

深海采矿的环境影响与技术展望

张农,冯晓巍*,庞华东,张朝阳

(中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:近年来,国际范围内开发与利用深海资源的技术迅猛发展,与此同时,深海采矿技术的环境影响也引起了国际海洋组织的高度关注.本文以当前国际主流的深海采矿技术-液压汲取式开采技术作为出发点,介绍其主要技术组成及工作机理,并对该技术的发展现状进行阐述.在环境生态系统影响方面,分别从生物及其所生活的环境2个方面系统地分析了液压汲取式开采技术所造成的固体悬浮颗粒对生态系统的影响,并对深海采矿的模拟扰动实验及作业装置技术进行展望.本文对于我国深海采矿技术的环境影响研究具有一定参考作用.

关键词:深海采矿;液压汲取式开采系统;海洋环境;固体悬浮颗粒;模拟扰动实验

中图分类号:TD807 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)02-0022-07

Environmental Impacts and Technology Outlook of Deep Ocean Mining

Zhang Nong, Feng Xiaowei, Pang Huadong, Zhang Chaoyang

(Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China,

China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In recent years, exploitation and utilization of deep ocean resources has been developing rapidly in international scope, meanwhile the environmental impacts of deep ocean mining have also raised concern of International Maritime Organization. In this study, an international mainstream deep ocean mining named hydraulic suction mining technology is chosen as starting point to introduce its primary technology components, and the working mechanism and the current situations of development is also discussed. With respect to the environmental impacts of this mining technology, the influence of suspended solid particle caused by mining on ecosystem is respectively analyzed from the aspects of marine organism and habitat. In addition, an outlook to the simulated disturbance experiment and relevant operation equipment as well as technology of deep ocean mining is proposed. Results of this study is able to provide certain reference effects for researches regarding environmental impacts of deep ocean mining in China.

Keywords: deep ocean mining; hydraulic suction mining system; ocean environment; suspended solid particle; simulated disturbance experiment

世界上剧烈增长的人口以及迅速加快的工业化进程使得人们对于金属的需求急剧加大,研究表明,未来20年全球矿产需求仍将呈快速增长趋势,粗钢需求量增长54.4%,铜需求量增长36.8%,铝需求量增长78.9%^[1],未来的陆地资源将有很大的可能在满足全球生产生活的需求上存在瓶颈,因此,深海资源的开采开发在国际上引起了一定的关注.

海洋的面积覆盖了地球表面的70%,其中75%深于3 000 m^[2],大量丰富的多金属资源赋存在深海底

收稿日期:2019-04-12

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51804296);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2017CXNL01)

*通信作者, E-mail: fengxiaowei@cumt.edu.cn

部,深海采矿的研究起始于20世纪50年代末,日本、法国、美国等国家相继提出连续绳斗法采矿系统、穿梭艇式采矿系统、集矿机与管道提升相结合的采矿系统^[3,4],使得深海矿产资源的技术开发的可行性不断提高。

从20世纪80年代以来,我国就开展了对于国外深海采矿技术的有关资料以及专利文献的收集,在“八五期间”,建成集矿实验室,进行了水力式、机械式、水力机械复合式3种集矿机总体方案的研究和作业参数的模拟以及采集、输送、行驶结构的机理分析^[5,6],成功研制了具有自主知识产权的集矿模型机,但在商业开采、环境研究方面还存在很多不足。

海底的金属资源主要包含海底块状硫化物、富钴铁锰结核以及多金属锰结核,它们赋存在深海底部,赋存含量最高的海洋为太平洋,其次是大西洋和印度洋^[7,8],图1为3种主要多金属资源在海底的分布图^[9]。

