“双碳”目标下深海矿产资源全产业链战略布局研究*

刘峰[1],朱耀胜[2],李艳[3],金强[2],郑成荣[2],潘放[2],李向阳[4],朱建璋[2]

(1.中国大洋矿产资源研究开发协会, 北京 100860;
2.中国船舶集团有限公司第七〇八研究所, 上海 200011;
3.中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083;
4.中国大洋事务管理局, 北京 100860)

摘要:“双碳”目标推动新能源产业爆发式增长,铜、镍、钴等关键金属需求激增,而深海矿产作为陆基资源的战略补充,其开发成为保障供应链安全的核心路径。针对我国关键金属资源对外依存度高、供应链风险突出的现状,系统研究深海矿产资源开发的全产业链战略布局。基于国际海底多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物、深海稀土等资源的巨大潜力,结合我国已获得的5块国际海底矿区专属勘探权和优先开采权“先手棋”战略优势,通过竞争力分析指出:我国虽在勘探矿区规模和载人深潜装备上具备优势,但仍面临采矿装备核心部件依赖进口、环保标准话语权不足等瓶颈。研究提出以“顶层战略布局—绿色技术创新—产业链协同—国际规则引领”为主轴的解决方案,包括建立举国攻关机制突破低扰动采矿技术、构建“远洋采矿—沿海初加工—内陆精炼”分布式产业链、主导制定深海绿色采矿国际标准等路径,并提出分阶段目标:2030年完成矿区全系统海试,2040年实现年产2 000万t干结核的产业规模。该框架通过整合技术突破与规则博弈,为我国构建自主可控的深海资源供应体系提供战略支撑。

关键词:深海矿产资源开发;全产业链布局;绿色开采技术;国际规则博弈;战略资源安全

中图分类号:TD807;TD857 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)08-0001-09

Strategic Layout of the Entire Industry Chain of Deep-Sea Mineral Resources Under the “Dual Carbon” Goals

Liu Feng[1], *Zhu Yaosheng*[2], *Li Yan*[3], *Jin Qiang*[2], *Zheng Chengrong*[2], *Pan Fang*[2], *Li Xiangyang*[4], *Zhu Jianzhang*[2]

(1.China Ocean Mineral Resources Research and Development Association, Beijing 100860, China;
2.The 708 Research Institute of CSSC, Shanghai 200011, China;
3.School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
4.China Oceanic Affairs Administration, Beijing 100860, China)

Abstract: The “dual carbon” goals have driven explosive growth in the renewable energy industry, leading to surging demand for critical metals such as copper, nickel, and cobalt. As a strategic supplement to land-based resources, the development of deep-sea minerals has become a critical pathway to ensure supply chain security. Addressing China's high external dependency on critical metals and acute supply chain vulnerabilities, the strategic layout of the entire industry chain for deep-sea mineral resource development was systematically investigated. Building on the vast potential of international seabed resources such as polymetallic nodules, cobalt-rich crusts, polymetallic sulfides and deep-sea rare earths, and leveraging China's “first-mover advantage” of exclusive exploration rights and priority mining rights over five international seabed areas, competitiveness analysis indicates that China has advantages in exploration scale and manned submersible technologies. However, persistent bottlenecks are summarized, including reliance on imported core mining components and insufficient influence in international environmental standard-setting. A framework anchored in “top-level strategic planning, green technology innovation, industrial chain coordination, international rule leadership” was proposed. Key pathways encompass establishing a national collaborative mechanism to advance low-disturbance mining technologies, building a distributed industrial chain spanning “offshore mining-coastal preprocessing-inland refining”, and spearheading international standards for sustainable deep-sea mining. Phase-specific

* **收稿日期**:2025-09-26
基金项目:国家自然科学基金战略研究类项目(42342028)
作者简介:刘峰(1962—),男,山东鄄城人,博士,教授级高级工程师,长期从事深海装备、深海政策研究。E-mail:liufeng@comra.org

milestones are defined: completing full-system sea trials in mining areas by 2030 and achieving an annual production capacity of 20 million tons of dry nodules by 2040. By integrating technological breakthroughs and international rule gaming, this framework provides strategic support for China to build an independent and controllable deep-sea resource supply system.

Key words: Deep-sea mineral resource development, Entire industry chain layout, Green mining technology, International rule gaming, Strategic resource security

0 引言

随着以风电、光伏、电动汽车、高效储能、永磁电机等为代表的绿色低碳转型成为全球共识,全球对关键金属的需求急剧增加。同时,美国总统签署了《释放美国离岸关键矿产与资源》行政命令[1],这一举动越来越清楚地表明,深海矿产资源作为一种战略性资源,其开发已从技术探索演变为国家间的战略博弈。国际海底区域蕴藏多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物和深海稀土等资源,因其巨大的资源量、丰富的种类和巨大的商业开发潜力,海洋矿产资源勘查开发日益受到世界各国的重视,成为全球关注的焦点[2-3]。这些资源直接关系到新能源产业链的安全与稳定。尽管我国已握有 5 块国际海底矿区专属勘探权和优先开采权的"先手棋"[4],但在开发技术成熟度和环保标准制定权等方面仍面临诸多挑战。当前,国际海底管理局(International Seabed Authority, ISA,简称海管局)关于《"区域"内矿产资源开发规章》[5]的谈判陷入僵局,加之美西方实施技术封锁,我国亟须以全产业链思维研究布局深海资源开发路径。

