

深海采矿潜在环境影响因素及监测技术体系研究

丁忠军^{1,2}, 孙永福¹, 高伟¹, 任玉刚¹

(1. 国家深海基地管理中心 青岛 266237; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 青岛 266237)

摘要:目前深海采矿潜在的生态环境影响引起来了广泛关注,文章针对工业化深海金属矿产资源开采潜在的环境影响监测评估需要,系统地总结了深海铁锰多金属结核、铁锰富钴结壳以多金属硫化物等主要深海资源的基本产状,分析了“物质迁移—羽流产生—声光电磁噪声—耗氧—有毒物质释放”等主流采矿工艺潜在的环境影响因素,基于深海采矿生态环境影响评估调查研究的技术需求,从实施深海采矿环境监测实验工程、建立深海重大装备系统、发展原位监测传感器等方面提出了深海采矿环境监测技术体系建设构架,以期为我国深海采矿生态环境监测保护技术发展提供借鉴。

关键词:深海采矿;环境影响评估;监测技术

中图分类号:P71

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2021)07-0073-11

Study on Potential Environmental Impact Factors and Monitoring Technology System of Deep-Sea Mining

DING Zhongjun^{1,2}, SUN Yongfu¹, GAO Wei¹, REN Yugang¹

(1. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China;

2. National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: The potential ecological environmental impact of deep-sea mining has attracted widespread attention. This paper systematically summarized the basic occurrence of main deep-sea resources such as iron-manganese polymetallic nodules, iron-manganese-cobalt-rich crusts and polymetallic, analyzed the substance migration-plume generated-light-oxygen-toxic substances released by the electromagnetic noise in major potential environmental impact factors of mining technology, based on deep sea mining ecological environment impact assessment study of technical requirements. In order to provide reference for the development of environmental monitoring technology for deep-sea mining in China, the framework of environmental monitoring technology system for deep-sea mining was put forward from the aspects of carrying out the experimental

收稿日期:2020-09-06;修订日期:2021-06-21

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0306600);山东省自然科学基金(ZR201910220189);深海专项(预研)—深海技术装备(2016ASKJ15);水下机器人技术重点实验室稳定支持课题(JCKYS2019604SXJQR-06);泰山学者工程专项经费资助(No. tspd20161007).

作者简介:丁忠军,教授级高工,博士,研究方向为深海技术装备发展与技术研究

通信作者:任玉刚,工程师,硕士,研究方向为深海探测技术装备应用技术研究

project of environmental monitoring for deep-sea mining, establishing the system of major deep-sea equipment and developing in-situ monitoring sensors.

Keywords: Deep-sea mining, Environmental impact assessment, Monitoring technology

0 引言

深海拥有丰富的金属矿产资源,随着深海资源勘查评估工作的不断深入以及深海采矿装备技术的持续发展,深海矿产资源勘探开发活动进入了高度活跃时期,从国际海域矿区申请来看,2010 年仅 7 块矿区,到 2019 年猛增到了 29 块矿区 (ISA)。即 20 世纪 70 年代国际上首次完成深海采矿试验以来,随着韩国、日本、印度等几个国家的深海采矿试验工作开展,沉寂了几十年的深海采矿再度活跃起来。

同时,金属矿产资源在深海海底广泛分布,这意味着商业化的深海采矿活动启动后几乎整个深海海底均会造成破坏,如不加深深海采矿环境影响的研究以制定必要措施实施环境保护性开发,深海采矿对深海环境的破坏将不可估量,甚至是毁灭性的。

深海采矿是一项大型人类活动,从目前主流的深海采矿工艺和装备来看,主要采用海底集矿、管道提升输送和水面选矿等方式,作业过程中,底层物质移除、沉积物羽流生成,以及废弃物排放,既对海底形貌不可避免地产生破坏,又对整个水体和海洋表层产生重要影响,除此之外采矿系统运行的声光电磁噪声的影响也不可忽视^[1],与海洋渔业生产、油气生产以及水上运输相比,对于极端脆弱的深海生态环境而言,其破坏性严重得多。

为了研究深海结核采矿活动扰动的生态环境响应,国际上与 20 世纪 70 年代结核试采同步先后开展了几个深海环境影响实验研究计划,如 DOMES、MESEDA、DISCOL、ATESEPP 等,并持续报道一系列研究成果^[2-3]。由于目前对海洋生命特性、生物地理学分布以及深海生物,尤其底栖生物的连通性了解的极少,对计划投入的采矿技术以及规模还在研究,深海采矿的影响是否能够在时间和空间上得到控制,是否会产生持续和大面积的影响很难预测。可以预测的是,如果产生大规模持续

的海底环境变化,将会导致近底生物群落的长期变化,可能会加大因大洋暖化和酸化造成的生态系统压力^[4]。

深海矿产资源开发的前提是对采矿环境影响取得全面深入的认识,并能提出应对措施,由于深海环境极其复杂,需要长期深入开展监测研究,开展监测研究必须研发环境监测技术,反之,研发深海采矿环境监测技术,必须了解深海采矿环境监测研究的需要。本研究从深海矿产资源现状、深海采矿环境影响的因素、深海采矿环境监测研究需求以及国际上采矿实验研究计划实施情况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监测技术的发展方向,以期今后全面开展深海采矿环境监测研究提供参考。

1 深海金属矿产资源分布

深海存在大量矿产资源,目前 5 种矿产资源被普遍认为具有潜在的商业开发前景,包括铁锰结核、富钴结壳、多金属硫化物、多金属软泥和磷灰岩结核。其中:铁锰结核又称多金属结核,广泛分布在深海海盆,尤其太平洋最为丰富;富钴结壳主要分布在 800~2 500 m 水深,没有沉积物覆盖的海山及其斜坡上;海底多金属硫化物主要形成在热液喷口区;多金属软泥,目前仅在红海中央区域被发现;磷灰岩结核,多分布在 200~400 m 水深的陆坡上。考虑到磷灰岩结核多用于制造磷肥,多金属软泥区域比较集中,本研究主要以多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物等 3 种主要金属矿产资源开采为主,讨论深海采矿环境影响监测问题^[4]。

