

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2014.05163

# 深海锰结核开采对环境的影响研究进展

郑杰文<sup>1</sup>, 刘保华<sup>2</sup>, 刘晓磊<sup>3</sup>, 丁忠军<sup>2</sup>, 景春雷<sup>2</sup>

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 青岛 266061;  
2. 国家深海基地管理中心, 青岛 266061; 3. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 青岛 266003)

**摘要:** 海深海锰结核开采活动已提上日程, 而深海锰结核开采对环境产生何种影响, 影响范围与影响程度如何成为人们普遍关注的热点问题。对目前国际上在深海锰结核开采的环境影响方面取得的研究成果进行了凝练与总结, 从现代沉积环境、海洋地球化学环境、海洋生态环境与气候环境四方面进行了论述, 并提出了目前研究工作中尚未解决的问题及未来的研究方向、研究重点与难点。该工作对于深入研究与认识人类活动引起的海洋环境与气候变化具有重要意义, 对于促进与丰富国内深海锰结核开采的环境影响研究具有重要的指导意义。

**关键词:** 锰结核开采; 海底沉积物; 地球化学环境; 生态环境; 气候变化

中图分类号: P744

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2014)05-0163-07

海洋作为地球上的“蓝色聚宝盆”, 蕴藏资源丰富。多金属结核、富钴结壳、海底热液硫化物大量不均匀分布于太平洋、大西洋、印度洋三大洋, 水深从几千米到几百米不等<sup>[1]</sup>。陆地矿场资源的日益枯竭, 迫使人们把目光投向深远的海洋。在 20 世纪 50 年代末国际上就开始了多金属结核开采技术与装备的研究, 之后对多金属结核开采技术进行拓展, 研制对富钴结壳和热液硫化物的开采技术<sup>[2]</sup>。目前, 中国大洋协会已与国际海底管理局签订了《勘探合同》, 在东太平洋海盆 CC 区获得了 7.5 万平方千米拥有专属勘探权和优先开采权的多金属结核勘探合同区, 并选择了示范区进行了加密调查, 为我国深海多金属结核做准备<sup>[3]</sup>。

海底采矿采用开放式采矿方式, 使用遥控器操作水下采矿集矿机, 并采用液压泵系统将矿石运上水面。在海底矿产开采过程中, 海底浅层底床沉积物扰动、破坏, 海底沉积物将会发生侵蚀再悬浮、输运、沉降、再堆积固结过程, 在此过程中吸附于其上的物质成分, 如, 重金属, 无机营养盐, 也将发生一系列的变化过程, 造成底部水体污染, 并间接影响海底动物群结构, 并且可能通过改变海洋初级生产力而影响气候变化<sup>[4-8]</sup>。

基于上述对深海采矿过程导致的海底沉积物发

生的一系列动态变化过程, 及其诱发的一系列海洋生态环境问题, 以及可能对地球气候变迁产生影响的初步研究结果, 认为深海采矿带来的次生环境效应是多方面、多尺度, 不容忽视的。对这一问题的研究将涉及多学科领域的方法、技术与理论, 是一项具有显著学科交叉特色的、前瞻性的研究课题。

对于深海锰结核开采产生的环境效应问题, 在 20 世纪七八十年代已有学者进行了初步的研究分析<sup>[9-13]</sup>; 九十年代, 由地方政府与各大学成员组成的德国深海环境保护研究协会(TUSCH), 开展了 ATESEPP 项目, 印度国家海洋协会海洋发展部资助开展了 INDEX 研究, 分别在太平洋东南部秘鲁海盆、中印度洋盆地进行了锰结核开采引起的海洋物理、化学、生物环境变化的初步调查研究<sup>[14-19]</sup>; 目前, 中国在此方面开展的研究工作还非常少。

本文对目前国际上围绕深海锰结核开采过程中及开采后产生的环境影响及相关研究进行了归纳总结, 从锰结核开采对海洋现代沉积环境、海洋地球化学环境、海洋生态环境以及气候环境四方面产生的影响进行了论述, 并指出了未来研究方向与研究重点, 期望能够对未来深海锰结核开采的环境影响研究工作提供借鉴指导。

## 1 锰结核开采对海洋现代沉积环境的影响

锰结核大量分布于海底上部强度较低, 含水量较高的半流体沉积物中。在秘鲁海盆的现场调查结果表明, 半流体厚度在 8~15 cm 范围内变化, 剪切

基金项目: 国家海洋局基金(GY02-2012T04); 国家海洋局第一海洋研究所基金(2013302)

