

深海采矿的 环境影响

何宗玉

20世纪70年代以来,随着大洋多金属结核勘查和开发活动的日益频繁,深海采矿可能引起的环境问题亦引起了国际社会的广泛关注,联合国建立了多种临时委员会和常设委员会来研究开发海洋矿产资源的法律、经济、科学和技术方面的问题,《联合国海洋法公约》等有关法律和法规相继出台。而在《联合国海洋法公约》框架基础上成立的国际海底管理局有责任和义务对国际海底资源及其环境保护进行管理和监督。为了保护深海生物多样性和海洋自然环境,防止采矿活动对海洋环境的危害,国际海底管理局和参与勘探和开发活动的国家及组织应建立监测和评价深海勘探活动对海洋生态环境影响的计划。为此,美国、德国、俄罗斯、法国、日本等国家和一些国际财团相继开展了一系列与深海采矿有关的环境研究。

一、国外深海环境研究现状

世界上第一次海底采矿环境影响实验是在1970年7月进行的。美国深海投资财团和哥伦比亚大学拉蒙特-多尔蒂

地质所在距佛罗里达-佐治亚沿岸150km的北大西洋布莱克海底高原,与气泵提升采矿系统试验同时开展了环境影响研究,研究的主要焦点是底层沉积物在表层排放所产生的表层羽状流及其由此而带来的营养盐的生态影响。此后,一些工业国家和国际财团相继开展了环境影响实验研究项目。

1. DOMES 之前的研究

(1) 百慕大海隆研究(美国,1972年):该研究的主要目的是收集百慕大海隆锰结核矿区的物理、化学和生物基线资

料及定量测定底栖生物量。

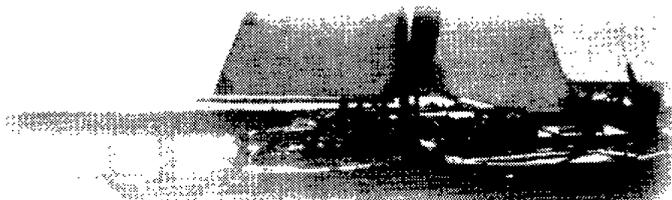
(2) 连续链斗式(CLB)采矿实验研究(日本-美国-法国,1972年):在北太平洋采矿试验期间采集了水柱中的物理、化学和生物资料,使用深海照相机获得了采矿实验点在挖掘前、挖掘期间和挖掘后的底层巨型底栖生物照片。

(3) 克拉里昂-克里帕顿断裂带研究(德国,1972年):在地质航次调查期间,进行了环境基线调查,并从箱式样品中采集了小型底栖生物样。

(4) 海洋生态系统分析(MESA)计划(美国,1976年):对火山喷发和浊流等自然灾害对底栖生物群落的影响和深海采矿的潜在影响等进行了比较研究。

2. DOMES 研究

该项目由美国国家海洋大气局负责实施(1975~1980年),包括两个阶段。第一阶段主要以靶区环境特征为研究目标,包括:(1)建立类似于矿区环境条件的三个代表区



(DOMES A、B 和 C 区)的物理、化学、生物和地质环境基线；(2) 发展预测结核开采潜在环境影响的早期预警能力；(3) 帮助工业部门和政府建立环境数据库，以制定有关环境影响评价指南。第二阶段主要是监测海洋管理公司(OMI)和海洋采矿协会(OMA)于1978年分别在DOMES A区和C区进行的两次实验性采矿实验的影响，其目的有两个：(1) 观察深海采矿期间所产生的环境影响，以提高在DOMES第一阶段所发展起来的环境影响预测能力；(2) 继续发展和完善数据库，为最终环境指南的制定提供依据。

该项研究取得了如下成果：(1) 建立了“克拉里昂—克里帕顿断裂带”(“CC区”)A、B和C三个区的环境基线；(2) 提供采矿前的可能环境影响预测报告，为依据美国法律进行实验性采矿的环境监测计划的设计提供依据；(3) 对商业采矿可能产生的短期环境效应做出了合理的预测；(4) 建立了相关数据库，并据此对某些长期效应进行了评估。

