



国际海底区域矿产资源相关环境问题与管理进展

高 岩^{1,2}, 孙 栋¹, 黄 浩³, 王春生¹, 钱培元⁴, 王宗灵⁵, 史先鹏⁶, 宋成兵²

(1. 自然资源部第二海洋研究所 海洋生态系统动力学重点实验室, 杭州 310012;

2. 中国大洋矿产资源研究开发协会, 北京 100860;

3. 自然资源部第三海洋研究所, 厦门 361005;

4. 香港科技大学, 香港 999077;

5. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061;

6. 国家深海基地管理中心, 青岛 266237)

摘 要: 随着人类社会对矿产资源需求的日益增加和相关技术与装备的逐渐成熟, 深海采矿成为全球产业界和科研界共同关注的热点。普遍观点认为深海采矿不可避免地会对深海环境和生物群落造成不同程度的扰动甚至破坏, 这也极大影响了国际海底管理局“区域环境管理计划”和《开发规章》的制定进程。本文基于生态系统的视角与方法, 总结了三类深海矿产资源分布区的典型生态系统与环境特征, 回顾了国内外伴随着深海采矿系统综合试验开展的一系列环境基线 and 环境影响评价研究及取得的重要认识, 在此基础上归纳了深海采矿活动对深海平原、海山和大洋中脊热液区这三类生态系统的潜在影响。同时, 本文简要回顾了过去三十年来中国大洋协会在这三类区域部署开展的主要环境任务与进展, 以及我国在国际海底区域环境管理方面所做出的积极努力。最后, 在分析当前国际海底管理局关于平衡资源开发和环境保护主要举措的基础上, 本文对我国进一步积极参与国际海底区域环境管理和全球海洋治理领域工作提出了相关建议。

关键词: 深海采矿; 环境影响; 区域环境管理计划; 生物多样性

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2722-16

中图分类号: P76

文献标志码: A

引文格式: 高 岩, 孙 栋, 黄 浩, 等. 国际海底区域矿产资源相关环境问题与管理进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2722–2737. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37976

GAO Yan, SUN Dong, HUANG Hao, et al. Progress of environmental research and management related to mineral resources in international seabed[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2722–2737. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37976

随着深海技术和装备的不断发展, 人类对国际海底区域(简称“区域”)矿产资源(特指固体矿产资源, 不包括油气资源及天然气水合物等)的大规模开发日渐成为可能, 深海活动主要国家热情高涨, 纷纷由勘探阶段向开发阶段过渡, 伴随而来的深海采矿对生态系统的影响问题成为国际社会的重要关切。

根据 1982 年《联合国海洋法公约》(简称《公约》)和《关于执行〈联合国海洋法公约〉第十一部分(“区域”)的协定》(《执行协定》), 由国际海底管理局(以下简称“海管局”)代表全人类组织和控制“区域”内的活动、管理“区域”矿产资源、制定保护和保全海洋环境的政策和措施等。为履行《公约》规定的义务, 海管局采取了战略、区域和

基金项目: 中国大洋协会项目 (DY135-E2-1, DY135-E2-2, DY135-E2-3, DY135-E2-4, DY135-E2-5); 国家自然科学基金资助项目(41806204, 42076122)

收稿日期: 2021-06-03; **修订日期:** 2021-08-31

通信作者: 宋成兵, 高级工程师, 博士; 电话: 010-68030504; E-mail: songcb@comra.org

合同区三个层面的环境管理措施。作为区域层面的主要管理措施,推进区域环境管理计划(REMP)是当前海管局的首要任务,其目标在于借助划区管理工具的手段对深海生态系统进行有效管理,实现资源开发和环境保护的平衡,并提高生态系统弹性以抵抗全球变化对海洋的不利影响。

“没有区域环境管理计划就没有深海采矿”已成为国际社会的普遍共识。海管局理事会于 2012 年发布了《有关克拉里昂-克利伯顿区环境管理计划的决定》并予以实施。随着近年来《“区域”内矿物资源开发规章草案》制定进程的推进,海管局于 2019 年适时出台了《区域环境管理计划指南》,明显加快了在北大西洋洋中脊、西北太平洋等资源丰富区建设 REMPs 的进程,并积极开展东太平洋克拉里昂-克利伯顿断裂带(CCZ)环境管理计划的适应性调整和完善工作。2020 年 2 月召开的海管局第 26 届理事会第一次会议中,秘书长强调环境保护已成为“过去两年海管局最重要的工作之一”。

1 深海矿产资源概况

人类社会当前开发的矿产资源几乎全部都来自于陆地矿床,但伴随着深海科学考察和资源调查活动的广泛开展,深海存在种类繁多、储量丰富的矿产资源已广为人知。其中,已探明具有开发前景的深海矿产资源主要包括多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物三大类,这里做一简要介绍。

1.1 多金属结核

多金属结核,又称锰结核或铁-锰结核,它们在全球各种水深条件下都可能形成,但具有开采价值的结核主要分布在水深约 3500~6500 m、沉积速率极慢的深海平原^[1]。目前已经圈划的最有利勘查区域的总面积约为 3800 万 km²,其中大部分(81%)位于国际海底区域^[2]。具体来说,已探明的覆盖率最高的多金属结核区位于东太平洋 CCZ。除 CCZ 外,多金属结核资源量较大的区域还包括南太平洋的秘鲁海盆、库克群岛以及印度洋和大西洋的深海平原等^[3]。

1.2 富钴结壳

富钴结壳,又称富钴铁锰结壳或多金属结壳,

通常覆盖在水深 400~7000 m 的火山斜坡、洋脊、平顶海山以及海底高原上^[2, 4],其中最具开采价值的高品位结壳主要分布在 800~2500 m 的海山山脊上,面积达 170 万 km²,其中 46%位于国际海底区域^[3, 5]。西太平洋是全球已探明富钴结壳海山分布最多的区域。除此之外,在西南太平洋的彭林-萨摩亚海盆附近、东印度洋九十度海岭、南印度洋的凯尔盖朗群岛、大西洋的亚速尔群岛等区域的海山也有富钴结壳资源分布^[4]。

1.3 多金属硫化物

多金属硫化物,也称为海底块状硫化物,主要分布于洋中脊和弧后扩张中心等区域,分布深度多在 800~5000 m 之间。其中,大约 65%的热液活动及矿化区分布于洋中脊。洋中脊热液活动发育的水深变化范围较大,但主要集中在 2000~4000 m,尤其在 3000 m 左右水深发现最多^[2]。据估算,多金属硫化物资源的全球分布面积约为 320 万 km²,其中 58%分布于国际海底区域^[5]。全球范围内具有商业开采价值的多金属硫化物资源主要集中在大西洋洋中脊、西太平洋弧后区和西印度洋洋中脊区域。自 1977 年在东太平洋的加拉帕戈斯裂谷首次发现热液喷口以来^[6],全球海洋中已经发现了超过 300 个硫化物热液喷口^[7]。

2 深海矿产资源分布区的典型生态系统与环境特征

“深海”被定义为水深超过 200 m 的海洋部分,分布有最为复杂多样的生态系统。这里为人类和整个生物圈提供着重要的生态系统服务功能,是地球生物圈最为重要的组成部分之一。由于深海技术、开发成本等因素,人类所涉足和认知的深海范围迄今仍十分有限。深海三种矿产资源赋存区域的代表性生态系统受到各自理化环境、进化历史、生物扩散阻隔以及营养物质供给等诸多因素的影响而各具特色(见图 1)。对这些深海生态系统的科学认知是客观评价深海采矿环境影响的基本前提,因此这里对这三类与深海矿产资源分布最直接相关的典型生态系统特征作简要阐述,并介绍中国大洋协会在这三类区域部署开展的主要环境任务与进展。

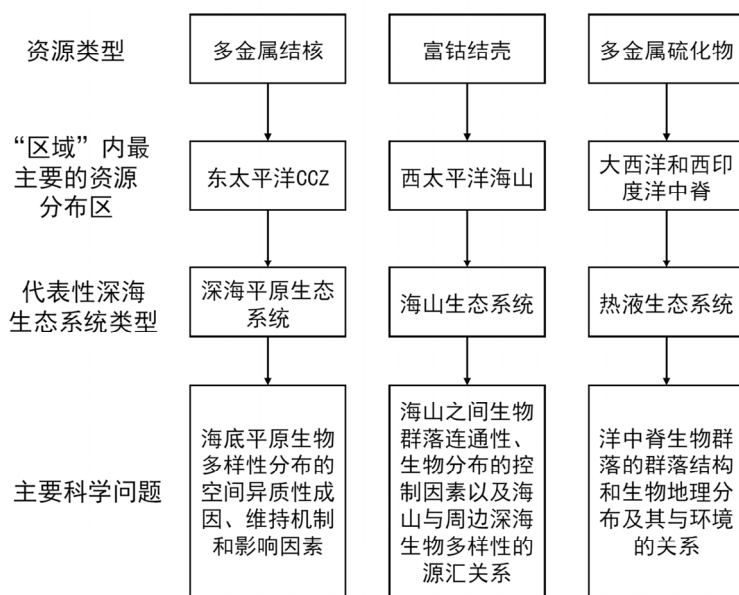


图 1 深海矿产资源分布与主要生态系统的对应关系

Fig. 1 Distribution of deep-sea mineral resources and correlation with deep-sea ecosystems

