深海采矿国际规则演进与中国应对策略①

周娜[1]，毕致玮[2]，袁健[1]，吴巧生[2]
（1.中国地质大学（武汉）公共管理学院，湖北 武汉 430074；2.中国地质大学（武汉）经济管理学院，湖北 武汉 430078）

摘　要：系统梳理了国际海底管理局勘探合同、开发规章谈判进展及主要国家政策分歧，认为深海采矿规则争议集中于环境保护、收益分配、监管责任与商业化可行性。中国已形成较完整的国际海底区域资源布局和深海开发技术基础，但仍面临深海采矿规则不确定、环境压力和商业化约束。中国应积极参与深海采矿国际规则制定，加强国际合作，统筹资源安全、生态保护，尽快实现深海矿产资源商业化开采。

关键词：深海采矿；国际规则；战略性矿产；资源安全；应对策略
中图分类号：TD857；TD807；F415　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.005
文章编号：0253-6099（2026）03-0046-08

Evolution of International Rules for Deep-Sea Mining and China's Countermeasures

ZHOU Na[1], BI Zhiwei[2], YUAN Jian[1], WU Qiaosheng[2]
(1.*School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *Hubei, China*; 2.*School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan* 430078, *Hubei, China*)

Abstract: Based on sorting out all exploration contracts approved by the International Seabed Authority, progress in negotiations on exploitation regulations, and policy divergences among major countries, it is argued that controversies over deep-sea mining rules focus on environmental protection, benefit distribution, regulatory responsibilities and commercial feasibility. China has established a relatively complete resource layout in international seabed, and also solid technological foundation for deep-sea exploitation, yet still confronts with regulatory uncertainties, environmental pressure and constraints on commercialization. China shall actively participate in the formulation of international deep-sea mining rules, strengthen international cooperation, and coordinate resource security and ecological conservation, for promoting the commercial exploitation of deep-sea mineral resources.

Key words: deep-sea mining; international rules; strategic minerals; resource security; countermeasure

在新一轮科技革命与产业变革的深刻影响下，全球战略性矿产资源需求结构发生显著变化，各国围绕战略性矿产资源的稳定供给、技术优势和产业链主导权的竞争不断加剧[1]。中国正处于产业结构优化升级和新质生产力培育的关键阶段，战略性新兴产业的迅速发展抬高了战略性矿产需求[2]。大国博弈以及地缘政治冲突加剧了战略性矿产资源的供应链脆弱性，推进深海战略性矿产资源勘探与开发，不仅是拓展战略性矿产供给渠道、增强资源保障能力的重要途径，也是维护产业链供应链安全、提升国家长期竞争优势的重要战略选择[3-6]。

目前，深海采矿已由国际海洋法秩序中的资源开发问题逐步演化为全球资源治理、海洋生态安全与国际规则塑造相互交叠的重要议题。《联合国海洋法公约》（以下简称《公约》）明确规定，国家管辖范围之外的国际海底区域及其资源被确立为“人类共同继承财产”，其开发活动应在国际海底管理局框架下进行统一管理[7]。当前，国际海底管理局（International Seabed Authority，ISA）逐步构建起以《公约》及《关于执行 1982 年 12 月 10 日<联合国海洋法公约>第十一

① **收稿日期**：2026-05-15
基金项目：国家社科基金重大项目（23&ZD107）；国家自然科学基金（72573163；72203211）；中国地质大学（武汉）公共管理学院（CUGFZ-2510）
作者简介：周娜（1992—），女，湖北恩施人，博士，副教授，主要从事关键矿产风险治理等方面的研究工作。E-mail：nazhou@cug.edu.cn
通信作者：毕致玮（1998—），男，山东淄博人，博士研究生，主要从事深海资源开发政策设计等方面的研究工作。E-mail：cugbzw@cug.edu.cn

部分的协定》(以下简称《执行协定》)为核心法律依据的深海矿产资源全球治理制度体系,但商业开发规章仍处于谈判之中,环境基线、损害责任、收益分配、技术标准与发展中国家权益保障等问题仍存在显著分歧[8]。基于此,深海采矿国际规则实质上是围绕资源获取权、环境治理权和制度塑造权展开的多维度国际治理博弈。对于中国而言,如何在坚持人类共同继承财产原则和海洋命运共同体理念的基础上,统筹资源安全、生态保护、国际制度参与和深海科技能力建设,已成为参与全球海洋治理和维护国家战略利益的重要问题。

1　深海矿产资源开发形势

1.1　深海矿产资源类型及战略价值

深海中蕴藏着丰富的油气资源、天然气水合物、多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物、稀土等战略性资源,资源潜力巨大,其中富含的钴、锰、镍等稀有金属资源储量远超陆地[9]。除油气资源外,其他战略性资源尚处于勘探和开发技术前期准备阶段。深海多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物、稀土等战略性资源勘探程度低、成矿规律认识不清;深海战略性金属的采矿、集矿、扬矿、选矿以及水下作业系统等技术装备需要尽快突破;深海油气勘探开发平台系统结构复杂、庞大,易受台风、大浪、海流等恶劣海洋动力环境的影响,安全运行保障技术有待进一步加强。成矿机理认识、资源精细勘查、资源量精确评估、绿色高效开发技术等是未来深海战略性资源勘探开发需要重点攻关突破的方向。