作者简介: 郑杰文(1984—), 女, 博士, 主要从事海洋地质环境与海底沉积声学研究。E-mail: jiewenzheng@126.com

通讯作者: 刘保华, bhlou@fio.org.cn

收稿日期: 2013-08-25; 改回日期: 2013-11-15。文凤英编辑

强度为 0.2~1.0 kPa,含水量高达 70%~83%,此沉积物层内,锰结核发育丰富,其下部是固结程度与强度高(剪切强度 3~5 kPa)的沉积物,锰结核含量非常少(见图 1)<sup>[5]</sup>。若结核采集器优化设计,能够控制好其采集过程中施加的外力大小与挖掘深度,则仅能够导致半流体层沉积物发生悬浮,下部固结程度好的沉积物悬浮量将会很低,理论上可以忽略。

但是,锰结核开采导致的底床沉积物发生不同程度的再悬浮输运及沉降再分布过程,对现代海洋沉积环境的影响仍是存在,且需要进一步深入研究。根据目前已有数据的对比分析推测,锰结核开采活动对底床的扰动,将导致海水中出现以细颗粒为主的泥沙云团,大约在超过 7 倍结核采集机器长度的距离外,泥沙云团消失<sup>[4,14]</sup>。

Becker 等(2001)采用螺旋桨作用产生喷射水压对深海底采集的原状样品与扰动样品开展甲板试验与室内试验模拟研究发现,水头喷射压力仅能够使 16% 的沉积物发生悬浮,其余部分被扰动产生较小水平位移,未悬浮至水体中;再悬浮沉积物沉降与絮凝体形成过程明显受温度与悬浮泥沙浓度控制,高浓度与高温加速絮凝体絮凝,从而加速悬浮颗粒的沉降过程;沉降到底床的泥沙至少需 20 年的固结时间,才能达到原状沉积物的初始容重<sup>[14]</sup>。Sharma 等(2001)采用深海底扰动器—深海沉积物

再悬浮系统(Deep-Sea Sediment Resuspension System, DSSRS)(图 2)在中印度洋海盆对悬浮沉积物的运移趋势及海洋生态环境影响的研究发现,底床地貌形态发生显著变化(图 3),距离扰动区越远,沉积物扰动程度越低,150 m 以外扰动程度很低;附近区输运通量也发生不同程度的变化,距离超过 100 m 后变化差异则变小;而且悬浮沉积物中有机物含量增加<sup>[17]</sup>。

Rolinski 等(2001)采用汉堡大尺度地转海洋(Hamburg large-scale geostrophic ocean model)-拉格朗日输运(Lagrangian transport model)耦合模型的数值模拟结果表明,对于锰结核开采产生的再悬浮沉积物,粒径较大的沉积物输运距离在 100 km 范围内,其中 99% 在 1 个月内沉积完成;粒径较小的扩散距离则非常远,其中 90% 的泥沙,在水深 500~3 000 m 条件下,在 3~10 年内完成沉积过程<sup>[15]</sup>。Ozturgut 等(1984)采用激光仪对锰结核尾矿的沉降过程开展的室内模拟试验研究结果表明,海洋密度跃层能够抑制尾矿沉降过程的速率,从而延长了其在海水中存留扩散的时间<sup>[11]</sup>。后期开展的室内试验研究也表明,悬浮沉积物的沉降速率与其有效半径及团聚特性密切相关,在泥沙云团中将出现 2~3 层,每层悬浮沉积物在不同的沉积速率下发生沉降过程<sup>[14, 20]</sup>。

