacts and ecological responses of the exploitation of deep-sea resources are the premise of commercial mining. This study took three representative deep-sea solid mineral resources (polymetallic nodules, cobalt-rich crusts, and polymetallic sulfides) as examples, analyzed the pre-exploitation occurrence environment, and environmental impacts during exploitation and post-exploitation. The results showed that: ① Different deep-sea solid mineral resources had different distribution patterns, depths, biological characteristics, and occurrence environments. Due to the changes of occurrence environment caused by mining activities, the impact duration and recovery potential of mining potential impact areas were also variable. ② The environmental impacts of polymetallic nodules mining are mainly sediment plumes, those of crust mining include three aspects: sediment disturbance, crust removal, and habitat change, and those of polymetallic sulfide mining are toxic release and habitat removal. ③ The post-exploitation environmental impact monitoring analysis showed that the quantity and the species composition of benthic species had been undergone different degrees of influence. Finally, this study proposed some countermeasures and suggestions, for example, follow-up monitoring and evaluation, data enrichment, mining technology, and equipment improvement, top-level design and decision management, rule making, etc., which can be used as the reference for environmental impact assessment and rule making of deep-sea mining.

**Key words:** deep-sea mineral resources; polymetallic nodules; cobalt-rich crust; polymetallic sulfide; environmental impacts

**Received:** October 14, 2021