

GREENPEACE 绿色和平

深海瑰宝之下

深海矿产开发现状及其环境影响机制梳理

作者

陈书凌 庞雨萌

编辑

李小溪 周薇

致谢 (按姓氏首字母顺序排列)

保航 董世杰 李茹萍 薛桂芳 张安琪 张雨靖 张朝晖

简报设计

贾森迪

著作权及免责声明

除标明引用的内容以外,本简报内所有内容(包括文字、数据、图表)的著作权及其他知识产权归绿色和平所有。如需引用本简报中的数据及图表,请注明出处。标明由绿色和平拍摄的照片必须取得绿色和平授权后方可使用。

本简报为基于有限时间内公开可得信息研究产出的成果。如本简报中相关环境信息存在与真实信息不符的情况,欢迎与我们联系:greenpeace.cn@greenpeace.org。由于信息获取渠道的局限性,绿色和平不对简报中所含涉信息的及时性、准确性和完整性作任何担保。

本简报资料收集时间为2023年11月30日至2024年3月26日,研究期间之外,各信息平台上公开的环境信息如有被更改或增加,不被包括在此研究结果分析中。本简报仅用于政策参考、信息共享和环保公益目的,不作为公众及任何第三方的投资或决策的参考。

发布时间:2024年5月

封面图:《深蓝奇遇》

执行摘要 1

第一章 深海采矿含义及现状 2

1.1 深海采矿简介	3
1.2 三种主要的深海矿产资源及其分布	3
1.2.1 多金属结核	3
1.2.2 多金属硫化物	3
1.2.3 富钴铁锰结壳	3
1.3 国际海底区域的深海采矿管理	5
1.3.1 国际海底管理局介绍	5
1.3.2 国际海底管理局关于深海采矿的管理规定	6
1.3.3 “两年规则”	9
1.4 深海采矿进程备受关注	10

第二章 深海采矿的环境影响机制 11

2.1 深海采矿的生态环境影响	12
2.1.1 生物多样性的威胁	14
2.1.2 金属类的化学污染	14
2.1.3 海底悬浮物的生物影响	14
2.1.4 噪声、灯光和震动产生的物理扰动	14
2.2 其他潜在威胁	14

第三章 总结与建议 16

参考文献 18

Executive Summary

执行摘要

近年来,深海采矿日益受到人们关注,同时也引发了许多讨论。对于大多数人来说,深海采矿和深海一样,都是陌生的领域。本简报旨在通过梳理学术文献、专业报告和会议简报等公开材料,系统地呈现深海采矿的起源、研究进展、管理现状和各方态度,以期为读者提供必要的背景信息,助其全面理解人类与海洋的关系。

深海采矿是指从水深约1,000米以下的深海海底挖掘、提取矿产资源的过程,目前主要涉及到三种矿产资源:多金属结核,多金属硫化物和富钴铁锰结壳。这些矿产资源主要分布在深海平原、大洋中脊和深海海山,这些区域往往也具备着丰富、独特的生物多样性。此外,深海矿产资源的分布区大部分位于国家管辖范围以外的国际海底区域。¹

目前深海采矿在全球范围内仍处于探矿和勘探阶段,尚未进入商业开发。国际海底区域内的深海采矿活动由国际海底管理局(简称“海管局”)统一管理,其中有30个勘探合同处在有效期内。迄今为止,海管局已经出台了针对探矿和勘探活动的相关管理规定,而关于开发的规章草案仍处在谈判阶段。

2021年7月,加拿大矿产开发企业The Metals Company的全资子公司瑙鲁海洋资源有限公司(NORI)向海管局提交深海矿产资源开发申请而触发了“两年规则”。按照规则,海管局须在两年内,即2023年7月前,完成开发规章的制定。然而由于此前各方未能就开发规章草案的文本内容达成一致,仍需进一步磋商,预计将于2025年完成。这意味着在开发规章尚未到位的前提下,采矿公司有可能递交矿产资源开发的申请并获得批准。

研究显示,深海采矿可能给海洋生态环境造成诸多破坏及威胁:采矿活动将直接移除作业范围内的深海生境;深海采矿过程中释放的重金属等化学物质以及搅动起的悬浮物将污染周边的深海环境;采矿作业引发的噪音、震动和光线等物理干扰会扩散至范围更加广阔的海域……这些影响有可能导致脆弱的深海生态系统功能发生不可逆转的衰退或丧失,而依赖特殊深海生境的物种也将因此受到威胁。深海生态系统具备的重要生态学意义及其普遍的脆弱性亟需得到我们的重视。此外,深海采矿在经济上的低投入产出比以及其对沿海国家和社区的潜在社会经济影响也应被充分考量。

由于人类对深海认知的诸多空白、采矿活动复杂的生态环境影响和高评估难度以及开发规章的缺失,越来越多的国家、社会组织和企业开始明确表达对开启深海采矿的担忧。当前形势下,不论是各国政府,还是企业决策者,都应谨慎对待深海采矿,遵循预防性原则,暂缓深海矿产商业开发的进程,并为深海研究和法规制定创造机会。

随着人们对海洋的重要性及其所受威胁的认识不断提升,对于保护海洋生态环境的重视也在日益增长。《联合国海洋法公约》提出了保护海洋生态环境的原则;2022年,“在2030年前保护30%海洋”(简称“3030”)的目标得到通过;2023年,历史性的《<联合国海洋法公约>下国家管辖范围以外区域海洋生物多样性的养护和可持续利用协定》²达成,更是为实现海洋生态保护目标提供了有力工具。

在认识海洋、评估人类活动影响、完善海洋管理措施方面,我们仍需加倍努力,以确保对海洋资源的开发建立在完备的保护基础之上。

全球海洋连通一体并与人们的生产生活紧密相连,在这个蓝色星球上,没有任何人或国家是一座孤岛,我们的行动与海洋的未来息息相关。我们期待各国携手合作,共担责任,一起提升海洋保护和可持续管理。

第一章

深海采矿含义及现状

深海采矿是指从深海海底挖掘并提取矿产资源的过程。海洋学上，深海通常指代水深超过1,000米的海域，³全球深海海域面积占比可达到90%。⁴虽然在水深大于1,000米的海域，几乎没有光照和光合作用，但深海依然孕育着丰富的生物多样性，也潜藏着诸多矿产资源。其中，深海矿产的发现最早可以追溯到19世纪七十年代的英国皇家海军舰艇“挑战者号”科学考察。⁵

1.1 深海采矿简介

不管是在国家管辖海域,还是在国际海底区域(即超出国家管辖范围的海床、洋底及其底土,可参考图2),深海矿产都有分布,但大部分都在国际海底区域。^{6,7}深海矿产的开发可分为先后三个阶段:探矿(prospecting)、勘探(exploration)和开发(exploitation)。尽管深海矿产尚未进入商业开发阶段,近年来广泛的矿产勘探、科学研究和产业布局都展示出各国政府和企业层面对深海矿产的格外关注。新西兰⁸和巴布亚新几内亚⁹均曾经在国家管辖海域开展过深海采矿项目,但目前均已暂停。库克群岛、日本等国家仍在国家管辖海域内进行着深海矿产勘探工作。2024年,挪威通过议会投票,开放了针对挪威管辖的北极水域内的深海矿产勘探开发申请。¹⁰

1.2 三种主要的深海矿产资源及其分布

目前,深海采矿主要涉及到的三种矿产为多金属结核,多金属硫化物和富钴铁锰结壳。

1.2.1 多金属结核

多金属结核是一类富集镍、铜、锰、钴和钼¹¹的矿物堆积物,形状大小类似土豆,呈地毯状大面积分布于水深约3,000–6,000米被沉积物覆盖的深海平原上。^{12,13}

多金属结核广泛分布在太平洋和印度洋的海盆中,其中最著名的集中分布区是东太平洋克拉里昂-克利珀顿断裂带(Clarion-Clipperton Zone,简称“CCZ”)。¹⁴据保守估计,克拉里昂-克利珀顿断裂带结核矿场是全球已知面积和吨位最大的结核矿场,其含有的许多矿产元素吨位甚至大于全球陆地储量。

最新的研究表明,迄今为止,在克拉里昂-克利珀顿断裂带发现的物种中92%可能是学术界新发现的物种(已记录到的5,578种中只有436种已经得到命名)。¹⁵该断裂带可能是生物多样性最高的区域之一。^{16,17}

越来越多的证据表明,多金属结核可能是影响深海生物多样性、生物丰富度和生态系统功能的关键因子之一。^{18,19}多金属结核为微生物群落提供了重要的栖息地,这些微生物群落对深海碳固定、碳循环和碳储存都起着决定性作用。^{20,21}同时,多金属结核也具有重要的教育和科学研究价值——多金属结核矿场独特的生态环境和生物多样性,可以为生物进化学的研究提供新的视角。^{22,23}

由于克拉里昂-克利珀顿断裂带结核矿场占地面积大且囊括不同的地质类型和生态环境,包括地形条件、生态系统组成以及多金属结核大小和密度在内的基线数据仍存在大量空白。^{24,25}然而相比之下,学术界对其他结核矿场的认知则更为有限。

1.2.2 多金属硫化物

多金属硫化物是富含铜、铅、锌、铁、钼、金和银的矿物沉积物,多出现在水深2,500米的海域。²⁶其在活跃的热液喷口²⁷附近产生,并在喷口活动暂停或永久停止后沉积,原理和陆地上的火山类似。^{28,29}