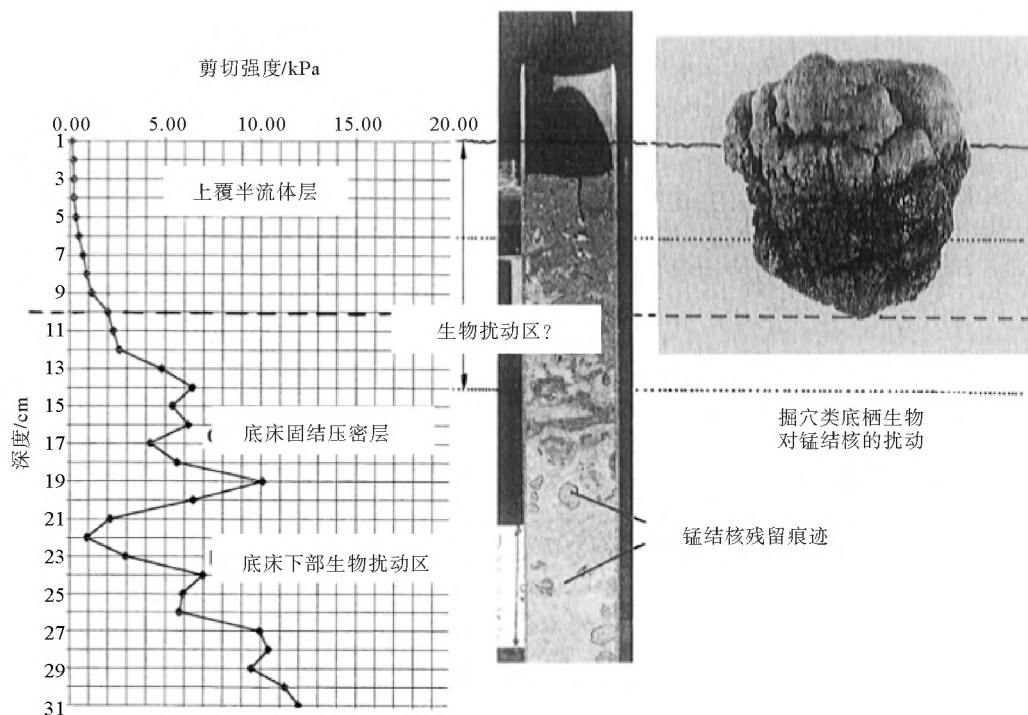


图 1 深海锰结核分布特征(据文献[4])

Fig. 1 Distribution of manganese nodule in deep-sea (after reference [4])

目前,国外前期开展的研究已经初步表明,深海沉积物在锰结核开采活动中能够发生一系列动态变化过程,包括沉积物侵蚀再悬浮、输运、沉降、堆积、再固结。沉积物发生的这一周而复始的动力响应过程,至今仍是现代沉积动力过程研究的热点与难点<sup>[21]</sup>。深海锰结核开采诱发的沉积物发生的这一系列变化过程持续时间可达几个月、几年、十几年,甚至可能上百年的时间尺度<sup>[14, 18, 22]</sup>。并且,由于地域、沉积物特征、海洋动力环境、采矿装备等条件存在差异,海底沉积物的动态变化也呈现出显著的不同<sup>[19]</sup>。目前,对于此项内容的研究尚停留在局部区域的初步调查与室内外模型试验数据的初步分析层面,数据资料很少,理论支撑薄弱,测试内容单一,测试手段局限,从而制约了对研究问题的深入认识。由于涉及多学科研究问题的交叉,及问题自身的复杂与研究难度,至今,对于在深海动力环境下,深海采矿诱发的沉积物动力响应发生过程、影响因素、影响程度、影响范围、动力发生机制仍缺乏清晰准确的认识,需要进一步开展研究。

## 2 锰结核开采对海洋地球化学环境的影响

锰结核中含有10%~28%的Mn,4%~16%的

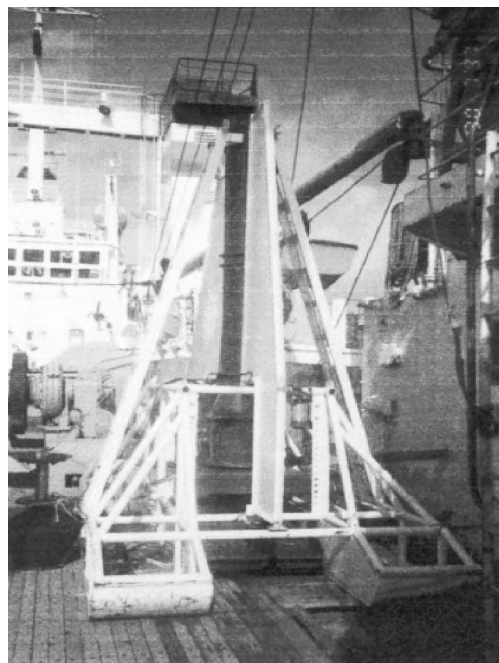


图 2 深海沉积物再悬浮系统(据文献[17])

Fig. 2 Deep-Sea Sediment Resuspension System (reference [17])

Fe, 0.3%~1.6%的Ni, 0.02%~0.4%的Co, 0.1%~1.8%的Cu,在海底环境中沉积物孔隙水与上部水体保持离子交换平衡,而深海底锰结核的开采将破坏这种动态平衡,改变海底氧化还原边界的位置,从而对已有稳定的海洋地球化学环境产生破坏<sup>[23-24]</sup>。