1.1 多金属铁锰结核

多金属铁锰结核最早由 C. W. Thomson 在 1873 年 3 月 7 日英国皇家海军探险期间发现的。主要在水成作用、成岩作用和热液流体沉积作用下生成的,外形呈不规则球形,类似土豆,二维分布于沉积物表面,主要分布在 4 000~6 000 m 的大洋深水区。

目前发现具有较高经济价值的矿区主要有东北太平洋 CC 区 (Clarion-Clipperton Zone), 中印度洋盆、库克群岛海区 and 秘鲁海盆^[5]。由于含有较高丰度的 Ni, Cu, Co, Mo, Li, REE 和 Ga 等贵金属元素^[6], 东北太平洋、中印度洋的结核经济价值最高。一些浅海如波罗的海也发现了铁锰结核, 由于其金属品位低, 所以经济价值不高。

(1) CC 区矿区存储情况。CC 区具有大面积连续的集合分布, 大约 400 万 km², 几乎和整个欧洲的面积相同 (ISA 2010), 在太平洋中心, 赤道北部, 夏威夷和墨西哥中间。在水成作用和成岩作用下生成的, 成岩作用的比例可达 80%, 由 CC 区东部经过中心区域到西部逐渐增高^[7]。这导致了钴元素和稀土含量从中心到西部逐渐略有增大。与结核分布丰度的变化相比, 整个 CC 区结核化学组成是极其稳定的。CC 区东部结核化学组成变化系数 (CoV) 小于 10% 而丰度变化大于 30%。结核丰度湿重 0~30 kg/m², 平均 15 kg/m², 锰结核总量估计可达 210 亿 t, 锰含量估计可达 6 亿 t, 锰的总量估计与全球陆地锰的储量相等, 而 Ni, Co, Y, Tl 可是全球陆地储量的几倍^[8]。

(2) 秘鲁海盆存储情况。秘鲁海盆距离秘鲁沿岸约 3 000 km, 面积大约是 CC 区的一半。铁锰结核丰度平均 10 kg/m², 而在 4 250 m 水深的碳酸盐补偿区最大丰度高达 50 kg/m²^[9], 与 CC 区相比, 一个显著的不同是, 秘鲁海盆大部分区域靠近或浅于碳酸盐补偿区, 导致了其碳酸盐含量高于 50%, 而 CC 区结核碳酸盐含量极小, 一般小于 1%, 多含有硅质软泥和深海黏土^[10-11]。秘鲁海盆多金属结核镍、钼含量与 CC 区类似, 铜、钴和稀土含量较低, 锂锰含量较高。目前的矿物学研究表明秘鲁海盆和 CC 区海底表面结核含有同样类型的无序层状锰^[12]。秘鲁海盆与 CC 区结核金属含量的不同主要原因在于成矿机制, CC 区结核分布在高缺氧成岩作用层和低水作用层^[13]。

(3) 库克群岛专属经济区存储情况。库克群岛专属经济区位于西南太平洋, 包括彭里斯和萨摩亚海盆约 200 万 km², 海盆深度大于 4 700 m, 沉积物主要由富沸石深海黏土组成, 包含少量的火山玻

璃、铁锰氧化物、磷酸盐碎屑、生物碳酸盐和硅碎屑^[14]。该区域的特征是低沉积率、低有机物通量、高核心物质、强底流。长期不变的深海环境, 海底和沉积物内氧的状况长期不变, 导致了缓慢生长, 平均 1.9 mm/Myr 的水生铁锰结核形成, 这类结核含有大量的钴 (0.41%)、钛 (1.20%)、REY (0.17%)、锆 (524 μg/g), 但镍、铜含量较低, 分别是 0.38% 和 0.23%。调查研究发现, 潜在勘探区丰度 19~45 kg/m², 在个别区域最大可达 58 kg/m²^[15]。

(4) 中印度洋海盆存储情况。中印度洋海盆具有潜在经济利益的结核区位于 10°S—16°30'S, 72°E—80°E, 水深 3 000~6 000 m, 面积约 70 万 km²。该区域的结核富集区被称为印度洋结核区 (IONF), 面积大约 30 万 km²^[16], 结核总量约 14 亿 t, 平均丰度为 4.5 kg/m², 铜钴镍含量约为 2 184 万 t, 还含有高浓度的铅和稀土元素。其结核分布丰度极其不平均, 差别较大, 与该区域存在大量的海山和断层相关^[17], 印度洋结核区包括几个不同的扇区, 不同的扇区结核形成的模式略有变化, 其 Mn/Fe 比例在 1.8~4.8 变化, 而 Ni、Cu、和 Co 的总含量基本不变, 在 2.48%~2.53%。矿物学组成涵盖了复水锰矿、水钠锰矿和钡镁锰矿, 表明结核生成的水成作用和成岩作用相比例是变化的^[18]。不同扇区硅质软泥、陆源物质和深海红色软泥含量是不同的。沉积速率从 IONF 北部的 9 mm/kyr 下降到了南部的 1 mm/kyr^[18]。结核的化学和矿物学组成及沉积环境特征表明结核生成的机制与 CC 区是类似的, 两个区结核的不同主要是丰度, 印度洋结核区结核丰度明显高于 CC 区, 主要原因可能是较低的沉积速率和较高的陆源物质输入。

除了以上几个主要勘查区外, 世界大洋其他海区也有结核分布, 如大西洋海。波罗的海发现了快速生长的成岩作用锰结核, 在里加、芬兰和波的尼亚海湾几十米到 150 m 的浅海海湾也发现了 10~40 kg/m² 的高丰度结核, 面积覆盖几百平方千米。