3. DOMES 之后的研究

(1) 回声-I考察(美国, 1983年): 1983年斯克里斯普斯海洋研究所的“MELVILLE”考察船重访OMA 1978年的实验性采矿区，研究实验性采矿5年后这些区域的底栖动物有无显著的差别。结果表明，采矿轨迹与参照区之间的底栖动物无明显不同。

(2) 现场死亡实验(美国, 1987年): 该项实验是由水下遥

控器在圣加德林纳海盆1250m深处进行的，结果表明，1cm厚的沉积物覆盖对大型底栖动物不会产生严重的影响。

(3) QUAGMIRE II 考察(美国, 1990年): 该项目原计划用改进的水下遥控器在OMA 1978年的采矿轨迹内进行精确取样，继续对在回声-I考察期间所进行的采矿轨迹内底栖生物再迁入进行研究。

4. 底层影响实验(BIE)

自1991年起，多个国家和国际组织采用相同的扰动器陆续进行了被称为“底层影响实验”(BIE)的一系列实验。实验的目的在于通过人工扰动海底表层沉积物来研究沉积物的再沉积及其与周围海水混合和在离海底5m高处的排放效应。

(1) 美国的BIE: 是美国国家海洋大气局与俄罗斯“Yuzhmorgeologia”的科学家们合作进行的，前两次分别是在1991年和1992年用美国国家海洋大气局制造的第一代深海沉积物再悬浮系统进行实验，但沉积物再沉积的效果不太令人满意。因此，在1993年制造了第二代深海沉积物再悬浮系统，并用该装置进行了新的扰动实验。小型底栖生物分析表明，扰动发生9个月后，一些种类尤其是线虫数量明显下降，而大型底栖生物种类多样性却未因沉积物的再沉积作用而受到影响。

(2) 俄罗斯的BIE: 始于1993年，与美国国家海洋大气局合作进行，实验区位于俄罗斯开辟区附近，其实验方法与

美国的BIE相同，分三个阶段进行：第一阶段为基线调查；第二阶段为扰动实验；第三阶段在扰动后的不同时间取样，监测扰动对环境的影响。

此外，“海金联”(1994年~1997年)、日本(1993年参加了美、俄的BIE，并于1994年~1996年在日本开辟区进行BIE，又称JET)和印度(1995年~2002年)也用与美国和俄罗斯相同的扰动器和相似的方法分别在各自的开辟区内开展了BIE。

5. 扰动和再迁入实验(DISCOL/ECOBENT)

德国在1988年~1993年开展了大尺度深海环境影响研究——DISCOL，实验区位于东南太平洋秘鲁海盆面积为10.8km²的圆形海底，实验分三个阶段进行：第一个阶段(1989年2月~3月)先进行基线调查，然后由特殊设计的犁耙系统对实验区进行人为扰动，这个装置在海底拖曳，穿过圆形实验区78次，扰动的沉积物深度至少达10cm~15cm，并在扰动结束后立即进行第一次扰动后采样；第二阶段(1989年9月)在扰动半年后进行第二次扰动后采样；第三个阶段(1992年2月)在扰动3年后进行第三次扰动后采样，获得了有关巨型、大型、小型底栖生物丰度、细菌生物量和生物活动等方面的资料。其目的是通过大尺度的实验，包括对广阔海底区的扰动，以监测海底受人为严重扰动后的几年时间内底栖生物的再迁入和底栖生物群落重建的速率。

1995年~1998年德国又开展了“东南太平洋深海生态系统中的底栖生物调查(ECOBENT)”，此项目是DISCOL的延续，在扰动影响7年(1996年)后重访DISCOL实验区，继续对底栖生物再迁入情况进行监测。