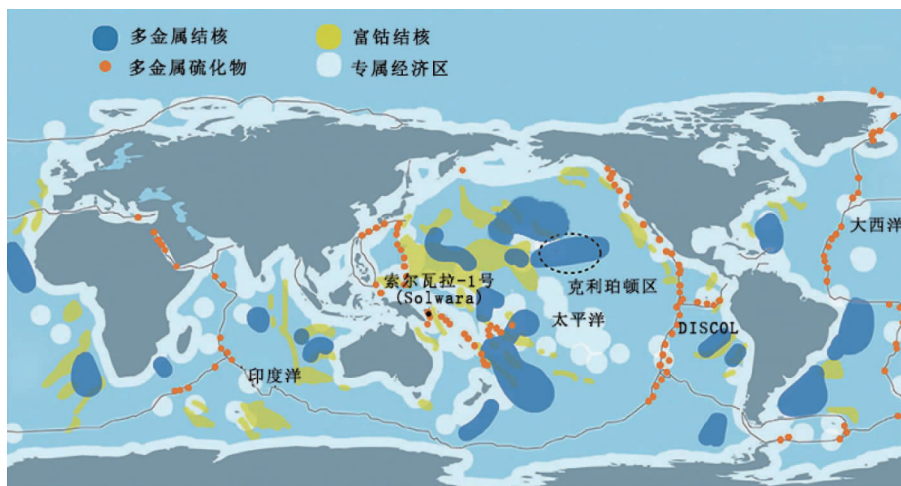


图1 多金属资源分布图

深海除了丰富的多金属资源外还有赋存在海底的沉积物,尤其在沉积率缓慢的海洋区域大量赋存,它们由铁和锰的水合金属氧化物组成,形成于结核周围^[10],因此,当深海采矿设备作业时例如采矿头的采集以及采矿车履带的滚动等,都会造成沉积物的重分布,尽管深海生态系统有一定的抵抗能力,但深海开采对海底沉积物的扰动作用仍然会对海底的微生物群落密度及多样性造成持续的危害^[11]。

1 当前主流深海采矿技术

在人们探索海洋、开发海洋的过程中,深海采矿技术的发展已经趋向成熟.国际上2种主流采矿开采系统分别为连续的线性桶装开采系统(CLB)以及液压汲取开采系统^[12],但经过不断海试表明液压汲取开采系统的可操作性、环境友好度、应用前景相较于线性桶装开采系统更优越.图2是美国海洋管理公司OMI(Ocean Management Inc)的液压汲取式多金属结核开采技术系统示意图^[13]。

该系统被称为液压汲取式开采系统,其子系统主要包括:(1)以采矿船为核心的海底采集装置与提升装置提供动力的水面支持系统;(2)以水力为动力通过泵和管道将多金属固体矿产从海底输送至海面的矿产提升系统;(3)在海底对多金属结核进行采集作业的矿产采集装置。

1978年,美国海洋公司(OMI公司)率先研发了集矿机与水力管道相结合的提升采矿系统并进行采矿海试,成功将800 t锰结核从5200 m的深海输送至采矿船,验证了该系统在海底多金属结核开采作业中的可行性.随后在西方发达国家探索海洋的历程中,该系统被公认为最具有工业应用前景的采矿系统^[13]。其后日本、印度、韩国、中国相继使用液压汲取开采系统对固体矿产的采集进行海试,并取得较为理想的成果^[5,14-16]。

深海采矿商业公司Nautilus Minerals(鸚鵡螺矿业)近年来所提出的开采方案,总体上仍在沿用液体汲取式开采系统,利用辅助切割机和采集装置对海底固体矿产进行联合作业,辅助切割机处理崎岖的地形,使该系统灵活性更强.并且在生产支持船(PSV)对泥浆排水并输送至旁边的运输船,最后将过滤的海水通

过管道再次输送至海底,以最大程度地减小对环境的影响,图3是 Nautilus Minerals 公司多金属资源的采矿系统示意图^[17].在2015年第3季度,该公司重新开始组装海底泥浆提升泵(SSLP),并于2016年2月进行了工厂验收测试,其中生产支持船(PSV)在2018年3月前就完成了75%^[17].