1.2 富钴结壳

富钴铁锰结壳在全球大洋均有发现, 主要生长在水下海底火山或平顶海山的山顶、斜坡和台地上, 该区域由于洋流的作用, 几百万年鲜有沉积物

沉积,水下平顶海山的山顶也发现有水成结核^[19]。

估计西北太平洋有5万座海山具有结壳分布,该区域发现了最富的结壳矿。中太平洋海盆海山斜坡上采样发现的结壳,厚度达8 cm,生长在火山玻璃碎屑基岩上。厚的富金属结壳一般生长在海山山顶外缘、海山平台以及山脊上^[20]。海山斜坡阶地也有结壳分布,经常伴生水成作用结核,还有一些小的结壳碎片。具有经济利益的结壳一般钴镍含量较高,大多分布在800~3 000 m水深。大西洋和印度洋的海山包括水下海山山脉远远少于西太平洋,因此高丰度结壳矿发现的前景很小。

结壳的分布和组成是复杂的,主要受海山形貌、海流、物质坡移、基岩类型、沉积年龄、沉降历史以及气候影响造成的大洋表层生物生产率。这些潜在金属资源的区域重要性最终依赖结壳的分布、矿区小尺度形貌、矿物品位、储量以及水深范围。通常结壳层生长的基岩形貌在厘米一分米尺度变化。圆形的巨石和火山流构造形貌在结壳表面得到了再现,小尺度构造形貌经常表现出多节节结构。基岩完全覆盖的结壳厚度3~5 cm,其局部丰度可达湿重50~90 kg/m²。

与结核相比,结壳一般仅仅固结在基岩上。在中太平洋16°~18°海山斜坡上发现了一些米到分米级的结壳碎片受自然过程影响正从基岩上脱离下滑脱落并破碎分解^[21]。结壳碎片脱离的斜坡一般比较光滑,脱离区域上方结壳发现了纵横交错的收缩裂缝,估计是随着铁锰物质成熟度的升高孔隙度和含水率相应减少致使富水沉积物脱水造成的。体积的逐渐减小引起了收缩裂缝的形成,在重力作用下产生了滑塌并形成了一些小的结壳碎片。

1.3 海底多金属硫化物

海底多金属硫化物主要分布在热液喷口区。热液喷口及其化能合成生物群落以及块状硫化物最早于1976年由“阿尔文”号载人潜水器在加拉帕戈斯裂谷发现的,是20世纪重大的海洋科学发现之一。由于热液喷口具有大量的高浓度金属物质排放至海底,该发现具有重要的基础研究意义和经济意义。

海底热液系统分布及海底硫化物矿具有全球

特征。目前已知的活动热液点接近了500个,估计数量可能提高数倍。根据目前已知海底硫化物矿藏研究结果,估计在现代海底可能存在1 000~5 000个大型硫化物矿,这些矿区约58%在国家管辖海域以外,36%在专属经济区,6%在各国大陆架及延伸区^[22]。海底硫化物矿所处位置具有显著的地质多样性,如大洋中脊和岛弧系统。

海底硫化物矿藏的形貌由热液系统的演化阶段及其所处的不同的地质背景决定的。黑烟囱是典型的热液矿藏形成的初级阶段,已发现的黑烟囱高度从几厘米到45 m^[23]。在中速扩张的胡安·德富卡洋脊发现的玄武岩为主的活动喷口,陡峭的硫化物烟囱体一般几十米高,存在多个活动的高温流体排放点^[24]。在慢速扩张的大西洋中脊发现了像森林一样的超基性岩烟囱堆积体,30~40 cm高,每平方米接近10个。除了烟囱外,在TAG热液区和其他的热液区还发现了类似蜂窝状的热液喷口。

烟囱坍塌后,硫化物碎片堆积成为小丘,即硫化物堆积体,在加拉帕戈斯和胡安·德富卡洋脊广泛分布,胡安·德富卡洋脊Zephyr小丘高26 m直径达90 m,是该区域最大的单个硫化物堆积体^[25]。TAG热液区的Mir小丘直径40~50 m高,直径达200 m,巨大的体积是长期堆积形成的,最长长达5万年^[26],除了洋中脊外,直径几百米,高数十米的巨大的硫化物丘状堆积体也在其他地质背景被发现,如Middle裂谷^[27]和Okinawa海沟^[28]。硫化物堆积体最终聚集成堆,矿体的近底三维成像技术有助于采矿作业。

2 深海采矿潜在的环境影响因素

将几百米直至数千米的海底金属矿物采集并运输到水面,是一项大型的人类活动,目前主流的深海采矿工艺和装备来看,主要采用海底集矿、管道或者链桶提升输送、水面支持母船选矿、水下尾矿排放等方式。环境影响的主要因素有底层物质迁移、环境水迁移、光和噪声的产生、作业沉积物羽流的产生、沉积物(尾矿)排放羽流产生、有毒物质释放、海水酸化、溶解氧耗竭、栖息地改变、外来物种或致病物质输入等几方面^[27]。

2.1 底层物质及底层水迁移

几乎所有海底金属矿产的开发均涉及大量海

底物质的迁移。由于金属矿产在深海大洋海底大面积的广泛分布,未来结核、结壳工业化采矿影响面积将是巨大的。一个单一的铁锰结核采矿点估计每年会开采 100~600 km² 的矿物^[29-30],一个 260 km² 的富钴结壳矿仅 20 年的开采周期^[31]。海底集矿作业过程中,需对大面积的矿物及其周围沉积物进行刮耙、切割,对原位浮游生物和底栖生物的直接影响无法忽视。如使用射流技术使结核松散并抽吸收集,矿石、沉积物和水流势必混合在一起,小的底栖生物和浮游生物无法逃避水流。矿物及其周围沉积物等一些物质的永久移除,对生态环境的影响可能是深远的,也是多方面的。