多种能源及战略性矿产资源在深海中的含量是其陆地品位的数十倍、数百倍或更高,深海是未来满足战略性资源需求的重要接替区[10]。深海多金属结核富含多种稀有金属元素,富集于 3 000~6 500 m 水深的深海平原,资源量约为陆地储量的几十至几百倍[11];多金属硫化物是有望最先实现商业化开采的深海矿产,其主要赋存于 1 000~4 000 m 水深的洋中脊和弧后海盆[12-14];富钴结壳中钴含量为(4~8)亿 t,富集于 800~2 500 m 水深的海底[10];相较于其他深海矿产资源,深海稀土的调查研究起步较晚,但资源开发潜力巨大[15]。表 1 展示了主要战略性金属的深海资源来源、典型深海矿床供应量,表中 CCZ 和 PCZ 是当前国际上最受关注、资源勘探和开发活动最集中的两大深海战略性矿产区块。

表 1　主要战略性金属的深海资源来源、典型深海矿床供应量

Table 1　Deep-sea sources of key strategic metals and reserves of typical deep-sea deposits

金属	用途	深海资源来源	2050 年低碳技术发展预计需求量/万 t	CCZ 潜在供应量/万 t	PCZ 潜在供应量/万 t	海底块状硫化物供应量/万 t
铜	动力电池连接件、电动车电机绕组、充电桩导体、风电设备线圈、光伏导线、5G 基站散热器、半导体封装材料	热液喷口的多金属硫化物;深海平原上的多金属结核	137.8	22 600e	740	2 160
钴	三元锂电池正极材料、高温合金、航空发动机叶片、硬质合金、磁性材料	海山上的富钴结壳;深海平原上的多金属结核	64.4	4 400	5 000	N/A
锌	镀锌钢材、锌空气电池、锌基储能电池、防腐材料、电子元器件镀层	热液喷口的多金属硫化物	N/A	N/A	N/A	4 740
锰	动力电池正极材料、高强钢、储能电池、电子磁性材料	海山上的富钴结壳;深海平原上的多金属结核	69.4	592 200	171 400	N/A
银	光伏银浆(太阳能电池导电电极)、5G 电子元件、高端触点材料、柔性电子、抗菌医疗材料	热液喷口的多金属硫化物	1.5	N/A	N/A	6.9
金	半导体芯片、高可靠连接器、航天电子器件、生物传感器、纳米医疗材料	热液喷口的多金属硫化物	N/A	N/A	N/A	0.102
锂	动力锂电池、储能电池、电网储能系统、消费电子电池、轻质合金	海山上的富钴结壳;海洋沉积物	41.5	280	2	N/A
镍	三元锂电池正极(高镍材料)、不锈钢、高温合金、氢能装备、电池集流体	海山上的富钴结壳;深海平原上的多金属结核	226.8	27 000e	3 200	N/A

注:CCZ 指克拉里昂-克利珀顿区;PCZ 指秘鲁盆地多金属结核区。需求量是指到 2050 年新能源低碳技术所需的资源量;潜在供应量是指目前技术水平下典型区块的资源量估值;e 为预测供应量;N/A 表示暂无数据。

深海矿产资源商业化前景广阔,各国为抢占先机,积极布局谋划区域深海矿产资源勘探开发。在当前大国博弈和地缘政治冲突大幅升级的国际环境下,深海战略性矿产将成为新一轮战略争夺的焦点。

1.2　全球深海采矿勘探与商业化进展

随着深海矿产资源商业化开发预期不断增强,国

际海底权益配置逐渐成为各国海洋战略布局的重要内容。各国围绕国际海底矿区勘探资格、未来开发优先权以及关键核心技术突破展开积极部署。截至2024年12月,ISA已核准32份勘探工作计划,涉及21个国家的22个承包者,覆盖国际海底区域面积约为148万km^2。在已获核准的勘探工作计划中,30份勘探合同仍处于有效状态,占比约94%。从合同效力状态看,多数勘探合同仍处于首次合同期内,约1/4的合同在原期限届满后签署了延期协议。其中,德国的多金属结核勘探合同处于首次延期阶段,而7个先驱投资者的多金属结核勘探合同已进入第二次延期阶段。另有印度政府于2024年7月获准1块多金属硫化物勘探矿区,并于2025年9月正式签订勘探合同;巴西富钴结壳勘探合同则自2022年起已终止,相关方仍在就原合同有效期内的履约责任进行协商处理。

各国/组织持有的国际海底矿区数量[16]如图1所示。国际海底区域勘探合同的配置在国家之间呈现明显的不均衡特征,矿区数量与矿区面积均集中在少数国家。从矿区数量看,发达国家持有的矿区约占50%,发展中国家持有的矿区约占47%,另有约3%的矿区由保加利亚等6国共同担保的国际海洋金属联合组织持有。俄罗斯和韩国在深海采矿领域积极布局,各持有3块国际海底资源矿区。近年来,印度申请国际海底矿区的意愿明显增强,其已获核准的3块矿区均位于印度洋,并且是目前唯一拥有2块多金属硫化物勘探矿区的国家[17]。英国持有2块多金属结核矿区,其矿区面积仅次于中国。欧盟成员国合计拥有3块多金属结核矿区和3块多金属硫化物矿区,并通过参与国际海洋金属联合组织进一步介入多金属结核资源勘探。日本长期重视海洋资源开发利用,在推进本国专属经济区内深海矿产资源开发的同时,积极谋