尽管数量众多,但从面积而言,热液喷口仍然是地球上特殊的栖息地类型。³⁰因具有高温、缺氧、重金属浓度高等极端特质,深海热液喷口附近栖息的生物群落属于特有类群,深海热液喷口甚至被认为是生命起源地之一。热液喷口区的大多数生物类群在生活史初期是阶段性浮游生物,随海流在不同喷口之间迁移,这意味着热液喷口之间存在一定的生态连通性,这也给保护工作提出了新的需求。³¹然而,目前只有四分之一的热液喷口受到了一定程度的保护。³²

过往的科学研究主要集中在活跃的热液喷口的生态环境特点和生化合成反应,研究表明,热液喷口周边的生态环境非常脆弱。^{33,34}然而,很多多金属硫化物的勘探合同区域都集中在大西洋中脊和印度洋中脊的热液喷口区域,有关这些区域的物理化学和生物生态环境研究都十分匮乏。^{35,36}

1.2.3 富钴铁锰结壳

富钴铁锰结壳中具有经济利益的金属包括钴、锰、镍、钼、碲、铂、钒和稀土元素,遍布在水深800-2,500米的海山和海脊岩石表面。^{37,38}

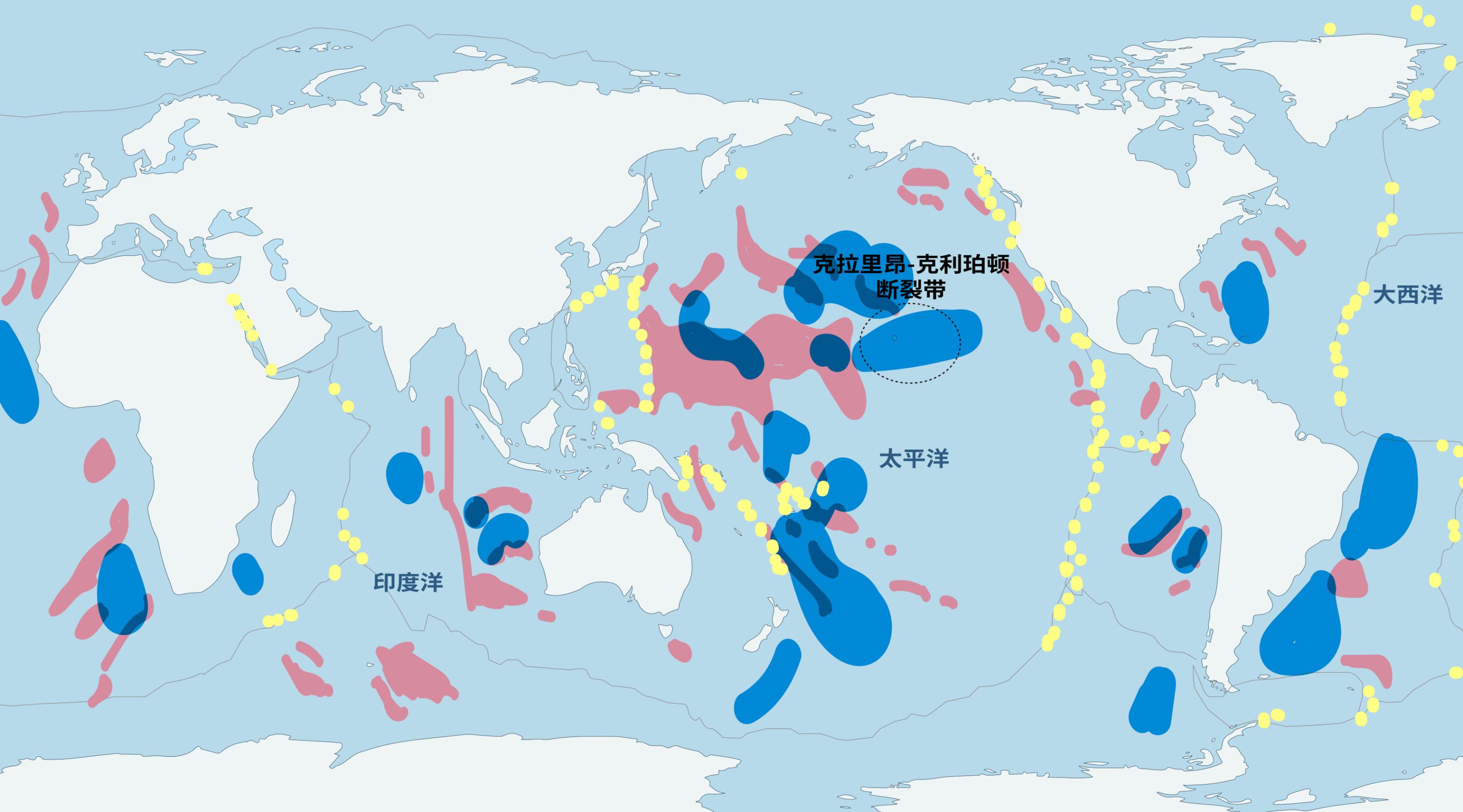
太平洋原始地壳带中蕴藏着约75亿吨的富钴铁锰结壳(干重)。³⁹由于海底海山,像陆地山脉一般,分布极不规则,大小不一,连绵不断或相隔甚远,这些地形特点增加了海山研究的难度。⁴⁰

迄今为止的研究仅仅涵盖了世界上0.4%-4%的海山。⁴¹与活火山口类似,海山生态系统涵盖不同深度和温度的栖息环境,也具备较高的生物多样性和生态脆弱性。深海海山遍布着众多珊瑚、海绵类生物等附着滤食生物,这为生态系统中的其他生物,诸如鱼类、甲壳动物、软体动物、棘皮动物等,提供了重要的食物来源。^{42,43,44,45}

国际海底管理局签发了在西太平洋广阔海域的富钴铁锰结壳勘探合同。考虑到海山生态系统重要的生态学意义及其普遍的脆弱性,未来若想推进深海采矿,我们亟需更多对西太平洋海山生态环境的调查和研究来支撑。^{46,47}

图1 三种深海矿产资源在全球范围内的分布图
原始图片来自Miller et al.(2018)⁴⁸

● 多金属结核 ● 富钴铁锰结壳 ● 多金属硫化物



克拉里昂-克利珀顿
断裂带

大西洋

太平洋

印度洋

1.3 国际海底区域的深海采矿管理

《联合国海洋法公约》(UNCLOS, 以下简称“《公约》”), 是海洋领域最重要的一部国际条约。《公约》确立了国家管辖海域、公海与国际海底区域(即“区域”⁴⁹)的范围, 并对沿海国及其他国家的权利和义务进行了界定。《公约》自1994年生效以来, 为矿产资源勘探开发、海洋环境保护等领域的管理规章制定提供了框架。

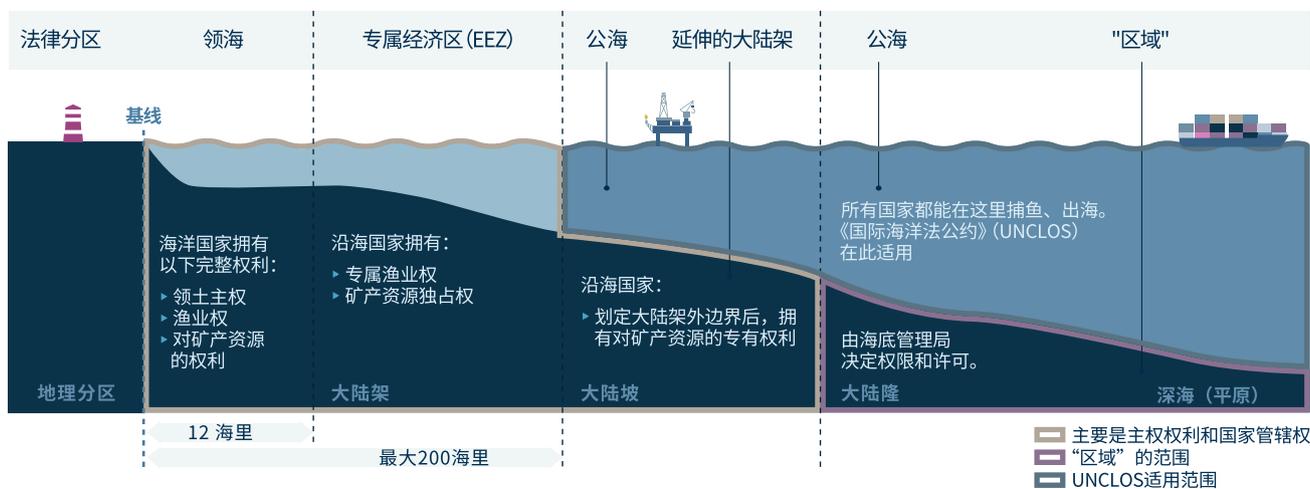
根据《公约》对海洋空间的划分, 海域主要分为内水、领海、毗连区、专属经济区 (EEZ)、大陆架、公海和国际海底区域 (即

“区域”) (如图2)。国家管辖海域囊括内水、领海、毗连区、专属经济区和大陆架, 在国家管辖海域内开展的深海勘探和矿产开采由各国管理。其中, 每个国家有权将海岸线向外延伸12海里以内的区域划定为领海, 各国还可以将距离其海岸线200海里以内的水域、海底划定为专属经济区。

国家管辖海域范围以外的海洋空间包括公海及“区域”。《公约》设立了“区域”及其资源是人类共同继承财产的原则, “区域”内的深海探矿、勘探和开发由国际海底管理局统一管理。国际海底管理局 (ISA, 简称“海管局”), 是联合国体系内负责管理“区域”资源的机构。⁵⁰