上述实验大部分是模拟深海采矿，与商业采矿有本质的区别。无论是BIE使用的“深海沉积物再悬浮系统(DSSRS)”，还是DISCOL使用的“犁耙系统”，它们只是将表层沉积物扬起后再沉积，或将上层的结核和沉积物翻到下层、推向轨迹的两侧，这比实际采矿时对海底的扰动要轻得多。在商业采矿时集矿机将绝大部分的结核吸走，同时还大量将表层沉积物吸入集矿机，杀死其中的生

物后，再排出形成底层沉积物羽流。因此可以预见，商业开采后底层环境恢复的时间将会更长。

6. 深海采矿可能对环境造成的影响

联合国环境计划署对海洋污染的定义为：“人类直接或间接把物质或者能量引入海洋环境，导致损害生物资源，危害人类健康，妨碍包括捕鱼在内的各种海洋活动，损害海水使用质量或损坏与降低环境优美的有害影响”。

深海采矿可能造成20余种影响，主要发生在两个深度带：第一个是在集矿机采矿轨迹附近的海底；另一个是在尾矿排放点附近海洋表层或上层。采矿对环境可能造成的影响中有三项可能是较严重的。

第一种重要影响是集矿设备将可能破坏底层的生物，其干扰的程度依赖于所用设备的种类和采矿的强度。大多数底层动物是生活在沉积物上层数厘米，以上层水域沉积下来的有机碎屑为食。在采矿路线上95%~100%的生物会当即被杀死。由于沉积物被翻到行进路线的外侧，轨迹边沿的生物也会被损伤。虽然生物的再迁入可能在采矿后发生，但所需时间却是未知的。水柱食物链估计无影响。

第二种重要影响是底层羽状流。它可能通过窒息和摄食干预影响采矿路线外的海底动物。悬浮沉积物浓度迅速减少，但羽状流可能扩散到距集矿机80km处，并持续到采矿停止后数日。由于羽状流的迅速稀释，