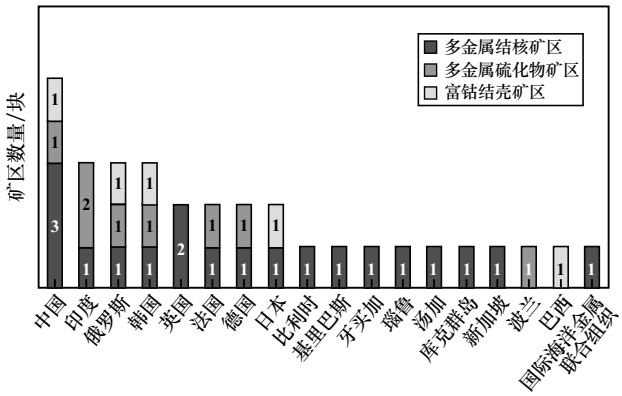


图1 各国/组织持有的国际海底矿区数量

Fig.1 Numbers of ISA exploration contracts by country and organization

划国际海底区域资源的勘探开发,持有2块国际海底矿区[18]。此外,基里巴斯、牙买加、瑙鲁、汤加、库克群岛、新加坡和巴西等发展中国家也分别持有1块国际海底矿区。中国目前拥有5块国际海底矿区,总面积约23.48万km^2,在矿区数量、控制面积以及矿种覆盖范围方面均居世界前列,是国际海底资源勘探布局最完整的国家之一[19]。

2 深海采矿国际规则演进

2.1 深海采矿国际治理体系

随着海洋探测与开发技术持续进步,人类对深海环境和海底资源禀赋的认知不断深化,深海矿产资源所蕴含的战略价值日益受到重视。为在未来深海资源开发格局中取得有利位置,部分国家围绕国际海底区域内资源开发展开积极布局,形成了以获取国际海底区域资源权益为核心的"蓝色圈地"运动[20]。1982年通过的《公约》对国际海底区域的法律属性、治理架构和资源开发制度进行了较为完整的制度设计。根据《公约》规定,国际海底区域是指国家管辖范围以外的海床、洋底及其底土,其资源属于人类共同继承财产,任何国家不得对国际海底区域或其资源主张或行使主权、主权权利或管辖权。在此原则基础上,《公约》设立ISA,由其代表全人类管理国际海底区域内矿产资源相关活动,以保障深海资源开发的公平性、秩序性和全人类共同利益。同时,《公约》确立了"平行开发制"这一特殊制度安排,允许ISA通过其企业部直接从事国际海底区域资源开发活动。此外,缔约国及其担保的企业、自然人或法人也可在符合规则要求的前提下参与勘探开发。该制度既体现了对人类共同继承财产原则的维护,也为缔约国参与国际海底资源开发、开展技术合作与利益分享提供了制度基础。1994年7月,为平衡发达国家与发展中国家在深海采矿中不同的利益诉求,ISA围绕缔约国费用体制安排、决策机制、深海采矿环境保护等九个核心议题,通过《执行协定》,进一步完善了深海采矿国际治理制度体系,对规范国际海洋治理具有重要现实意义。

《公约》以及《执行协定》的相继生效,表明国际社会围绕国际海底区域内资源开发所形成的基本制度框架初步建立。作为负责组织和管理国际海底区域内资源开发的专门机构,ISA承担着相关活动的规则制定与制度完善的重要角色,根据深海采矿活动全生命周期,目前已经形成涵盖勘探、采矿环境的规章体系,以实现对国际海底区域资源开发活动的规范管理。国际海底区域资源勘探开发规章制度见表2。

表 2　国际海底区域资源勘探开发规章制度

Table 2　Regulations and rules for exploration and exploitation of resources in international seabed

年份	类型	名称
2000	勘探规章	《“区域”内多金属结核探矿与勘探规章》
2010	勘探规章	《“区域”内多金属硫化物探矿与勘探规章》
2012	勘探规章	《“区域”内富钴铁锰结壳探矿与勘探规章》
2016	开发规章	《“区域”内矿产资源开发规章和标准合同条款初稿》
2017	开发规章	《“区域”内矿产资源开发规章草案》
2018	开发规章	《“区域”内矿产资源开发条例修订草案》
2019	开发规章	《“区域”内矿产资源开发条例修订草案》的附加标准和准则草案
2023	生态环境	《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》
2024	开发规章	《“区域”内矿产资源开发条例修订草案》单一案文

2.2　深海采矿开发规章谈判进展

为实现深海矿产资源的商业化,各国积极推进深海矿产资源勘探、采集与环境监测等关键技术研发进展,进而推动了全球深海矿业由实验探索和技术可行性验证阶段向商业化开发阶段的加速过渡。在这一过程中,能否及时有效地制定与落实开发规章,已成为国际海底区域内深海采矿进入商业化开发的关键制度前提。其重要性不仅仅是维护承包者的投资收益预期和担保国的制度性权益,更在于通过构建公平、有序且可持续的资源开发机制,保障国际海底区域资源开发活动在国际法框架下服务于全人类共同利益,并推动人类共同继承财产原则的实现[21]。