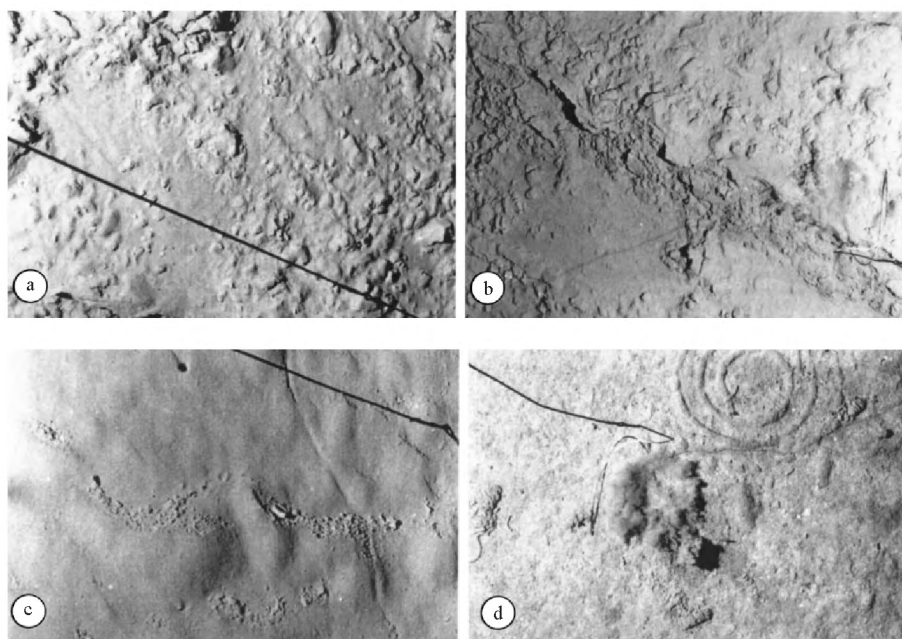


图 3 海底扰动特征照片

(a. 未机械扰动前底床生物扰动特征显著;b. 扰动区生物活动特征消失;c. 沉积物再堆积区表层特征;d. 细粒沉积物盖层产生平滑微地貌)(据文献[17])

Fig. 3 Disturbance features from seabed photos

(a. disturber tracks, b. piles of sediment, c. resedimentation, d. undisturbed seafloor)(reference [17])

发育有丰富的锰结核与底栖生物的底床上覆半流体层内沉积物,处于一个动态平衡的氧化还原环境中<sup>[17]</sup>。深海采矿改变了底层化学场,从而改变了不同类化学元素、重金属的重分布,并因沉积物深度不同而产生分布量级差异<sup>[18]</sup>。

锰结核开采过程中,人为扰动使底床沉积物再悬浮于底层水体,在洋流作用下输运、沉降,重新分布;在此过程中,底床沉积物中的溶解相金属物质、营养盐、Mn/Fe 氢氧化物、有机物等也被释放于地层水体,从而改变了沉积物—地层水体边界层内的物理化学环境,进而影响边界层内的微生物活动,从而进一步影响悬浮于水体的颗粒物质,逐渐形成新的稳定的海底沉积物—底层水体边界层(图 4 所示)<sup>[25]</sup>。

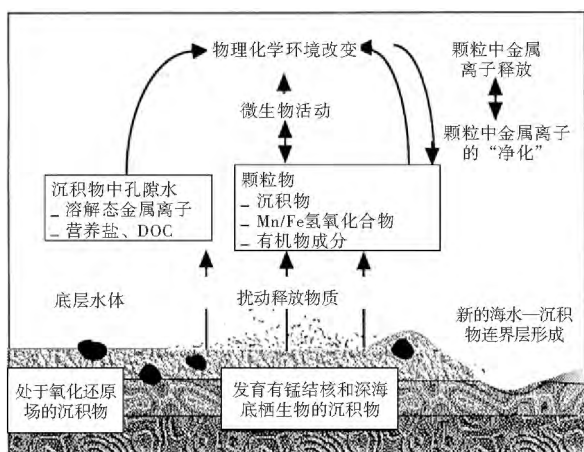


图 4 深海/底层水体动态系统与锰结核开采过程中底床沉积物再悬浮于水体中时可能发生的地球化学系统响应(据文献<sup>[25]</sup>)