1 深海矿产开发的战略需求与资源潜力

1.1 绿色低碳转型驱动关键金属需求激增

随着全球能源体系向绿色低碳转型的加速推进,"碳达峰、碳中和"的目标导向促使新能源产业呈现爆发式增长态势,进而导致关键金属需求呈指数级上升。具体来看,每辆电动汽车的电池生产需消耗约 8 kg 钴、10 kg 镍和 30 kg 锂;风力发电机每兆瓦装机容量需消耗 500 kg 稀土永磁材料;光伏组件每兆瓦产能需消耗 2.5 t 铜。国际能源署《2024 年全球关键矿产展望》中的量化研究表明,若要实现《巴黎协定》所设定的全球净零排放目标,以 2023 年为基准,预计到 2040 年,铜需求量将增长 50%,镍、钴、稀土需求量可能会翻一番,而锂的需求量可能会增长近 8 倍[6-8]。

1.2 我国对关键金属资源的对外依存度居高不下

中国作为全球最大的清洁能源装备生产国及关键金属消费国,其关键金属冶炼产能占全球的 50%以上,在新能源供应链中占据中枢地位。然而,我国关键金属资源禀赋先天不足,严重依赖海外供应,原材料端受制于人的情况较为突出。

统计数据显示,2023 年中国铜矿进口量约 2 754 万 t,对外依存度约 82%;镍矿进口量约 4 393 万 t,对外依存度约 86%;进口钴湿法冶炼中间产品约 38 万 t,对外依存度约 98.4%;国内锂资源开发成本高,进口锂精矿约 401 万 t,对外依存度约 58%;中国锰矿储量虽占全球的 10%,但因高品位矿石稀缺,2023 年进口量约 3 000 万 t,对外依存度约 80%[9-10]。

此外,我国铜、钴、镍、锂的进口高度依赖少数国家,供应链过于集中,地缘政治和资源民族主义严重威胁供应稳定[11-13]。例如,刚果(金)掌控全球 75%钴产量,中国钴进口量中 99.5%来自刚果(金);镍矿则高度依赖菲律宾(85.2%)和印尼;澳大利亚垄断了 36%的锂矿供应[14-15]。此外,中资企业在刚果(金)、印尼等国面临政策审查、税费提高等风险和国有化压力,海外投资风险加大。同时,美国《通胀削减法案》、欧盟《关键原材料法案》等对我国参与关键矿产加工环节进行限制,严重威胁产业安全[11-13]。

1.3 深海矿产——战略资源储备与供应安全的新途径

海洋中蕴藏着丰富的多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物等金属矿产资源,预测资源量为多金属结核 2 万亿~3 万亿 t[16-17]、富钴结壳 351 亿 t[18-19]、多金属硫化物 6 亿 t[20]、深海稀土 4 400 亿 t[21]。以多金属结核为例,其富含锰、钴、镍、铜等关键金属,资源量是陆地的几倍甚至十几倍(具体数据见表 1)[16-21]。

从分布特征来看,太平洋在全球深海矿产资源格局中占据核心地位,是多金属结核、富钴结壳及深海稀土的主要产区,其资源量占全球总量的 80%以上;大西洋则以热液硫化物和部分富钴结壳为其显著特征;而印度洋虽然资源潜力相对较低,但其锰结核和热液硫化物仍具有一定的开发价值。

表 1 深海多金属结核与陆地矿床金属当量对比

Table 1 Comparison of metal equivalents of deep-sea polymetallic nodules and land-based deposits $\times 10^8$ t

金属	太平洋资源量	大西洋资源量	印度洋资源量	陆地储量	说明
铜 Cu	6.70	1.00	0.50	9.80	太平洋铜资源量约为陆地储量的 0.68 倍，克拉里昂－克利珀顿断裂带(CC 区)为全球最大富集带。
钴 Co	1.22	0.17	0.07	0.11	太平洋钴资源量约为陆地储量的 11 倍，CC 区结核钴为陆地储量的 3.4 倍。
镍 Ni	7.90	1.20	0.43	1.30	太平洋镍资源量约为陆地储量的 6.1 倍，CC 区结核镍为陆地储量的 1.8 倍。
锰 Mn	53.04	11.31	6.29	17.00	太平洋多金属结核锰资源量占全球大洋结核锰总资源 90%以上，主要富集于 CC 区。

深海矿产资源开发将有助于为我国提供关键矿产资源供应的替代方案，破解我国“双碳”目标下的资源瓶颈，同时也有助于降低关键矿产的对外依存度，避免对少数几个国家的资源依赖，重塑全球资源地缘格局，形成自主可控的供应链体系，提升我国新能源产业的国际竞争力。

2 我国深海矿产资源开发竞争力分析

2.1 核心优势

长期以来，中国是国际海底区域活动的主要参与者，致力于推动深海采矿的绿色可持续发展，促进国际海底资源公平合理分配[22]。目前，我国在深海矿产资源开发领域已取得显著成就，展现出独特的优势。中国已通过海管局在太平洋、印度洋获得 5 份具有专属勘探权和优先开采权的勘探合同，包括多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物 3 种资源，总面积逾 23 万 km^2(见表 2)，成为世界上在国际海底拥有矿区数量最多、矿种最全的国家[4]。这为我国深海矿产资源开发奠定了坚实的物质基础，占据了战略性矿产资源布局的先机。