图2《联合国海洋法公约》划分出的海洋空间示意图⁵¹

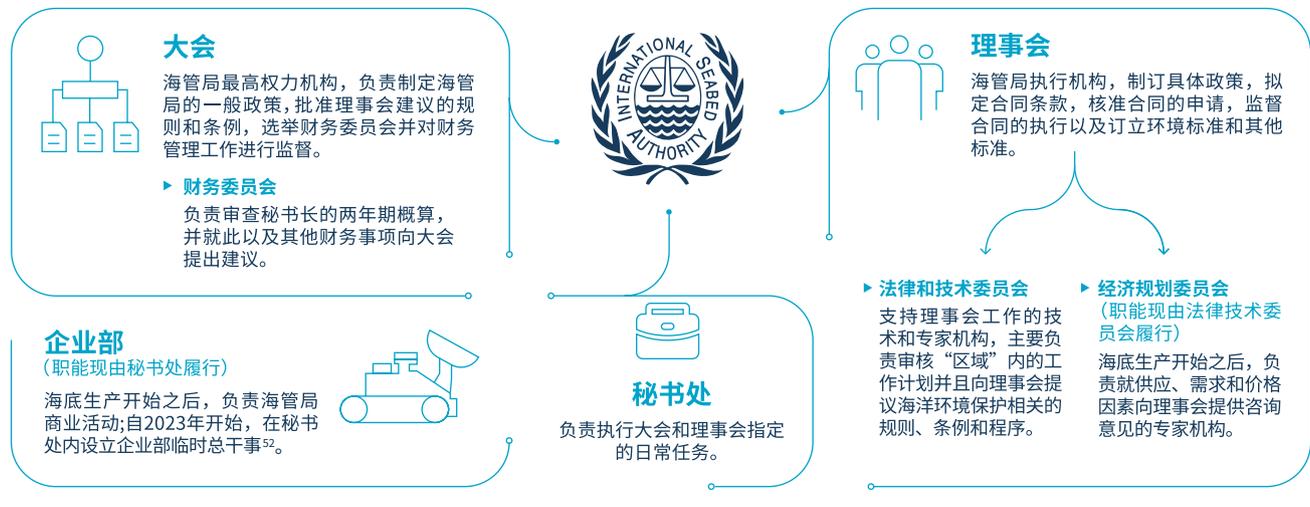
原始图片来自CC-BY-SA PETRABOECKMANN.DE / OCEAN ATLAS 2017 | SOURCE: UNCLOS / WBGU



1.3.1 国际海底管理局介绍

图3 国际海底管理局组织结构

整理自 <https://www.isa.org/jm/organs/>



国际海底管理局是根据《联合国海洋法公约》成立的、专门组织和管理所有与国际海底区域矿物资源相关行为活动的国际组织。国际海底区域占世界海洋总面积的54%，其中的“资源”⁵³是人类共同继承财产。国际海底管理局的主要任务之一是有效地进行海洋环境保护，以防止深海海底相关活动可能带来的有害影响，从而造福全人类社会的发展。

国际海底管理局目前参与决策和管理的部门主要包括大会、理事会和秘书处(如图3)。大会是海管局的最高权力机构，大会是海管局的最高决策和政治机关，《联合国海洋法公约》的所有缔约国自动成为ISA大会的成员国，其中包括167个成员国和欧盟。大会负责制定海管局的一般政策，批准理事会建议的规则和条例，选举财务委员会并对财务管理工作进行监督。

理事会作为海管局的执行机构，分为五个组，分别代表各类海底矿物所含金属的主要消费国(A组，四个席位)、在国际海底区域活动的主要投资国家(B组，四个席位)、深海矿产有关金属的主要陆地生产国(C组，四个席位)、具有特殊利益的发展中国家(D组，六个席位)、按公平地域分配产生的国家(E组，18个席位)，共包含36个席位，具体国家由大会选出。⁵⁴

理事会下属的法律和技术委员会(LTC，简称“法技委”)是为支持理事会工作而设立的技术和专家机构，由41位专家组成，主要负责审核“区域”内的工作计划并且向理事会提议海洋环境保护相关的规则、条例和程序。

秘书处通过其行政服务、法律事务和环境管理、矿产资源办公室以及秘书长执行办公室提供行政和法律服务以及科学和技术投入。在实现商业性海底采矿之前，负责海管局商业活动的企业部将由秘书处代替履行职能。⁵⁵

1.3.2 国际海底管理局关于深海采矿的管理规定

国际海底区域的采矿活动包括三个阶段：探矿、勘探和开发。其中，“探矿”指没有专属权利地探寻矿床，估算矿床的分布情况、面积、主要成分及其经济价值；“勘探”是指在专属权利的保障下探寻分析矿床的基本情况，测试各类系统和设备，以及研究环境、经济、商业等有关因素；“开发”则指基于探矿和勘探结果进行矿产资源开发的过程。《联合国海洋法公约》为“区域”内活动提供了总体监管框架，并委托海管局制定矿产资源勘探和开采所有必要的规则、条例和程序(RRP)，用于规范国际海底区域矿物的探矿、勘探和开发三个阶段。⁵⁶

图4 深海采矿管理条例的制定进程



海管局分别通过了“区域”内多金属结核(2000年)、多金属硫化物(2010年)和富钴铁锰结壳(2012年)的探矿和勘探规章。^{57,58}若有承包者⁵⁹计划进行勘探,需要在担保国(sponsor)的支持下向海管局提交勘探合同的申请,一份勘探合同的时效通常为15年。目前有效的勘探合同一共30份(图5):20份合同由10个国家(中国、日本、韩国、印度、俄罗斯、法国、德国、波兰、库克群岛、基里巴斯)通过其国有企业或政府机构持有,1份合同由政府间组织持有,另有9份合同的承包方为私营公司。当前30份勘探合同中,多金属结核占19份,多金属硫化物占7份,富钴铁锰结壳占4份。⁶⁰

海管局法技委于2014年开启矿产开发的管理规章(简称“开发规章”)的制定工作。经过初步讨论和对利益相关方的调查,2016年海管局法技委发布了“‘区域’内矿产资源开发和标准合同条款规章工作草案”,此后各成员国就开发规章草案中包括惠益分享机制、缴费和检查机制等存在分歧的议

题展开协商。2019年3月,法技委向理事会提交了开发规章的第四版草案,但在2019年至2020年的会议上,草案审议工作进展甚微,2020年理事会决定设立三个非正式工作小组(IWG)来推进法规的讨论工作。根据相关条款,开发规章的通过需要理事会内部协商一致,因此开发规章草案目前仍在谈判进程中,且短时间内难以出台。2023年,海管局理事会暂定于2025年出台开发规章,并将在2024年再次评估这一出台时间。

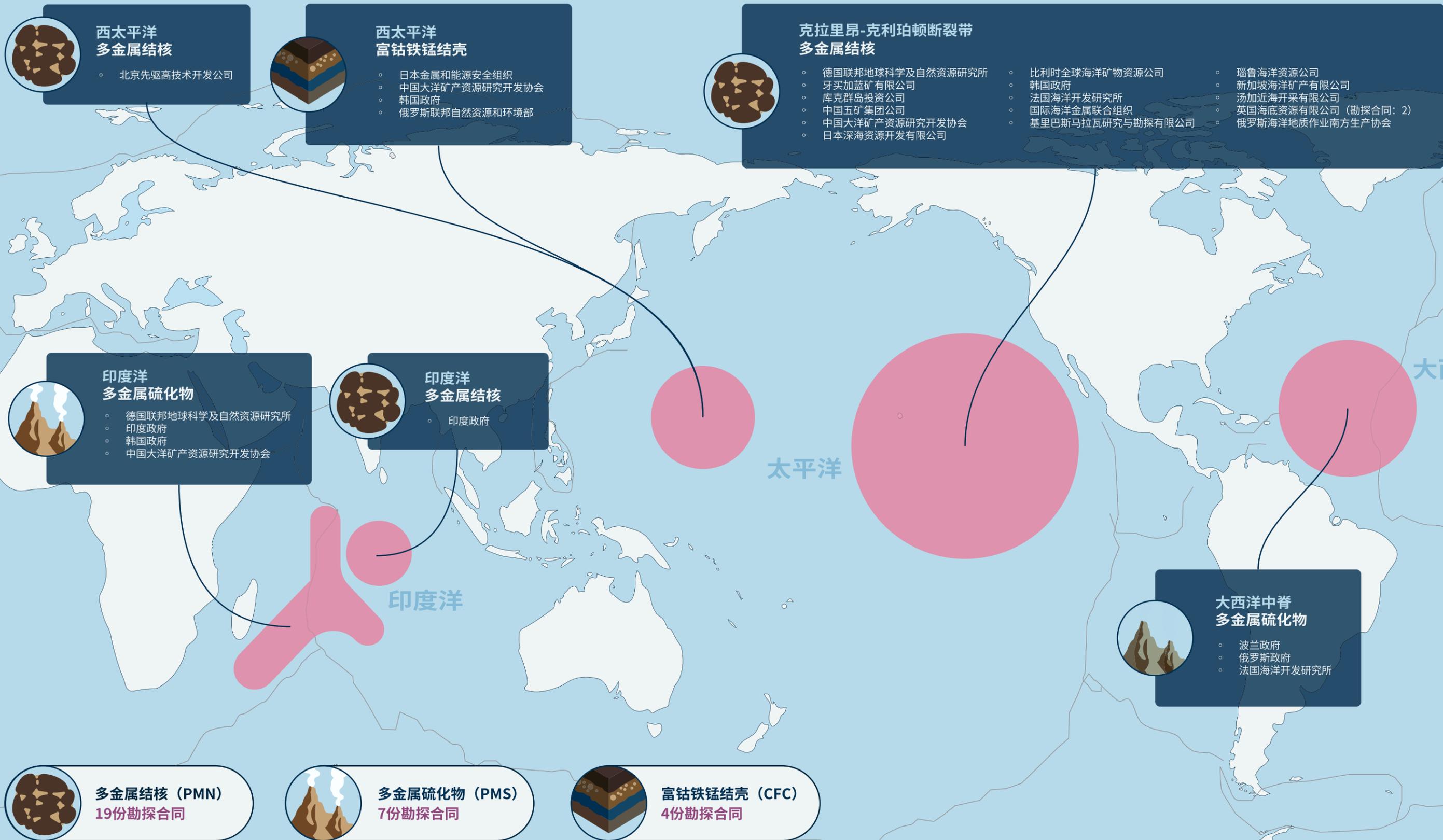
联合国于2023年达成的《<联合国海洋法公约>下国家管辖范围以外区域海洋生物多样性的养护和可持续利用协定》(BBNJ,常简称为《海洋生物多样性协定》)进一步明确要求包括深海采矿在内的活动需要在符合国际海底管理局的行为规范的同时,要按照该公约进行深海生物多样性的保护并评估开采活动产生的环境影响,以及保证项目实施过程中的透明度。⁶¹