目前的深海采矿工艺,大多数包含闭环提升系统,使用大量水稀释冲刷矿物和抽吸泥浆到水面,同时还可能需要用水对设备进行冲洗。估计单一采矿点,硫化物矿每天环境水迁移大于 40 000 m³/d,铁锰结核矿大于 50 000 m³/d^[32]。大多数水是从距离海底不足 10 m 的上方取走,这是特种底栖动物群落的栖息地,大量的无脊椎动物和浮游动物与上层水是显著不同的。流体生物裹挟的量取决于抽吸设备的直径和速度以及水体物种的大小的移动能力。一些大的移动快的动物可能会逃离开水流抽吸,长期生活在无干扰环境下的深海鱼类游动相当缓慢,可能逃避干扰能力较低,浮游动物,包括季节性浮游生物幼虫一般会被吸走杀死。在活动热液喷口,由于无脊椎浮游生物幼虫比较集中,抽吸裹挟的影响会更特殊。

2.2 光和噪声的产生

结核、结壳和硫化物集矿机需配备强光源沿着采矿路径照亮海底,以便使用照相机控制作业。同时,用于调查、监测和维护的遥控运载器(ROV)等也会发出强光。几乎所有矿种的海底集矿和提升设备都会产生噪声,包括提升过程中震动摩擦以及管线移动。

阳光无法穿透 1 000 m 水深进入大洋,许多深海生物部分或者完全没有眼睛或感光器官,但是许多鱼类和无脊椎动物可以感觉到极弱的生物发光^[33]。生物发光的物种范围很大,从细菌到鱼类,是深海唯一的自然光源,这种现象在各个大洋普遍

存在^[34]。一些鱼类追逐亮光,一些鱼类逃避亮光,还有一些对亮光没有反应。这无疑增加了抽吸裹挟上海的危险性,生物发光的生态功能将会被局部破坏,比生物发光强得多的人工光源可能会伤害附近一些生物的眼睛。

水下声音传播,尤其低频段,可以传播得非常远,估计采矿系统的噪声会传播几百千米,影响较大区域。声音的传播是全向的,可以穿过温盐跃层到达表层,因此其影响的不仅是深海生物甚至包括整个水体和表层生物,无论主动还是被动利用声音的动物,包括捕食、通信、导航等,都会有一定的影响。除了直接伤害声音感应器或者误导海洋生物行为,人为噪声可能干扰声音的自然应用,遮蔽了生物声音信息或触发了错误的响应。因为没有合适的深海海底采矿噪声产生和传播的信息,以及对深海生物声音感知的了解也很少,深海采矿噪声影响还很难预测。

2.3 采矿作业沉积物羽流

海底采矿过程中的矿物刮、耙、切割收集,冲洗、破碎和研磨等操作,以及集矿机运动都不可避免会产生沉积物羽流。目前,工业规模采矿产生的影响浮游生物浓度的羽流扩散范围还不能可靠地估计。根据加拿大鸚鵡螺矿业公司数值模拟的结果,硫化物采矿沉积物羽流可影响 3.5 km²,小于 1 mm 的颗粒物覆盖范围可以到达距离矿井 700 m 远,该结论还存在质疑,影响可能还要大得多。

铁锰结核采矿区域较大,每年可影响几百平方千米,沉积物羽流的沉降区域将更大。模拟计算估计一个 12×12 km 的结核采矿区大于 0.1 mm 颗粒物一年扩散的距离可以到达 50 km。该沉降速率可能超过了背景沉降速率的 100 倍,既不包括长期采矿作业的叠加影响也不包括可以悬浮多年对浮游动物影响最重的极细小碎片^[35]。

海山区结壳区沉积物极薄,一般在结壳表面裂隙中,采矿作业不可避免地会产生沉积物再悬浮,结壳的切割、刮耙将会产生沉积物云。沉积物羽流的产生在几个方面直接影响了海底浮游和底栖生物群落。①沉积物掩埋造成底栖生物窒息。悬浮

无机颗粒物阻塞呼吸或者滤食器官,削弱呼吸作用和摄食能力。②无营养或低营养颗粒物的摄入导致近底生物饿死或者减缓生长,并会导致级联影响;干扰沉降食物产生的味道,从而影响一些生物觅食,如食腐生物。③增加浊度降低生物发光传播距离,降低生物发光求偶成功率,从而降低再生产率;掩盖生物的化学痕迹,影响生物求偶从而减少再生产率。

2.4 尾矿排放沉积物羽流

目前的深海采矿工艺,主要利用水力提升系统或者链桶系统输送的水面支持母船进行预处理。预处理产生的尾矿,包括废水、沉积物和矿石破碎磨损产生的细固体颗粒物,将被排放回海洋,在排放点产生沉积物羽流。估计每个铁锰结核集矿机每天产生干重400 t的固体颗粒物悬浮在5万 t废水里^[36-37]。硫化物采矿每天产生的4万 t废水里将包含干重6 000 t固体颗粒物返回海洋^[38]。排放沉积物羽流的影响区域大小取决于排放持续时间、排放量、排放物质粒径分布、排放深度以及排放区海洋学状况。仿真模拟发现大于15 μm 粗颗粒物靠近源头快速沉降,而细颗粒物可能漂浮在海上数年扩散至几百千米,在中尺度涡的作用下,废弃物可以传输更远的距离^[38]。尾矿排放沉积物羽流除了具有作业沉积物羽流一样的深海生态环境影响外,排放深度不同还可能发生不同的影响^[39]。

(1)在光合作用带(0~200 m)区域排放:光合作用带浊度增强会降低光的利用率,导致初级生产率显著下降,可能产生级联反应影响到高营养等级的生物。Chan等^[40]估计18×2 km区域的全面结核采矿作业,短期的排放影响会导致初级生产率会降低到50%,持续数年的连续排放无疑会对浮游植物群落产生长期的影响。浮游动物摄入无机颗粒物会降低生长率,其高沉降率粪便的排泄也会导致颗粒物通量的增强。排放水与环境水流速和密度的不同可能会局部引起对流,直接干扰上层水,其对生态系统的影响上尚不能被预测。