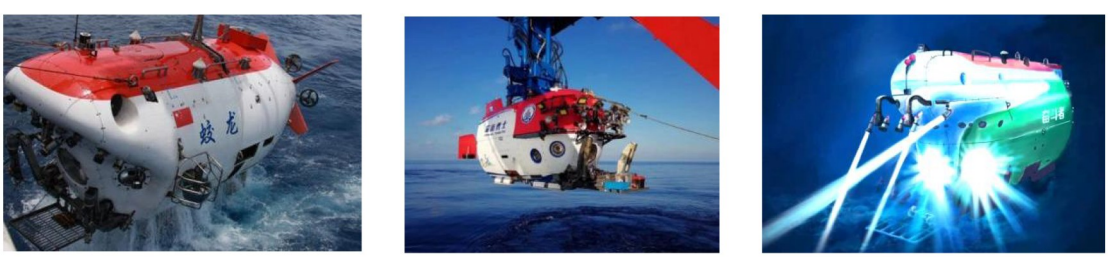
表 2 我国国际海底矿产勘探矿区概况

Table 2 Overview of China’s international seabed mineral exploration areas

承包方	资源类型	矿区面积/(万 km^2)	合同区位置	合约期限
中国大洋协会	多金属结核	7.5	东太平洋克拉里昂－克利珀顿断裂带(CC 区)	2001-05-22 至 2026-05-21
中国大洋协会	多金属硫化物	1	西南印度洋中脊	2011-11-18 至 2026-11-17
中国大洋协会	富钴结壳	0.3	西太平洋麦哲伦海山群	2014-04-29 至 2029-04-28
中国五矿集团有限公司	多金属结核	7.274	东太平洋克拉里昂－克利珀顿断裂带(CC 区)	2017-05-12 至 2032-05-11
北京先驱高技术开发有限责任公司	多金属结核	7.4	西太平洋海盆区	2019-10-18 至 2034-10-17

同时，我国在深海高技术装备领域走出了一条自主创新之路，成功研发了“蛟龙号”“深海勇士号”和“奋斗者号”等先进载人潜水器(见图 1)[4]。这些装备的成功研制和应用，不仅彰显了我国在深海探测领域的技术实力，也为深海矿产资源的勘探与开发提供了强大的技术支撑。

此外，我国在深海采矿技术装备方面也取得了突破性进展。由中国大洋协会牵头联合数十家企业、科研院所及高校，在完成 3 500 m 级 1/10 商业开采规模缩比的多金属结核采矿车、管道输送系统、水面支持系统(布放回收系统)、测控系统、甲板脱水系统等关键装备研制的基础上，于 2021 年 7 月在中国南海 1 300 m 水深海域完成履带式集矿车(见图 2)海底行走、水力式集矿、管道输运、甲板脱水、采矿装备布放回收等一系列功能和性能测试，从海底采集并输送到采矿船上天然多金属结核 1 166 kg，实现了世界首例千米级深海多金属结核履带自行式采矿联动海试[4]。



(a) 蛟龙号 (b) 深海勇士号 (c) 奋斗者号

图 1 我国典型载人深潜装备

Fig.1 Typical manned deep-sea submersibles of China



图 2 多金属结核集矿车

Fig.2 Polymetallic nodule collector vehicle

2021 年,上海交通大学自主研制的深海重载作业采矿车工程样机“开拓一号”在不同海区分别布放至 108 m、246 m、968 m 和 1 305 m 等多个水深的海底,成功完成重载装备海上布放回收、海底路径规划与自主行走、海底矿石采集与沉积物取样等采矿车单体海试[23]。

2024 年,上海交通大学自主研制的深海重载作业采矿车工程样机“开拓二号”(见图 3)在海底多金属结壳与结核矿区,连续 5 次成功完成了下潜,其中 2 000 m 级深度 4 次、4 000 m 级深度 1 次,采矿车分别到达了 1 802.4 m、1 929.9 m、1 955.8 m、2 048.5 m 和 4 102.8 m 的深海海底,对紧密附着在坚硬矿岩上的多金属结壳、浅埋于稀软深海沉积物中的多金属结核等不同类型海底矿物进行了高效开采收集,成功获得了约 200 kg 的多金属结壳、多金属结核、海底基岩等各类深海矿产样品[23]。

2024 年 8 月,招商工业集团建成全国首个深海矿产资源开发装备研制与海试的保障基地,成功研制了 6 000 m 级大功率深海多金属结核采矿车、7 000 m 重载大功率非金属铠装脐带缆、国内首台水下自动对接重载布放回收装备等一系列深海工程装备,并在西太平洋顺利完成 6 000 m 级原位试验[24]。

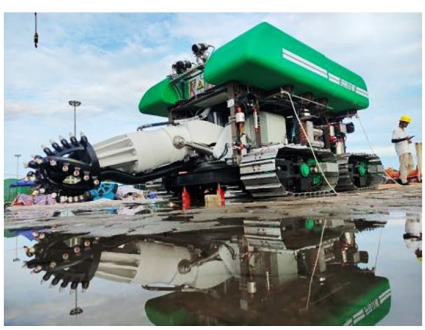


图 3 上海交通大学“开拓二号”深海采矿车

Fig.3 “Pioneer Ⅱ” deep-sea mining vehicle developed by Shanghai Jiao Tong University