表 1 三类深海矿产资源勘探合同在不同地理位置的数量分布

整理自<https://www.isa.org/jm/>

地理位置	多金属结核 勘探合同	多金属硫化物 勘探合同	富钴铁锰结壳 勘探合同
克拉里昂-克利珀顿断裂带	17		
中印度洋盆地	1	3	
大西洋中脊		3	
西南印度洋中脊		1	
西太平洋	1		4
总计	19	7	4

图5 国际海底管理局颁发的30份勘探合同的地理分布⁶²



1.3.3 “两年规则”

2021年7月,加拿大公司 The Metals Company (前身为 DeepGreen, 简称“TMC”)的子公司瑙鲁海洋资源公司(简称“NORI”)宣布计划对海底矿产资源进行商业开发,并通过担保国瑙鲁向海管局提交开发申请。这一举动触发“两年规则”,即海管局须在两年内颁布开发规章。按照规定,至2023年7月,假使海管局没有正式颁布开发规章,瑙鲁可以在没有明确海底环境监管的规范下申请开发活动许可。在2023年7月备受瞩目的海管局理事会会议上,各国就“两年规则”触发后续程序展开讨论,但未能达成一致,这意味着接下来矿产公司可以在任何时候提交工作计划。

“两年规则”源于1994年《关于执行<联合国海洋法公约>

第十一部分的协定》(简称“《执行协定》”),即如果在开发申请提交的两年内,海管局理事会未能完成相关法规流程的制定,理事会需要审议并暂时核准相关的工作计划(plan of work)。⁶³目前,关于开发工作计划审批决策机制仍存在不确定性,尤其是法技委是否参与工作计划的审议决策,将在很大程度上影响开发工作计划的通过与否。如果法技委不参与,理事会将根据出席成员的投票作出决策;如果法技委参与其中,不论法技委批准与否,理事会都将根据法技委的建议作出决策,除非有至少三分之二的理事会成员投票表示反对。这意味着,如果法技委参与决策并建议批准申请,理事会将很难推翻该建议。同时,由于开发规章尚未出台,当前决策的法律依据仅有《公约》和《执行协定》,其对于环境的关注度远不及财政、技术和不歧视原则,这些都将有利于开发许可的通过。⁶⁴



在印度洋记录到的领航鲸群
© Alex Westover

1.4 深海采矿进程备受关注

随着深海科研的不断推进,行业专家和各国政府逐渐意识到深海这片生境的珍贵和特殊及其中孕育的丰富生物多样性,深海采矿带来的负面影响也开始变得清晰。然而,深海采矿在环境、生态和社会影响及其规制上依然存在大量空白。同时,随着2022年保护海洋的“3030”目标⁶⁵被各国公认,2023年《海洋生物多样性协定》通过,公海生物多样性保护受到了更多国际社会关注。在此背景下,越来越多的国家、社会组织和企业公开表达对开启深海采矿的担忧。

根据深海保护联盟(DSCC)的统计,截至2024年4月,共有25个国家作出反对深海采矿的表态。其中,太平洋岛国帕劳总统在2022年里斯本联合国海洋会议上呼吁暂停深海采矿,并成立了国家联盟。斐济和萨摩亚是最早加入该联盟的国家,紧随其后的是密克罗尼西亚联邦。⁶⁶

德国、加拿大、智利、哥斯达黎加和墨西哥等20个国家提出基于当前科学认知以及相应规则、规章和程序的空白,应暂停深海采矿的进程。加拿大政府于2023年2月宣布:由于国内尚不存在深海采矿相关的法律框架,在没有严格的监管框

架的情况下,加拿大将不会授权在其管辖范围内的海域进行深海采矿。⁶⁷

2022年,法国总统马克龙在第二届联合国海洋大会上强烈建议制定出一个法律框架来停止深海采矿,并且不再允许新的行业活动发生,从而避免对海洋生态系统带来更多危害。⁶⁸

2023年7月19日,在国际海底管理局理事会会议期间,全球37家主流金融机构(总资产超过3.3万亿欧元)发表联合声明,反对在全面了解环境、社会和经济风险以及替代方案之前推进深海采矿,并提到增加循环经济投资将是更有效的方式。⁶⁹与此同时,来自44个国家超过800名科学家和政策专家签署了一份呼吁暂停海底采矿的声明。⁷⁰

2024年联合国《保护野生动物迁徙物种公约》第十四届缔约方大会通过了一项决议:基于深海采矿对海洋生态环境和包括海龟、鲸类和鲨鱼在内的迁徙物种的广泛影响,决议敦促各缔约方在没有充足科学研究支撑决策的情况下不要开展深海采矿。⁷¹

图6 反对深海采矿的国家分类梳理

原始图片来自深海保护联盟(DSCC)⁷²



第二章

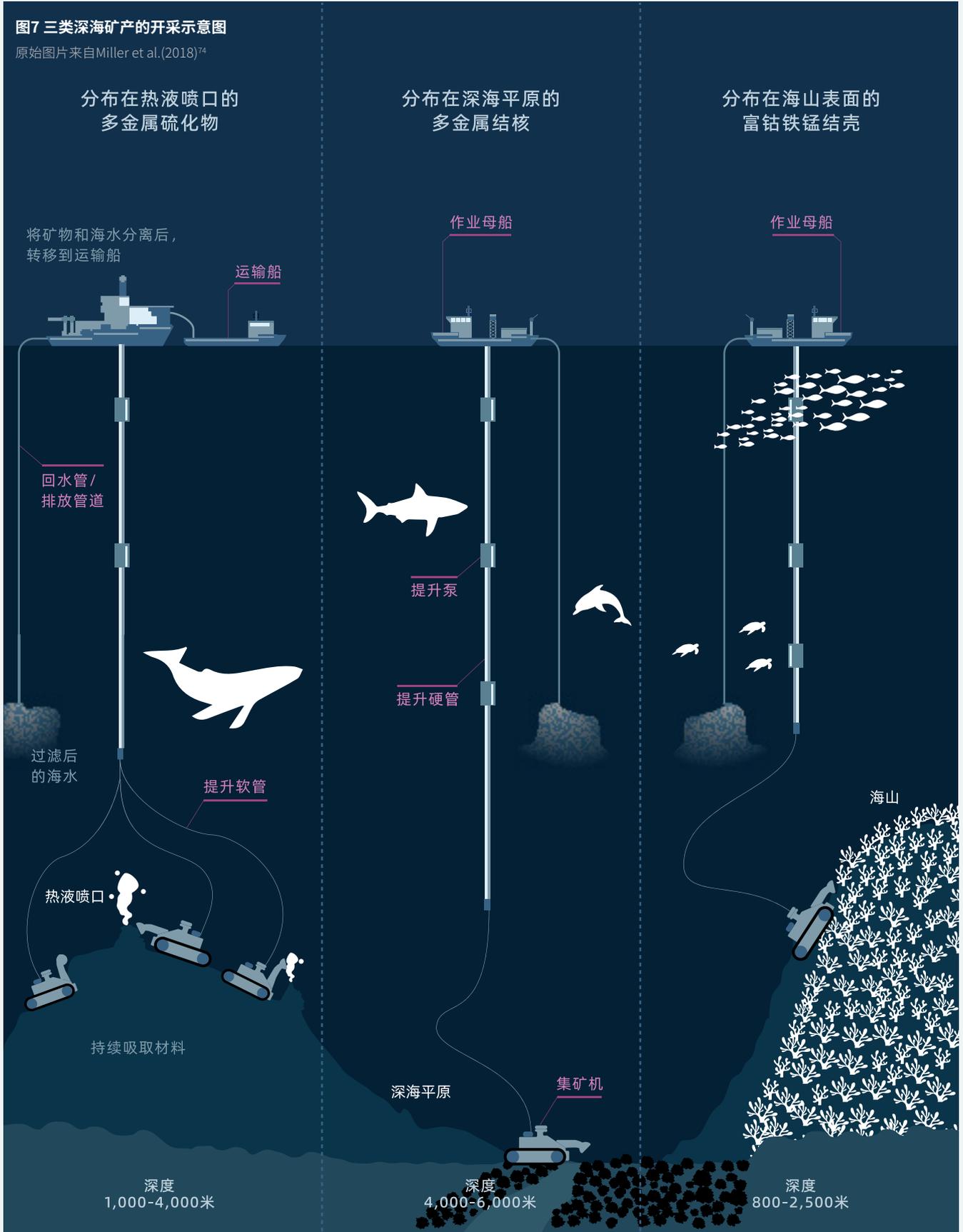
深海采矿的环境影响机制

鉴于深海海底环境还存在着许多未知,深海采矿对环境产生的潜在影响引起了社会各界的担忧。一些以商业为目的的试开采,仅在多金属结核矿床进行了小范围、低强度的环境测试试验,至今为止尚未能对深海采矿可能带给海洋环境的影响进行全面科学地评价。⁷³科学家只能通过其他类似勘探活动可能产生的影响进行类比。