目前,国际海底区域内深海矿产资源开发规章已经历多轮起草、审议与修订。2011 年,在国际海底管理局第 17 届会议期间,斐济代表团提出应加快推进深海矿产资源开发规章的制定进程。2017 年,ISA 正式发布《“区域”内矿物资源开发规章草案》(以下简称《开发规章草案》),并将开发规章制定列为此后三年的重点工作,原计划于 2020 年前完成相关规则体系的制定程序。此后,ISA 又分别于 2018 年和 2019 年发布修订文本,在规则结构、程序安排和制度内容等方面持续推进完善。2020 年,在新冠疫情的影响下,ISA 理事会主要通过静默程序对《开发规章草案》进行逐条审议,相关谈判和文本推进速度有所放缓。2021 年,瑙鲁依据《执行协定》触发所谓的“两年规则”,即在成员国提出请求后,ISA 应启动开发规章制定工作,并力争在两年内完成相关规则、规章和程序;若期限届满仍未形成完整开发规章,ISA 仍可能需要在规则尚不完备的情况下审议承包者提交的开发工作计划。瑙鲁表示,其担保的承包者拟在两年后申请国际海底区域内深海矿产资源开发工作计划,并要求 ISA 尽快制定和通过批准开发工作计划所必需的准则、规章和程序。总体来看,《开发规章草案》的制定已持续十余年,并在制度框架和文本内容方面取得较大进展,但在利益分享机制、承包者权利保障、担保国责任边界等方面仍存在较大争议和完善空间。

国际海底区域内开发规章的制定不仅是深海矿产资源商业化开发的制度基础,也直接影响全人类对国际海底区域资源权益的实现方式。国际社会有必要在《公约》及《执行协定》确立的法律框架下,进一步完善国际海底区域内活动的管理机制、程序规则和责任体系,逐步形成涵盖探矿、勘探与开发全过程的深海矿产资源开发政策与规则体系。

2.3　深海采矿国际规则争议的主要焦点

1) 环境问题突出。环境保护是国际海底区域深海矿产资源开发规章谈判中最具争议性的议题之一。反对或主张暂缓深海采矿的国家及相关主体认为,深海生态系统具有脆弱性强、恢复周期长和科学认知不足等特征,商业化采矿可能通过海底地貌扰动、沉积物羽流扩散、噪声污染、生境破坏和生物多样性下降等途径,对深海环境造成长期甚至不可逆损害[22-23]。模拟扰动研究也表明,小尺度多金属结核采矿试验即可对深海底栖生物群落产生显著影响,且不同生物类群恢复能力存在差异[24]。支持者则强调,深海矿产对新能源产业发展和关键矿产供应安全具有重要意义,在严格环境标准、全过程监测和适应性管理约束下,其环境影响并非完全不可控,且相较部分陆地矿产资源开发可能具有一定环境比较优势[25-26]。环境保护争议不仅源于各国对于深海采矿在科学认知上的差异,也深刻反映了各国在深海采矿领域中产业利益、技术能力与规则塑造权之间的深层博弈。

2) 利益诉求存在差异。发达国家与发展中国家在收益分配机制上存在显著分歧[20]。尽管《公约》明确规定国际海底区域资源属于共同财产,并要求利益分配向发展中国家倾斜,但在具体分配方案、倾斜幅度及技术标准等方面,双方仍存在深刻矛盾,导致相关谈判进程缓慢且博弈不断加剧。

不具备深海采矿技术和资本能力的多数发展中国家强调,国际海底区域及其资源是全人类共同继承财产,深海矿产开发所产生的财政收益、技术溢出和发展机会应在公平基础上惠及全体国家,尤其应兼顾发展中国家的特殊利益[27]。与此相对,具备开发能力且积极推进商业化采矿的国家及承包者则更关注深海采矿

项目的高技术门槛、高资本投入和高经营风险,主张开发规章应体现商业可行性,通过合理缴费机制、稳定合同预期和风险分担安排,避免过高制度成本抑制投资积极性[28]。因此,开发规章中的利益分配制度并非单纯的财政技术安排,而是共同财产原则、投资激励机制与国际资源治理公平性之间的制度平衡问题,既需要通过收益分享、能力建设、技术转让和企业部安排等机制回应发展中国家的公平受益诉求,也需要防止监管费用、履约义务和财政负担过度转嫁给承包者,从而削弱商业开发的经济可行性[29]。

3 深海采矿国际政策分化与规则竞争格局

3.1 支持开发国家的资源安全诉求

作为战略性矿产消费大国,美国在战略性矿产供给体系中长期面临较高程度的外部依赖。因此,美国将深海采矿视为拓展战略性矿产来源并降低供应链脆弱性的重要路径。根据 USGS 发布的《2025 年矿物商品概要》,美国在 2024 年有 13 种战略性矿产完全依赖进口。尤其自 2017 年以来,美国对中国战略竞争不断深化,美国相关战略部门发现,其关键矿产自给能力不足及中国在全球关键矿产供应链中的重要地位,已成为美国推进产业竞争、技术竞争和地缘战略布局中的重大挑战。深海采矿为美国实现关键矿产供应链多元化和“去中国化”、补齐这一短板提供了重要条件[30]。2025 年 4 月 24 日,美国总统特朗普签署第 14285 号行政令《释放美国离岸关键矿产和资源》,试图通过推动美国企业参与深海采矿、提升本土加工能力等方式,强化美国在关键矿产领域的自主保障能力。由于美国尚未批准加入《公约》,其推动深海采矿的单边行动不仅可能冲击以《公约》为基础的国际海洋法秩序,也可能对未来全球矿产资源竞争、供应链重组和贸易格局产生深远影响。

