

国际海底区域关键矿产：资源禀赋、环境特征与开发前景

韩喜球^{1,2,3*}, 郭航成^{1,2}, 李波⁴, 王春生^{1,3},
李小虎^{1,2,3}, 王叶剑^{1,2}, 邱中炎¹

1. 海底科学与划界全国重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012;
2. 浙江大学海洋学院, 浙江舟山 316021;
3. 上海交通大学海洋学院, 上海 200030;
4. 中国大洋事务管理局, 北京 100860

[摘要] 随着全球能源转型, 钴、镍、铜等关键金属需求激增, 陆地高品位矿产资源加速枯竭, 供应链地缘风险日益凸显, 构建多元化可持续的关键矿产供应渠道迫在眉睫。国际海底区域蕴藏着多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物等战略性矿产资源, 有序开发利用该区域资源是保障未来关键金属供应安全、支撑可持续发展的重要战略路径。本文系统梳理了国际海底区域多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物的资源禀赋及其赋存区域的生态与环境特征, 从资源战略价值、勘探程度、开发技术成熟度、生态影响等维度, 横向对比三者的商业化开发潜力、核心优势与关键制约, 研判其开发前景与落地时序。认为这 3 类矿产的商业化开发大概率将遵循“结核先行、硫化物接续、结壳储备”的梯次时序, 但受深海生态系统认知局限、国际海底开发监管规则尚未出台等因素制约, 最终商业化落地节奏与规模仍存在不确定性。本文可为深海矿产开发战略的制定、差异化绿色开发技术体系的构建、深海矿产资源开发与生态保护的统筹提供决策参考。

[关键词] 海底矿产资源; 深海采矿; 关键金属; 深海生态与环境; 国际海底区域

[分类号] P744.3

[文献标志码] A

Critical minerals in the International Seabed Area: resource endowments, environmental features and exploitation prospects

HAN Xiqiu^{1,2,3*}, GUO Hangcheng^{1,2}, LI Bo⁴, WANG Chunsheng^{1,3},
LI Xiaohu^{1,2,3}, WANG Yejian^{1,2}, QIU Zhongyan¹

1. State Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of

收稿日期: 2026-06-27; 改回日期: 2026-07-19。 责任编辑: 魏 巍。

基金项目: 浙江省“尖兵领雁+X”研发攻关计划项目(2024C03036); 国家重点研发计划项目(2021YFF0501304); 海底科学与划界全国重点实验室自主课题(SGLabZZKT2025-03)。

*通信作者: 韩喜球(1969—), 女, 研究员, 研究方向: 海底资源与成矿系统, E-mail: xqhan@sio.org.cn。

引用格式: 韩喜球, 郭航成, 李波, 等, 2026. 国际海底区域关键矿产: 资源禀赋、环境特征与开发前景 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(4): 689—701.

Han X Q, Guo H C, Li B, et al., 2026. Critical minerals in the International Seabed Area: resource endowments, environmental features and exploitation prospects [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(4): 689—701.

Natural Resources, Hangzhou 310012, China;

2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China;

3. School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

4. China Ocean Administration, Beijing 100860, China

Abstract: The global energy transition has significantly increased demand for critical metals, particularly cobalt, nickel, and copper. As high-grade terrestrial mineral deposits continue to decline, global mineral supply chains are becoming increasingly vulnerable to geopolitical uncertainties. The International Seabed Area hosts three major categories of strategic mineral resources: polymetallic nodules, cobalt-rich ferromanganese crusts, and polymetallic sulfides. Their responsible development offers a vital pathway to securing long-term critical metal supplies and advancing global sustainable development goals. This paper systematically reviews the resource endowment of these three mineral resource types, as well as the ecological features of their host environments. The commercial development potential, competitive advantages, key constraints, and commercialization prospects are comparatively assessed based on strategic resource value, exploration maturity, technological readiness, and ecological disturbance intensity. The results suggest that the commercial exploitation of these mineral resources is likely to proceed in a phased manner. The polymetallic nodules are expected to be the first to achieve large-scale commercial development given their abundant reserves, the relatively mature exploration and mining technologies, and lower technical barriers. Polymetallic sulfides are likely to follow, whereas cobalt-rich crusts may remain a long-term strategic resource owing to the significant technical challenges associated with their extraction. Nevertheless, the pace and scale of future commercial development remain uncertain due to limited scientific understanding of deep-sea ecosystems and the unresolved regulatory frameworks governing exploitation in the area. This study can serve as decision-making reference for prioritizing deep-sea mineral development, establishing differentiated environmentally responsible mining technology systems, and coordinating deep-sea mineral exploitation and ecological protection.