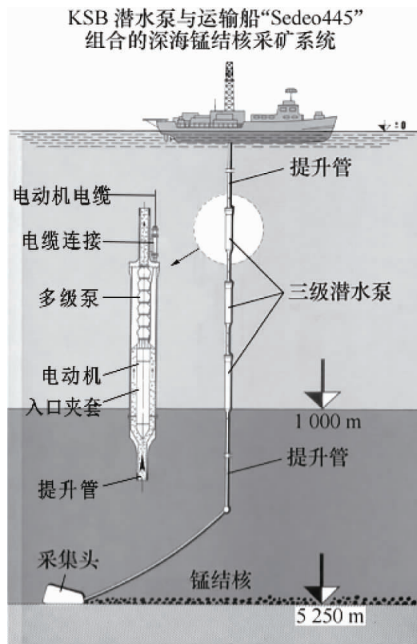


图2 液压汲取式开采系统

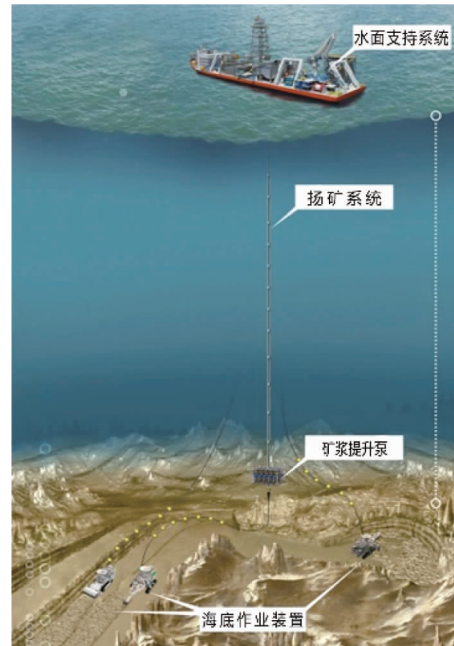


图3 鹦鹉螺公司采矿系统

虽然我国在深海采矿中的多个技术领域取得了较大突破,但总体技术水平与国外先进技术相比还存在一定的差距.构建面向商业体系的采矿技术、精确控制和高效作业的集矿技术、高效稳定的采矿支持系统以及合理有效的深海采矿环境影响评价体系等关键技术亟待攻关.

2 深海采矿系统对环境的影响

初步分析表明,大多数微生物生存在海底沉积物上层2 cm^[18],因此,在深海作业的过程中不可避免地会对海底生态造成影响.同时,通过对液压汲取式系统的不同程度的海试表明,每通过该采矿系统采集1 t的矿产资源,将会造成2.5~5.5 t的沉淀重新分布^[19],大量重分布的沉淀漂流导致的固体悬浮颗粒对生态系统的破坏以及系统装置对海水理化性质的改变都将长远影响深海系统的平衡.

考虑到深海采矿所处环境恶劣性、深海底的地形地貌复杂性以及海底水流方向的不确定性,迄今为止,人们对于深海采矿对环境的具体影响还尚未能具体得知,但是全球范围内越来越多的研究者已经着手关注深海采矿的环境影响并开展了一系列研究.

2.1 国际范围内海洋采矿下的海洋环境影响研究

在国际对深海采矿环境影响的不断海试中,其中影响较大的是INDEX对于印度洋流域进行海试,利用液压扰动装置在划定范围的长条形扰动地带(长度88.3 km),对深海的沉积物进行扰动,导致约6 000 m²的海底沉淀物重新分布^[20],形成的固体悬浮颗粒对于在长条形模拟地带及周围的海底底栖生物、微生物等多样性造成危害性影响^[21,22].

NOAA-BIE, JET, IMO-BIE 研究组织都采用和INDEX相同的模拟扰动装置在长条形的海试地带进行测试,取得了类似的结论.与之不同的是1989年DISCOL采用犁耙式扰动装置对深海沉淀物进行扰动^[23],并在扰动后的6个月、3年、7年后对海底沉淀物重新分布产生的固体悬浮颗粒及海底生物的恢复状况进行勘测,实验结果表明尽管海底生物经历长时间得以恢复,但其组分及理化性质却与之前不同^[24].漫长的恢复时间表明海底生态平衡的构建是一个极其缓慢的过程,数据表1是国际主流研究所得出的深海采矿影响数据.

上述研究表明,深海采矿所引起的固体悬浮颗粒影响海洋生态系统,而海洋生态系统主要分为生物及生物所处的环境.因此,固体悬浮颗粒对生态系统的影响可划分为(1)固体悬浮颗粒对生物所处环境的影

响,具体表现为作业装置及沉淀重分布对海水温度、PH、含氧量等理化性质的改变;(2)固体悬浮颗粒对生物的影响,具体表现为装置造成的漂流颗粒对海底生物的影响.图 4 表示液压汲取式采矿技术的对环境造成的影响.