挪威是首个在本国专属经济区内开放深海采矿勘探的欧洲国家,2024 年 1 月 9 日,议会审议通过了在挪威大陆架开辟矿产活动区域的提案,2024 年 12 月 4 日,挪威国王会同枢密院正式决定开放挪威海和格陵兰海的挪威大陆架区域,用于采矿活动。挪威作为海洋资源强国,依托其海洋工程、油气开发和北极治理经验,将本国大陆架海底矿产勘探视为绿色转型和高端制造所需原材料的重要保障,但其政策推进同时受到环境风险、科学不确定性和国内政治制衡的约束[31]。瑙鲁、汤加、基里巴斯等资源国和担保国,通过担保企业申请、完善国内立法和参与 ISA 相关活动谈判,争取在人类共同继承财产原则下获得财政收益、技术转移和发展权利[32]。

支持开发的国家并非单纯追求商业采矿收益,而是围绕关键矿产控制权、产业链重组和国际规则解释权展开战略布局,推动深海采矿规则竞争由环境治理议题转向资源安全与制度主导权之争。

3.2 支持审慎暂停开发国家的环境治理诉求

部分国家主张在科学认知、环境基线和监管能力尚不充分的条件下,应以预防原则为基础暂缓商业化开采,优先构建更高环境门槛和更严格监管标准。德国明确提出“预防性暂停”,认为现有科学知识不足以支撑批准深海商业采矿,并强调应在国际海底管理局框架下强化环境标准与科研评估;加拿大也支持在国家管辖范围以外区域暂停实施商业海底采矿,理由是环境影响认知和监管制度尚不完备。葡萄牙则进一步通过国内法确立至 2050 年暂停安排深海采矿,体现出将海洋保护、气候政策与可持续蓝色经济相衔接的治理取向。

3.3 商业化进程对国际规则供给的制度压力

技术装备的进步发展是应对深海采矿环境问题、推动商业化开采的重要力量。现阶段,全球尚未形成可大规模商业运行的完整深海采矿体系,但采集车、扬矿系统、环境监测装备和智能化控制技术已取得实质性进展,技术装备成为推动深海矿业由勘探阶段迈向试开采阶段的关键变量[33]。从企业实践看,加拿大的 TMC 与瑞士的 Allseas 在克拉里昂-克利珀顿区开展了多金属结核采集与管道提升试验,成功将数千吨结核运输至海面,显示出深海采集、扬矿和水面支持系统的集成能力已明显提升;比利时 GSR 的 Patania Ⅱ 预原型采集车在约 4 500 m 水深开展海试,并推动了关于沉积物羽流扩散、海底再沉降和环境监测方法的实证研究[34-35]。除传统履带式采集和管道提升取得实质性突破外,美国 Impossible Metals 等企业提出基于自主水下机器人、机器视觉和机械臂的选择性结核采集方案,试图通过降低海底扰动、避让大型底栖生物和减少沉积物羽流影响,回应环境合规要求;相关研究也表明,不同深海采矿技术路线在采集效率、海底扰动、羽流扩散和环境风险方面存在差异,因而需要差异化的监管标准[36]。企业的技术试验和商业许可申请已经不单是产业层面的市场行为,而是正在转化为对 ISA 规则供给的制度性压力。开发规章必须尽快回应设备准入、环境影响评价、实时监测、试开采边界、责任分配和商业合同审批等问题。可以看出,随着企业技术成熟度和资本投入持续提升,深海采矿国际规则谈判也

被迫从原则性规范讨论转向可执行、可审查和可追责的监管制度建构。

4　中国参与深海采矿面临的挑战与应对策略

4.1　中国参与深海采矿的基础与优势

作为《公约》的重要缔约国,中国长期深度参与全球海洋治理体系建设,并在国际海底区域资源勘探开发领域持续参与制度建设和实践探索。依托深海探测技术、海洋工程装备和大洋科考能力的不断提升,中国已累计开展近 90 航次大洋科学考察,逐步取得涵盖多金属结核、多金属硫化物和富钴结壳 3 类资源的国际海底勘探合同,成为目前世界上少数同时布局 3 类深海矿产资源开发、并在国际海底区域持有 5 块专属勘探矿区合同的国家之一,在国际海底区域资源勘探领域形成了较为显著的先发优势。已有调查结果显示,中国所持 5 块国际海底矿区具有较高资源潜力,其中仅多金属结核资源量即达 18 亿 t 左右,所含锰、镍、钴等关键金属资源规模可分别满足中国现阶段约 44 年、20 年、58 年的消费需求[37]。中国在国际海底区域的矿区布局不仅拓展了战略性矿产资源的潜在供给空间,也为未来提升关键矿产资源保障能力、增强产业链供应链韧性提供了重要支撑。