(2)在中深层暮光带(200~1 000 m)排放:昼夜垂直迁徙动物在该层出现,沉积物羽流造成的浊度增强,可能会减少依赖生物发光现象捕食的生物猎

食成功率,通过生物发光进行通信的能力也会受到抑制,浮游动物无机颗粒物的摄入会提高其粪便的沉降速率^[41]。颗粒物通量的增强是否会提高有机物质通量,从而增加深海动物群落的食物尚不清楚,是否影响生物和微生物碳泵也不清楚。

(3)在1 000 m以深深海区域排放:该区域除了生物发光外是完全黑的,颗粒物负载的增加与上层类似,包括抑制生物发光的生态功能,可能会更严重,因为该层的自然浊度是极低的。由于天然颗粒物丰度高得多,沉积物颗粒与天然有机物颗粒的竞争,与上面几层相比,可能会大幅提高。

(4)靠近底部排放:由于沉积物沉降距离最短,影响的区域可能最小,将增大作业沉积物羽流的影响。

此外,泵输矿物到水面支持母船的水会在矿物预处理过程中会变暖,排放的水的温度与排放区域环境温度不同,可能会引起湍流垂直流。深海动物群落一般适应很小温差的低温环境,在深海或者海底释放暖水可能损害甚至杀死一些对排放敏感的生物。移动速度较快的生物能否感知并逃避温度上升尚不确定。由于沉积物羽流可以与环境水快速混合,温度会快速实现平衡,影响的区域较小。

2.5 酸化、氧损耗及生境改变

硫化物矿在采矿过程中由于硫化物氧化可能会产生硫酸,硫化物采矿酸的产出可能不会超过海水的缓冲能力。但由于采矿过程中酸的释放是否会局部增大由于气候变化导致的海洋酸化,尚不清楚。

在一些大洋洋盆,例如秘鲁海盆,其有氧沉积物较浅,海底采矿作业可能会搅起缺氧沉积物,缺氧沉积物在水体的排放可能会增加氧的消耗。由于采矿路径上死亡动物的微生物分解,可以忽略溶解氧浓度变化的影响,而大量缺氧沉积物排放到贫氧层可能会局部的降低氧浓度,影响到该层的大多数浮游动物和弱泳生物。

深海采矿造成的底层物质移除和再沉积,以及采矿装备在海底运动碾压,除了多数底栖动物难以幸存外,将严重影响海底微形貌和结构,也可能会影响底流和湍流的特征。由于低沉降速率、低底流

流速以及深海海底类似结核结壳等坚硬物质的难重塑性,海底结构的人为变化可能会持续很长的时间,其影响是直接的、多方面的。

(1)微小地质结构体的破坏、采矿装备行走轨迹、沟槽的产生,不同程度的影响底栖生物的行为甚至改变他们物种组成。

(2)珊瑚海绵等慢速生长的深海底栖动物利用栖息地觅食或庇护,栖息结构移除的影响可能是长期的。

(3)深海生物组成的变化会影响海底生物和底栖生物摄食途径,从而影响具体的喂养相互作用,最终改变底栖生物群落组成。

(4)采矿活动的底栖生物致死会影响深海底栖生物的食物供应变化,如浮游生物幼虫的减少,从而改变深海生物群落的生物多样性。

(5)采矿期间摄食相互作用会遭到破坏,只有通过快速地再移植才能重建。

2.6 有毒物质释放及外来物种侵入

无论是矿物开采还是尾矿排放均会释放有毒物质,如重金属。铁锰结核和铁锰结壳的重金属浸出较低,硫化物矿可能会有大量的潜在有毒金属^[41]。考虑到温度、压力和废水的成分等不定因素,加之深海动物群落对高浓度金属离子的敏感性数据还十分缺乏,可靠地预测有毒物质对具体生物组织的影响目前是不可能的,一些潜在的风险难以避免^[42]。有毒化合物,如重金属,对生物组织会产生急性或慢性的伤害,深海采矿作业和排放的羽流中,超过生物可利用量的重金属进入水体可能会致死或者抑制深海生物生长,或者降低在生产率,高等的动物会由于有毒物质在食物链中的生物积累可能受到影响,并通过水平和垂直迁徙增大影响范围。由于海底生物群落对好金属例子浓度敏感性较小,如多金属硫化物矿区,靠近海底释放金属物质,比在水体内释放影响可能会小,还需要进一步的实验验证。

所有深海采矿活动均需要将深海固体物质和水从海底运输到水面,也包括生物、微生物和病毒;另一方面,尾矿在深海的排放可能会将水面污染物携带到深海水层。深海真核生物可能会在采矿极

端不同环境中幸存,并传播到水面支持母船。水面污染物在深海海底持续的繁殖是不可能的,但不排除一些细菌、古菌和病毒给海底生物群落带来潜在的健康风险。深海金属矿物开采影响的不仅仅是底栖生物群落,也可能影响到深海生态系统组成。对于深海生物而言,一些影响可能是致命的,大多数会削弱摄食、生长和再生产过程,导致生物资源量减小,生物群落改变以及生物多样性降低。然而对深海种群,食物链和整个生态系统间接影响的潜在结果及规模的判断是相当困难的,需要通过技术手段系统地长期地开展监测研究。

3 深海采矿环境监测技术体系

3.1 生态环境监测目标任务

深海采矿环境影响研究应实现两个目标:更好地认识深海生态系统,实现可靠地预测潜在的影响;探明工业化采矿活动在生物多样性、生物量以及功能关系等方面造成的生态系统结构变化^[43]。

深海采矿环境影响因素是综合的多方面,比较大的影响主要包括底层物质移除,沉积物羽流,尤其尾矿排放羽流的产生扩散及其造成生境变化。由于传播扩散的路径最短,尾矿海底排放可能对生态环境的影响最小,环境调查研究主要任务可基于海底排放开展系统全面调查监测研究,在此基础上针对排放水层的不同增加调查监测研究任务。