2.1 深海平原(海盆)生态系统

全球海底分布有广袤的深海平原(海盆), 而多金属结核分布的海盆主要位于热带和亚热带。由于上层海洋强烈的层化作用, 真光层的海水营养盐水平受到极大限制, 导致海洋生态系统的初级生产力极低^[8]。同时, 初级生产者以体型微小的原绿球藻、蓝细菌等为主^[9-10], 光合作用产物从真光层以细小的生物尸体碎屑、浮游动物粪团等颗粒沉降和通过浮游动物昼夜垂直迁移等方式到达深海。这些有机碳在海洋上层和中层的沉降过程中会不断被微生物分解利用而减少^[11]。沉积物捕获器调查结果表明, 颗粒有机物通量随深度呈指数下降, 只有约 10% 的净初级生产力残留在数百米深处, 1% 左右的净初级生产力残留在 4000 m 深处, 这意味着仅仅只有平均不足 $1.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的有机碳到达深海盆地的海床上^[12]。

上层食物供给的极端匮乏导致深海盆地生物丰度和生物量都非常低, 海底生物(从微生物到巨型底栖生物)的总生物量普遍低于 $200 \text{ mg}/\text{cm}^2$ ^[13]。虽然深海平原的食物供给贫瘠, 但这里的生物多样性却极高^[14], 保守估计深海中分布有超过百万种生物^[15]。深海平原的无脊椎动物主要包括线虫、多毛类、甲壳类、海绵、缓步类、软体动物以及海参、

海星、海蛇尾和海胆等棘皮动物。脊椎动物主要为各种深海近底层和底栖鱼类, 包括吞鳗、琵琶鱼、鲑鱼和鼠尾鳕等。但需要指出的是, 沉积物中肉眼看不到的细菌和古菌等微生物才是这一生态系统中按照生物量计的最优势类群, 它们在深海物质循环和再生产过程中都发挥着重要作用^[16]。在深海平原(海盆)的结核区, 密集分布的多金属结核创造了独特的硬基底环境, 这为结核生物的固着和繁衍提供了基本条件^[17](见图 2)。此外, 结核内部具有丰富的空隙, 这也为一些结核生物提供了隐秘且适宜的微生境^[18]。因此, 目前已有的一些调查表明深海平原的结核区普遍具有在非结核区所没有发现的独特物种^[19], 甚至在东太平洋 CCZ 的调查中发现结核分布区的全部巨型底栖生物中有一半数量的物种是仅在结核区才有分布(即所谓“结核生物”)^[20]。

中国大洋协会作为先驱投资者, 于 2001 年获得在东太平洋克拉里昂-克利伯顿断裂带区(CCZ)的多金属结核合同区, 并组织开展了一系列的科考活动。由于 CCZ 位于北太平洋环流控制区, 而该环流具有极强的年代际、年际和季节变化, 因此中国大洋协会于 1996 年在国际上率先提出了“基线及其自然变化(NaVaBa)”计划^[21]。NaVaBa 计划的



图2 东太平洋克拉里昂-克利伯顿断裂带我国多金属结核合同区的结核及海参(“蛟龙”号载人潜水器第65潜次任务期间拍摄)

Fig. 2 Polymetallic nodules and sea cucumber distributed at China Ocean Mineral Resources Research and Development Association (COMRA)'s contract area in Clarion-Clipperton Zone, East Pacific Ocean (Shot by “Jiaolong” manned submersible during its 65th dive mission)

基本科学涵义是,所谓的基线并不是一条静止的线,而应是一个变化的范围。该计划收集生物、化学、物理和地质基线资料,评价海底生态系统与环境在空间和时间上的自然变化,并对开发活动可能造成的环境影响进行初步的评估。通过“九五”和“十五”期间的调查与研究,NaVaBa计划取得了一些成果,初步查明了我国东太平洋多金属结核合同区的生物基线、沉积基线、化学基线和物理海洋基线^[22-32],这些工作系统地证实了上层和深海底层环境都存在着显著的年际变化现象,初步建立了该区域的环境基线。此后,中国大洋协会继续部署了“多金属结核和富钴结壳区环境研究”(“十一五”计划)、“多金属结核合同区环境保全参照区和影响参照区建设”(“十二五”计划)和“东太平洋生态环境监测保护”(“十三五”计划)三个重点项目/课题,深入积累了该区域的环境基线资料,并初步发现厄尔尼诺事件是合同区环境基线年际变化的最主要控制因子,但更深入的控制机理、特别是深海底栖生态系统对于上层厄尔尼诺事件的响应机制还有待深入研究。

2.2 深海海山生态系统

与周边广袤的深海平原(海盆)相比,海山在垂

直方向上的环境梯度和丰富的微地貌变化为生物提供了充裕的生态位^[33],而“泰勒柱效应”等动力机制的存在则为海山区的浮游生物和游泳动物提供了较周边寡营养大洋更为丰富的食物来源^[34],并进一步通过浮游-底栖耦合机制而将有机质输送到海山底栖生物群落^[35],因此大量的调查发现海山具有丰富的底栖生物多样性^[36]。较早一些的观点认为,地理隔离、独特的进化历史和生境特点使得海山底栖生物群落的特有种比例很高,一般可达30%~40%之间,个别海山的特有种比例甚至高达52%^[37]。但此后更多的研究发现,海山底栖生物群落的特有种比例并没有异常升高,前期认识上的偏差更多是由于调查不足所导致^[38-39],而且海山特有种的比例在不同大洋之间存在明显差异^[40]。这些结果表明,尽管海山有丰富的生物多样性是科学界的共识,但不能笼统的认为全部海山都具有高比例的特有种。

由于海山上硬基底普遍存在^[41],而且独特的水动力条件导致海山近底层水体中的有机颗粒物浓度要高于周边寡营养大洋^[42],这为海山上生长多种多样的珊瑚、海绵等固着性滤食生物提供了良好环境条件^[43]。这些大型的固着性滤食生物为体型较小、且具有一定运动能力的底栖生物,如甲壳类、软体动物和棘皮动物等提供了良好的栖息地和重要的食物来源,是海山底栖生物群落的关键类群^[44](见图3)。由于这些大型固着生物在海山生物群落构建过程中起着关键作用,因此一般认为海山底栖生物群落极其脆弱^[45],尤其是最关键的冷水珊瑚,寿命很长、生长率很低、繁殖力低下,一旦受破坏需要数百年才能恢复^[46]。早期受渔业捕捞作业尤其是底拖网作业破坏严重^[47],而目前普遍认为深海采矿也可能对海山底栖生物群落构成巨大威胁,由深海采矿引起的海山环境问题是当前各界关注的热点^[48-49]。

此外,在东太平洋CCZ存在一些较小的深水海山,有观点认为这些海山可以作为寡营养深海平原上的生物多样性热点区,能够为相邻区域的底栖生物群落提供幼体补充。特别是,采矿活动会彻底消除依赖硬基质的结核生物类群的栖息地^[50],而这些海山可以为结核生物提供重要的“庇护所”,因此对于深海采矿的环境影响评价和后续的矿区生态修复都有积极意义^[51]。但近期一个实证研究却发现

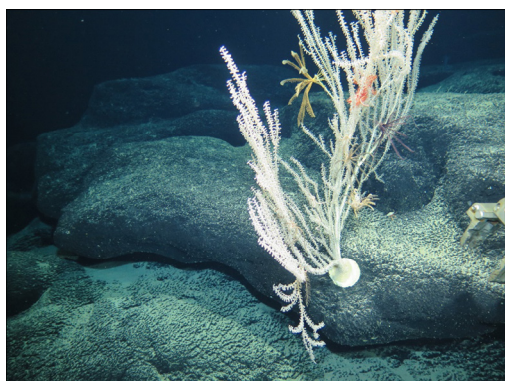


图3 西北太平洋海山区富钴结壳海山上生长的珊瑚及附生的海百合和海蛇尾(“海龙 III” ROV 于中国大洋 56 航次任务期间拍摄)

Fig. 3 Corals, sea lilies and brittle stars growing on cobalt-rich crust in seamounts of Northwest Pacific Ocean (Shot by the “Hailong III” ROV during the 56th Cruise of COMRA)

现巨型底栖生物群落结构在结核区内的深水海山和周边深海平原的结核区之间存在显著差异,因此这些海山可能无法作为结核生物的“庇护所”而存在^[52]。

“十一五”期间,伴随着对西北太平洋富钴结壳海山区的资源调查,中国大洋协会部署了“多金属结核和富钴结壳区环境研究”项目,其中的“北太平洋环流区环境基线年际变化及其内在机制研究”课题对麦哲伦海山区水体生态系统的空间变化特征开展了初步研究^[53]。由于海山生态系统与环境研究对调查装备的依赖性很强,而早期我国并不具备开展深海海山生态系统科学调查的技术装备条件,因此长期以来并未开展系统的海山生态系统调查研究。从 2012 年开始,我国加大了在麦哲伦海山区的环境和生物多样性调查力度,连续部署了两期重点研究项目“富钴结壳勘探区环境梯度及其对底栖生物成带分布的效应”(“十二五”计划)和“西太平洋海山区环境调查与评价”(“十三五”计划),对我两座合同区海山(采薇海山和维嘉海山)进行了重点解剖,包括采用“蛟龙”、“海龙 III”、“海马”等潜水器开展近底调查和布设锚系潜标观测系统等,获得了丰富的数据资料和样品。在此基础上,我国科学家较为全面的研究了海山区巨型底栖生物的生物多样性^[53-56],并开展了浮游生物和小型底栖生物的空间异质性、海蛇尾的种群连通性、深水