深海技术装备能力是支撑深海矿产资源勘探、评价与开发利用的基础前提。经过长期技术积累和工程实践,中国已初步形成以“蛟龙”号载人潜水器、“海龙”系列遥控无人潜水器和“潜龙”系列自主无人潜水器为核心的深海探测与资源调查装备体系[38],深海装备发展路径也由早期的关键技术引进、消化吸收,逐步转向自主研发和系统集成创新[39]。相关技术突破不仅提升了中国对深海资源环境的认知能力和作业能力,也为深海科学研究和海洋强国建设提供了重要装备支撑,同时,进一步体现了中国在“海洋命运共同体”理念下推动深海资源和平利用与合作治理的实践取向。

4.2　中国面临的主要风险

1) 国际监管框架的不确定性、环境影响与国际反对。一方面,ISA 开发规章谈判已持续多年,各方在利益分配、环境保护、责任机制和监管权限等核心议题上仍存在显著分歧。尤其是美国未加入 ISA,可能通过国内法或单边许可推动深海采矿活动,进而加剧国际海底治理的制度碎片化,进一步使中国的国际合作复杂化。另一方面,环保组织与科学界对深海生态系统的脆弱性、不可逆损害风险和科学认知不足保持高度关注,主张在环境基线调查和生态影响评估充分完善之前,暂缓乃至暂停商业化采矿活动。中国代表在 ISA 谈判中反对设立独立环境监管委员会和严苛惩罚性条款,主张在“规则不足”时优先推进资源利用,并对《开发规章草案》中环境限制条款提出异议,此立场与部分发达国家及发展中国家的谨慎原则可能形成冲突。

2) 技术和经济上可行性约束。深海采矿通常需在 4 000 m 乃至 11000 m 级深海高压、低温及复杂海底地形条件下开展作业,对采矿装备、扬矿输送系统、海底定位控制、环境监测与风险预警体系均提出了更高技术要求。尽管中国深海采矿的装备技术体系已经初步形成,但面向规模化、连续化作业的商业化开采技术总体仍处于试验验证阶段,关键装备的可靠性、稳定性和系统协同能力仍需进一步检验。同时,深海采矿项目通常伴随高额的前期研发投入、装备制造成本和长期运营维护支出,其商业收益受矿产品价格波动、开采效率、环境合规成本和国际规章不确定性影响较大,商业化开采的经济可行性仍存在较高不确定性。

4.3　中国应对策略

1) 积极参与 ISA 规则制定。应充分发挥中国在 ISA 中的影响力,推动国际海底区域深海矿产资源开发监管框架尽早形成,并促使相关制度安排在资源开发效率与海洋环境保护之间实现合理平衡。倡导构建兼具开发可行性与环境约束力的规则体系,在允许深海采矿活动有序推进的同时,设置科学、严格且可操作的环境准入标准,以回应国际社会对深海生态风险的关注。积极参与谈判过程,围绕“严重损害”界定、环境影响评价程序、监测与责任机制、收益分配制度等关键问题积极提出方案,维护中国在国际海底区域资源开发与全球海洋治理中的合法权益。

2) 加强国际合作与外交。与支持深海采矿的国家(如挪威、太平洋岛国)建立战略伙伴关系,共同推动行业发展。与反对深海采矿的国家(如德国、加拿大)进行对话,寻求共识,强调深海采矿对清洁能源转型的必要性,同时承诺严格的环境保护措施。避免在争议水域进行敏感活动,以减少法律和外交风险。通过 ISA 框架,确保发展中国家(特别是太平洋岛国)从深海采矿中获得公平利益,分享技术和知识,促进国际合作。

3) 提升科技创新能力与推动商业化进程。将深海科技纳入国家产业政策重点扶持范围,加大研发力度,短期聚焦自主水下机器人(AUVs)和远程操作水下车辆(ROVs)等自动化设备的改进,开发并推广环境友

好型采矿技术,以提高采矿效率和降低环境影响。中长期侧重深海科技创新与产业创新的深度融合,加快试验性采矿测试进程,并借鉴国际经验,营造深海采矿创新生态,尽早实现深海采矿商业化。

4) 巩固市场地位与供应链安全。通过ISA,争取并维护我国在深海采矿探索和开发中的优先权,确保对镍、钴、锰等战略性矿产资源的长期供应。加强对深海矿产资源的加工和提炼能力,延续中国在全球矿产资源供应链中的领先地位。同时,投资回收技术和开发替代材料,减少对新矿开发的依赖,降低环境和地缘政治风险。

参考文献(References):

[1] 吴巧生,周娜,成金华. 战略性关键矿产资源供给安全研究综述与展望[J]. 资源科学, 2020(8):1439-1451.
WU Qiaosheng, ZHOU Na, CHENG Jinhua. A review and prospects of the supply security of strategic key minerals[J]. Resources Science, 2020(8):1439-1451.

[2] 吴巧生,周娜,杨铖,等. 碳中和驱动下的战略性矿产资源全球治理[J]. 环境经济研究, 2024,9(1):130-148.
WU Qiaosheng, ZHOU Na, YANG Cheng, et al. Global governance of critical minerals driven by carbon neutrality[J]. Journal of Environmental Economics, 2024,9(1):130-148.