2.1 深海采矿的生态环境影响

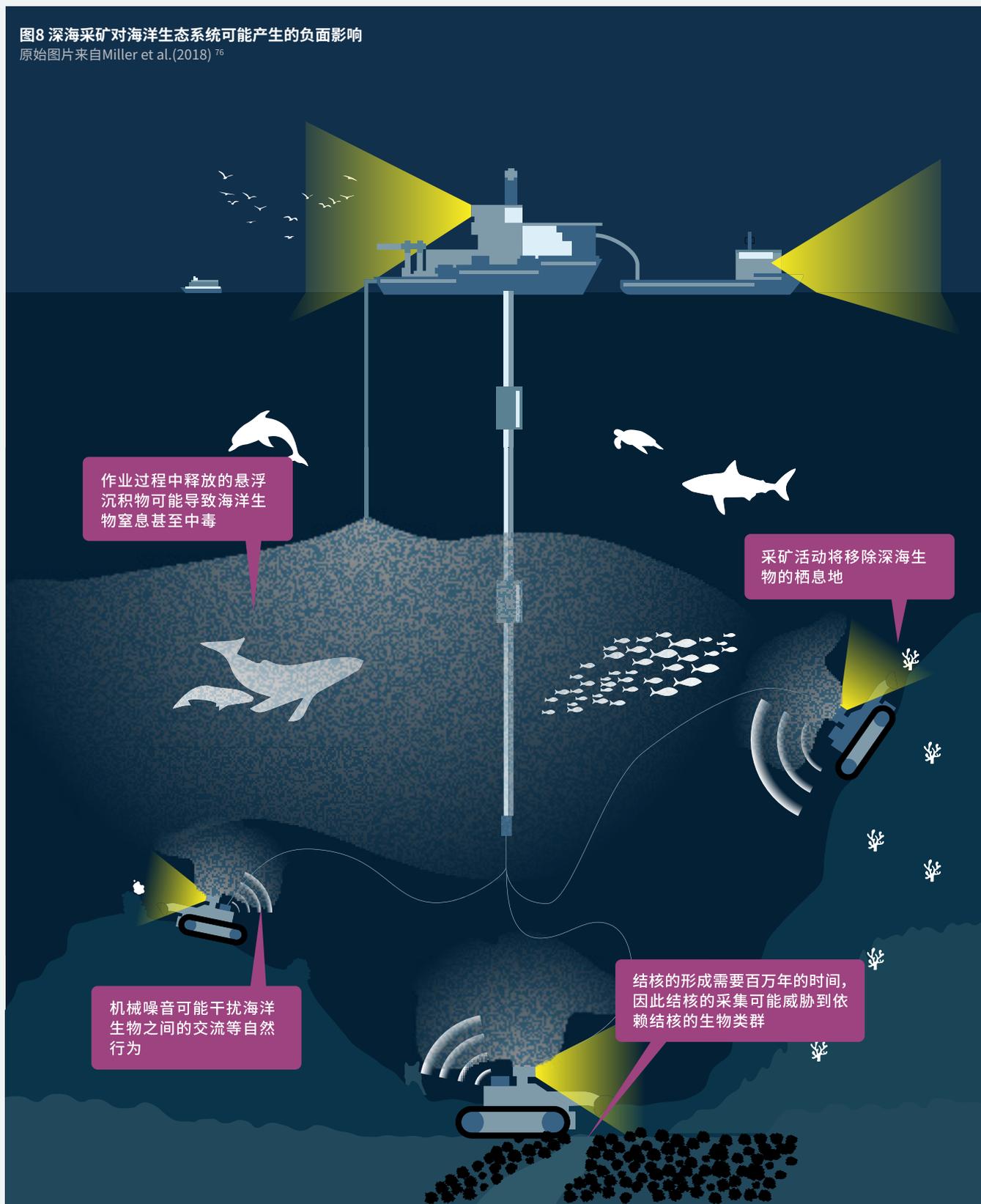
图7 三类深海矿产的开采示意图

原始图片来自Miller et al.(2018)⁷⁴



对于多金属硫化物和富钴结壳来说，海底矿产资源开采大多需要同时使用三种器械：1) 切割机器来平整海底表面、创建平台，2) 分割机器进一步分割平台至小块矿石，3) 最后利用连接着泵和升降机的收集系统，将分解后的矿石吸上来；⁷⁵

若是开采平铺在海床上的多金属结核，前两个环节则可以省去，更多是直接依赖采矿车将矿石收集、破碎并利用泵和管道系统将矿浆提升至作业母船。依据上述的开发过程，深海采矿过程可能会带来大致以下几类环境影响(图8)：



2.1.1. 生物多样性的威胁

不管是对多金属结核物、多金属硫化物还是富钴铁锰结壳的开发,本质上都是在深海海底生物的附着基质上进行开采和破坏,将对开采区域内的栖息地和生物多样性产生严重的负面影响。据估计,单次开采活动会破坏6-15,000平方公里的海底表面、近10平方公里的热液喷口环境或10-100平方公里的海山表层。^{77,78}

在全世界深海采矿试验扰动或模拟扰动项目中,最著名的是德国1989年在秘鲁海盆(东南太平洋)开展的扰动和再迁入实验(DISCOL),该实验对扰动海域实行了长期观测。⁷⁹实验显示,扰动将影响微生物群落,而该区域中微生物参与的包括碳循环在内的生物地球化学循环等关键深海生态系统服务功能可能需要至少50年才能恢复到扰动前的水平。^{80,81,82}由于深海物质沉积速率极低,多金属结核物的再生速率非常缓慢(约250毫米/百万年)。因此,附着在海底结核表面的生物类群可能需要数百万年才能恢复。^{83,84,85}

这些证据表明,深海采矿可能导致矿区深海生态系统的生物多样性和生态系统功能发生不可逆转的变化和衰退丧失,尤其在直接受干扰的区域,甚至可导致依赖结核物生存的物种局部灭绝。^{86,87,88}尽管当前在热液喷口或是海山山脊的试开采仍十分有限,这些开采活动依然将不可避免地对生态系统和生物多样性带来破坏。由于生物物种分布具有区域性,在连通性弱的热液喷口周边或是孤立的海山生态系统周围进行开采活动,则更容易造成物种局部灭绝。

2.1.2 金属类的化学污染

采矿的过程会释放大量包括金属在内的化学物质,从而严重影响海底水化学环境。硫化物矿物具有高氧化性,所以硫化物矿物的开采预计具有最大的金属毒性潜力,且有可能导致底栖生物摄入该物质而产生亚致死和致死影响。^{89,90}评估毒性及其对深海物种的影响极具挑战性,因为科学上关于深海动物对毒素反应方面的认知基本为空白。⁹¹尽管如此,我们依然能从一些维度上预估较高的金属浓度对海底环境的影响,例如海底环境中溶解氧含量的下降、重要经济鱼类体内毒素积累的增多等。⁹²

2.1.3 海底悬浮物的生物影响

结核矿场的开采试验还指出,采矿引起的大量悬浮沉积物,不仅会造成水体长时间浑浊,还可能堵塞呼吸器官的表面使生物窒息,损害大部分底栖动物群中悬浮物滤食者的滤食器官,甚至造成生物之间的信号交流困难等。^{93,94}自然环境下,海底水层中的悬浮物浓度很低,因此生活在水底和海表面的生物群体会对大量悬浮物引起的生态变化极其敏感。⁹⁵这最终可能导致整个生态系统及其功能发生重大变化,甚至影响重要的经济鱼类。

此外,悬浮物重新沉积也需要花费较长的时间。在这期间,一方面,长时间漂浮的悬浮物会影响游泳动物(如底层鱼类)和滤食性底栖动物(如海绵)的生物活动;另一方面,悬浮物很可能会沉积到新的地方,对新的沉积地点的底栖生物进一步造成未知的影响。^{96,97,98}目前,没有公开可用的采矿设备测试数据能支持对采矿作业排放的沉积物进行准确的数量级评估。据估计,一次多金属结核物采矿作业每天开采约1-2平方公里,排放30,000-80,000立方米的沉积物、碎矿粉和海水,由于采矿造成的水体浑浊和悬浮物再沉积可能导致海底环境受到扰动的面积比直接采矿的区域大出2-4倍。^{99,100,101}

2.1.4 噪声、灯光和震动产生的物理扰动

深海采矿同时会带来噪音、震动和光线等物理方面的干扰。由于缺乏采矿技术伴随的具体的物理条件信息,这些物理因素可能对深海环境产生的影响尚难以被准确评估。¹⁰²一些研究者推测,类似于浅水珊瑚礁,声音可能是深海生物在特定栖息地进行交流的信号。在采矿过程中,矿物挖掘、切割和回收等产生的机械噪音以及废弃岩石碎屑都可能会掩盖自然条件下深海中的声音信号,从而影响区内及其周边的海洋哺乳动物和其他物种的栖息环境。^{103,104,105}例如,克拉里昂-克利珀顿矿区与须鲸和齿鲸等一些海洋哺乳动物的栖息地或洄游路线重叠。未来在该海域进行的全天不同深度的作业,会产生大量噪音,这些噪音可能与鲸类动物的交流频率重叠因而扰乱海洋哺乳动物之间的交流等行为活动。¹⁰⁶因此,为解决开采过程中的噪音污染问题,我们仍需要对开采技术进行提升,并在噪音处理上进行评估。