表 1 液压汲取式采矿系统环境影响

研究机构名称	面积/km ²	扰动次数	持续时间/min	沉积物干重/t	沉积物排放量/m ³
a. DISCOL	10.80	78	20 160	NE	NE
b. NOAA-BIE	0.45	49	5 290	1 332	6 951
c. JET	0.32	19	1 227	355	2 495
d. TOM-BIE	0.50	14	1 130	360	2 693
e. IN DEX	0.60	26	2 434	580	6 015

数据来源:

a :Foell E J,Thiel H,Schriever G.[25]

b :Trueblood D D.[26]

c :Fukushima T.[27]

d :Tkatchenko G, Radziejewska T, et al.[28]

e :Nath B N, Parthiban G, Sankar S J.[29]

NE:无法估计(Not Estimated)

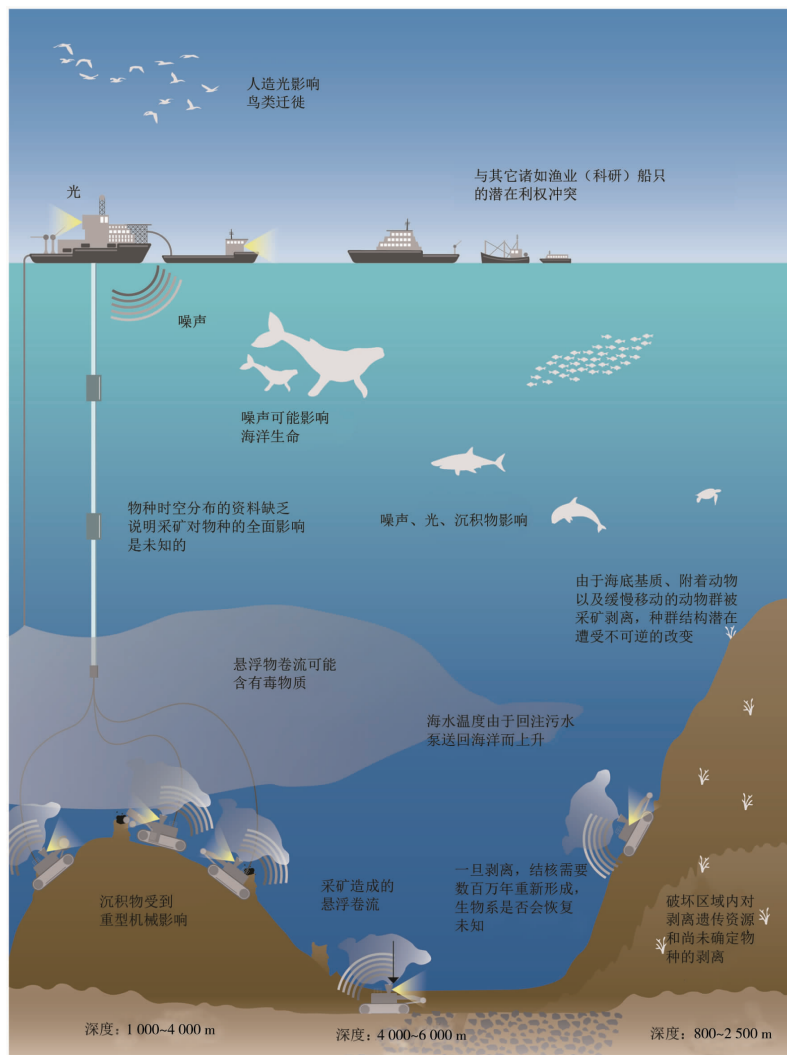


图 4 液压汲取式采矿技术对海洋环境造成的潜在影响^[9]

据图 4 可见,这种采矿技术在海面以上影响鸟类迁徙,同时存在利权冲突.在海面以下噪声影响海洋生态系统,所排放的污水含有有毒物质,影响海洋温度.此外,大量的悬浮物卷流影响海水能见度,进而影

响海底生物系统的多样性和光合作用.对海底基质的剥离造成初始附着的小型生态系统消失,金属结核的再次形成也需要数百万年之久.

2.2 固体悬浮颗粒的环境影响

现有的技术开采系统中的水下子系统对深海矿产进行运输、采集等作业时,都不可避免地将对海水的温度、PH 理化性质产生影响,从而影响深海的生态系统^[30].