(1)靠近海底排放。应研究海洋哺乳动物出现情况及其背景噪声,不同层深浮游动物组成、丰度和生物量,底边界层浮游生物组成丰度和生物量,底边界层以及近底游泳动物的组成、丰度和总量。通过研究鱼类和大型无脊椎动物胃容物监测研究受影响水层的食物网变化,采用原位实验研究生物群落的新陈代谢以及颗粒物浓度增加后对滤食生物的影响,原位实验研究不同营养等级物种有毒物质影响。

(2)光合作用带以下排放。还需要在选择多个站位,按深度评估本层以及下层一直到海底水体的浮游生物组成、丰度和生物量(若水体出现垂直对流,上层水体也应该考虑)。

按深度评估本层以及下层一直到海底水体的弱泳生物和游泳生物组成、丰度和生物量。若中深

层(暮光层)受到影响,昼夜垂直迁移(DVM)生物的影响需要研究,如出现贫氧层,须特别重视。

(3)光合作用带排放。还需要调查浮游植物大小、种类组成,按深度分层评估光合作用带浮游生物、弱泳生物和游泳生物组成、丰度和生物量时,需要考虑垂直迁移生物的影响。

多金属硫化物区和富钴结壳区的复杂地形使近底生物群落的环境影响评估尤其困难。尤其海山区,生物栖息地随深度变化剧烈,微地形地貌与海流的相互作用使得海流形式更加复杂,导致了深海生物群落时空变化较高,铁锰结壳矿及其开采产生羽流可能位于垂直迁移生物范围内,并且会影响到表层环境,需要特别关注。

3.2 环境监测研究技术需求

3.2.1 环境监测调查方法

深海采矿活动及其对环境的干扰是动态的、复杂的、多方面的具有系统性、耦合性,需要科学的监测调查方法,主要包括以下几个方面。

(1)调查监测任务的时序或流程。采矿试验和环境监测研究之前应首先开展环境基线调查,采矿扰动试验开展后应立即开展扰动监测和影响评估,然后不间断地定期开展研究。

(2)监测采样网格设计。应能代表采矿站位的生物和非生物特征,采矿作业和排放羽流至少包括高、中、低几个颗粒物浓度地点,要有一个以上的影响区域以外的参考站位。

(3)样品数据要求。每个站位必须有足够数量的样品和数据,以保证统计分析结果的质量,尽可能完成多次重复测量以了解自然地时间变化,在生物调查取样的同时,完成水体物理化学剖面等环境属性的测量。

(4)监测时间要求。具有季节性变化特征的,需要长期监测,应覆盖一个以上变化周期,如一年以上,监测垂直迁移生物需要昼夜分别观测。

3.2.2 装备技术

深海采矿环境监测研究,需要获取高质量环境样品和数据,高度依赖深海装备技术。一般情况下,不同作业任务需要不同的技术装备支持,包括运载装备、固定观测装备、监测调查仪器以及小型

取样装置。

水体、底边界层和近底游泳动物的组成、丰度和生物量调查监测,需要围网、声光系统、诱捕装置以及载人潜水器、ROV 或 AUV 等运载装备,搭载长期定时照相机和多频水听器的锚系或者 LANDER 系统。

水体及底边界层浮游生物组成丰度和生物量监测,需分层拖网、底表撬网或者 ROV 和成像系统调查。

按深度分层评估光合作用带浮游生物、弱泳生物和游泳生物组成、丰度和生物量时,需要分层拖网、摄像系统,如视频浮游生物记录器、水下摄像剖面仪等,多频水听器。

在海底形貌极端复杂的站位和活动热液喷口开展调查研究,靠近海底的生物群落应使用配置拖网和成像系统的载人潜水器、ROV 或者 AUV 开展调查研究,如果丰度极高,可采用泵类设备。小型网具、声光系统、诱捕装置、小型撬铲均可以使用。

考虑到海山区和热液区生物群落的时空变化特征,需要采用声光锚系统进行长期观测;羽流跟踪和面积环境参数监测,可采用水下滑翔机或 AUV 等运载装备。

原位实验研究生物群落的新陈代谢以及颗粒物浓度增加后对滤食生物的影响,需要搭载声光观测系统的锚系或者 LANDER 系统;原位实验研究不同营养等级的物种有毒物质影响。需要搭载声光观测系统的锚系或者 LANDER 系统。

3.2.3 仿真模拟技术

深海采矿,尤其进入工业化开采阶段,环境影响范围大,机理复杂。仅靠现场调查取样研究,无论从人力、物力、投入还是科学认识本身,都难以实现可靠地评估。模拟实验技术是不可或缺的重要技术手段,并且取得了一系列的研究成果。仿真模拟实验技术包括物理模型实验和数值模拟计算等两类。

利用物理模型试验,可开展新型采矿装备海底采矿作业与海底底质环境的相互作用研究,如底流作用下,海盆、海山、洋中脊等不同地质环境,不同采矿装备,不同作业方式下,作业沉积物羽流的产

生动态特征模型研究。

利用数值模拟仿真,可开展沉积物羽流,包括作业羽流及尾矿排放羽流,在水动力环境下的运移研究,包括不同底质,不同微地形地貌下采矿作业羽流的运移,不同深度尾矿排放羽流的运移,涡旋、湍流对沉积物羽流的影响等。

3.3 技术体系构架

深海采矿对深海大洋生态环境的影响是深远的、多方面的、复杂的,其监测评估系应满足不同矿种、不同海域、不同规模海底采矿活动对环境产生的影响,环境影响监测的技术体系应具备多目标、多维度、多层次、多手段、多学科,全开放、全链条、全天候,陆海一体、软硬一体等基本特征。

(1)多目标:技术体系以监测深海采矿活动对海洋生态环境影响为主,解决深海生物,尤其底栖生物群落结构变化、多样性和生物量的影响,同时监测深海采矿活动对目前以出现的海洋酸化、暖化等现象及其对全球气候的可能影响。对于具体采矿活动的影响,即可以监测多金属结核采矿活动的环境影响,也可实现富钴结壳、多金属硫化物甚至稀土和多金属软泥等矿产开采活动的影响;即监测生态环境影响,又可监测可能出现的局部生态和地质灾害。