2.2 其他潜在威胁

除去对生态环境影响的担忧,研究者同时质疑深海采矿在扰动海底有机碳储存的同时,可能影响消耗二氧化碳和甲烷等温室气体的深海微生物群落,从而加剧全球变暖的趋势。¹⁰⁷

深海采矿也伴随着一些社会问题。The Metals Company和国际海底管理局的合作关系致使一些太平洋岛屿发展中国家受到了不公平的待遇。作为人口总和仅有120,000人的太平洋岛国,瑙鲁和汤加因为为The Metals Company提供担保,而被其掌控了矿产资源开发经济权。尽管据报道,The Metals Company首席执行官并未透露其公司计划向瑙鲁支付多少费用,但汤加的一位社区领袖表示,该公司已同意向汤加支付每吨2美元的“采矿生产费”,¹⁰⁸然而,这笔费用尚不足该公司开采材料总估值的千分之五。国际海底区域的资源是世界全人类的共有财产,The Metals Company的做法不仅损害了发展中岛国的利益,更违背了世界对国际海底区域资源利用的公平性。

海洋是一个独特的生态系统,深海采矿在海水温度异常上升的基础上对海洋生态系统产生进一步的破坏或将是不可逆转的。科学合理的海底开采必须进行广泛的测试,以详尽地证明开采活动对物种和生态系统的影响是最小的并且是可

逆的。虽然企业能够吸引资金并迅速投入到对海洋环境影响较小的开采工具的研发中,但科学界仍需要时间来调查和理解深海采矿更深远的影响以及对可能造成的破坏的应对方案。

图9 绿色和平与科学家团队合作开展深海研究,图为热液喷口周边的生物多样性记录

© Greenpeace / Gavin Newman



第三章

总结与建议



广袤的深海之下蕴藏着珍贵的宝藏。大洋中脊、海底平原和深海海山区域不仅分布有多种矿产资源，同时孕育着难以想象的珍稀生命，其中多数物种甚至尚未被发现、记录和命名。深海不仅是矿产资源开发的新兴焦点，也是科学研究的前沿区域，隐藏着解开众多科学难题的线索。

现有的研究成果已初步揭示了深海采矿可能给深海环境和生物多样性带来的严重破坏和威胁，其中许多影响是永久且不可逆转的。然而，我们对于深海矿产开发影响的认知仍存在空白，难以有效预测、评估和控制潜在的生态环境影响。同时，深海采矿开发规章还在制定进程中，面临诸多复杂的谈判难题，短期内难以出台。基于这些前提，在国际社会中，有关审慎对待深海采矿、暂缓商业开发进程的呼声日益高涨。这些客观因素要求各国各界应本着预防性原则，放缓深海矿产商业开发的步调，为科学研究和政策制定留出充足的时

间，以免对海洋造成无法挽回的损害。

有关深海采矿的探讨也反映出人类在向深海大洋发展过程中面临的挑战。随着技术进步和经济发展，在过去数十年间，人类开发活动的范围迅速扩展到更深更远的海域，也给这些海域的生态环境带来了新的威胁。我们应该吸取历史教训，摒弃开发先行、保护滞后的不良模式，在开发利用之前，优先保护好那些重要的海洋生态系统，确保它们不会受到人类活动的损害；同时，确保资源开发活动的可持续性，充分顾及生态环境保护的需求。

海洋的开放与流动，将世界各地的人们紧密联结为一个生命共同体，人类对海洋特定区域的扰动可能导致整个海洋生态系统产生连锁反应。因此，各国各界需要通力合作，共同推进海洋的研究与管理工



Deep sea creatures - Helmet jellyfish
© Solvin Zankl / Greenpeace

参考文献

- 1 Miller, K. A., Thompson, K. F., Johnston, P., & Santillo, D. (2018). An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps. *Frontiers in Marine Science*, 4, 312755. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00418>
- 2 简称“《海洋生物多样性协定》”
- 3 孙栋, & 王春生. (2017). 深远海浮游动物生态学研究进展. *生态学报*, 37(10), 3219-3231. <http://dx.doi.org/10.5846/stxb201603060393>
- 4 孙松, & 孙晓霞. (2017). 全面提升海洋综合探测与研究能力——中国科学院海洋先导专项进展. *海洋与湖沼*, 48(6), 1132-1144. <http://dx.doi.org/10.11693/hyh20171000254>
- 5 Baker, M., Ramirez-Llodra, E., Tyler, P. A., & Tyler, P. (Eds.). (2020). *Natural capital and exploitation of the Deep Ocean*. Oxford University Press, USA. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198841654.003.0005>
- 6 Seas at Risk (2021). *At a crossroads: Europe's role in deep-sea mining*. <https://seas-at-risk.org/wp-content/uploads/2021/05/At-a-Crossroads-Europes-role-in-Deep-sea-mining.pdf>
- 7 同样具有经济价值的资源还包括分布在大陆架的铁砂、钻石和磷矿等,但不算在深海矿产的范畴内,因此不在本简报的讨论范围内。
- 8 朱永灵. (2017). 关于中国国际海底区域矿区采矿的思考. *海洋开发与管理*, 34(8), 109-112
- 9 Deep-sea mining project in PNG resurfaces despite community opposition. <https://news.mongabay.com/2023/08/deep-sea-mining-project-in-png-resurfaces-despite-community-opposition/>
- 10 <https://news.mongabay.com/2024/01/really-a-sad-day-as-norway-votes-to-allow-deep-sea-mining-in-arctic-waters/>
- 11 Hein, J. R., & Mizell, K. (2022, April). Deep-Ocean Polymetallic Nodules and Cobalt-Rich Ferromanganese Crusts in the Global Ocean: New Sources for Critical Metals. In *The United Nations Convention on the Law of the Sea, Part XI Regime and the International Seabed Authority: A Twenty-Five Year Journey* (pp. 177-197). Brill Nijhoff. https://doi.org/10.1163/9789004507388_013
- 12 K.A. Miller, K.F. Thompson, P. Johnston and D. Santillo. (2018). An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps, *Frontier of Marine Science*. 4, 312755. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00418>
- 13 Petersen, S., Krättschell, A., Augustin, N., Jamieson, J., Hein, J. R., & Hannington, M. D. (2016). News from the seabed—Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. *Marine Policy*, 70, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.03.012>
- 14 <https://www.isa.org.jm/exploration-contracts/polymetallic-nodules/>
- 15 Rabone, M., Wiethase, J. H., Simon-Lledó, E., Emery, A. M., Jones, D. O., Dahlgren, T. G., ... & Glover, A. G. (2023). How many metazoan species live in the world's largest mineral exploration region?. *Current Biology*, 33(12), 2383-2396. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.04.052>
- 16 Goineau, A., and Gooday, A. J. (2017). Novel benthic foraminifera are abundant and diverse in an area of the abyssal equatorial Pacific licensed for polymetallic nodule exploration. *Scientific Reports*, 7(1), 45288. <https://doi.org/10.1038/srep45288>
- 17 Grischenko, A. V., Gordon, D. P., & Melnik, V. P. (2018). Bryozoa (Cyclostomata and Ctenostomata) from polymetallic nodules in the Russian exploration area, Clarion-Clipperton Fracture Zone, eastern Pacific Ocean—taxon novelty and implications of mining. *Zootaxa*, 4484(1), 1-91. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4484.1.1>
- 18 Lejzerowicz, F., Gooday, A. J., Barrenechea Angeles, I., Cordier, T., Morard, R., Apothéloz-Perret-Gentil, L., ... and Pawlowski, J. (2021). Eukaryotic biodiversity and spatial patterns in the Clarion-Clipperton Zone and other abyssal regions: Insights from sediment DNA and RNA metabarcoding. *Frontiers in Marine Science*, 8, 671033. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.671033>
- 19 Stratmann, T., Soetaert, K., Kersken, D., and van Oevelen, D. (2021). Polymetallic nodules are essential for food-web integrity of a prospective deep-seabed mining area in Pacific abyssal plains. *Scientific Reports*, 11(1), 12238. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91703-4>
- 20 Sweetman, A. K., Smith, C. R., Shulse, C. N., Maillot, B., Lindh, M., Church, M. J., ... & Gooday, A. J. (2019). Key role of bacteria in the short-term cycling of carbon at the abyssal seafloor in a low particulate organic carbon flux region of the eastern Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography*, 64(2), 694-713. <https://doi.org/10.1002/lno.11069>
- 21 Orcutt, B. N., Bradley, J. A., Brazelton, W. J., Estes, E. R., Goordial, J. M., Huber, J. A., ... and Pachiadaki, M. (2020). Impacts of deep-sea mining on microbial ecosystem services. *Limnology and Oceanography*, 65(7), 1489-1510. <https://doi.org/10.1002/lno.11403>
- 22 Thurber, A. R., Sweetman, A. K., Narayanaswamy, B. E., Jones, D. O., Ingels, J., & Hansman, R. L. (2014). Ecosystem function and services provided by the deep sea. *Biogeosciences*, 11(14), 3941-3963. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3941-2014>
- 23 Le, J. T., Levin, L. A., & Carson, R. T. (2017). Incorporating ecosystem services into environmental management of deep-seabed mining. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 137, 486-503. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.08.007>
- 24 Volz, J. B., Mogollón, J. M., Geibert, W., Arbizu, P. M., Koschinsky, A., and Kasten, S. (2018). Natural spatial variability of depositional conditions, biogeochemical processes and element fluxes in sediments of the eastern Clarion-Clipperton Zone, Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 140, pp. 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2018.08.006>
- 25 Washburn, T. W., Jones, D. O., Wei, C. L., and Smith, C. R. (2021). Environmental heterogeneity throughout the Clarion-Clipperton Zone and the potential representativity of the APEI network. *Frontiers in Marine Science*, 8, 661685. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.661685>
- 26 李江海, 宋琛琛, & 洛怡. (2019). 深海多金属硫化物采矿研究进展及其前景探讨. *海洋开发与管理*, 36(11), 29-37.