同时,研究表明在最小排放量的情况下,水面支持子系统在近水面的排放物必须稀释到 1 : 10 000 以保证水面含氧量的稳定^[31],并且沉淀浊液的分布实验表明小规模沉淀扰动(约 225 kg)所造成的固体悬浮颗粒对水质的影响较小,几天后水质又将重新恢复稳定^[32],但大规模的固体悬浮颗粒将会随着海底水流的移动造成较大规模的环境影响^[33],为了减少悬浮颗粒的随机流动,悬浮颗粒应尽可能地排放至海水底部.

因此,开采系统的作业装置、固体悬浮颗粒的排放程度都需要进行严谨的环境影响评估后再实施开采.

2.3 固体悬浮颗粒的生物影响

固体悬浮颗粒通常表现为精磨、细小的颗粒,通过聚集进而形成在水中漂流、类似云雾的团状结构.海底沉淀的重分布以及通过该系统管道输送回去的尾矿,将增加水的浊度,从而形成固体悬浮颗粒,打破深海生态系统的平衡.根据固体悬浮颗粒的悬浮位置不同分为(近)水面型漂流颗粒以及(近)水底型漂流颗粒.

2.3.1 (近)水面型漂流颗粒的生物影响

国际上多次海试表明通过液压提升开采系统所提升的多金属矿产资源不仅有多金属结核,通常还伴随着海底的碎屑以及海水,如果将除去多金属结核的海底附带沉淀排放在水面,将增加水面的浊度,形成(近)水面型漂流颗粒.

(近)水面型漂流颗粒相对于(近)水底型漂流颗粒对生态环境造成的破坏性更大,因为其漂流的位置受到颗粒浓度、水流状态以及下沉性质等多因素影响^[34],导致(近)水面型漂流颗粒所覆盖的范围极大,环境破坏性强.

并且,覆盖在海水表面的水面型漂流颗粒,将减少水的透光性从而影响海底微生物的光合作用^[30],影响海底多种有机物的合成以及浮游生物的多样性.

2.3.2 (近)水底型漂流颗粒的生物影响

(近)水底型漂流颗粒形成过程:深海采集装置的采矿头作业时造成的沉淀重分布以及液压汲取式开采系统管道输送至海底的尾矿所构成的位于水底的团状物,从而形成(近)水底型漂流颗粒.

(近)水底型漂流颗粒所覆盖的范围通常小于(近)水面型漂流颗粒,其影响覆盖范围主要取决于海底的洋流的大小和方向以及泥沙颗粒的排放高度^[35].但海底生态系统中脆弱的生态环境依靠深海生物群落来维持二者微妙的平衡关系,实验表明,经过模拟干扰后的海底底栖生物数量发生减少^[21, 36],揭露出的海底生物群落对于自己所处的周围深海环境中每一个微小的改变都表现出很强的敏感性.

而(近)水底型漂流颗粒的产生将清除 70%以上的小型底栖生物.对以线虫纲(91%)、桡足类(4%)和有孔虫纲(4%)为主的群落造成直接影响^[37],漂流颗粒还会堵塞底栖生物的器官^[33],这将对深海生态系统造成巨大的破坏.同时,中印度洋海盆的海试勘测表明,海底大量的有机物都和海底的沉淀物具有密切的联系^[38],因此,任何导致(近)水底型漂流颗粒的开采作业都应在作业前进行环境风险评估.

3 深海采矿技术的未来展望

尽管国际上的海洋研究组织经过多次海试,针对犁耙式模拟扰动装置以及液压扰动装置开展了扰动模拟研究,在其对海底沉积物的影响方面得到了精确的模拟结果与监测数据.但是大型开采系统运作的时间是 300 d/a^[39],而实验模拟的运作时间远远未达到商业开采的要求,并且商业开采的区域为 300 km²,实验模拟的区域最大才达到 10.8 km²^[20].因此,以上研究方式所带来的误差性也是不可忽略的一个因素.