Fig. 4 Deep-sea/bottom-water system and possible reactions of the geochemical system when surface sediment is resuspended into the bottom-water layer (reference <sup>[25]</sup>)

前人围绕锰结核开采后海洋地球化学场的变化过程及恢复周期,取得了一些研究成果。Koschinsky 等(2001)通过对未扰动沉积物表层厘米厚度范围进行搅拌,研究了溶解于其孔隙水中的重金属与营养盐的释放过程,获得了扰动过程中阳离子活性金属与金属阴离子不同的释放过程<sup>[25]</sup>。Thiel 等(2001)的研究结果表明,锰结核开采导致近底层海水金属浓度的增加,在氧化条件下,短时间内对生物影响不明显;在低值氧区,将会增加生物利用金属浓度,改变其物种形态;并指出富含锰的沉积物深度、氧化层、扰动深度成为影响海床重金属动态变化的关键因素<sup>[18]</sup>。Fritsche 等(2001)试验研究表明,氧

化性强的表层沉积物再悬浮将伴随着溶解的重金属的扩散通量的增加,在扰动后的最初几周,扩散通量约几个  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ ,锰沉降 100 年才能恢复至最初状态,其他重金属通量则相对较低<sup>[26]</sup>。数学模型与现场数据已有研究表明,深海底上表层浮泥层是很好的氧气输入底床的通道与生物活化层,采矿导致此表层的丧失,将导致海底上百年形成的氧化还原泵的关闭<sup>[22, 27]</sup>。

目前,对于深海锰结核开采过程中不同金属离子、营养盐等物质在不同氧化还原环境下的变化过程及其对底栖生物的影响过程与机制,以及海底边界层氧化还原环境的破坏程度评价及再恢复周期需要多长时间,研究方面的数据仍非常少,需要进一步研究才能够为深海锰结核开采提供科学指导。

### 3 锰结核开采对海洋生态环境的影响

锰结核开采过程中,海底表层沉积物被吸走,同时寄居于其上的底栖生物也被带走,或者被采矿机碾压致死,降低了底栖生物多样性,改变了底栖生物群落结构;而且,集矿机工作导致的再悬浮沉积物运移与输运改变了海水环境,从而也将在一定程度上影响滤食性动物的生存环境与海洋植物的光合作用;另一方面,锰结核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>[28]</sup>。

目前,单方面研究深海锰结核开采对底栖生物影响的研究已经展开,主要采用物理模拟试验手段研究物理扰动对底栖生物群落结构与数量的影响程度与修复周期。

Borowski 和 Thiel(1998)在太平洋东南部开展的大尺度扰动试验,研究了物理扰动对深海大型生物的影响,研究结果表明扰动区生物密度在扰动后均发生显著降低,不同种群降低程度存在明显差异,扰动结束后 3 年,生物密度仍未恢复至扰动前状态<sup>[29]</sup>。扰动结束 7 年后,海底上表层半流体层恢复至近于初始状态,底栖生物活动差异很小,推测生物密度的恢复过程受到上部半流体层的形成过程控制<sup>[30]</sup>。Miljutin 等(2011)在东太平洋开展的调查结果表明,5 000 m 深度海底被扰动后,分布于扰动区的毛线虫 26 年后仍未恢复至初始状态(图 5),其研究工作也表明扰动程度和底床特征对毛线虫的恢复速率具有显著的控制作用<sup>[31]</sup>。Rodrigues 等(2001)在中印度洋盆地进行物理扰动试验,对其前后海底大型生物群落的研究结果表明,海底物理扰动将导致近乎一半数量的大型生物减少,其不同子类数量

降低程度受其对海水浊度增加与沉积速率的抵抗能力大小影响存在差异<sup>[32]</sup>。Ingole 等(2001)在印度洋盆地 5 300~5 350 m 深度开展的扰动试验研究结果显示,底床扰动后表层 2 cm 范围内一半以上生物减少,5~10 cm 深度范围生物量则显著增加(图 6),并指出底层扰动物的移动碾压是海底表层沉积物中生物量减少的重要原因<sup>[33]</sup>。

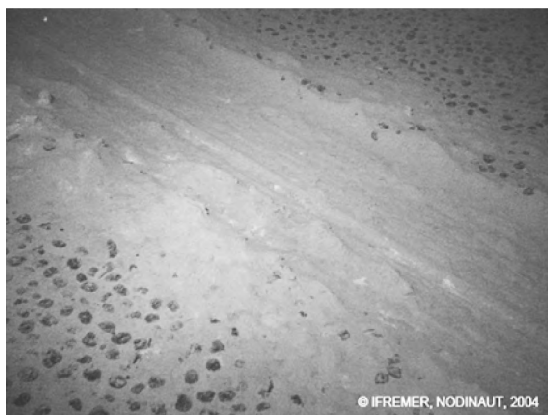


图 5 26 年后保存的扰动记录(据文献[31])