海山的物理海洋动力环境特征、海山周边的沉积与生物扰动、底栖生物群落的食物来源等方面的研究^[57-62],显著提升了我国在该区域的科学话语权。

2.3 大洋中脊热液生态系统

伴随着 1977 年美国“阿尔文”号载人潜水器对深海热液喷口的科学发现,人们也惊奇地注意到喷口附近存在着特殊的深海热液生态系统^[63]。在这些区域,地热驱动的一系列水岩反应生成高温和强还原性的热液流体从海底喷出并与周围海水发生剧烈混合。在此过程中,硫化物快速堆积,塑造出壮观的海底烟囱景观^[64]。热液流体喷出后,其中裹挟的大量硫化氢、氢气、甲烷等都可以被化能合成微生物所利用,同时将水中的二氧化碳及碳酸盐转化为碳水化合物,从而为整个热液生态系统提供能量^[65]。在高温热液烟囱的周围经常围绕着巨型管状蠕虫、蛤、贻贝、蟹等热液区特有生物。热液生物群落中的很多底栖生物,例如虾、蟹和蛤等,都可直接摄食喷口附近的热液微生物;但是更多的热液生物则与化能自养微生物之间呈现共生关系^[66]。例如热液区特有的盲虾和贻贝分别依赖于其鳃室表皮上的硫氧化菌与氢氧化菌和内共生的甲烷氧化菌与硫化氢菌提供能量^[67-68]。这些化能自养微生物及依赖它们的底栖生物在局部区域内形成了极高的生产力^[69],共同造就了深海最为富饶的生态系统。

由于大洋中脊在深海呈现带状分布且具有良好的地理连通性,同时热液生态系统及热液生物从能量来源上又极为依赖在大洋中脊上断续分布的热液喷口,因此沿着大洋中脊的热液生物种群连通性和热液生物群落的空间异质性就自然而然地成为一个引人关注的科学问题^[70]。例如,BEEDESSEE 等^[71]研究了洋中脊热液区的四个代表性广布种后发现,即使相隔数千公里,它们的种群之间也没有显著的遗传差异,这表明它们具有良好的地理连通性。关于这种长距离扩散的机制,有观点认为这些生物的幼体可能上浮至海洋表层而实现随洋流的大范围扩散^[72],但这一假说还需要更多的研究证据。

由于热液喷口都具有一定的寿命,待其停止喷发后,活跃热液生态系统就会逐渐被非活跃热液生态系统所替代,主要表现为维持生态系统的能量来源从依赖热液中溶解态的硫化物和其他还原性物

质转变为依赖还原性铁和固体硫化物^[73]。此外, 随着热液喷发的停止, 嗜热微生物也逐渐被偏好低温环境的微生物所替代; 底栖生物群落的物种组成和群落结构也会随之发生显著演替^[74]。随着近年来研究的深入, 国际社会已经逐渐认识到非活跃热液区所拥有的独特生物群落可能面临采矿活动的更大威胁^[75]。

2005 年我国首次环球大洋科考航次期间就在西南印度洋热液区开展了深海热液探测, 并于 2007 年发现了西南印度洋中脊的首个活动热液区^[76]。此后, 随着 2011 年多金属硫化物勘探合同的签订, 我国加大了对热液生态系统和热液环境的调查力度, 并针对生物基线、化学基线、物理海洋基线和沉积基线分别部署了研究专题。特别是 2015 年以后“蛟龙”、“深海勇士”、“海龙 III”、“潜龙 II/III”等潜水器在西南印度洋“龙旂”等热液区开展的调查工作获得了大批样品和原位探测数据(见图 4)。依托这些调查资料, 我国科学家不仅报道了一批热液区特有的新物种^[77-81], 而且首次报道了超慢速扩张洋脊热液区生物群落的年际变化特征, 受到国际科学界的广泛关注^[82]。2018 年起, 中国大洋协会集中内陆和香港两地的优势研究力量, 设立了“U 形区洋中脊生态系统监测保护”重大项目, 力图从连通性视角整体研究南大西洋、西南印度洋、中印度洋和西北印度洋的热液生态系统及环境特征, 并已经在深海群落生态学、连通性、环境特征等方面取得了一批原创性研究成果^[83-87]。

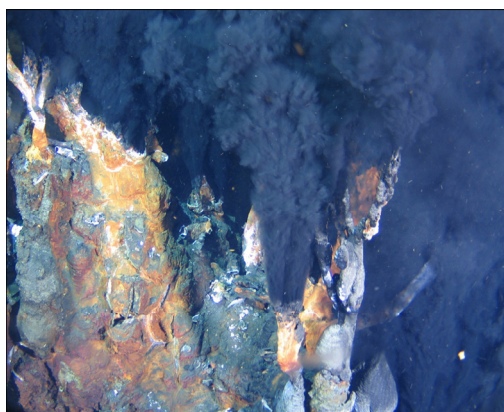


图 4 西南印度洋龙旂热液区的热液喷口及生物群落 (“蛟龙”号载人潜水器第 100 潜次任务期间拍摄)

Fig. 4 Hydrothermal vents and biological communities in Longqi hydrothermal area in southwest Indian Ocean (Shot by “Jiaolong” manned submersible during its 100th dive mission)

3 深海采矿活动对典型深海生态系统的影响

尽管深海采矿活动被广泛认为会对深海生态系统造成较大不利影响, 但深海生态系统复杂多样, 绝大多数尚未开展系统调查, 栖息于深海或生活史某一阶段处于深海的大量新物种还有待科学发现, 而且当前也缺乏商业规模的深海采矿实践, 因而准确评价深海采矿活动对典型深海生态系统的影响具有显而易见的客观困难。下文首先依据国内外已有研究成果, 特别是伴随几次有重大影响力的深海采矿模拟试验得到的数据, 综述了当前深海采矿环境影响评价方面的基本认识。其次, 简要回顾了 20 年以来我国深海采矿系统综合试验开展的一系列环境基线和环境影响评价研究。最后, 基于生态系统的视角与方法, 系统总结了深海采矿活动对深海平原、海山和大洋中脊热液区这三类生态系统的潜在影响。

3.1 深海采矿环境影响试验

20 世纪 70 年代以来, 部分先驱国和国际财团(例如“海洋金属联合组织”)相继开展了一系列与深海采矿有关的环境影响试验。到目前为止, 所有公开报道的深海采矿环境影响试验均集中在多金属结核采集方面, 尚未有针对富钴结壳和多金属硫化物的环境影响试验。比较有影响的是 1975—1980 年美国在东太平洋结核区进行的深海采矿环境研究(DOMES)、1985—1998 年德国在东南太平洋结核区进行的扰动和再迁入实验(DISCOL)及其 1995—1998 年的后续项目—东南太平洋深海生态系统中的底栖生物调查(ECOBENT)、1991—1998 年美国、俄罗斯等国家和矿业公司合作进行的底层影响实验(BIE)。上述试验为认知深海采矿的环境影响和生态系统恢复能力评估提供了第一手的资料, 也为后期海底管理局有关环境管理规则的出台提供了关键的数据支撑。

3.1.1 深海采矿环境研究(DOMES)

由美国国家海洋大气局负责实施, 共持续了 6 年, 包括两个阶段, 第一阶段主要以获得试验区的环境基线为目标, 包括: 1) 建立类似矿区环境条件的三个代表性小区的物理、化学、生物和地质基线;

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年分别在上述三个区块中的两个区块进行的两次试验性采矿实验的影响, 其目的有两个: 一是观察深海采矿期间所产生的环境影响, 以提高在试验第一阶段所发展起来的环境影响预测能力; 二是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CCZ内三个试验区的环境基线; 2) 提供采矿前的可能环境影响预测报告, 为依据美国国内法进行试验性采矿环境监测计划的设计提供了依据; 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。

3.1.2 扰动和再迁入试验(DISCOL)

德国的扰动和再迁入试验(DISCOL)于1988—1993年期间开展, 试验区位于太平洋秘鲁海盆, 面积为10.8 km², 试验分为三个阶段进行: 第一阶段为基线调查阶段, 然后由特殊设计的犁耙系统对试验区进行人为扰动, 扰动的痕迹为深度至少达10~15 cm, 并在扰动结束后立即进行第一次扰动后采样; 第二阶段, 在扰动半年后进行第二次扰动后采样; 第三个阶段, 在扰动4年后进行第三次扰动后采样。获得了有关巨型、大型、小型底栖生物丰度和群落结构、细菌生物量和生物活动强度等方面的资料, 其目的是通过大尺度的试验, 包括对大面积海底的扰动, 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群落重建的速率。