海底的水流对固体悬浮颗粒的带动作用受到温度、季节等多因素扰动影响,国际上对于深海环境的研究也在不断重视.因此,就当前深海多金属采矿的技术现状而言,可以得出如下观点:

1) 在实验模拟方面

(1) 在模拟扰动实验中,未来应加强多学科、多领域的合作,在从多个角度考虑海水流动、生物种类以及沉淀分布等参数的基础上开展模拟,进而得到更精确的深海技术的环境影响数据^[30]。

(2) 未来在正式海底作业前,充分考虑沉积物的重分布对海底生态系统的影响,通过小型的预实验判断作业的可行性。

2) 在采集作业方面

(1) 未来的采集作业必将是环境友好型作业,因此,考虑到水面型漂浮颗粒对生物危害性较大,应将采集出的金属矿所附带的废料尽可能地通过另一管道输送至海底以减少沉淀的重分布^[33]。同时,不同的尾矿覆盖面积对环境理化性质的影响也不同^[40],废料重排到海底时的排放面积应合理分析。

(2) 深海采集作业子系统中采矿车的采矿头采集和履带行走是导致近水底沉积物重分布的主要原因,采集作业时附加吸收装置的应用将减少对固体悬浮颗粒物和海底微生物的影响。

4 结论

1) 随着人们对金属资源的需求加大,海洋多金属结核资源的勘探开发已经在国际范围开展,我国目前在此方面的研究已经起步,但是在商业开采、环境研究方面还存在一定的滞后性和不足性。

2) 液压汲取开采系统由于具有优良的可操作性、环境友好度以及应用前景,从而在国际范围内的多金属结核开采中被广泛采用。本文对其技术原理以及其对环境的影响进行了分析评价。

3) 国际上不同研究机构的海试结果表明液压汲取式开采对海洋环境的影响主要有固体悬浮物对海洋生态环境的影响以及对海洋生物的影响。其中(近)水面型悬浮物降低海水光线穿透力,进而影响海底生态环境;(近)水底型悬浮物则影响海底生物群落特征。减少悬浮物的有效方式之一为尽可能将回排料排放至海水底部。

4) 尽管存在一定局限性,当前海洋试验模拟仍旧为多金属采矿的环境影响评估中较为有效的手段之一。实际海洋采集作业应事先分析环境影响并对现有采集系统进行相应改进以降低对海洋环境及海洋生物的影响。

参考文献:

- [1] 王安建,王高尚,陈其慎,等.矿产资源需求理论与模型预测[J].地球学报,2010,31(2):137-147.
- [2] Locket N A. Adaptations to the Deep-Sea Environment[M]. Berlin :Springer -Verlag, 1977.
- [3] 阳宁,夏建新.国际海底资源开发技术及其发展趋势[J].矿冶工程,2000(1):1-4.
- [4] Glasby G P. Lessons Learned from Deep-Sea Mining[J]. Science, 2000,289(5479):551-553.
- [5] 陈新明.中国深海采矿技术的发展[J].矿业研究与开发,2006,26(s1):40-48.
- [6] 丁六怀,高宇清,简曲,等.中国大洋多金属结核集矿技术研究综述[J].矿业研究与开发,2003,23(4):5-7.
- [7] Bice S. Wealth in the Oceans: Deep sea mining on the horizon[J]. Environmental Development, 2014:50-61.
- [8] 方银霞,包更生,金翔龙.21世纪深海资源开发利用的展望[J].海洋通报,2000,19(5):73-77.
- [9] 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.
- [10] Glasby G P. Marine Manganese Deposits[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub. Co., 1977.
- [11] Gollner S, Kaiser S, Menzel L, et al. Resilience of benthic deep-sea fauna to mining activities[J]. Marine Environmental Research, 2017, 129:76.
- [12] Pearson J S. Ocean floor mining[M]. New Jersey :Noyes Data Corp, 1975.
- [13] McFarlane J, Brockett T, Huizingh J P. Analysis of mining technologies developed in the 1970s and 1980s[R]. Kingston: International Seabed Authority, 2008.
- [14] Yamada H, Yamazaki T. Japan's ocean test of the nodule mining system[C]//The Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference, 1998.
- [15] Rajesh S, Gnanaraj A A, Velmurugan A, et al. Qualification tests on underwater mining system with manganese nodule collection and crushing devices[C]//Ninth ISOPE Ocean Mining Symposium. International Society of Offshore and Polar