(2)多维度:时间上既满足采矿前环境基线的调查研究需要,又可满足采矿活动环境干扰的动态全过程,并在采矿扰动产生后可长时间监测其变化;在空间上从海底沉积物层到底边界层,1 000 m以深深海,1 000~200 m 暮光层直至 200 m 以浅光合作用带可实现全面原位监测。

(3)多层次:作为技术体系,应包括多个层级。技术体系构建首先应以环境监测技术需求为导向,监测的技术方法,包括技术规范规程以及标准是监测技术体系的顶层;深海调查监测高度依赖技术装备,技术装备是技术体系的核心层,技术装备同样应成体系构建,除科考船外,包括 MUV、ROV、AUV、水下滑翔机、着落器等水下运载装备,声学、光学拖体,潜标、锚系等固定观测装备、各类物理化学传感器以及甲板 and 室内分析测试仪器;数据分析处理层,包括各类数据处理软硬件、数值技术与仿

真软硬件平台等;试验验证层,包括物理模型试验系统、深海采矿原位试验场。

(4)多手段:技术体系采用多种技术手段,在监测研究实施层面包括长期原位监测、分阶段走航调查、陆上模拟实验和大数据分析处理以及仿真计算等;在采用的技术方法方面包括声、光、电磁等手段。

(5)多学科:调查技术方法涉及生物生态、海洋地质、物理海洋、地球物理等多个学科,技术装备研发同样涉及材料、结构、控制、通信、传感检测等多个学科。

(6)全开放:技术体系的全开放性表现在两个方面,从应用方面要向海洋环境监测各个领域开放,从体系构建方面要实现结构开放,不断跟随技术进步丰富和完善技术体系的架构,不断增加新的技术手段。

(7)全链条:监测体系的全链条指从采矿环境干扰信息的提取,到不同时空环境影响样品和数据的获取,到分析测试研究,再到试验验证一体化全链条。

(8)全天候:监测技术体系满足监测活动的时限要求,既可以长期稳定工作,又可以解决应急监测需要。

(9)陆海一体:海上调查监测与陆上分析测试、仿真模拟一体化。

(10)软硬一体:监测的技术方法、数据分析处理方法、仿真计算和模拟实验等软技术和重大装备和原位精密传感器以及甲板和室内测试仪器等硬件一体化。

4 结论和建议

本研究从深海采矿活动监测评估需要,系统地分析多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物等主要深海矿产资源的在全球各大洋的分布状况,以及海盆、海山、洋脊和海沟等以上几类资源的生长的地质背景;从底层物质迁移、沉积物羽流产生输运、声光噪声的产生以及有毒物质释放等 10 个方面在采矿活动工程角度分析了深海采矿对环境的印象因素,分析了生态环境监测研究的目标任务,提出了深海采矿环境监测技术体系构建的基本要求,对今后系统全面地开展深海采矿环境监测具有一定的

技术支持作用。然而,由于目前深海采矿技术工艺尚在不断发展中,进入大规模商业采矿的时间也难预测,本研究提出的技术体系构建理念还需要进一步深化细化。

目前处在深海采矿事业发展的战略机遇期,为了尽快提升深海采矿环境影响评估的能力,推动深海采矿向商业化工业化迈进,建议系统地谋划环境监测技术体系,加强顶层设计,加大重大装备研发,启动采矿环境影响试验工程,发展数值模拟技术,推动深海环境监测国际标准制定,以期在未来深海资源开发与环境保护中维护国家利益。

参考文献

- [1] THIEL H, ANGEL M, FOELL E. Environmental risks from large-scale ecological research in the deep sea: A desk study [R]. *Marine Science and Technology*, 1995, 23(11): 201—209.
- [2] JONES D, KAISER S, SWEETMAN A, et al. Biological responses to disturbance from simulated deep-sea polymetallic nodule mining[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): 158—165.
- [3] YAMAZAKI T, SHARMA R. Estimation of sediment properties during benthic impact experiments[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2010, 19(3): 269—289.
- [4] CHRISTIANSEN B, DENDA A, CHRISTIANSEN S. Potential effects of deep seabed mining on pelagic and benthopelagic biota[J]. *Marine Policy*, 2020, 21(3): 436—442.
- [5] HEIN J, KOSCHINSKY A. Deep—Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, 13(9): 273—291.
- [6] GLASBY G. Manganese: predominant role of nodules and crusts. In: Schulz HD, Zabel M(eds) *Marine geochemistry*[J]. *Marine Geochemistry*, 2006, 12(08): 371—427.
- [7] International Seabed Authority. ISA/99/02 Deep-seabed polymetallic nodule exploration: Development of environmental guidelines[S]. Kingston, Jamaica, 1999.
- [8] Visbeck M, Gelpke N. World ocean review 3 Marine resource opportunities and risks[M]. Hamburg: KIEL marine science, 2014: 163.
- [9] STACKELBERG V. Growth history of manganese nodules and crusts of the Peru Basin[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1997, 119(1): 153—176.
- [10] KOSCHINSKY A. Heavy metal distributions in Peru Basin surface sediments in relation to historic, present and disturbed redox environments[J]. *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(17): 3757—3777.
- [11] KINGSTON J. A geological model of polymetallic nodules in the Clarion-Clipperton Fracture Zone[J]. *International Seabed Authority Technical Study*, 2010, 6(3): 68—75.
- [12] WEGORZEWSKI V, KUHN T. The influence of suboxic diagenesis on the formation of manganese nodules in the Clarion Clipperton nodule belt of the Pacific Ocean[J]. *Marine Geology*, 2014, 12(357): 123—138.
- [13] WEGORZEWSKI A, KUHN T, DOHRMANN R, et al. Mineralogical characterization of individual growth structures of Mn-nodules with different Ni+Cu content from the central Pacific Ocean[J]. *American Mineralogist*, 2015, 100(11): 2497—2508.
- [14] GRANGEON S, LANSON B, MIYATA N, et al. Structure of nanocrystalline phyllosilicates produced by freshwater fungi[J]. *American Mineralogist*, 2010, 95(02): 1608—1616.
- [15] HEIN J, SPINARDI F, OKAMOTO N, et al. Critical metals in manganese nodules from the Cook Islands EEZ, abundances and distributions [J]. *Geology Reviews*, 2015, 68(03): 97—116.
- [16] MUKHOPADHYAY R, GHOSH A, IYER S. The Indian Ocean nodule field: Geology and resource potential. In: Hale M (series editor) *Handbook of exploration and environmental geochemistry*[M]. Amsterdam, Elsevier, 2010: 292.
- [17] MUKHOPADHYAY R, GHOSH A. Dynamics of formation of ferromanganese nodules in the Indian Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(8): 394—398.
- [18] BOROLE D. Late Pleistocene sedimentation: a case study in the central Indian Ocean Basin[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1993, 40(4): 761—775.
- [19] ANNA V, WEGORZEWSKI, THOMAS K. The influence of suboxic diagenesis on the formation of manganese nodules in the Clarion Clipperton nodule belt of the Pacific Ocean[J]. *Marine Geology*, 2014, 357(6): 123—138.
- [20] HEIN J, KOSCHINSKY A, BAU M, et al. Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific. In: Cronan DS(ed) *Handbook of marine mineral deposits*[M]. London, CRC Press, 2000: 239—279.
- [21] HALBACH P, SCHWARZ U, MARBLER H. Platinum and some other trace metals in ferromanganese crusts—geochemical models to explain contradictions[C] // *marine minerals: technological solutions and environmental challenges*, Oxford, USA, 2008, 6: 2701—2706.
- [22] PETERSEN S, KRATSCHELL A, AUGUSTIN N, et al. News from the seabed-geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources [J]. *Marine Policy*, 2016, 70(12): 175—187.