1995—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年后重访试验区, 继续对底栖生物再迁入情况进行监测。此后, 在首次扰动的26年后再次重返试验区开展了观测, 从而获得了较长时间跨度的观测数据。

3.1.3 底层影响实验(BIE)

底层影响实验(BIE)是一个多国合作计划。该计划于1991年启动, 先后有美国、俄罗斯、日本、印度等国家和“国际海洋金属联合组织”(IOM)参与实施。该试验采用相同的扰动装置, 通过人工扰动海底表层沉积物, 研究沉积物的再沉积及其与原

位海水混合后在离海底5 m高度排放的生态效应。美国的BIE试验(1991—1994)由美国和俄罗斯专家合作开展, 试验分三个阶段进行: 第一阶段为基线调查, 第二阶段为扰动试验; 第三阶段在扰动后的不同时间内取样, 监测扰动对环境的影响。在最后一次扰动试验约10个月后, 在扰动区重复取样, 监测扰动对环境的影响。对小型底栖生物的分析表明: 扰动发生9个月后, 一些类群的数量仍然明显低于基线值, 尤其是线虫这一类群表现得最为显著; 而大型底栖生物的物种多样性却未因沉积物的再沉积作用受到显著影响。此外, IOM(1994—1997年)、日本(1993年参加了美国、俄罗斯的BIE, 并于1994—1996年在日本合同区内进行了BIE, 又称JET)和印度也用与美俄相同的试验方案在各自的合同区内进行了实验。IOM在其1995年的BIE结束后, 又分别在1997年、2000年和2015年开展了连续实验后监测调查, 积累了时间序列观测数据。

3.1.4 国内的深海采矿试验

我国深海采矿试验起步较晚, 主要以采矿装备试验为主, 对采矿环境影响的试验长期处于探索阶段。2001年, 中国大洋协会首次在云南抚仙湖开展了130 m级多金属结核采矿系统综合湖试, 完成了向深海采矿技术装备领域进军的尝试。2016年, 科技部重点支持、中国大洋协会组织实施的“深海多金属结核采矿试验工程”启动, 其中专门设立了“环境调查与环境影响评估”课题。2017年起在南海开展了“1000米级多金属结核试采工程”的工程选址和环境基线调查, 经过三年多的努力, 顺利完成了选址并基本建立了试验区的环境基线, 为2021年的试采工程期间及后续的环境影响评估奠定了基础。此外, 2018年“鲲龙500”海底集矿车在我国南海成功完成500 m级海底采矿试验。在该试验进行期间, 我国对海底集矿车造成的沉积物羽状流及影响范围开展了深海原位监测和评估, 获取的监测数据为开展后续更大深度采矿试验环境影响监测方案的设计奠定了基础。

3.2 深海采矿活动对深海典型生态系统的影响

目前认为, 深海采矿将不可避免地在局部范围对深海生物多样性和生态系统产生负面影响^[88], 这不仅包括深海采矿活动导致生物体的直接死亡、基

质栖息条件的破坏以及水柱和海底生境的退化, 也包括沉积物羽流扩散或噪音等附带影响可能导致的更大范围损害^[89]。这里就三种主要资源的开采活动分述如下。

3.2.1 深海采矿对深海平原(盆地)生态系统的影响

3.2.1.1 深海采矿对底层生态系统的影响

深海平原(盆地)分布的锰结核发育速度极为缓慢, 甚至达到数百万年^[90-91]。因此随着开采过程中结核的移除, 依赖于这一坚硬基质的所有动物类群都会受到栖息地丧失的直接影响^[92]。据估计, CCZ 超过一半巨型底栖生物依赖结核的存在, 因此这些结核在维持区域生物多样性方面发挥着重要作用^[20]。

多金属结核的开采对海洋底层生态系统的潜在影响主要包括如下几个方面:

1) 集矿机将直接移走结核及结核生物, 使原来软相和硬相相混合的底栖生物群落变成纯软相底栖生物群落, 造成底栖生物群落多样性的降低。例如, 科考人员于 26 年后重新考察了 1978 年进行深海扰动试验的区域, 以评估底栖生物栖息地的恢复情况。结果发现, 当年采矿车留下的扰动痕迹仍然清晰可见, 且与周围未受干扰的地区相比, 受干扰区域的线虫多样性和生物量仍未恢复^[93]。

2) 深海采矿对海底及周围水体生物多样性的影响在于栖息地破坏(丧失与片段化)和栖息地质量下降(污染、缺氧等), 由此导致生物多样性的降低或者完全丧失。近期一个对 37 年前扰动试验的跟踪发现采矿活动会对栖息地造成永久性损伤, 从而导致显著的生物多样性丧失^[94]。

3) 当集矿机沿海底运动时, 将对沉积物和底栖生物产生机械挤压作用, 直接杀死底栖生物, 特别是运动能力弱或完全固着生物、身体结构脆弱的类群。

4) 集矿机还将在海底 50 m 以上的水层产生沉积物羽状流, 羽状流中较大颗粒的沉积物很快降到底底, 但是较细的颗粒沉降速度较慢, 将在较长时间内滞留在水中, 在底层流的作用下扩散并在海底较大范围内发生再沉积, 这可能会对底层生物产生较大的影响, 尤其是对滤食性动物, 比如堵塞贝类的鳃, 阻碍其呼气甚至窒息死亡^[95]。

5) 在开采过程中, 由于对底质的剧烈扰动, 会使沉积物中的金属和有害物质释放到水体中, 污染

周围环境, 使附近底栖及近底游泳生物的生理状态受到影响。

3.2.1.2 深海采矿对表层和上层生态系统的影响

尽管多金属结核采矿的主要环境影响发生在底层, 但采矿活动也会对水体生态系统产生影响^[96]。

主要包括以下几个方面:

1) 尾矿在表层的排放使水体中悬浮颗粒物增加、光衰减程度加剧。深海采矿对上层水体最明显的影响是悬浮颗粒物浓度增加, 这也是表层羽流唯一明显的特征; 而尾矿物质沿密度跃层扩散和累积是采矿影响上层生态环境的最主要问题。

2) 尾矿羽流区的初级生产力会因光照不足而明显下降, 但因大部分悬浮颗粒物会在一天内沉降和扩散, 因此它的遮蔽效应是暂时的、局部的。

3) 含有丰富营养盐的底层水在表层排放使营养盐浓度增加。

4) 由于光合作用可能受到光衰减加剧的抑制, 因此真光层中的溶解氧浓度可能降低。

5) 痕量重金属等有毒物质被生物吸收并通过食物链传递和累积。

6) 上述因素将影响浮游植物的光合作用、浮游动物和游泳动物的摄食、呼吸、生长等重要功能及代谢作用, 但对浮游动物、浮游植物种类组成和浮游动物死亡率的影响均不太明显。

7) 悬浮颗粒物在大多数情况下不会影响鱼卵、仔鱼的死亡率, 但对仔鱼的摄食率有较大的影响, 严重时可能导致它们的死亡率上升。

8) 在开采过程中形成的高浓度悬浮颗粒和原始基质的丧失会减少某些鱼类物种的最佳产卵和育苗地^[97]。

9) 海底采矿还会产生噪音, 噪音会给海洋生物, 尤其是一些大型洄游性生物的活动带来不利影响^[98]。

3.2.2 深海采矿对深海海山生态系统的影响

一般认为, 结壳开采会造成海山生物多样性、覆盖率和丰富度的下降^[99]。最显著和直观的影响是结壳的剥离和开采将导致大量生长在硬基底上的固着生物的死亡。大量海山生物种类依赖生长在硬基底上的固着生物而存在, 例如海蛇尾、海百合等都与冷水珊瑚存在广泛的共附生关系。因此, 这些冷水珊瑚遭受破坏后, 其共生的生物类群也必然会遭受严重影响^[100]。富钴结壳采矿车的扰动强度和规

模要远远超过底拖网渔业活动,而商业规模的移除伴随着缓慢的物种恢复率,可能会导致海山及其周围的底栖生物群落结构发生不可逆转的变化^[91]。底栖生物优势群落的移除可能会降低底栖无脊椎动物的生物多样性,从而改变栖息地生态系统结构。物理干扰会导致优势种从大型固着型生物向小型、快速生长、机会主义、外来种、食腐动物和幼体的转移^[101-102]。海山区的开采活动还可能导致底栖生物、中层游泳生物(200~1000 m)和深层游泳生物(1000~4000 m)的死亡^[103]。

3.2.3 深海采矿对大洋中脊热液生态系统的影响

多金属硫化物采矿最直接的影响是热液口及周边地质特征的破坏与移除,特别是热液生物群落赖以生存的热液通道被破坏,这种变化的环境很可能不适合土著生物类群的重新定居^[104]。除此之外,其他几个方面的潜在影响也日益受到关注。首先,采矿车的物理铲挖或碾磨也会使沉积物再悬浮,从而形成沉积物羽状流^[105],因而滤食性动物可能因滤食器官的堵塞而降低摄食效率甚至死亡^[106];其次,采矿过程中的光污染、噪音污染、尾矿在海底的堆积等也会对局域环境造成不利影响^[107];最后,矿物的运输过程中,物种可能会被转移到不同的地点,因而可能会导致潜在的物种入侵问题^[107]。