[3] 邢佳韵,陈其慎,张艳飞,等. 俄乌冲突背景下欧盟能源资源战略分析[J]. 中国矿业, 2025,34(3):1-8.
XING Jiayun, CHEN Qishen, ZHANG Yanfei, et al. Analysis of energy and mineral resources strategy of European Union in the background of the Russia-Ukraine conflict[J]. China Mining Magazine, 2025,34(3):1-8.

[4] 鞠建华,韩见,冯聪. 我国矿产资源综合利用现状评估与发展路径[J]. 中国矿业, 2024,33(6):14-25.
JU Jianhua, HAN Jian, FENG Cong. Evaluation and development path of comprehensive utilization of mineral resources in China[J]. China Mining Magazine, 2024,33(6):14-25.

[5] AMON D J, GOLLNER S, MORATO T, et al. Assessment of scientific gaps related to the effective environmental management of deep-seabed mining[J]. Marine Policy, 2022,138:105006.

[6] DANOVARO R, SNELGROVE P V R, TYLER P. Challenging the paradigms of deep-sea ecology[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2014,29(8):465-475.

[7] 于宏源. 全球深海矿产治理的制度困境:基于大国竞争的视角[J]. 亚太安全与海洋研究, 2026(1):16-33.
YU Hongyuan. The institutional dilemmas of global deep-sea mineral governance: A perspective based on great power coopetition[J]. Asia-Pacific Security and Maritime Affairs, 2026(1):16-33.

[8] 毕致玮,周娜,吴巧生,等. 深海战略性矿产资源开发的政策逻辑与中国选择[J]. 中国矿业, 2026,35(1):66-78.
BI Zhiwei, ZHOU Na, WU Qiaosheng, et al. The policy logic of deep-sea strategic mineral resource development and China's choice[J]. China Mining Magazine, 2026,35(1):66-78.

[9] 杨建民,刘磊,吕海宁,等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020,22(6):1-9.
YANG Jianmin, LIU Lei, LYU Haining, et al. Deep-sea mining equipment in China: Current status and prospect[J]. Strategic Study of CAE, 2020,22(6):1-9.

[10] LEVIN L A, MENGERINK 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.

[11] ALI S H, GIURCO D, ARNDT N, et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance[J]. Nature, 2017,543(7645):367-372.

[12] JOUFFRAY J B, BLASIAK R, NORSTRÖM A V, et al. The blue acceleration: The trajectory of human expansion into the ocean[J]. One Earth, 2020,2(1):43-54.

[13] LEVIN L A, AMON D J, LILY H. Challenges to the sustainability of deep-seabed mining[J]. Nature Sustainability, 2020,3(10):784-794.

[14] WANG Y J, FAN J C, WU S N. Research on the scheduling scheme of resource storage locations in deep-sea oil and gas exploitation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2023,220:111214.

[15] SNELGROVE P V R, METAXAS A. Mining of the deep ocean[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2025,50:455-481.

[16] 刘成军,李满红,郑皓,等. 国际海底矿区竞争格局与应对策略[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):8-13.
LIU Chengjun, LI Manhong, ZHENG Hao, et al. Competitive landscape and coping strategies for international seabed exploration areas[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):8-13.

[17] 魏益帆. 印度关键矿产战略动向及对中国的影响[J]. 亚太经济, 2024(5):100-114.
WEI Yifan. The Indian critical minerals strategy and its impact on China[J]. Asia-Pacific Economic Review, 2024(5):100-114.

[18] 李满红,程阳锐,李小艳,等. 日本深海采矿发展现状分析及启示[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):16-20.
LI Manhong, CHENG Yangrui, LI Xiaoyan, et al. Analysis of current status of Japan's progress in deep sea mining and its revelations[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):16-20.

[19] 刘峰,刘予,宋成兵,等. 中国深海大洋事业跨越发展的三十年[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(10):2613-2623.
LIU Feng, LIU Yu, SONG Chengbing, et al. Three decades' development of China in deep-sea field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(10):2613-2623.

[20] 彭建明,鞠成伟. 深海资源开发的全球治理:形势、体制与未来[J]. 国外理论动态, 2016(11):115-123.
PENG Jianming, JU Chengwei. Global governance of deep-sea resources development: Situation, system and future[J]. Foreign Theoretical Trends, 2016(11):115-123.

[21] 李汉玉. 人类共同继承财产原则在国际海底区域法律制度的适用和发展[J]. 海洋开发与管理, 2018,35(4):70-75.
LI Hanyu. The application and development of the principle of common heritage of mankind in the international seabed area legal system[J]. Ocean Development and Management, 2018,35(4):70-75.

[22] VAN DOVER C L, ARDRON J A, ESCOBAR E, et al. Biodiversity loss from deep-sea mining[J]. Nature Geoscience, 2017,10(7):464-465.

[23] 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.

[24] JONES D O B, KAISER S, SWEETMAN A K, et al. Biological responses to disturbance from simulated deep-sea polymetallic nodule mining[J]. PLoS One, 2017,12(2):e0171750.

[25] PAULIKAS D, KATONA S, ILVES E, et al. Life cycle climate change impacts of producing battery metals from land ores versus deep-sea polymetallic nodules[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,275:123822.

[26] ALVARENGA R A F, PRéAT N, DUHAYON C, et al. Prospective life cycle assessment of metal commodities obtained from deep-sea polymetallic nodules[J]. Journal of Cleaner Production, 2022,330:129884.