2.2 关键挑战

2.2.1 技术短板

我国深海矿产资源开发技术成熟度仍有待提升。与国际先进水平相比,我国在关键装备的研发和应用方面存在明显差距,尤其是在采矿车和矿物提升系统等领域。这主要表现在以下两方面。一是核心元器件研发能力不足,对外依赖性强。目前,采矿车上的深海传感器、水密接插件、中央控制系统和海洋科考装备的核心芯片、高精度姿态解算敏感元件,以及中央控制系统等核心技术组件多依赖进口[23,25-26]。二是自有产品及技术的稳定性与可靠性问题,主要包括矿物提升系统中的大功率深水电缆和光纤技术 ,有待进一步验证与提高[23]。要充分认识到,配套产品的创新能力不足导致我国海洋装备制造业整体处于价值链中低端,并影响了整个产业链的自主可控能力,严重制约了我国深海矿产资源开发的自主性和效率。

2.2.2 环保挑战

深海采矿活动可能带来的环境影响不容忽视。一是沉积物羽流对海洋生物的潜在危害,深海矿物开采过程中的海底作业阶段、矿物收集阶段及海面矿物处理阶段均可能导致羽流的产生[27-29]。由于悬浮浓度高、传播范围广、沉降时间长,可能会对底栖生物的生态环境造成一定影响[30]。二是声音和光污染问题,由于阳光无法照射到深海,因此细菌到鱼类的生物发光是深海唯一的自然光源,但采矿车作业时配备强光源,将会对海底生物发光的生态功能产生一定影响。同时深海采矿作业产生的噪声可能掩盖自然背景声学信号,对依赖声呐导航的海洋生物(如鲸类、海豚)的生态行为产生干扰。三是采矿活动将不可避免地导致基质栖息地的移除和破碎[31-33]。《联合国海洋法公约》规定,参加国际海底区域勘探和开发活动的国家和组织必须检测、评价深海勘探开发活动对海洋生态环境的影响[34]。如何在资源开发的同时保护海洋生态环境,是我国开发深海矿产资源面临的一项重大挑战。

2.2.3 西方技术垄断与规则博弈

在国际竞争方面,西方国家凭借其技术和经济优势,通过跨国企业等主体已直接或间接控制了大量深海矿区资源[35-36]。由于深海矿产资源主要分布于公海领域,以美国为代表的西方发达国家依托多个太平洋岛国等发展中国家推进海底矿产资源布局,以大规模获取深海资源专属勘探权和优先开采

权,并纷纷开展深海采矿单体和综合海试,大力发展深海采矿技术。2022 年,加拿大金属公司(TMC)与 AllSeas 合作分别在大西洋水深 745 m 和 2 470 m 处完成了采矿车与立管系统和柔性软管的水下连接,并测试了采矿车的各种泵和关键机动性功能。随后,在太平洋 CC 区完成了 4 400 m 深海采矿试验及环境影响监测。该试验首次采用"采矿船-管道气力提升系统-采矿车"一体化系统进行采矿试验,验证了深海采矿整体技术的可行性[37]。

2020 年,日本能源金属矿物资源机构将硫化物采矿车样机进行改造,在位于南鸟岛以南、日本单方面主张的专属经济区海域的拓洋 5 号平顶海山(水深 930 m)进行单体挖掘试验,收集约 649 t 的富钴结壳样品,并在采矿试验结束后采集浊度、再沉积物和噪声等环境数据,评估富钴结壳开采对环境的影响。这是世界上首次富钴结壳采矿试验[38]。2022 年,日本海洋研究开发机构在日本茨城县近海 2 470 m 深的海域开展了世界首次稀土沉积物开采、输送、环境监测联合海试[39]。另据《日本经济新闻》2025 年 7 月 1 日报道,日本海洋研究开发机构于 2026 年 1 月利用"地球号"钻探船在南鸟岛附近 5 500～6 000 m 海底开展更大规模的稀土开采试验,目标开采约 35 t 海底沉积物(稀土含量约 70 kg)。

国际海底矿产资源正在由勘探阶段向开发阶段过渡,部分深海技术强国正在加快推动深海矿产资源开发技术装备研发,预计在 2030 年实现深海矿产资源商业开发利用。美国、加拿大、比利时等国的国际财团纷纷开展深海采矿试验,以期进入深海开发第一梯队,我国深海科技创新能力有待提升。深海科技研发力量较为分散,协同创新能力不强。深海调查和监测装备智能化程度不高,深海多平台设备联合作业、深海装备协同作业自主可控能力不强。深海资源开发、环境监测技术装备水平与世界领先水平还存在较大差距,难以有效支撑深海资源保护和利用[4]。

3 全产业链布局的突破路径

3.1 加快体制机制布局

针对国际海底资源特性、战略定位、大国博弈态势及我国技术瓶颈,充分发挥举国体制优势,建立高层次深海开发战略协调机制,统筹制定涵盖资源勘查、技术研发、装备制造、生态保护、市场机制等国际海底矿产资源开发全链条国家战略与规划。