另外,需要特别关注热液生态系统与海山或深海平原生态系统的最大差别,即维持生态系统的能量来源和生产力的明显差异。对于拥有极高生产力的热液生物群落来说,在一次大的扰动之后,群落优势物种可能会在短时间在活跃的喷口附近重新定殖,从而促进群落的快速恢复^[108]。但对于处于休眠状态或者已永久性停止活动的非活跃热液区,这里的生物群落受到破坏或者剧烈扰动后的恢复过程则可能要长达数十年甚至更久^[74]。

最后,需要指出的是,以上关于深海采矿活动对三类典型生态系统的影响仅是试验性采矿的短期科学研究所得出的结论,其影响规模和持续时间上都与商业规模的开采活动完全不具有可比性,因此不足以阐明采矿的长期(累积)效应、各种复杂协同或拮抗效应等一系列问题,外推使用时需特别谨慎。总之,为了更充分地评估深海采矿对海洋生态系统的潜在影响,需要进一步开展模拟试验和长期影响观测,并且在更接近商业开采规模的试验中积累现场监测和环境影响评价数据。

4 区域环境管理进程

海管局自 1996 年进入全面运作以来,已签订了 30 份勘探合同。针对不同类型资源的勘探活动,海管局先后制定了涵盖三大资源的规章,包括《“区域”内多金属结核探矿和勘探规章》、《“区域”内多金属硫化物探矿和勘探规章》及《“区域”内富钴铁锰结壳探矿和勘探规章》(以下简称《勘探规章》)。为履行《公约》第 145 条“切实保护‘区域’的海洋环境不受‘区域’内活动可能产生的有害影响”要求,控制深海采矿活动的环境风险、开展环境影响评估,海管局在《勘探规章》中明确了承包者须履行海洋环境保护的义务,包括开展环境基线调查、监测并评估自然时空变化的环境影响等。近年来,伴随着德国、比利时等国家纷纷尝试开展更接近商业化技术水平、为进入开发阶段做准备的深海采矿试验,国际社会对深海采矿相关环境问题的关注达到了前所未有的程度。2018 年,海管局在其《2019—2023 战略计划》中明确将保护海洋环境作为战略目标(ISBA/24/A/10),并制定了高级别行动计划(ISBA/25/A/15),确定以“对环境负责的方式管理‘区域’内活动”。针对“区域”内的采矿试验及未来采矿活动可能带来的环境影响,海管局着手制定实质性的区域环境管理政策(即 REMP),以期作为区域环境管理的最佳实践。东太平洋 CCZ 是第一个建立 REMP 的区域,通过对物理海洋、地球化学、生态和种群数据集进行空间分析,选划了 9 块环境特殊利益区(Areas with Particular Environment Interest, APEI),以覆盖整个管理区域内的所有栖息地、生物多样性和生态系统功能^[51],面积达 144 万 km²,约占 CCZ 总面积的 24%,近期正在讨论增设 APEI,以达到面积比例的 30%以上。此后,海管局通过组织科学和管理两个阶段研讨会的模式,先后启动了北大西洋洋中脊、西北太平洋等区域的 REMPs 建设进程。此外,海管局还积极响应联合国大会于 2017 年宣布的“2021—2030 联合国海洋促进可持续发展十年”计划,将增加深海生物多样性认识、加强海洋观测等作为共同目标,制定了海洋科学研究行动计划草案,并启动了深海数据库的建设,作为海管局组织管理区域活动、有效保护海洋环境的关键工具。

海管局的区域环境管理进程是当前国际社会维护资源开发与环境保护平衡、促进自然与人类社会可持续发展的一个典型缩影。目前,保护和可持续利用海洋已成为国际社会的共同使命。联大将其作为2030年可持续发展目标之一,并加快了“国家管辖外海域生物多样性养护与可持续利用”(BBNJ)谈判进程,将划区管理工具包括海洋保护区、环境影响评估作为两项重要议题。《生物多样性公约》缔约方大会于2010年通过“爱知目标”明确提出2020年前海洋保护区面积达到10%,并呼吁即将在我国昆明召开的第15次缔约方大会上通过2030年前保护30%的海洋面积。基于以上共同目标,世界自然保护联盟、绿色和平组织、国际鸟盟等国际组织也纷纷发布了各自的全球海洋保护区选划方案。此外,国际海事组织、区域渔业组织等也针对航行、渔业等特定人类活动设计了特别敏感海域、脆弱海洋生态系统等划区管理工具。

5 中国参与及展望

我国的深海资源勘探活动自20世纪80年代初起步,历经近40年发展,目前已在国际海底区域拥有三种资源共五块勘探合同区。作为拥有勘探合同区数量最多的国家,我国承包者在履行勘探合同义务的同时,也在以专项调查和科学计划等多种形式积极推动深海环境保护工作。1996年起,中国大洋协会发起了NaVaBa计划,每年或隔年的夏、秋季节在CCZ的大洋协会结核勘探合同区开展自然基线调查,以期观察全球气候变化对合同区环境基线变化的影响,更好地识别自然因素和人类活动对环境基线的扰动。2017年7月7日,中国大洋协会在海管局第23届理事会第二次会议期间组织边会,正式发起在西北太平洋富钴结壳区和印度洋洋中脊区域建设REMPs的倡议,得到了海管局及与会各方的积极回应。2018年5月,海管局与大洋协会联合在中国青岛举办了西太平洋富钴结壳区REMPs研讨会,海管局秘书长及相关人员、联大及相关国际组织代表、科学界代表等与会,会议成果已作为海管局第23号技术报告发布。2020年11月9日,我国自然资源部(国家海洋局)与海管局共建的联合培训和研究中心正式启动,其核心任务之一即为促进深海环境与深海生态领域研究,提升发展中

国家参与区域环境治理的能力。

根据我国《深海海底区域资源勘探开发法》的要求,中国大洋协会在积极履行承包者相关环境保护义务之外,也努力促进区域海洋科学研究和海洋环境保护。其中的核心举措就是以深海环境监测与保护为目标,发起了西北太平洋海山区生态系统监测与保护、洋中脊热液区域生态系统监测与保护、东太平洋CCZ生态系统监测与保护等科学研究计划,为区域环境管理计划的制定提供了科学支撑。同时,中国大洋协会还将通过组织研讨会、发起联合航次、建立合作研究等方式,积极推动区域内相关承包者之间的双边和多边合作。

近年来,以保护海洋环境为主旨的全球海洋治理进入规则重塑期,BBNJ谈判、区域环境管理、南极保护区建设等进程从立法、政策、实践等多重层面协同推进,呈现出连锁态势。海洋命运共同体理念、生态文明指导思想等均为我国积极参与区域环境管理和全球海洋治理指明了发展方向。相关建议如下:

第一,加强环保优先理念在深海开发与调查技术装备研发领域的贯彻实施,提高深海开发技术与环境影响评价相关的科学认知水平,为“区域”内矿产资源事业提供中国环保标准和环境友好型技术方案。

第二,构建“区域”蓝色伙伴关系,由深海事务管理部门统筹承包者、研究机构等,联合“区域”相关利益攸关方,推动“区域”环境领域的实质性合作,探索生态优先的可持续利用路径,为制定区域环境管理方案做出实质性贡献。

第三,积极响应联大“海洋十年”计划,在全球气候变化的大背景下,启动深海典型生态系统和生物多样性领域相关国际科学计划,提高对深海生态系统和生物多样性的认知水平,构建长期、立体的深海观测和监测体系,为海洋空间规划和政策研究提供有效支撑。

第四,加强区域环境调查的顶层设计,搭建多部门航次管理协调机制,促进多系统任务及航次业务化运行,提高调查效率及数据成果利用率。

第五,紧抓全球海洋治理规则重塑契机,开展国际海洋治理领域专项研究,带动培养一批综合性国际海洋治理人才,深度参与机制构建、规则制定、标准建立等进程,推动构建公正合理的国际海洋治