- Engineers, 2011.
- [16] Hong S, King H W, Choi J, et al. A self-propelled deep-seabed miner and lessons from shallow water tests [C]//ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2010: 75-86.
- [17] Nautilus Minerals Technology [EB/OL]. [2018/10/20]. <http://www.nautilusminerals.com/irm/content/technology-overview.aspx?RID=329&RedirectCount=1>.
- [18] Ingole B S, Ansari Z A, Rathod V, et al. Response of Meiofauna to Immediate Benthic Disturbance in the Central Indian Ocean Basin [J]. *Marine Geotechnology*, 2000, 18(3): 263-272.
- [19] Amos A F, Roels O A, Garside C, et al. Environmental aspects of nodule mining [J]. *Marine manganese deposits*, 1977, 391-437.
- [20] Sharma R. Quantitative estimation of seafloor features from photographs and their application to nodule mining [J]. *Marine Geotechnology*, 1993, 11(4): 311-331.
- [21] Ingole B S, Ansari Z A, Rathod V, et al. Response of Meiofauna to Immediate Benthic Disturbance in the Central Indian Ocean Basin [J]. *Marine Geotechnology*, 2000, 18(3): 263-272.
- [22] Shanta N, Mohandass C, Bharathi P A L, et al. Microscale Response of Sediment Variables to Benthic Disturbance in the Central Indian Ocean Basin [J]. *Marine Geotechnology*, 2000, 18(3): 273-283.
- [23] Glasby G P. Deep Seabed Mining: Past Failures and Future Prospects [J]. *Marine Geotechnology*, 2002, 20(2): 161-176.
- [24] Schriever C, Ahnert A, Bluhm H, et al. Results of the large scale deep-sea environmental impact study DISCOL during eight years of investigation [C]//The Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 1997.
- [25] Foell E J, Thiel H, Schriever G. A LONG-TERM, LARGE-SCALE, DISTURBANCE-RECOLONISATION EXPERIMENT IN THE ABYSSAL EASTERN TROPICAL SOUTH PACIFIC OCEAN [C]// Offshore Technology Conference, 1990.
- [26] Trueblood D D. US cruise report for BIE II cruise [J]. National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum, NOS OCRM, 1993, 4: 51.
- [27] Fukushima T. Overview "Japan Deep-Sea Impact Experiment = JET" [C]//First ISOPE Ocean Mining Symposium. International Society of Offshore and Polar Engineers, 1995.
- [28] 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 Sea-bed Mining Tech, China Ocean Mineral Resources R&D Assoc. Beijing, C55-C681996, 1996.
- [29] Nath B N, Parthiban G, Sankar S J. Sediment redistribution during simulated benthic disturbance and its implications on deep seabed mining [J]. *Deep-Sea Research Part II*, 2001, 48(16): 3363-3380.
- [30] Nagendernath B, Sharma R. Environment and Deep-Sea Mining: A Perspective [J]. *Marine Geotechnology*, 2000, 18(3): 285-294.
- [31] Desousa S N, Sardessai S D. Baseline studies and evaluation of effects of surface discharge of deep-sea mining-Index Area [C]//Third ISOPE Ocean Mining Symposium. International Society of Offshore and Polar Engineers, 1999.
- [32] Lokabharathi P A, Nagendernath B, Ingole B S, et al. Impacts on Surface Productivity during Sediment Dispersal Experiment in Central Indian Basin [J]. *Marine Geotechnology*, 2005, 23(4): 315-330.
- [33] Sharma R. Deep-Sea Impact Experiments and their Future Requirements [J]. *Marine Geotechnology*, 2005, 23(4): 331-338.
- [34] Ahnert A, Borowski C. Environmental risk assessment of anthropogenic activity in the deep-sea [J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress & Recovery*, 2000, 7(4): 299-315.
- [35] Sharma R. Deep-Sea Impact Experiments and their Future Requirements [J]. *Marine Geotechnology*, 2005, 23(4): 331-338.
- [36] Sharma R, Nagendernath B, Valsangkar A B, et al. Benthic Disturbance and Impact Experiments in the Central Indian Ocean Basin [J]. *Marine Geotechnology*, 2000, 18(3): 209-221.
- [37] Sherman K M, Coull B C. The response of meiofauna to sediment disturbance [J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 1980, 46(1): 59-71.
- [38] Sharma R, Rao A S. Geological factors associated with megabenthic activity in the central Indian Basin [J]. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 1992, 39(3/4): 705-713.
- [39] United Nations Ocean Economics and Technology Branch. Delineation of Mine-Sites and Potential in Different Sea Areas [M]. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 1987.
- [40] Moreno L, Neretnieks I. Long-term environmental impact of tailings deposits [J]. *Hydrometallurgy*, 2006, 83(1): 176-183.