Fig. 5 Photograph of 26-year-old track after the disturbance (reference [31])

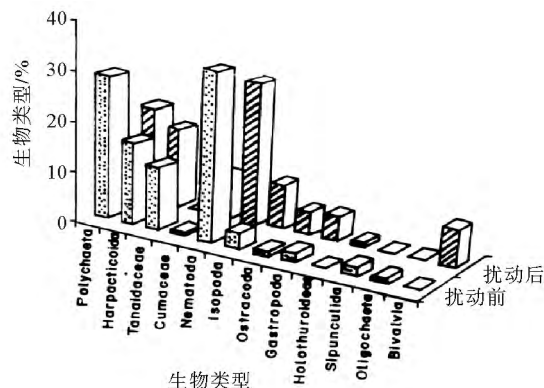


图 6 深海扰动前后底层大型生物的数量变化(据文献[33])

Fig. 6 Abundance of major macrofaunal groups during pre-and post-disturbance study (reference [33])

海洋生态环境是海洋生物生存和发展的基本条件,生态环境的任何改变都有可能导致生态系统和生物资源的变化,从而影响海洋生物基因库。任何海域某一要素的变化,都有可能对邻近海域或者其他要素产生直接或者间接的影响和作用。锰结核开采对海洋生态环境的影响范围与程度,以及改变后的海洋生态要素的动态变化过程及其相互制约关系,至今仍不清楚,需要进一步研究。

## 4 锰结核开采可能产生的其他影响

连续观测发现深海表层海水藻类的勃发,几天之后就引起深海底栖群落的响应,由此可见,深海底栖生物与浮游生物,纵然相隔几千米,依然存在着耦合关系<sup>[7]</sup>。由此可以推测,在一定程度上,深海锰结核的开采可能会通过影响海海底栖生物进而影响上层浮游动植物群落。

Smith 等(2009)在研究东太平洋近底一种小个体海参变化时发现,在 1997—1998 厄尔尼诺年的时候,此物种急剧增多,之后恢复原状,推测深海底栖生物群具有影响气候的能力<sup>[7,34]</sup>。进而可推测,深海锰结核开采将可能通过影响深海底栖生物结构与密度而对气候产生间接影响。

Jickells 等(2005)的研究中发现无机营养物质能影响海洋初级生产力,改变海洋的储碳能力和碳输出,以及海气间气体和气溶胶的通量,从而影响辐射、云特征与气候变化<sup>[35]</sup>。由此可以推测深海锰结核开采释放的无机营养物质对海洋初级生产力的影响同样可能影响大气环境与全球气候的变化。

## 5 结论与展望

(1)目前已有研究成果表明,深海锰结核开采对环境的影响范围可能不止涉及深浅海,也有可能涉及陆地与大气环境;影响时间也可能是小时、天、月、年,甚至是世纪为单位的不同时间尺度;影响对象涉及水体、气体、生物等多种类型。深海锰结核开采的环境效应是一种具有不同时空尺度、多要素链形关联的动态变化过程。对深海锰结核开采的环境效应问题的研究需要地质学、生物学、生态学、化学、大气科学等多学科的交叉,现场观测、室内外试验、数值模拟、计算分析多研究手段的联用,以及大量数据影像资料的支撑与分析。

(2)深海锰结核开采活动势在必行,而如何在保障获得海洋矿产资源的同时,实现对地球环境的影响控制在自修复能力范围内,是目前亟待研究的一个重要课题。因此,通过多学科交叉理论、方法、技术,系统研究深海多金属结核开采带来的环境影响,揭示深海多金属结核开采活动对海洋现代沉积环境、海洋地球化学环境、海洋生态环境及其他环境因素产生何种影响,量化其产生的影响程度与范围,确定其产生影响的关键因素、时间周期与触发机制,并对多金属结核开采产生的环境影响进行评价预测,

是今后一段时间内的重要研究目标。

(3)在深海锰结核开采活动的环境效应研究方面拟取得的研究成果对深入理解深海多金属结核开采产生的环境效应过程,丰富环境演变过程中人类活动扮演角色的认知,推动海洋环境生态、海洋地球化学、海洋现代沉积地质环境研究进入新的阶段,促进海洋科学发展,均具有重要科学意义;另一方面,能够为深海矿产资源探测开发技术的创新、海洋生态环境保护方法与技术的确定与研发,以及环境保护法律法规的制定提供科学指导。