理新秩序。

REFERENCES

- [1] KUHN T, WEGORZEWSKI A V, RÜHLEMANN C, et al. Deep-sea mining: Resource potential, technical and environmental considerations[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 23–63.
- [2] PETERSEN S, KRAESCHELL A, AUGUSTIN N, et al. News from the seabed — Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources[J]. Marine Policy, 2016, 70: 175–187.
- [3] 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.
- [4] HEIN J R, KOSCHINSKY A. Treatise on geochemistry[M]. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2014: 273–291.
- [5] LEVIN L A, AMON D J, LILY H. Challenges to the sustainability of deep-seabed mining[J]. Nature Sustainability, 2020, 3: 1–11.
- [6] CORLISS J B, DYMOND J, GORDON L I, et al. Submarine thermal springs on the galapagos rift[J]. Science, 1979, 203(4385): 1073–1083.
- [7] HANNINGTON M, JOHN J, THOMAS M, et al. The abundance of seafloor massive sulfide deposits[J]. Geology, 2011, 39(12): 1155–1158.
- [8] BEHRENFELD M J, FALKOWSKI P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration[J]. Limnology Oceanography, 1997, 42: 1–20.
- [9] LIU H, NOLLA H A, CAMPBELL L. Prochlorococcus growth rate and contribution to primary production in the equatorial and subtropical North Pacific Ocean[J]. Aquatic Microbial Ecology, 1997, 12: 39–47.
- [10] ZHANG D, WANG C, LIU Z, et al. Spatial and temporal variability and size fractionation of chlorophyll a in the tropical and subtropical Pacific Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 31: 120–131.
- [11] BUESSELER K O, LAMBORG C H, BOYD P W, et al. Revisiting carbon flux through the ocean's twilight zone[J]. Science, 2007, 316: 567–570.
- [12] KAWAHATA H, SUZUKI A, OHTA H. Export fluxes in the Western Pacific warm pool[J]. Deep-Sea Research I, 2000, 47: 2061–2091.
- [13] WEI C, ROWE G T, ESCOBARBRIONES E, et al. Global patterns and predictions of seafloor biomass using random forests[J]. PLoS ONE, 2010, 5: e15323.
- [14] VANREUSEL A, FONSECA G, DANOVARO R, et al. The contribution of deep-sea macrohabitat heterogeneity to global nematode diversity[J]. Marine Ecology, 2010, 31: 6–20.
- [15] GRASSLE J F, MACIOLEK N J. Deep-sea species richness: Regional and local diversity estimates from quantitative bottom samples[J]. American Naturalist, 1992, 139: 313–341.
- [16] REX M A, ETTER R J, MORRIS J S, et al. Global bathymetric patterns of standing stock and body size in the deep-sea Benthos[J]. Marine Ecology Progress Series, 2006, 317: 1–8.
- [17] SIMON-LLEDÓ E, BETT B J, HUVENNE V A I, et al. Ecology of a polymetallic nodule occurrence gradient: Implications for deep-sea mining. Limnology and Oceanography, 2019, 64: 1883–1894.
- [18] WU Yue-hong, LIAO Li, WANG Chun-sheng, et al. A comparison of microbial communities in deep-sea polymetallic nodules and the surrounding sediments in the Pacific Ocean[J]. Deep Sea Research I, 2013, 79: 40–49.
- [19] GOODAY A J, GOINEAU A, VOLTSKI I. Abyssal foraminifera attached to polymetallic nodules from the eastern Clarion Clipperton Fracture Zone: A preliminary description and comparison with North Atlantic dropstone assemblages[J]. Marine Biodiversity, 2015, 45: 1–22.
- [20] AMON D J, ZIEGLER A F, DAHLGREN T G, et al. Insights into the abundance and diversity of abyssal megafauna in a polymetallic-nodule region in the eastern Clarion-Clipperton Zone[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 30492.
- [21] ZHOU Huai-yang. Chinese environmental investigation related to potential impact of deep-sea mining[C]// The Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference. Honolulu, HI: ISOPE, 1997: 496–498.
- [22] 倪建宇, 周怀阳, 潘建明, 等. 中国多金属结核开辟区沉积物地球化学特征[J]. 海洋学报, 2001, 23(6): 94–100.
NI Jian-yu, ZHOU Huai-yang, PAN Jian-ming, et al. Geochemical characteristics of sediments from the China Pioneer Area equatorial northeast Pacific Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(6): 94–100.
- [23] 高爱根, 王春生, 杨俊毅, 等. 中国多金属结核开辟区东、西两小区小型底栖动物的空间分布[J]. 海洋学研究, 2002, 20(1): 28–35.
GAO Ai-gen, WANG Chun-sheng, YANG Jun-yi, et al. Distribution of deep-sea meiobenthos of the eastern and

- western portions of the COMRA's Pioneer Area[J]. *Donghai Marine Science*, 2002, 20(1): 28–35.
- [24] 倪建宇, 周怀阳, 潘建明, 等. 中国多金属结核开辟区沉积物中微量元素地球化学特征[J]. *地球化学*, 2002, 31(1): 71–77.
- NI Jian-yu, ZHOU Huai-yang, PAN Jian-ming, et al. Geochemistry of trace elements in sediments from the China Pioneer Area, northeast equatorial Pacific Ocean[J]. *Geochimica*, 2002, 31(1): 71–77.
- [25] 王春生, 何宗玉, 何德华, 等. 中国多金属结核开辟区仔稚鱼的分布特征[J]. *海洋学研究*, 2002, 20(2): 32–40.
- WANG Chun-sheng, HE Zong-yu, HE De-hua, et al. Distribution of larval and juvenile fishes in the COMRA's Pioneer Area[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2002, 20(2): 32–40.
- [26] 倪建宇, GRUPE B, MAGGIULLI M, 等. 中国多金属结核开辟区间隙水中铜、锰、镍的分布规律[J]. *海洋学报*, 2003, 25(2): 42–47.
- NI Jian-yu, GRUPE B, MAGGIULLI M, et al. Distribution of Cu, Mn, and Ni in the porewater of sediment in China Pioneer Area of the northeast Pacific[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(2): 42–47.
- [27] 李艳平, 陈敏, 黄奕普, 等. 北太平洋亚热带环流区表层水中 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 的分布与变化[J]. *应用海洋学学报*, 2004, 23(3): 261–267.
- LI Yan-ping, CHEN Min, HUANG Yi-pu, et al. Surface distribution and temporal change of ^{226}Ra and ^{228}Ra in North Pacific subtropical gyre[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2004, 23(3): 261–267.
- [28] 梁楚进, 侯一筠, 陈琪, 等. 中国多金属结核开辟区近底低频流动特征[J]. *科学通报*, 2004, 49(11): 1116–1120.
- LIANG Chu-jin, HOU Yi-jun, CHEN Qi, et al. Characteristics of low frequency flow near bottom in China's polymetallic nodules area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(11): 1116–1120.
- [29] 杨群慧, 周怀阳. 中国多金属结核合同区近表层沉积物生物扰动作用的过剩 ^{210}Pb 证据[J]. *科学通报*, 2004, 49: 2198–2203.
- YANG Qun-hui, ZHOU Huai-yang. Evidence for excess ^{210}Pb of sediments bioturbation near surface of China's polymetallic nodule contract area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49: 2198–2203.
- [30] 杨俊毅, 王春生, 刘镇盛, 等. 热带北太平洋深海小型底栖生物大尺度空间分布[J]. *海洋学研究*, 2005, 23(3): 23–29.
- YANG Jun-yi, WANG Chun-sheng, LIU Zhen-sheng, et al. The spatial distribution of tropical north Pacific deep-sea meiobenthos[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2005, 23(3): 23–29.
- [31] 陈兴群, 林荣澄. 东北太平洋中国合同区的叶绿素 a 和初级生产力[J]. *海洋学报*, 2007, 29(5): 146–153.
- CHEN Xing-qun, LIN Rong-cheng. Chlorophyll a and primary production in the Chinese Contract Area in the east-north Pacific[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(5): 146–153.
- [32] 张东声, 王春生, 杨俊毅. 东太平洋中国合同区沉积物微型生物生物量的分布特征及其影响因子[J]. *海洋学研究*, 2010, 28(1): 32–38.
- ZHANG Dong-sheng, WANG Chun-sheng, YANG Jun-yi. Distribution of sediment microbial and their impact factors of COMRA's contract area in eastern Pacific Ocean[J]. *Journal of Marine Science*, 2010, 28(1): 32–38.
- [33] RAMIRO-SÁNCHEZ B, GONZÁLEZ-IRUSTA J, HENRY L, et al. Characterization and mapping of a deep-sea sponge ground on the Tropic Seamount (Northeast Tropical Atlantic): Implications for spatial management in the high seas[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 278.
- [34] GENIN A. Bio-physical coupling in the formation of zooplankton and fish aggregations over abrupt topographies[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 50: 3–20.
- [35] PRECIADO I, CARTES J E, PUNZÓN A. Food web functioning of the benthopelagic community in a deep-sea seamount based on diet and stable isotope analyses[J]. *Deep Sea Research. II*, 2017, 137: 56–68.
- [36] 张均龙, 徐奎栋. 海山生物多样性研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(11): 1209–1216.
- ZHANG Jun-long, XU Kui-dong. Progress and prospects in seamount biodiversity[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(11): 1209–1216.
- [37] DE FORGES B R, KOSLOW J A, POORE G. Diversity and endemism of the benthic seamount fauna in the Southwest Pacific[J]. *Nature*, 2000, 405(6789): 944–947.
- [38] O'HARA T D. Seamounts: Centres of endemism or species richness for ophiuroids?[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16: 720–732.
- [39] CASTELIN M, PUILANDRE N, LOZOUET P. Molluscan species richness and endemism on New Caledonian Seamounts: Are they enhanced compared to adjacent slopes?[J]. *Deep Sea Research I*, 2011, 58: 637–646.
- [40] PANTE E, FRANCE S C, GEY D, et al. An inter-ocean comparison of coral endemism on seamounts: The case of *Chrysogorgia*[J]. *Journal of Biogeography*, 2015, 42:

- 1907–1918.
- [41] YANG Yong, HE Gao-wen, MA Jin-feng, et al. Acoustic quantitative analysis of ferromanganese nodules and cobalt-rich crusts distribution areas using Em122 multibeam backscatter data from deep-sea basin to seamount in Western Pacific Ocean[J]. *Deep-Sea Research I*, 2020, 161: 103281.
- [42] TURNEWITSCH R, DUMONT M, KIRIAKOULAKIS K, et al. Tidal influence on particulate organic carbon export fluxes around a tall seamount[J]. *Progress in Oceanography*, 2016, 149: 189–213.
- [43] STOCKS K. *Seamounts: Biodiversity and fisheries*[M]. Vancouver: Fisheries Centre, University of British Columbia, 2004: 17–24.
- [44] ROBERTS J M, WHEELER A J, FREIWALD A. Reefs of the deep: The biology and geology of cold-water coral ecosystems[J]. *Science*, 2006, 312(5773): 543–547.
- [45] CLARK M R, ROWDEN A A, SCHLACHER T, et al. The ecology of seamounts: Structure, function, and human impacts[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2010, 2: 253–278.
- [46] ANDREWS A H, CORDES E E, MAHONEY M M, et al. Age, growth and radiometric age validation of a deep-sea, habitat-forming gorgonian (*Primnoa resedaeformis*) from the gulf of Alaska[J]. *Hydrobiologia*, 2002, 471: 101–110.
- [47] KOSLOW J A, GOWLETT-HOLMES K, LOWRY J K, et al. Seamount benthic macrofauna off southern Tasmania: Community structure and impacts of trawling[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 213: 111–125.
- [48] JONES D O B, AMON D J, CHAPMAN A S A. Mining deep-ocean mineral deposits: What are the ecological risks?[J]. *Elements*, 2018, 14: 325–330.
- [49] MONTSERRAT F, GUILHON M, CORRÊA P V F, et al. Deep-sea mining on the Rio Grande Rise (Southwestern Atlantic): A review on environmental baseline, ecosystem services and potential impacts[J]. *Deep Sea Research I*, 2019, 145: 31–58.
- [50] VANREUSEL A, HILARIO A, RIBEIRO P A, et al. Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26808.
- [51] WEDDING L M, FRIEDLANDER A M, KITTINGER J N, et al. From principles to practice: A spatial approach to systematic conservation planning in the deep sea[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, 280: 1684.
- [52] CUVELIER D, RIBEIRO P A, RAMALHO S P, et al. Are seamounts refuge areas for fauna from polymetallic nodule fields?[J]. *Biogeosciences*, 2020, 17: 2657–2680.
- [53] DONG Dong, XU Peng, LI Xin-zheng, et al. Munidopsis species (Crustacea: Decapoda: Munidopsidae) from carcass falls in Weijia Guyot, West Pacific, with recognition of a new species based on integrative taxonomy[J]. *PeerJ*, 2019, 7: 80–89.
- [54] KOU Qi, XU Peng, POORE G C B, et al. A new species of the deep-sea sponge-associated genus *eiconaxius* (Crustacea: Decapoda: Axiidae), with new insights into the distribution, speciation, and mitogenomic phylogeny of axiidean shrimps[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 469.
- [55] SHEN Cheng-cheng, ZHANG Dong-sheng, LU Bo, et al. A new species of glass sponge (Hexactinellida: Sclerophora: Uncinateridae) from the Weijia Seamount in the northwestern Pacific Ocean[J]. *Zootaxa*, 2020: 4872(2): 322–334.
- [56] ZHANG Rui-yan, ZHOU Ya-dong, XIAO Ning. A new sponge-associated starfish, *Astrolirus Patricki* Sp. Nov. (Asteroidea: Brisingida: Brisingidae), from the northwestern Pacific seamounts[J]. *PeerJ*, 2020, 8: e9071.
- [57] SUN Dong, WANG Chun-sheng. Latitudinal distribution of zooplankton communities in the western Pacific along 160°E during summer 2014[J]. *Journal of Marine System*, 2017, 169: 52–60.
- [58] SUN Dong, ZHANG Dong-sheng, ZHANG Rui-yan, et al. Different vertical distribution of zooplankton community between north Pacific subtropical gyre and western Pacific warm pool: Its implication to carbon flux[J]. *Acta Oceanology Sinica*, 2019, 38: 32–45.
- [59] YANG Zi-feng, QIAN Qian-kun, CHEN Min, et al. Enhanced but highly variable bioturbation around seamounts in the northwest Pacific[J]. *Deep Sea Research I*, 2019, 156: 103190.
- [60] GUO Bin-bin, WANG Wei-qiang, SHU Ye-qiang, et al. Observed deep anticyclonic cap over Caiwei Guyot[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(10): e2020JC016254.
- [61] YANG Zhi, CHEN Jian-fang, WANG Chun-sheng, et al. Food sources of benthic communities at the Caiwei Guyot and Yap Trench, northwestern Pacific Ocean: Inferences from carbon and nitrogen isotopes[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020: 125(4): e2019JG005432.
- [62] ZHAO Mei-hong, LIU Qing-he, ZHANG Dong-sheng, et al. Deep-Sea Meiofauna assemblages with special reference to marine nematodes in the Caiwei Guyot and a polymetallic

- nodule field in the Pacific Ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 160: 111564.
- [63] LONSDALE P. Clustering of suspension-feeding macrobenthos near abyssal hydrothermal vents at oceanic spreading centers[J]. *Deep Sea Research*, 1977, 24: 857–863.
- [64] 李家彪. 现代海底热液硫化物成矿地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- LI Jia-biao. Modern submarine hydrothermal sulfide metallogenic geology[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [65] 邵宗泽. 深海热液区化能自养微生物多样性、代谢特征与环境作用[J]. *科学通报*, 2018, 63(36): 3902–3910.
- SHAO Zong-ze. Diversity and metabolism of prokaryotic chemoautotrophs and their interactions with deep-sea hydrothermal environments[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(36): 3902–3910.
- [66] 王春生, 杨俊毅, 张东声, 等. 深海热液生物群落研究综述[J]. *厦门大学学报(自然版)*, 2020, 45(2): 141–149.
- WANG Chun-sheng, YANG Jun-yi, ZHANG Dong-sheng, et al. A review on deep-sea hydrothermal vent communities[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2020, 45(2): 141–149.
- [67] DUPERRON S, BERGIN C, ZIELINSKI F, et al. A dual symbiosis shared by two mussel species, *Bathymodiolus Azoricus* and *Bathymodiolus Puteoserpentis* (Bivalvia: Mytilidae), from hydrothermal vents along the northern mid-Atlantic ridge[J]. *Environmental Microbiology*, 2006, 8: 1441–1447.
- [68] JAN C, PETERSEN J M, WERNER J, et al. The gill chamber epibiosis of deep-sea shrimp *Rimicaris Exoculata*: An in-depth metagenomic investigation and discovery of Zetaproteobacteria[J]. *Environmental Microbiology*, 2014, 16: 2723–2738.
- [69] MCNICHOL J, STRYHANYUK H, SYLVA S P, et al. Primary productivity below the seafloor at deep-sea hot springs[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115: 6756–6761.
- [70] VRIJENHOEK R C. Genetic diversity and connectivity of deep-sea hydrothermal vent metapopulations[J]. *Molecular Ecology*, 2010, 19: 4391–4411.
- [71] BEEDESSEE G, WATANABE H, OGURA T, et al. High connectivity of animal populations in deep-sea hydrothermal vent fields in the central Indian ridge relevant to its geological setting[J]. *PLoS One*, 2013, 8: e81570.
- [72] YAHAGI T, WATANABE H K, KOJIMA S, et al. Do larvae from deep-sea hydrothermal vents disperse in surface waters?[J]. *Ecology*, 2017, 98: 1524–1534.
- [73] SYLVAN J B, TONER B M, EDWARDS K J. Life and death of deep-sea vents: Bacterial diversity and ecosystem succession on inactive hydrothermal sulfides[J]. *mBio*, 2012, 3: e00279–00211.
- [74] VAN DOVER C L. Mining seafloor massive sulphides and biodiversity: what is at risk[J]? *ICES Journal of Marine Science*, 2011, 68: 341–348.
- [75] VAN DOVER C L. Inactive sulfide ecosystems in the deep sea: A review[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 461.
- [76] TAO Chun-hui, LIN Jian, GUO Shi-qin, et al. First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge[J]. *Geology*, 2012, 40: 47–50.
- [77] WANG Jian-jia, HUANG Ding-yong, LIN Rong-cheng, et al. A new species of *Austrodecus* Hodgson, 1907 (Arthropoda, Pycnogonida, Austrodecidae) from the Southwest Indian Ridge[J]. *ZooKeys*, 2013, 349: 73–79.
- [78] ZHOU Ya-dong, ZHANG Dong-sheng, LU Bo, et al. Description of a new Branchiate Scale-Worm (Polychaeta: Polynoidae) from the hydrothermal vent on Southwest Indian Ocean Ridge[J]. *Zootaxa*, 2017, 4282: 123.
- [79] ZHOU Ya-dong, WANG Yue-yun, ZHANG Dong-sheng, et al. *Branchinotogluma Bipapillata* n. sp., a new branchiate scale worm (Annelida: Polynoidae) from two hydrothermal fields on the Southwest Indian Ridge[J]. *Zootaxa*, 2018, 4482: 527–540.
- [80] ZHANG Dong-sheng, ZHOU Ya-dong, WANG Chun-sheng, et al. A new species of *Ophryotrocha* (Annelida, Eunicida, Dorvilleidae) from hydrothermal vents on the Southwest Indian Ridge[J]. *Zookeys*, 2020, 687: 1–9.
- [81] ZHOU Ya-dong, WANG Yue-yun, LI Yuan-ning, et al. First report of *Osedax* in the Indian Ocean indicative of trans-oceanic dispersal through the Southern Ocean[J]. *Marine Biodiversity*, 2020, 50(1). DOI: 10.1007/s12526-019-01034-x.
- [82] ZHOU Ya-dong, ZHANG Dong-sheng, ZHANG Rui-yan, et al. Characterization of vent fauna at three hydrothermal vent fields on the Southwest Indian Ridge: Implications for biogeography and interannual dynamics on ultraslow-spreading ridges[J]. *Deep-Sea Research I*, 2018, 137: 1–12.
- [83] ZHOU Ya-dong, CHEN Chong, SUN Ya-nan, et al. *Amphisamytha* (Annelida: Ampharetidae) from Indian Ocean hydrothermal vents: Biogeographic implications[J]. *Deep Sea Research Part I*, 2019, 154: 103148.
- [84] SUN Jin, ZHOU Ya-dong, CHEN Chong, et al. Nearest vent, dearest friend: Biodiversity of Tiancheng vent field reveals cross-ridge similarities in the Indian Ocean[J]. *Royal Society*