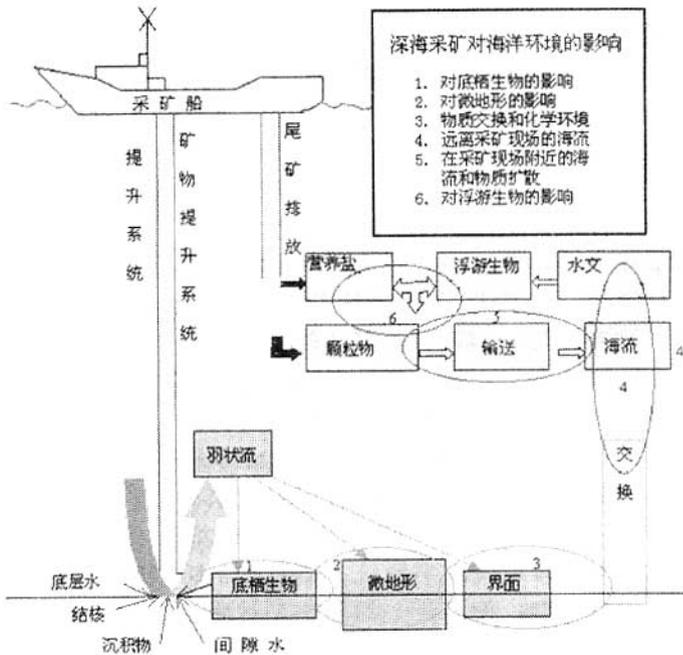


图1 深海采矿环境影响模式图

对水柱食物链估计无影响。然而，底层羽状流可能干扰底动物的食物供给，阻塞滤食动物呼吸器官的表面。

第三种影响是表层羽状流。表层羽状流被定义为表层颗粒物浓度超过周围 $1\mu\text{g}/\text{L}$ 的水体。一艘 5500TDP 的采矿船每天大约废弃 2 000t 的固体物和 8.5万 m^3 水。表层羽状流可能扩散到 $64\text{km} \sim 97\text{km}$ 远，宽度为 $16\text{km} \sim 24\text{km}$ ，并将持续 3 ~ 4 天。羽状流可能影响鱼类幼体，如在开阔大洋产卵的金枪鱼。水体浑浊度的增加将减少用来光合作用的光，但不会严重影响浮游植物种群。DOMES 研究表明，由于表层羽状流很快被稀释和扩散，它所造成的影响可能不会像以前想像得那么严重。然而，其他潜在的影响已被验证：冷水排放到邻近水域，温度剧变对浮游植物和鱼类幼体是有影响的。除了造成金枪鱼等幼体致死外，其有害影响较小。

二、我国的深海环境研究

1991 年，中国大洋协会在 5 000m 水深的太平洋 CC 区申请了 15万 km^2 的开辟区，成为在联合国国际海底筹委会登记的第五个“先驱投资者”。按照《联合国海洋法公约》，先驱投资者有义务和责任对深海采矿活动可能造成的环境影响进行调查和研究。中国大洋协会从“八五”期间即重视并安排了环境方面的研究课题和海上调查任务，获得了一些有关环境基线的样品与数据。“九五”期间，环境调查与研究进一步加强。通过对国外深海环境研究

的分析，根据我国现有条件，经过反复论证，提出了具有中国特点的“基线及其自然变化 (NaVaBa) 计划”。

如上所述，为了保护和安全开辟区的海洋环境，尽管至今已做过 DOMES、DISCOL 和 BIE 等一系列的环境影响试验与监测和评价深海环境的计划；但结果不尽一致，甚至存在矛盾，对深海采矿环境评价的一些关键问题仍未能很好地得到解决。分析其原因，除了受实验方式方法、实验规模的限制外，对深海环境基线所具有的自然变化特征研究不够，则可能是另一个重要原因。只有对基线的自然变化进行充分调查，在查清基线的自然变化后，才能对环境影响试验的结果做出正确的解释。NaVaBa 计划的重点就是通过多年观测、收集深海生物、化学、物理和地质基线资料，评价海底生态环境在空间和时间上的自然变化，并对深海采矿可能造成的环境影响进行初步的评估。

中国大洋协会已经开展了 6 个航次的深海环境基线调查作业，分别由“大洋一号”和“海洋四号”海洋科学考察船执行。在东、西勘探区各布设了 10 个大面站，每个勘探区各留出面积为 $15\text{km}^2 \sim 20\text{km}^2$ 的参照区，每个参照区各有 10 个观测站。主要调查手段有多波束测深系统、深海拖曳光学系统、深海拖曳声学系统、CTD 和 ADCP、海流计、深海锚系观测系统、多管取样器和箱式取样器、浮游生物拖网、邦哥拖网、底栖生物拖网等。深海锚系观测系

统在东、西勘探区各放置 1 套，在离海底不同高度装载海流计等观测仪器，投放水下 200 天 ~ 300 天后收回读取连续观测数据。

中国大洋协会将深海环境作为一个系统，设置了不同方面的研究课题，分别对生物生态、海水与沉积物化学、物理海洋与羽状流、地质地貌进行基线及其自然变化的研究。研究内容包括深海采矿可能造成的浮游生物的影响、对底栖生物的影响、对海底微地形的影响、对物质交换和化学环境的影响、采矿造成的物质扩散作用等。但是，深海采矿对环境影响的试验和评价将参加到国际合作中进行，或者与深海采矿系统的海上试验同步进行。

三、环境友好的深海采矿系统

在进行深海矿产资源开发的过程中，陆地资源开发的经验与教训都应认真总结，重视环境的研究与保护，减少深海采矿对海洋和陆地环境所带来的负面影响，开发环境友好的深海采矿系统，更加合理地利用深海矿产资源。在现有工作基础上，应进行以下几个方面的研究。