完善法律保障体系,修订《深海法》。深海矿产资源开发涉及多领域、多环节,单一、滞后的法律体系无法适应深海矿产资源开发的多元需求,也难以保障产业链的健康有序发展。其复杂性和专业性要求建立完善的法律保障体系,明确开发主体权责、环保标准及国际合作机制,推动形成兼顾效率与公平、平衡开发与保护的全球深海治理框架,维护国际海底矿产资源产业链的协同发展。

创新投融资机制,通过主权基金、绿色债券等吸引社会资本[40],设立专项基金,利用亚洲基础设施投资银行(亚投行)、金砖国家新开发银行(金砖银行)等多边机构分散地缘政治风险。深海矿产资源开发产业链建设需要庞大的资金投入和风险分散机制,单一的融资模式难以满足其复杂需求。为突破我国深海矿产资源开发全产业链布局的瓶颈,需构建多层次、国际化的投融资体系。一方面,通过发行绿色主权债券、设立主权基金等方式,引导国际资本流向深海勘探、装备研发等战略性领域;同时依托专项基金定向支持深海采矿技术攻关与商业化试点。另一方面,深化与亚投行、金砖银行等多边机构的合作,联合设计跨境融资方案,以有效分散地缘政治风险。

3.2 加速技术验证与规模化开发

以现有矿区为依托,研发环境友好型开采技术。深海矿产资源开发面临高技术门槛与生态敏感性挑战,海管局已核准的勘探矿区为技术研发提供了基础性试验场域。以我国现有多金属结核、富钴结壳等勘探合同区为技术验证靶区,研发环境友好型开采技术,如智能采矿系统、低扰动开采设备等,降低开采活动对深海环境的影响,同时提高资源开采效率。以现有矿区为依托,开展开采技术装备试验和验证,既是突破深海矿产资源开发产业链技术瓶颈的关键举措,也是实现经济发展与生态保护协同共进的必然选择。

布局国家科技重大专项,优先发展低扰动采矿技术,突破关键技术与装备,攻克深海采矿装备、高精度勘探、环境监测等"卡脖子"难题。组织国内高校、科研机构与企业,共同瞄准低扰动采矿技术装备研发,以最大程度减少对海洋生态环境的破坏,实现深海资源开发与海洋环境保护的相互平衡,保障深海矿产资源的可持续开发和利用。同时,全力攻克深海采矿装备可靠性不足、勘探技术的精度难以适

应复杂海底地形、环境监测体系缺乏实时性与生态影响量化评估能力不足等采矿装备、高精度勘探、环境监测“卡脖子”难题。

建立长期环境监测数据库,为国际环保标准提供科学依据,制定绿色深海采矿国际标准,以中国实践塑造“深海资源开发与深海环境保护相互平衡”原则内涵。深海矿产资源开发对全球资源格局意义重大,在推进我国深海矿产资源开发产业链布局进程中,建立长期环境监测数据库成为关键一环。运用先进传感与监测技术,全面收集深海生态环境数据,涵盖水质、地质、生物多样性等多维度信息,建立海底原位监测网络,形成覆盖采矿前、中、后三阶段的连续观测数据库,为评估深海采矿的环境影响提供详实依据。在绿色深海采矿国际标准制定方面,主动参与国际规则讨论与构建。通过深入研究深海采矿全过程的环境影响与资源利用效率,提出符合可持续发展理念的标准建议,推动全球深海采矿行业朝着绿色、高效方向发展。

3.3 完善产业链上下游协同

当前矿产产业链呈现出“中间大、两头小”的“纺锤形”发展态势,需整合勘探、开采、运输、冶炼等环节,构建“技术研发—装备制造—资源利用—商业应用”一体化链条[41]。

在装备制造方面,适度超前发展深海装备制造业,重点建设自主可控的低扰动深海采矿装备系统,使我国早日具备大型深海作业平台、深潜器、深海采矿船和海底采矿机等深海开发设备制造能力,以此改变产业链仅集中于冶炼加工等中游产业的局面[42]。在资源利用方面,提升矿产资源采选等工艺的回收利用率,加强对低品位、伴生与共生矿产资源的调研勘探与综合利用,加强推进矿产废料的回收利用工作,建立资源循环利用产业体系[43]。在商业应用方面,加快构建全方位服务的交易平台。加快金属原料电子交易平台的设计、建设和实质性运行,实现金属原料收储平台和电子交易平台有效对接,推动电子交易平台与商业银行战略协作,形成一批有核心竞争力的大宗商品贸易商、交易平台运营商和仓储物流配套商综合平台体系,为实体企业提供全方位的服务,以吸引全国贸易商、生产商在内陆设立中转基地、加工中心,促进产业集群的形成[43]。