- Open Science, 2020, 7: 200110.
- [85] WANG Ye-jian, HAN Xi-qiu, ZHOU Ya-dong, et al. The Daxivent field: An active mafic-hosted hydrothermal system at a non-transform offset on the slow-spreading Carlsberg Ridge, 6°48'N[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 129: 103888.
- [86] QIU Zhong-yan, HAN Xi-qiu, LI Mou, et al. The temporal variability of hydrothermal activity of Wocan hydrothermal field, Carlsberg Ridge, Northwest Indian Ocean[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 132: 103999.
- [87] YI Lan, SUN Jin, CHEN Chong, et al. Dual symbiosis in the deep-sea hot vent snail *Gigantopelta Aegis* revealed by its hologenome[J]. *Nature Communication*, 2021, 12: 1165.
- [88] NINER H J, ARDRON J A, ESCOBAR E G, et al. Deep-sea mining with no net loss of biodiversity—An impossible aim[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5: 53.
- [89] VAN DOVER C, ARDRON J A, ESCOBAR E, et al. Biodiversity loss from deep-sea mining[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10: 464–465.
- [90] HALBACH P, MARCHIG V, SCHERHAG C. Regional variations in Mn, Ni, Cu, and Co of ferromanganese nodules from a basin in the southeast Pacific[J]. *Marine Geology*, 1980, 38: M1–M9.
- [91] GOLLNER S, KAISER S, MENZEL L, et al. Resilience of benthic deep-sea fauna to mining activities[J]. *Marine Environmental Research*, 2017, 129: 76–101.
- [92] LEITNER A B, NEUHEIMER A B, DONLON E, et al. Environmental and bathymetric influences on abyssal bait-attending communities of the Clarion Clipperton Zone[J]. *Deep-Sea Research I*, 2017, 125: 65–80.
- [93] AMON D J, ZIEGLER A F, DAHLGREN T G, et al. Insights into the abundance and diversity of abyssal megafauna in a polymetallic-nodule region in the eastern Clarion-Clipperton Zone[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30492.
- [94] 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*, 2011, 58: 885–897.
- [95] VANREUSEL A, HILARIO A, RIBEIRO P, et al. Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna[J]. *Science Report*, 2016, 6: 26808.
- [96] GLOVER A G, SMITH C R. The deep-sea floor ecosystem: current status and prospects of anthropogenic change by the year 2025[J]. *Environmental Conservation*, 2003, 30: 219–241.
- [97] DRAZEN J C, SMITH C, GJERDE K M, et al. Opinion: Midwater ecosystems must be considered when evaluating environmental risks of deep-sea mining[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(30): 17455–17460.
- [98] FODEN J, ROGERS S I, JONES A P. Recovery rates of UK seabed habitats after cessation of aggregate extraction[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 390: 15–26.
- [99] ROBERTS L, CHEESMAN S, BREITHAUPT T, et al. Sensitivity of the mussel *Mytilus Edulis* to substrateborne vibration in relation to anthropogenically generated noise[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2015, 538: 185–195.
- [100] CLARK M R, ALTHAUS F, SCHLACHER T A, et al. The impacts of deep-sea fisheries on benthic communities: A review[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2015, 73: 51–69.
- [101] LEVIN L A, WEI C, DUNN D C, et al. Climate change considerations are fundamental to management to deep-sea resource extraction[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(9): 4664–4678.
- [102] GOLLNER S, KAISER S, MENZEL L, et al. Resilience of benthic deep-sea fauna to mining activities[J]. *Marine Environmental Research*, 2017, 129: 76–101.
- [103] ALTHAUS F, WILLIAMS A, SCHLACHER T A, et al. Impacts of bottom trawling on deep-coral ecosystems of seamounts are long-lasting[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 397: 279–294.
- [104] CLARK M R, ROWDEN A A. Effect of deepwater trawling on the macro-invertebrate assemblages of seamounts on the Chatham Rise, New Zealand[J]. *Deep-Sea Research I*, 2009, 56: 1540–1554.
- [105] LEVIN L A, MENERINK 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: 245–259.
- [106] VAN DOVER C L. Tighten regulations on deep-sea mining[J]. *Nature*, 2011, 470(7332): 31–33.
- [107] CLARK M R, DESBRUYÈRES D, FISHER C, et al. Deep sea minerals: Sea-floor massive sulphides: A physical, biological, environmental and technical review[M]. Suva: Secretariat of the Pacific Community, 2013.
- [108] ROGERS A D. The biology of *Lophelia Pertusa* (Linnaeus 1758) and other deep-water reef-forming corals and impacts from human activities[J]. *International Review of Hydrobiology*, 1999, 84: 315–406.
- [109] VAN DOVER C L. Impacts of anthropogenic disturbances at deep-sea hydrothermal vent ecosystems: A review[J]. *Marine Environmental Research*, 2014, 102: 59–72.

- [110] MULLINEAUX L S, MILLS S W, BRIS N L, et al. 20202070.
Prolonged recovery time after eruptive disturbance of a
deep-sea hydrothermal vent community[J]. Proceedings of
the Royal Society B: Biological Sciences, 2020, 287:
- [111] VAN DOVER C L. Mining seafloor massive sulphides and
biodiversity: What is at risk?[J]. ICES Journal of Marine
Science, 2011, 67(2): 341–348.

Progress of environmental research and management related to mineral resources in international seabed

GAO Yan^{1,2}, SUN Dong¹, HUANG Hao³, WANG Chun-sheng¹, QIAN Pei-yuan⁴,
WANG Zong-ling⁵, SHI Xian-peng⁶, SONG Cheng-bing²

- (1. Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics, The Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China;
2. China Ocean Mineral Resources Research and Development Association, Beijing 100860, China;
3. The Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China;
4. Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China;
5. The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;
6. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China)

Abstract: With the increasing need for mineral resources and the development of technology and equipment, deep-sea mining has become the common concern of the global industry and scientific research community. It is generally believed that deep-sea mining will inevitably lead to disturbance or even damage to the environment and biological communities of the deep sea. This view has accelerated the development of the “Regional Environmental Management Plan” and “Mining Code” by International Seabed Authority. Based on the ecosystem perspective and methodology, this paper summarized the characteristics of deep-sea ecosystems and environment of the three types of deep-sea mineral resources, reviewed a series of studies on environmental baseline and environmental impact assessment carried out with the comprehensive test of deep-sea mining system at home and abroad, and concluded the potential impacts of deep-sea mining activities on three types of ecosystems including deep-sea plain, seamount and mid-ocean ridge hydrothermal area. Meanwhile, this paper also briefly reviewed the major environmental research progress promoted by China Ocean Mineral Resources Research and Development Association in the past three decades, and the efforts made by China for the environmental management of international seabed. Based on the analysis on the progress of the balance between development and environmental protection made by International Seabed Authority, this paper put forward suggestions on China’s participation in regional environmental management.

Key words: deep-sea mining; environmental impacts; Regional Environmental Management Plan; biodiversity

Foundation item: Projects(DY135-E2-1, DY135-E2-2, DY135-E2-3, DY135-E2-4, DY135-E2-5) supported by China Ocean Mineral Resources Research and Development Association; Projects(41806204, 42076122) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2021-06-03; **Accepted date:** 2021-08-31

Corresponding author: SONG Cheng-bing; Tel: +86-10-68030504; E-mail: songcb@comra.org

(编辑 何学锋)