[27] JAECKEL A, ARDRON J A, GJERDE K M. Sharing benefits of the common heritage of mankind: Is the deep seabed mining regime ready?[J]. Marine Policy, 2016,70:198-204.

[28] VAN NIJEN K, VAN PASSEL S, BROWN C G, et al. The development of a payment regime for deep sea mining activities in the Area through stakeholder participation[J]. The International Journal of Marine and Coastal Law, 2019,34(4):571-601.

[29] SHEN H. A critical assessment of the International Seabed Authority's implementation of the common heritage of mankind principle from the perspective of benefit-sharing regime[J]. International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics, 2023,23(3):355-371.

[30] 阮建平,黄辉平. 美国推进海底矿产资源开发的政策动向、主要动因与影响[J]. 太平洋学报, 2025,33(12):61-74.
RUAN Jianping, HUANG Huiping. The U. S. policy in seabed mineral resources development: Trends, motivations and impacts[J]. Pacific Journal, 2025,33(12):61-74.

[31] RODINELIUSSEN R. Norway's quest for deep sea minerals and a green transition: A lucrative industry or empty promises to attract capital?[J]. Ethnos, 2026:1-15.

[32] ROBB S, LILY H, PECORARO A. Effective control and state sponsorship in deep seabed mining[J]. Marine Pollution Bulletin, 2024,209: 117119.

[33] ZHANG Q, CHEN X, LUAN L, et al. Technology and equipment of deep-sea mining: State of the art and perspectives[J]. Earth Energy Science, 2025,1(1):65-84.

[34] MUÑOZ-ROYO C, OUILLON R, EL MOUSADIK S, et al. An in situ study of abyssal turbidity-current sediment plumes generated by a deep seabed polymetallic nodule mining preprototype collector vehicle[J]. Science Advances, 2022,8(38):eabn1219.

[35] GAZIS I Z, DE STIGTER H, MOHRMANN J, et al. Monitoring benthic plumes, sediment redeposition and seafloor imprints caused by deep-sea polymetallic nodule mining[J]. Nature Communications, 2025,16:1229.

[36] SITLHOU L, CHAKRABORTY P. Comparing deep-sea polymetallic nodule mining technologies and evaluating their probable impacts on deep-sea pollution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2024,206:116762.

[37] 黄博,王健,李友训,等. 深海矿产资源勘探开发产业创新发展短板与对策[J]. 中国矿业, 2021,30(10):32-37.
HUANG Bo, WANG Jian, LI Youxun, et al. Weakness and solutions of deep-sea mineral resources exploration and development[J]. China Mining Magazine, 2021,30(10):32-37.

[38] 杨震,刘丹. 中国国际海底区域开发的现状、特征与未来战略构想[J]. 东北亚论坛, 2019,28(3):114-126.
YANG Zhen, LIU Dan. Current situation, characteristics, and future strategic vision of China's international seabed area development[J]. Northeast Asia Forum, 2019,28(3):114-126.

[39] 王国荣,黄泽奇,周守为,等. 深海矿产资源开发装备现状及发展方向[J]. 中国工程科学, 2023,25(3):1-12.
WANG Guorong, HUANG Zeqi, ZHOU Shouwei, et al. Current status and development direction of deep-sea mineral resource exploitation equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2023,25(3):1-12.

引用本文:周娜,毕致玮,袁健,等. 深海采矿国际规则演进与中国应对策略[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):46-53.
ZHOU Na, BI Zhiwei, YUAN Jian, et al. Evolution of international rules for deep-sea mining and China's countermeasures[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):46-53.

(上接第 45 页)

[7] 张正. 海底采矿车路径跟踪和点镇定行走控制研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
ZHANG Zheng. Study of path tracking and point stabilization driving control for seabed mining vehicle[D]. Changsha: Central South University, 2013.

[8] 张敏. 基于模糊神经网络的海底采矿车路径跟踪行走控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
ZHANG Min. Research on path tracking and walking control of underwater mining vehicles based on fuzzy neural networks [D]. Changsha: Central South University, 2010.

[9] CHEN Y H, WU H Y, SUI Q R, et al. Optimal path planning based on A* algorithm for submarine mining vehicle[J]. MATEC Web of Conferences, 2020,309:04006.

[10] 杨长兵. 基于深海钴结壳采矿车的路径规划方法研究[J]. 现代电子技术, 2024,47(11):113-117.
YANG Changbing. Research on path planning method based on deep-sea cobalt crust mining vehicle[J]. Modern Electronics Technique, 2024,47(11):113-117.

[11] KAWABATA K, MA L, XUE J R, et al. A path generation method for automated vehicles based on Bezier curve[C]// 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Wollongong, 2013:991-996.

[12] SONG R, LIU Y C, BUCKNALL R. Smoothed A* algorithm for practical unmanned surface vehicle path planning[J]. Applied Ocean Research, 2019,83:9-20.

引用本文:彭帷杰,王臣,苏泷德,等. 融合多代价约束与自适应平滑的深海结核采矿车路径规划方法[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):40-45.
PENG Weijie, WANG Chen, SU Longde, et al. A path planning method integrating multi-cost constraints and adaptive smoothing for deep-sea polymetallic nodule mining vehicle[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):40-45.