将深海矿区资源开发与国内沿海枢纽(如青岛、上海、舟山、三亚等)深度绑定,建立“远洋采矿—近岸初加工—内陆精炼”分布式产业链,明确以国有大型矿业企业为主导、地方配套企业协同参与的主责机制,选择具备资金、技术和牌照优势的国有大型矿业企业作为产业链“链长”,负责统筹远洋资源开发,并主导制定全链条的技术与环保标准;沿海枢纽地方政府负责近岸初加工基地的规划、基建与运营保障;中西部内陆地区则依托现有冶炼基地,承担精深加工与最终产品生产的责任。强化产业链各环节的责任主体与协作关系,形成权责清晰、运行高效的现代化产业体系[44],形成以东部沿海为核心、中部地区为补充的产业集群。依托港口城市的区位优势与产业基础,建设远洋采矿母港与近岸初加工基地,配套深海矿物快速分选、预富集生产线,利用保税政策降低物流成本。同时,完善多式联运体系,在沿海枢纽布局专业化码头与临港产业园,通过铁路干线、江海联运通道连接中西部内陆精炼中心,形成“远洋采矿船—枢纽港分选加工—铁路/内河运输—内陆精深冶炼”的物流闭环。通过上述措施,构建层次分明、功能互补的分布式产业链。

3.4 积极参与国际海底管理局规则制定

在海管局框架下,推动建立资源开发与环境保护平衡机制[45]。建立和完善与绿色采矿相关的法律法规,明确矿产资源开发利用中的环保要求、资源利用效率标准、生态修复责任,为绿色采矿提供法律依据[46]。提升环境、社会及治理水平,通过财政补贴、税收减免等政策工具,激励企业应用绿色技术;同时依托绿色信贷机制,支持国有与民营主体在开采、加工环节推行环保管理模式,推动自身行业规则同关键矿产责任倡议(RCI)等国际共识相对接,积极寻求同西方国家的第三方合作空间[47]。

深化多边合作,联合东南亚、非洲、拉美等地区的国家,通过技术输出、建设海外冶炼基地等建立战略伙伴关系,拓展多元化市场布局。依托“一带一路”倡议、中非合作论坛等高能级开放平台,加强与资源国的基础设施互联互通、产业投资、技术帮扶并提供经济援助,顺应发展中国家对矿业收益和经济发展的重大关切,发挥中国当前在清洁能源装备制造以及关键矿产资源勘探、精炼加工环节的优势,加大与资源国在关键矿产冶炼加工领域的合作力度,实现互利共赢,持续增强在关键矿产开采加工标准制定方面的影响力与话语权[48-49]。

4 结论与展望

我国深海矿产资源开发产业链布局可分步推

进:第一步,到2030年,以国家重大专项为牵引,鼓励企业积极参与,完成深海矿产开采关键技术攻关和矿区原位全系统联动试验,构建深海矿产资源开发产业雏形;第二步,到2035年,建立激励机制,以企业为主体,初步构建深海矿产商业化开发能力,达到600万t干结核年产量、百亿元人民币级年产量的目标,形成一定产业规模;第三步,到2040年,充分发挥市场机制,促进深海矿产开发产业链逐步成熟,形成年产2 000万t干结核、300万t硫化物的产业规模,实现年产值达到千亿元人民币级的目标;第四步,到2050年,以国际视野,全球布局产业结构,持续扩大产业链规模,实现年产量倍增,年产值达到三千亿元人民币级以上,并实现产业链海外拓展,开展国外专属经济区深海矿产开采项目。

我国深海矿产资源开发产业链布局既面临诸多机遇,也存在不少挑战。我国深海矿产开发应以"顶层布局把控总体战略、技术突破实现资源掌控、绿色标准引领规则制定、产业链协同对冲地缘风险"为战略主轴,立足现有矿区,将其打造为技术验证场与规则试验田,并以此为支点,逐步构建具有国际竞争力的完整产业链,为海洋强国建设和资源安全保障筑牢根基。

参考文献(References):

[1] Orders E. Unleashing America's offshore critical minerals and resources [EB/OL]. [2025-05-12]. https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/04/unleashing-americas-offshore-critical-minerals-and-resources/.

[2] Liu Zenghui, Liu Kai, Chen Xuguang, et al. Deep-sea rock mechanics and mining technology: state of the art and perspectives[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2023,33(9):1083-1115.

[3] 王淑玲,白凤龙,黄文星,等.世界大洋金属矿产资源勘查开发现状及问题[J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(3):160-170.
Wang Shuling, Bai Fenglong, Huang Wenxing, et al. Current status and problems of exploration and development of world ocean metal mineral resources[J]. Marine Geology and Quaternary Geology,2020,40(3):160-170.

[4] 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.

[5] Authority I S. Draft regulations on exploitation of mineral resources in the area[EB/OL].[2025-05-12]. https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2025/01/10012025-Revised-Consolidated-Text-2-1.pdf.

[6] Agency I E. Global critical minerals outlook 2024[R]. Paris: International Energy Agency,2024.

[7] 陈伟强,汪鹏,钟维琼.支撑"双碳"目标的关键金属供应挑战与保障对策[J].中国科学院院刊,2022,37(11):1577-1585.
Chen Weiqiang, Wang Peng, Zhong Weiqiong. Challenges and security strategies of China's critical metals supply for carbon neutrality pledge[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2022,37(11):1577-1585.

[8] 白光裕,梁明,齐冠钧.中国清洁能源关键矿产资源进口依赖性风险与应对策略[J].亚太经济,2024(3):141-152.
Bai Guangyu, Liang Ming, Qi Guanjun. Dependency risk and countermeasures of China's clean energy critical minerals' import[J]. Asia-Pacific Economy,2024(3):141-152.