- 27 热液喷口状态分为活跃和(暂时或永久)不活跃
- 28 Ramirez-Llodra, E., Brandt, A., Danovaro, R., De Mol, B., Escobar, E., German, C. R., ... & Vecchione, M. (2010). Deep, diverse and definitely different: unique attributes of the world's largest ecosystem. *Biogeosciences*, 7(9), 2851-2899. <https://doi.org/10.5194/bg-7-2851-2010>
- 29 Boschen, R. E., Rowden, A. A., Clark, M. R., & Gardner, J. P. (2013). Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: a review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks and management strategies. *Ocean & coastal management*, 84, 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.07.005>
- 30 Van Dover, C. L., Colaço, A., Collins, P. C., Croot, P., Metaxas, A., Murton, B. J., ... & Vermilye, J. (2020). Research is needed to inform environmental management of hydrothermally inactive and extinct polymetallic sulfide (PMS) deposits. *Marine Policy*, 121, 104183. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104183>
- 31 Adams, D. K., Arellano, S. M., & Govenar, B. (2012). Larval dispersal: vent life in the water column. *Oceanography*, 25(1), 256-268. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.24>
- 32 Menini, E., Calado, H., Danovaro, R. et al. (2023). Towards a global strategy for the conservation of deep-sea active hydrothermal vents. *npj Ocean Sustainability*, 2(1), 22. <https://doi.org/10.1038/s44183-023-00029-3>
- 33 Van Dover, C. L., Arnaud-Haond, S., Gianni, M., Helmreich, S., Huber, J. A., Jaeckel, A. L., ... & Yamamoto, H. (2018). Scientific rationale and international obligations for protection of active hydrothermal vent ecosystems from deep-sea mining. *Marine Policy*, 90, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.01.020>
- 34 Gollner, S., Colaço, A., Gebbruk, A., Halpin, P. N., Higgs, N., Menini, E., ... & Van Dover, C. L. (2021). Application of scientific criteria for identifying hydrothermal ecosystems in need of protection. *Marine Policy*, 132, 104641. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104641>
- 35 Van Dover, C. L. (2011). Tighten regulations on deep-sea mining. *Nature*, 470 (7332), 31-33. <https://doi.org/10.1038/470031a>
- 36 Thaler, A. D., & Amon, D. (2019). 262 Voyages Beneath the Sea: a global assessment of macro-and megafaunal biodiversity and research effort at deep-sea hydrothermal vents. *PeerJ*, 7, e7397. <https://doi.org/10.7717/peerj.7397>
- 37 Hein, J.R., Conrad, T.A., and Dunham, R.E. (2009). Seamount characteristics and mine-site model applied to exploration- and mining-lease-block selection for cobalt-rich ferromanganese crusts. *Marine Georesources and Geotechnology*, 27(2), 160-176. <https://doi.org/10.1080/10641190902852485>
- 38 <https://www.isa.org.jm/exploration-contracts/cobalt-rich-ferromanganese-crusts/>
- 39 Hein, J. R., & Mizell, K. (2022, April). Deep-ocean polymetallic nodules and cobalt-rich ferromanganese crusts in the global ocean: New sources for critical metals. In *The United Nations Convention on the Law of the Sea, Part XI Regime and the International Seabed Authority: A Twenty-Five Year Journey* (pp. 177-197). Brill Nijhoff. https://doi.org/10.1163/9789004507388_013
- 40 Kvile, K. Ø., Taranto, G. H., Pitcher, T. J., & Morato, T. (2014). A global assessment of seamount ecosystems knowledge using an ecosystem evaluation framework. *Biological Conservation*, 173, 108-120. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.10.002>
- 41 Rogers, A. D. (2018). The biology of seamounts: 25 years on. *Advances in marine biology*, 79, 137-224. <https://doi.org/10.1016/bs.amb.2018.06.001>
- 42 Baillon, S., Hamel, J. F., Wareham, V. E., & Mercier, A. (2012). Deep cold - water corals as nurseries for fish larvae. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(7), 351-356. <https://doi.org/10.1890/120022>
- 43 Clark, M. R., Althaus, F., Schlacher, T. A., Williams, A., Bowden, D. A., & Rowden, A. A. (2016). The impacts of deep-sea fisheries on benthic communities: a review. *ICES Journal of Marine Science*, 73(suppl_1), i51-i69. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsv123>
- 44 Pham, C. K., Vandeperre, F., Menezes, G., Porteiro, F., Isidro, E., & Morato, T. (2015). The importance of deep-sea vulnerable marine ecosystems for demersal fish in the Azores. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 96, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.11.004>
- 45 Delavenne, J., Keszler, L., Castelin, M., Lozouet, P., Maestrati, P., & Samadi, S. (2019). Deep-sea benthic communities in the largest oceanic desert are structured by the presence of polymetallic crust. *Scientific Reports*, 9(1), 6977. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43325-0>
- 46 Morato, T., Hoyle, S. D., Allain, V., and Nicol, S. J. (2010). Seamounts are hotspots of pelagic biodiversity in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(21), 9707-9711. <https://doi.org/10.1073/pnas.0910290107>
- 47 Demarcq, H., Noyon, M., & Roberts, M. J. (2020). Satellite observations of phytoplankton enrichments around seamounts in the South West Indian Ocean with a special focus on the Walters Shoal. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 176, 104800. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2020.104800>
- 48 Miller, K. A., Thompson, K. F., Johnston, P., & Santillo, D. (2018). An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps. *Frontiers in Marine Science*, 4, 312755. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00418>
- 49 “区域”是指国家管辖范围以外的海床和洋底及其底土
- 50 《联合国海洋法公约》第157条
- 51 海因里希·伯尔基金会. (2017). 《海洋地图集:海洋生态系统面临的威胁—事实与数据》. https://cn.boell.org/sites/default/files/boe_meeresatlas_innen-teil_ch.pdf
- 52 <https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2023/07/2314379E.pdf>
- 53 指“区域”内在海床及其下原来位置的一切固体、液体或气体矿物资源
- 54 <https://www.isa.org.jm/organs/the-council/>
- 55 http://isa.china-mission.gov.cn/chn/gjhdglj/msc/qyb/200512/t20051201_8255312.htm
- 56 Singh, P. A. (2022). The Invocation of the ‘Two-Year Rule’ at the International Seabed Authority: Legal Consequences and Implications. *The International Journal of Marine and Coastal Law*, 37(3), 375-412. <https://doi.org/10.1163/15718085-bja10098>
- 57 International Seabed Authority, Secretary-General. (2012). Workplan for the formulation of regulations for the exploitation of polymetallic nodules in the Area: report of the Secretary-General. <https://digitallibrary.un.org/record/729172>
- 58 http://isa.china-mission.gov.cn/chn/hyfy/202208/t20220819_10746460.htm