- [23] JAMIESON J, HANNINGTON M, CLAGUE D, et al. Sulfide geochronology along the Endeavour segment of the Juan de Fuca ridge[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2013, 14(7): 2084–2099.
- [24] JAMIESON J, CLAGUE D, HANNINGTON M. Hydrothermal sulfide accumulation along the Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 12(395): 136–148.
- [25] LALOU C, REYSS J, BRICHET E, et al. Hydrothermal activity on a 105-year scale at a slow-spreading ridge, TAG hydrothermal field, mid-Atlantic Ridge 26°N[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(9): 855–862.
- [26] ZIERENBERG R, FOUQUET Y, MILLER D. The deep structure of a sea-floor hydrothermal deposit[J]. *Nature*, 1998, 392(6675): 485–488.
- [27] TAKAI K, MOTTL M J, NIELSEN S. IODP expedition 331: strong and expansive subseafloor hydrothermal activities in the Okinawa Trough[J]. *Scientific Drilling*, 2012, 13(7): 9–26.
- [28] 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(8): 245–259.
- [29] SHARMA R. Environmental issues of deep-sea mining[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, 11(8): 204–211.
- [30] VOLKMANN S, LEHNEN F. Production key figures for planning the mining of manganese nodules[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 36(3): 360–375.
- [31] HEIN J, CONRAD T, DUNHAM R. Seamount characteristics and mine-site model applied to exploration-and mining-lease-block selection for cobalt-rich ferromanganese crusts, Mar[J]. *Geotechnol.* 2009, 27(2): 160–176.
- [32] OEBIUS H, BECKER H, ROLINSKI S. Parameterization and evaluation of marine environmental impacts produced by deep-sea manganese nodule mining, *Deep Sea Res. Part II Top* [J]. *Oceanogr.* 2001, 48(17): 3453–3467.
- [33] DOUGLAS R, PARTRIDGE J. Visual and lenticular pigments in the eyes of demersal deep-sea fishes[J]. *Physiol.* 1995, 177(03): 111–122.
- [34] HADDOCK S, MOLONE M, CASE J. Bioluminescence in the sea[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2010, 12(4): 443–493.
- [35] LUICK J. Physical Oceanographic Assessment of the Nautilus EIS for the Solwara I Project[J]. *Deep Sea Mining Campaign*, 2012, 11(05): 26–32.
- [36] ROLINSKI S, SEGSCHEIDER J. Long-term propagation of tailings from deep-sea mining under variable conditions by means of numerical simulations, *Deep Sea Res. Part II Top* [J]. *Oceanogr.* 2001, 48(17): 3469–3485.
- [37] JAK R, LAGERVELD S, WIT L C. Towards Zero Impact of Deep Sea Offshore Projects[J]. *Delft University of Technology*, 2014, 12(03): 234–239.
- [38] JUDD A G, HOVLAND M. The evidence of shallow gas in marine sediments[J]. *Continental Shelf Research*, 1992, 12(10): 1081–1095.
- [39] ALEYNIK D, INALL M E, DALE A, et al. Impact of remotely generated eddies on plume dispersion at abyssal mining sites in the Pacific[J]. *Rep.* 2017, 7(1): 169–175.
- [40] CHAN A, ANDERSON G C. Environmental investigation of the effects of deep-sea mining on marine phytoplankton and primary productivity in the tropical Eastern North Pacific Ocean[J]. *Mar. Min.* 1981, 15(03): 121–149.
- [41] HIROTA J. Potential effects of deep-sea minerals mining on macrozooplankton in the North Equatorial Pacific[J]. *Mar. Min.* 1981, 3(12): 19–57.
- [42] RAMIREZ E, TRANNUM H, EVENSET A. Submarine and deep-sea mine tailing placements; a review of current practices, environmental issues, natural analogs and knowledge gaps in Norway and internationally[J]. *Mar. Pollut.* 2015, 97(2): 13–35.
- [43] HAUTON C, BROWN A, THATJE S. Identifying toxic impacts of metals potentially released during deep-sea mining—a synthesis of the challenges to quantifying risk[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2017, 4(368): 124–129.