[9] 中华人民共和国海关总署.2023年金属矿产进口统计报告[R].北京:海关总署,2024.
General Administration of Customs of the People's Republic of China. Metallic minerals import statistics report 2023[R]. Beijing: General Administration of Customs of the People's Republic of China,2024.

[10] 华创证券有限责任公司.2023年关键矿产进口依赖性分析[R].贵阳:华创证券,2024.
Huachuang Securities Co., Ltd. Import dependence analysis of key minerals to 2023[R]. Guiyang: Huachuang Securities Co., Ltd,2024.

[11] 五矿证券有限公司.大变局下的资源安全:中国战略性(关键)矿产如何涅槃重生[R].深圳:五矿资本股份有限公司,2024.
Minmetals Securities Co., Ltd. Resource security in a changing environment: how China's strategic (key) minerals are reborn[R]. Shenzhen: Minmetals Capital Company Limited,2024.

[12] 张菁秋,吕阳,蔡嘉瑶.关键矿产资源供应链风险分析及对策:以铜资源保供稳价问题为例[J].海关与经贸研究,2024,45(5):1-19.
Zhang Jingqiu, Lyu Yang, Cai Jiayao. Risk analysis and countermeasures of critical mineral resources supply chain: a case study on ensuring copper resource supply and stabilizing prices[J]. Journal of Customs and Trade,2024,45(5):1-19.

[13] 朱清,朱海碧,邹谢华.全球战略性矿产产业链供应链分析[J].中国国土资源经济,2024,37(7):4-13+28.
Zhu Qing, Zhu Haibi, Zou Xiehua. Analysis of global strategic mineral industry chain and supply chain[J]. Natural Resource Economics of China,2024,37(7):4-13+28.

[14] Latourrette T, Villalobos F, Yoshiara E, et al. The potential impact of seabed mining on critical mineral supply chains and global geopolitics[R]. Santa Monica: RAND Corporation,2025.

[15] Survey U S G. Mineral commodity summaries 2025[R]. Reston, VA: U.S. Geological Survey,2025.

[16] 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.

[17] Hein J R, Koschinsky A, Kuhn T. Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials[J]. Nature Reviews Earth & Environment,2020,1(3):158-169.

[18] Halbach P E, Jahn A, Cherkashov G. Marine co-rich ferromanganese crust deposits: description and formation, occurrences and distribution, estimated world-wide resources[M]//Rahul Sharma. Deep-Sea Mining: Resource Potential, Technical and Environmental Considerations. Cham, Switzerland: Springer Nature,2017:65-141.

[19] Hein J R, Conrad T, Mizell K, et al. Controls on ferromanganese crust composition and reconnaissance resource potential, Ninetyeast Ridge, Indian Ocean[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers,2016,110:1-19.

[20] Jamieson J W, Hannington M D, Petersen S. Seafloor massive sulfide resources[J]. Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering,2017:1-10.

[21] Kato Y, Fujinaga K, Nakamura K, et al. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements[J]. Nature Geoscience,2011,4(8):535-539.

[22] 李雪威,李佳兴.国际社会深海采矿反对之声的演变、根源与应对[J].太平洋学报,2024,32(8):76-89.
Li Xuewei, Li Jiaxing. The evolution, root causes and responses of the international community's opposition to deep-sea mining[J]. Pacific Journal,2024,32(8):76-89.

[23] 冯妮,杨建民.全球深海矿产资源开发进展与启示:以装备技术为核心[J].太平洋学报,2024,32(8):62-75.
Feng Ni, Yang Jianmin. Development of equipment technology for exploitation of mineral resources[J]. Pacific Journal,2024,32(8):62-75.

[24] 深圳新闻网.拓展"深蓝"伙伴 共绘"深海"蓝图|全球顶尖海洋科学家齐聚国际深海科学与技术大会,纵论深海未来,发出《深圳倡议》[EB/OL].[2025-05-12]. https://www.sznews.com/news/content/2024-10/31/content_31308034.htm.

[25] 蔡鹏,柳存根,林忠钦,等.海洋强国目标下我国海洋装备关键基础性技术发展战略研究[J].中国工程科学,2024,26(5):91-103.
Cai Peng, Liu Cungen, Lin Zhongqin, et al. Development strategy of key basic technologies for marine equipment to enhance the marine strength of China[J]. China Engineering Science,2024,26(5):91-103.

[26] 董胜,廖振焜,于立伟,等.海洋科考装备技术发展战略研究[J].中国工程科学,2023,25(3):33-41.
Dong Sheng, Liao Zhenkun, Yu Liwei, et al. Development strategy for marine scientific equipment and technologies[J]. China Engineering Science,2023,25(3):33-41.

[27] Boschen R E, Rowden A A, Clark M R, et al. Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: a review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks and management strategies[J]. Ocean & Coastal Management,2013,84:54-67.

[28] Kaikkonen L, Venesjärvi R, Nygård H, et al. Assessing the impacts of seabed mineral extraction in the deep sea and coastal marine environments: current methods and recommendations for environmental risk assessment[J]. Marine Pollution Bulletin,2018,135:1183-1197.

[29] Weaver P, Aguzzi J, Boschen-Rose R, et al. Assessing plume impacts caused by polymetallic nodule mining vehicles[J]. Marine Policy,2022,139:105011.