- 59 承包商可以是《联合国海洋法公约》及其《执行协定》缔约国、缔约国国有企业、拥有缔约国国籍的自然人或法人、受缔约国或其国民有效担保的自然人或法人 来源: <https://www.isa.org/jm/wp-content/uploads/2023/11/ISA-Policy-brief-01-2023.pdf>
- 60 International Seabed Authority Exploration Contracts <https://www.isa.org/jm/exploration-contracts/>
- 61 High Sea Alliance. (2023). High Sea Treaty Frequently Asked Questions. <https://highseasalliance.org/wp-content/uploads/2023/07/HIGH-SEAS-TREATY-QA.pdf>
- 62 <https://www.isa.org/jm/exploration-contracts/exploration-areas/>
- 63 15 (c) 如果理事会未在规定时间内完成关于开发的规则、规章和程序的拟订工作, 而已经有开发工作计划的申请在等待核准, 理事会仍应根据公约中的规定和理事会可能已暂时制定的任何规则、规章和程序, 或根据公约内所载的准则和本附件内的条款和原则以及对承包者不歧视的原则, 审议和暂时核准该工作计划。来源: <http://policy.mofcom.gov.cn/pact/pactContent.shtml?id=1544>
- 64 Singh, P. A. (2022). The Invocation of the ‘Two-Year Rule’ at the International Seabed Authority: Legal Consequences and Implications. *The International Journal of Marine and Coastal Law*, 37(3), 375-412. <https://doi.org/10.1163/15718085-bja10098>
- 65 即2030年前保护30%的海洋
- 66 Resistance to deep-sea mining: Governments and Parliamentarians. <https://savethehighseas.org/voices-calling-for-a-moratorium-governments-and-parliamentarians/>
- 67 <https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2023/02/statement-on-seabed-mining.html>
- 68 https://savethehighseas.org/2022/07/01/emmanuel-macron-calls-for-a-stop-to-deep-sea-mining-at-un-ocean-conference/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=emmanuel-macron-calls-for-a-stop-to-deep-sea-mining-at-un-ocean-conference
- 69 Global financial institutions statement to governments on Deep Sea Mining. https://www.financeforbiodiversity.org/wp-content/uploads/Global-Financial-Institutions-Statement-to-Governments-on-Deep-Seabed-Mining_FfB-Foundation_19July2023.pdf
- 70 <https://seabedminingsciencestatement.org/>
- 71 https://www.cms.int/sites/default/files/document/cms_cop14_doc.27.2.4_rev1_deep-sea-mining_e.pdf
- 72 <https://savethehighseas.org/voices-calling-for-a-moratorium-governments-and-parliamentarians/>
- 73 Jones, D. O. B., Amon, D. J., & Chapman, A. S. A. (2018). Mining deep-ocean mineral deposits: what are the ecological risks? *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 14(5), 325-330. <https://doi.org/10.2138/gselements.14.5.325>
- 74 Miller, K. A., Thompson, K. F., Johnston, P., & Santillo, D. (2018). An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps. *Frontiers in Marine Science*, 4, 312755. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00418>
- 75 Okamoto, N., Shiokawa, S., Kawano, S., Yamaji, N., Sakurai, H., & Kurihara, M. (2019, June). World’s first lifting test for seafloor massive sulphides in the Okinawa Trough in the EEZ of Japan. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.
- 76 Miller, K. A., Thompson, K. F., Johnston, P., & Santillo, D. (2018). An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps. *Frontiers in Marine Science*, 4, 312755. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00418>
- 77 Hein, J. R., Mizell, K., Koschinsky, A., & Conrad, T. A. (2013). Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high-and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews*, 51, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.12.001>
- 78 Amon, D. J., Gollner, S., Morato, T., Smith, C. R., Chen, C., Christiansen, S., ... & Pickens, C. (2022). Assessment of scientific gaps related to the effective environmental management of deep-seabed mining. *Marine Policy*, 138, 105006. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105006>
- 79 在扰动发生后间隔 0.1 年、0.5 年、3 年、7 年和 26 年多次访问该区域
- 80 Stratmann, T., Lins, L., Purser, A., Marcon, Y., Rodrigues, C. F., Ravara, A., ... and Van Oevelen, D. (2018). Abyssal plain faunal carbon flows remain depressed 26 years after a simulated deep-sea mining disturbance. *Biogeosciences*, 15(13), 4131-4145. <https://doi.org/10.5194/bg-15-4131-2018>
- 81 Vonnahme, T. R., Molari, M., Janssen, F., Wenzhöfer, F., Haeckel, M., Titschack, J., and Boetius, A. (2020). Effects of a deep-sea mining experiment on seafloor microbial communities and functions after 26 years. *Science Advances*, 6(18), eaaz5922. <http://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5922>
- 82 李学恭, 徐俊, & 肖湘. (2013). 深海微生物高压适应与生物地球化学循环. *微生物学通报*, 40(1): 59-70
- 83 Miljutin, D. M., Miljutina, M. A., Arbizu, P. M., & Galeron, J. (2011). Deep-sea nematode assemblage has not recovered 26 years after experimental mining of polymetallic nodules (Clarion-Clipperton Fracture Zone, Tropical Eastern Pacific). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 58(8), 885-897. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.06.003>
- 84 Macheriotou, L., Rigaux, A., Derycke, S., & Vanreusel, A. (2020). Phylogenetic clustering and rarity imply risk of local species extinction in prospective deep-sea mining areas of the Clarion-Clipperton Fracture Zone. *Proceedings of the Royal Society B*, 287(1924), 20192666. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.2666>
- 85 Hein, J. R. (2016). Manganese nodules. *Encyclopedia of marine geosciences*, 408-412.
- 86 Simon-Lledó, E., Bett, B. J., Huvenne, V. A., Köser, K., Schoening, T., Greinert, J., & Jones, D. O. (2019). Biological effects 26 years after simulated deep-sea mining. *Scientific reports*, 9(1), 8040. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44492-w>
- 87 Haffert, L., Haeckel, M., de Stigter, H., & Janssen, F. (2020). Assessing the temporal scale of deep-sea mining impacts on sediment biogeochemistry. *Biogeosciences*, 17(10), 2767-2789. <https://doi.org/10.5194/bg-17-2767-2020>
- 88 Macheriotou, L., Rigaux, A., Derycke, S., & Vanreusel, A. (2020). Phylogenetic clustering and rarity imply risk of local species extinction in prospective deep-sea mining areas of the Clarion-Clipperton Fracture Zone. *Proceedings of the Royal Society B*, 287(1924), 20192666. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.2666>
- 89 Hauton, C., Brown, A., Thatje, S., Mestre, N. C., Bebianno, M. J., Martins, I., ... & Weaver, P. (2017). Identifying toxic impacts of metals potentially released during deep-sea mining—a synthesis of the challenges to quantifying risk. *Frontiers in Marine Science*, 4, 368. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00368>
- 90 Fallon, E. K., Frische, M., Petersen, S., Brooker, R. A., & Scott, T. B. (2019). Geological, mineralogical and textural impacts on the distribution of environmentally toxic trace elements in seafloor massive sulfide occurrences. *Minerals*, 9(3), 162. <https://doi.org/10.3390/min9030162>
- 91 Brown, A., Wright, R., Mevenkamp, L., & Hauton, C. (2017). A comparative experimental approach to ecotoxicology in shallow-water and deep-sea

- holothurians suggests similar behavioural responses. *Aquatic Toxicology*, 191, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.06.028>
- 92 Hein, J. R., Mizell, K., Koschinsky, A., & Conrad, T. A. (2013). Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high-and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews*, 51, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.12.001>
- 93 Gooday, A. J., Holzmann, M., Caille, C., Goineau, A., Kamenskaya, O., Weber, A. A. T., & Pawlowski, J. (2017). Giant protists (xenophyophores, Foraminifera) are exceptionally diverse in parts of the abyssal eastern Pacific licensed for polymetallic nodule exploration. *Biological Conservation*, 207, 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.01.006>
- 94 Grischenko, A. V., Gordon, D. P., & Melnik, V. P. (2018). Bryozoa (Cyclostomata and Ctenostomata) from polymetallic nodules in the Russian exploration area, Clarion-Clipperton Fracture Zone, eastern Pacific Ocean-taxon novelty and implications of mining. *Zootaxa*, 4484(1), 1-91. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4484.1.1>
- 95 Kaikkonen, L., Venesjärvi, R., Nygård, H., & Kuikka, S. (2018). Assessing the impacts of seabed mineral extraction in the deep sea and coastal marine environments: Current methods and recommendations for environmental risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 1183-1197. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.055>
- 96 Christiansen, B., Denda, A., & Christiansen, S. (2020). Potential effects of deep seabed mining on pelagic and benthopelagic biota. *Marine Policy*, 114, 103442. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.02.014>
- 97 Gausepohl, F., Hennke, A., Schoening, T., Köser, K., & Greinert, J. (2020). Scars in the abyss: Reconstructing sequence, location and temporal change of the 78 plough tracks of the 1989 DISCOL deep-sea disturbance experiment in the Peru Basin. *Biogeosciences*, 17(6), 1463-1493. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1463-2020>
- 98 Spearman, J., Taylor, J., Crossouard, N., Cooper, A., Turnbull, M., Manning, A., ... & Murton, B. (2020). Measurement and modelling of deep sea sediment plumes and implications for deep sea mining. *Scientific reports*, 10(1), 5075. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61837-y>
- 99 Drazen, J., Smith, C., Gjerde, K., Au, W., Black, J., Carter, G., ... & Ziegler, A. (2019). Report of the workshop Evaluating the nature of midwater mining plumes and their potential effects on midwater ecosystems. *Research Ideas and Outcomes*, 5, e33527. <https://doi.org/10.3897/rio.5.e33527>
- 100 Boschen, R. E., Rowden, A. A., Clark, M. R., & Gardner, J. P. (2013). Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: a review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks and management strategies. *Ocean & coastal management*, 84, 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.07.005>
- 101 Amon, D. J., Gollner, S., Morato, T., Smith, C. R., Chen, C., Christiansen, S., ... & Pickens, C. (2022). Assessment of scientific gaps related to the effective environmental management of deep-seabed mining. *Marine Policy*, 138, 105006. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105006>
- 102 Drazen, J. C., Smith, C. R., Gjerde, K. M., Haddock, S. H., Carter, G. S., Choy, C. A., ... & Yamamoto, H. (2020). Midwater ecosystems must be considered when evaluating environmental risks of deep-sea mining. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(30), 17455-17460. <https://doi.org/10.1073/pnas.2011914117>
- 103 Amon, D. J., Hilario, A., Arbizu, P. M., & Smith, C. R. (2017). Observations of organic falls from the abyssal Clarion-Clipperton Zone in the tropical eastern Pacific Ocean. *Marine Biodiversity*, 47, 311-321. <https://doi.org/10.1007/s12526-016-0572-4>
- 104 Lin, T. H., Chen, C., Watanabe, H. K., Kawagucci, S., Yamamoto, H., & Akamatsu, T. (2019). Using soundscapes to assess deep-sea benthic ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 34(12), 1066-1069. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.09.006>
- 105 Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., ... & Juanes, F. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science*, 371(6529), eaba4658. <https://doi.org/10.1126/science.aba4658>
- 106 Thompson, K. F., Miller, K. A., Wacker, J., Derville, S., Laing, C., Santillo, D., & Johnston, P. (2023). Urgent assessment needed to evaluate potential impacts on cetaceans from deep seabed mining. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1095930>
- 107 Orcutt, B. N., Bradley, J. A., Brazelton, W. J., Estes, E. R., Goordial, J. M., Huber, J. A., ... & Pachiadaki, M. (2020). Impacts of deep - sea mining on microbial ecosystem services. *Limnology and Oceanography*, 65(7), 1489-1510. <https://doi.org/10.1002/lno.11403>
- 108 Secret Data, Tiny Islands and a Quest for Treasure on the Ocean Floor. <https://www.nytimes.com/2022/08/29/world/deep-sea-mining.html>



GREENPEACE 绿色和平

绿色和平是一个全球性环保机构,致力于以实际行动推动积极的改变,保护地球环境。

地址:北京东城区东四十条 94 号亮点文创园 A 座 201 室

邮编:100007

电话:86 (10) 65546931

传真:86 (10) 64087851

www.greenpeace.org.cn