1. 不同作业系统集成矿机对环境的影响

由于不同作业系统集成矿工作原理不同，对环境影响的程度也有较大的不同。开展不同作业系统集成矿机环境影响研究，可以改进集矿系统设计，并为发展对环境影响较小的集矿系统提供科学依据。

2. 尾矿的最佳排放深度

为了减轻尾矿表层排放对生态环境的影响,可采用次表层或较深层尾矿排放的方式。目前,多数科学家认为商业开采时在 500m~800m 左右的溶解氧最低层之下排放废水是可行的办法。这种方法可以减少对环境的影响,因为这种排放不仅不对浮游植物的光合作用和浮游动物及鱼卵等产生影响,而且排放出来的悬浮颗粒物由于没有跃层的阻隔而容易沉降到海底,在水平方向上扩散的范围缩小。另一种建议认为,采矿过程的尾矿应尽可能快地返送到海底。但也有相反的意见,认为尾矿在较深层排放也许对生态产生更大的危害,因为较深层排在温跃层下相对静止的水层进行,使原来在表层排放时所具有的一些自然过程(它们对聚集和迁移悬浮固体物质非常有效)不再起作用,悬浮颗粒物质可能会在水层中滞留更长时间。

3. 采矿影响的理论模型

随着环境基线资料的获得,将需要发展基于海底采矿环境影响的理论模型,包括表层羽状流和底层羽状流的扩散模型。这些模型将作为评估地区性特殊情况下环境影响的基础,同时也将被用作预测可能发生影响的混合区的体积。例如,大洋表层废弃悬浮颗粒物的量的增加使浮游动物死亡,模型的建立将近似估计这种影响可能发生的大洋体积。这类模型必须在勘探和试采中不断改进,小规模 and 大规模监视也将为验证和发展羽状流模型提

供数据。

4. 海底边界层(BBL)的水动力学

海底是造成采矿羽流扩散和远离采矿区域大范围潜在环境影响的动力因子。由于将来进行开采的区域主要集中在海底,而目前关于深海海底的水动力状况的资料还相当缺乏。已有研究表明,深海海底并不是平静的海域,也存在着一定的变化周期,流速达 15cm/s 以上的海底风暴也时有发生。因此,需要对海底水动力学做进一步的研究,才能更好地对海底采矿的环境影响进行评价和预测。此外,如果尾矿在表层排放的话,对大洋上层水动力学的研究也同样重要。

5. 海底雾状层(BNL)的特征

进行深海采矿时,采矿机所导致的沉积物羽状流主要集中在近底边界层的范围内,而现有的一些观测资料也证明在海底还存在着一个准均匀的海底雾状层,但目前对于海底雾状层的特性所知甚少。为了正确评价深海采矿过程中形成的沉积物羽状流的环境影响问题,对此层进行系统的研究是十分必要的。

6. 底栖生物多样性研究

海底采矿对底栖生物群落的影响最为明显。深海底栖生物多样性的多样性与热带雨林相当,但深海生物繁衍的速率较低,因而生物量和丰度也较低。此外,深海大部分生物都有其一定的分布范围。据研究结果表明,在 CC 区一端的动物群落与相隔 2 500km 的另一端的动物

群落明显不同。为了防止因深海采矿导致的生物种类灭绝,必须对深海底栖生物多样性及分布特性等进行深入研究。

7. 底栖生物再迁入和底栖生物群落重建速率

扰动后底栖生物再迁入和底栖生物群落重建速率的研究,对于正确评价和预测采矿环境影响具有十分重要的意义。

8. 采矿的长期效应、各种复杂生态学过程的相互作用效应

各种复杂生态学过程的相互作用效应需要较长时间才能显示出来,因此需要进一步开展试验性采矿和商业采矿长期效应的监测和研究,以便充分地评估深海采矿对海洋生态系统的潜在影响。

在以上理论研究的基础上,树立环境友好的深海采矿系统的设计理念,将环境-资源-利用融为一体,人类在享用深海资源的同时带动科技创新,促进人与自然的协调发展。

(作者单位 中国大洋协会办公室)