[30] 王翠,丁一,罗阳,等.深海采矿沉积物羽流环境影响研究现状与展望[J].应用海洋学学报,2024,43(3):473-484.
Wang Cui, Ding Yi, Luo Yang, et al. Status and perspectives of environmental impact studies on deep-sea mining sediment plumes[J]. Journal of Applied Oceanography,2024,43(3):473-484.

[31] 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,2018,4:312755.

[32] 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.

[33] 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.

[34] 王春生,周怀阳,倪建宇.深海采矿环境影响研究:进展、问题与展望[J].东海海洋,2003(1):55-64.
Wang Chunsheng, Zhou Huaiyang, Ni Jianyu. Studies on the environmental effects of deep-sea mining: progress, problems and prospects[J]. DongHai Marine Science,2003(1):55-64.

[35] 王雨昕,潘翔.国际海底区域勘探开发资格的认定:《联合国海洋法公约》有效控制条款解释及适用[J].中国国土资源经济,2024,37(6): 67-78.
Wang Yuxin, Pan Xiang. Identification of qualification for exploration and development of international seabed areas: interpretation and application of the effective control clause of the *United Nations Convention on the Law of the Sea*[J]. Natural Resource Economics of China,2024,37(6):67-78.

[36] Company T M. World First: TMC USA submits application for commercial recovery of deep-sea minerals in the high seas under U.S. Seabed Mining Code[EB/OL].[2025-05-12]. https://investors.metals.co/news-releases/news-release-details/world-first-tmc-usa-submits-application-commercial-recovery-deep.

[37] Company T M. NORI and allseas lift over 3,000 tonnes of polymetallic nodules to surface from planet's largest deposit of battery metals, as leading scientists and marine experts continue gathering environmental data[EB/OL].[2025-05-12]. https://investors.metals.co/news-releases/news-release-details/nori-and-allseas-lift-over-3000-tonnes-polymetallic-nodules.

[38] 中国地质调查局.日本在世界上首次取得深海海底富钴结壳的成功试采[EB/OL].[2025-05-12].http://www.cgl.cgs.gov.cn/gzdt_4169/dwdt_4172/202103/t20210330_667092.html.

[39] 参考消息网.日媒：日本拟开采海底稀土泥，以摆脱稀土进口依赖[EB/OL].[2025-05-12].https://www.sohu.com/a/603231754_114911.

[40] 邹晶.绿色债券：一种解决低碳融资困境的新方式[EB/OL].[2025-05-12].https://www.ncsc.org.cn/yjcg/fxgc/201409/t20140926_609650.shtml.

[41] 干勇，彭苏萍，毛景文，等.我国关键矿产及其材料产业供应链高质量发展战略研究[J].中国工程科学，2022，24(3)：1-9.
Gan Yong，Peng Suping，Mao Jingwen，et al. High-quality development strategy for the supply chain of critical minerals and its material industry in China[J]. China Engineering Science，2022，24(3)：1-9.

[42] 姜秉国.中国深海战略性资源开发产业化发展研究[D].青岛：中国海洋大学，2011.
Jiang Bingguo. Study on industrialization development of deep-sea strategic resources exploitation in China[D]. Qingdao：Ocean University of China，2011.

[43] 冯羽生，徐水太，许礼刚，等.产业集群视角下江西钨产业可持续发展的问题与对策研究[J].有色金属科学与工程，2021，12(5)：103-109.
Feng Yusheng，Xu Shuitai，Xu Ligang，et al. Sustainable development of tungsten industry in Jiangxi province from the perspective of industrial cluster[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering，2021，12(5)：103-109.

[44] 郑茜，王臻，蒋玉涛.产业链“链长制”的理论内涵与实施路径：基于扎根理论的多案例实证研究[J].科技管理研究，2022，42(23)：209-215.
Zheng Qian，Wang Zhen，Jiang Yutao. The theoretical connotation and implementation path of the “chain chief system” in the industrial chain：multi-case empirical research based on grounded theory[J]. Science and Technology Management Research，2022，42(23)：209-215.

[45] 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.
Gao Yan，Sun Dong，Huang Hao，et al. Progress of environmental research and management related to mineral resources in international seabed area[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2021，31(10)：2722-2737.

[46] 李高锋.绿色采矿理念在矿产资源开发中的实践与探索[J].能源与节能，2024(11)：67-69.
Li Gaofeng. Practice and exploration of green mining concept in mineral resource development[J]. Energy and Energy Conservation，2024(11)：67-69.

[47] 王永中，万军，陈震.能源转型背景下关键矿产博弈与中国供应安全[J].国际经济评论，2023(6)：147-176+8.
Wang Yongzhong，Wan Jun，Chen Zhen. Geopolitical game and China's supply security in critical minerals amid energy restructuring[J]. International Economic Review，2023(6)：147-176+8.

[48] 邵留国，王露，蓝婷婷.战略性矿产资源影响力评价体系构建与测度[J].中国软科学，2025(2)：1-11.
Shao Liuguo，Wang Lu，Lan Tingting. Construction and measurement of an evaluation system for the influence of strategic mineral resources[J]. China Soft Science，2025(2)：1-11.

[49] 李冰.关键矿产资源大国博弈及我国应对策略[J].价格理论与实践，2023(12)：111-115+209.
Li Bing. Great power games in critical mineral resources and China's response strategies[J]. Price Theory and Practice，2023(12)：111-115+209.