### 参考文献 (References)

- [1] 朱继懋. 21 世纪的海洋资源开发[J]. 科学前沿, 2013, 53(2): 10-15. [ZHU Jimao. Development of marine resources in the 21<sup>st</sup> century[J]. Science Advances, 2013, 53(2): 10-15.]
- [2] 阳宁, 王英杰. 海底矿产资源开采技术研究动态与前景分析[J]. 采矿设备, 2012(专题): 54-58. [YANG Ning, WANG Yingjie. Review on the development of mining technology of marine resources[J]. Mining Equipment, 2012 (Special Topic): 54-58.]
- [3] 梁东红, 何高文, 朱克超. 中国多金属结核西示范区的结核小尺度分布特征[J]. 海洋学报, 2014, 36(4): 33-39. [LIANG Donghong, HE Gaowen, ZHU Kechao. The small-scale distributing characteristics of the polymetallic nodules in the West China Example Area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(4): 33-39.]
- [4] Oebius H U, Becker H J, Rolinski S, et al. Parametrization and evaluation of marine environmental impacts produced by deep-sea manganese nodule mining[J]. Deep-Sea Research Part II, 2001, 48: 3453-3467.
- [5] Grupe B, Becker H J, Oebius H U. Geotechnical and sedimentological investigations of deep-sea sediments from a manganese nodule field of the Peru Basin[J]. Deep-Sea Research Part II, 2001, 48: 3593-3608.
- [6] Smith K L J, Ruhl H A, Bett B J. Climate, carbon cycling, and deep-ocean ecosystems[C]// Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 2009, 106: 19211-19218.
- [7] 汪品先. 从海洋内部研究海洋[J]. 地球科学进展, 2009, 28(5): 517-520. [WANG Pinxian. Oceanography from inside the ocean[J]. Advances in Earth Science, 2009, 28(5): 517-520.]
- [8] Collins P C, Croot P, Carlsson J, et al. A primer for the environmental impact assessment of mining at seafloor massive sulfide deposits[J]. Marine Policy, 2013, 42: 198-209.
- [9] Han K N, Fuerstenau D W. Acid leaching of ocean manganese nodules at elevated temperatures[J]. International Journal of Mineral Processing, 1975, 2(2): 163-171.
- [10] Amos A F, Roels O A, Garside C, et al. Marine Manganese Deposits[J]. Elsevier Oceanography Series, 1977, 15: 391-437.
- [11] Ozturgut E, Lavelle J W, Burns R E. Marine environmental pollution[J]. Elsevier Oceanography Series, 1981, 27(part B): 437-474.
- [12] Lavelle J W, Ozturgut E, Baker E T. Discharge and surface plume measurement during manganese nodule mining tests in the north equatorial pacific[J]. Marine Environmental Research, 1982, 7(1): 51-70.
- [13] Clark J P, Neutra M R. Mining manganese nodules: Potential economic and environmental effect[J]. Resources Policy, 1983, 9(2): 99-109.
- [14] Becker H J, Grupe B, Oebius H U, et al. The behaviour of deep-sea sediments under the impact of nodule mining processes[J]. Deep-Sea Research II, 2001, 48: 3609-3627.
- [15] Rolinski S, Segschneider J, Sündermann J. Long-term propagation of tailings from deep-sea mining under variable conditions by means of numerical simulations [J]. Deep-Sea Research II, 2001, 48: 3469-3485.
- [16] Jankowski J A, Zielke W. The mesoscale sediment transport due to technical activities in the deep sea[J]. Deep-Sea Research Part II, 2001, 48: 3487-3521.
- [17] Sharma R, Nath B N, Parthiban G, et al. Sediment redistribution during simulated benthic disturbance and its implications on deep seabed mining[J]. Deep-Sea Research II, 2001, 48: 3363-3380.
- [18] 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 II, 2001, 48: 3433-3452.
- [19] Marchig V, von Stackelberg U, Hufnagel H, et al. Compositional changes of surface sediments and variability of manganese nodules in the Peru Basin[J]. Deep-Sea Research II, 2001, 48: 3523-3547.
- [20] Liu F, Oebius H U, Grupe B, et al. Basic research on characteristics of deep-sea sediment clouds produced by marine mining[C]// International Symposium on Environmental Research for Deep-sea Mining. Tokyo, Japan, 1997: 20-21.
- [21] 贾永刚, 单红仙, 杨秀娟, 等. 黄河口沉积物动力学与地质灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-17. [JIA Yonggang, SHAN Hongxian, YANG Xiujuan, et al. Sediment Dynamics and Geologic Hazards in the Estuary of Yellow River, China [M]. Beijing: Science Press, 2011: 1-17.]
- [22] Koschinsky A, Winkler A, Fritsche U. Importance of different types of marine particles for the scavenging of heavy metals in the deep-sea[J]. Applied Geochemistry, 2003, 18: 693-710.
- [23] Stummeyer J, Marchig V. Mobility of metals over the redox boundary in Peru Basin sediments[J]. Deep-Sea Research II, 2001, 48: 3549-3567.
- [24] Senanayake G. Acid leaching of metals from deep-sea manganese nodules-A critical review of fundamentals and applications[J]. Minerals Engineering, 2011, 24: 1379-1396.
- [25] Koschinsky A, Gaye-Haake B, Maue G, et al. Experiments on the influence of disturbances on the biogeochemistry of the

- deep-sea environment[J]. Deep-Sea Research II, 2001, 48: 3629-3652.
- [26] Fritsche U, Koschinsky A, Winkler A. The different diffusive transport behaviours of some metals in layers of Peru Basin surface sediment[J]. Deep-Sea Research II, 2001, 48: 3401-3410.
- [27] König I, Haeckel M, Lougear A, et al. A geochemical model of the Peru Basin Deep-sea floor-and the response of the system to technical impacts[J]. Deep-Sea Research II, 2001, 48: 3737-3756.
- [28] 李凤岐, 高会旺. 环境海洋学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 125-126. [LI Fengqi, GAO Huiwang. Environmental Oceanography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 125-126. ]
- [29] Borowski C, Thiel H. Deep-sea macrofaunal impacts of a large-scale physical disturbance experiment in the Southeast Pacific[J]. Deep-Sea Research II, 1998, 45: 55-81.
- [30] Borowski C. Physically disturbed deep-sea macrofauna in the Peru Basin, southeast Pacific, revisited 7 years after the experimental impact [J]. Deep-Sea Research II, 2001, 48: 3809-3839.
- [31] Miljutin D M, Miljutina M A, Arbizu P M, et al. Deep-sea nematode assemblage has not recovered 26 years after experimental mining of polymetallic nodules (Clarion-Clipperton Fracture Zone, Tropical Eastern Pacific)[J]. Deep-Sea Research I, 2001, 58: 885-897.
- [32] Rodrigues N, Sharma R, Nath B N. Impact of benthic disturbance on megafauna in Central Indian Basin[J]. Deep-Sea Research II, 2001, 48: 3411-3426.
- [32] Ingole B S, Ansari Z A, Rathod V, et al. Response of deep-sea macrobenthos to a small-scale environmental disturbance [J]. Deep-Sea Research II, 2001, 48: 3401-3410.
- [33] Smith K L J, Ruhl H A, Bett B J. Climate, carbon cycling, and deep-ocean ecosystems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 2009, 106: 19211-19218.
- [34] Jickells T D, An Z S, Andersen K K, et al. Global Iron Connections Between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate[J]. Science, 2005, 308(67):67-63.

## REVIEW ON ENVIRONMENTAL IMPACT OF DEEP-SEA MANGANESE NODULE MINING

ZHENG Jiewen<sup>1</sup>, LIU Baohua<sup>2</sup>, LIU Xiaolei<sup>3</sup>, DING Zhongjun<sup>2</sup>, JING Chunlei<sup>2</sup>

(1. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao Shandong Province 266061;

2. National Deep Sea Center, Qingdao Shandong Province 266061;

3. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong Province 266003)

**Abstract:** Manganese nodule mining in deep sea has been on their agendas, and it has been the hot point that how manganese nodule mining affect the environment with the influence range and degree. In this paper, we systematically analyzed and discussed the present research progress concerning the influence of manganese nodule mining on modern sedimentary environment, marine geochemical environment, marine ecological environment, and climate environment, and put forward the unsolved problems presently and the research direction and emphasis and difficulty. This work is of great value of further studying and understanding the impact of human activities on marine environment and climate, and instructive to promoting and enriching the study on environmental impact of deep-sea manganese nodule mining.

**Key words:** manganese nodule mining; geochemical environment; ecological environment; climate change