Key words: deep-sea mineral resources; deep-sea mining; critical metals; deep-sea ecology and environment; International Seabed Area

在“双碳”目标驱动下,全球能源转型正加速重塑关键金属需求结构。新能源汽车、可再生能源发电与储能产业的大规模增长,推动镍、钴、铜、锰等关键金属需求激增。根据国际能源署《2025年全球关键矿产展望》,在既定政策情景下,2040年全球镍需求量将较2020年翻倍,钴需求量增长50%~60%,铜需求量增长约30%(IEA, 2025)。然而,陆上矿产资源优质储量有限,开发成本不断攀升,供需矛盾日益突出。特别是关键金属矿产的全球地理分布高度不均,2024年全球76%的钴矿产量来自刚果(金),74%的镍矿产量来自印度尼西亚与菲律宾(USGS, 2025)。近年来,主要资源国通过提高出口关税、限制原矿出口、修订矿业法等举措强化资源管控,进一步抬升了全球关键矿产供应链的脆弱性。

国际海底区域蕴藏有丰富的多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物和深海富稀土沉积物等

战略性矿产资源,对其开发与利用是缓解未来全球关键金属供需缺口、支撑全球气候目标的重要路径。依据《联合国海洋法公约》,国际海底区域(International Seabed Area,以下简称“区域”,英文简称“the Area”)及其资源为全人类的共同继承财产。国际海底管理局(International Seabed Authority,简称ISA)先后于2000年、2010年、2012年颁布“区域”内多金属结核、多金属硫化物与富钴结壳资源的探矿与勘探规章,规定这3类矿产的单份勘探合同初始面积上限分别为 $15\times 10^4\text{ km}^2$ 、 $1\times 10^4\text{ km}^2$ 和 $3\,000\text{ km}^2$,承包者履行区块返还义务后,可留存用于后续开发的专属矿区面积分别为 $7.5\times 10^4\text{ km}^2$ 、 $2\,500\text{ km}^2$ 和 $1\,000\text{ km}^2$ 。值得注意的是,针对多金属结核,承包者若初始申请面积不超过 $7.5\times 10^4\text{ km}^2$,则无需履行区块返还义务;而多金属硫化物与富钴铁锰结壳无此豁免机制。截至2025年底,ISA累计核准32份国际海

底勘探合同,其中多金属结核勘探合同19份、富钴结壳勘探合同5份(含1份已终止)、多金属硫化物勘探合同8份(ISA, 2026)(图1)。中国目前共持有5份勘探合同,涵盖3块多金属结核合同区、1块多金属硫化物合同区与1块富钴结壳合同区,总勘探面积约 $23.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中多金属硫化物勘探合同区位于西南印度洋中脊,其余4块位于太平洋。

当前,国际海底区域资源勘查、深海采矿技术研发同步提速,多家勘探承包方已完成合同区详勘,个别已进入商业化开发前期筹备阶段。如加拿大金属公司 The Metals Company(TMC)旗下的瑞鲁海洋资源公司(NORI)已完成东北太平洋克拉里昂—克利珀顿区(Clarion-Clipperton zone, CCZ)NORI-D区块的详勘、采矿系统原型机采集试验及预可行性研究,规划于2027年下半年开启多金属结核的商业化开采(TMC, 2025)。制度层面,ISA自2011年启动《“区域”内矿产资源开发规章(草案)》编制,2018年草案进入ISA理事会谈判,原定出台时限为2023年,但因各方在环保标准、惠益分享等核心议题分歧显著,磋商进程迟缓,至今该规章尚未正式出台。与此同时,

美国作为非《联合国海洋法公约》缔约国,推行深海采矿单边许可制度,对ISA主导的多边治理体系形成冲击,倒逼规章谈判提速。结合ISA秘书长于2026年6月在纽约召开的第三十六次《联合国海洋法公约》缔约国会议上的表态:“当下比以往任何时候都亟须出台深海采矿规章,以此为国际海底区域开发活动搭建一套全面、完善、统一的监管体系,保障最高等级的环境保护标准落地执行,完整维护并践行人类共同继承财产原则”(Carvalho, 2026),预判深海开发规章或将在2027年前后正式颁布。

本文基于团队多年大洋科考调查成果与ISA勘探合同区公开资料,系统梳理已被ISA立法监管的多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物3类深海战略矿产的资源禀赋与生态环境本底特征,并从资源战略价值、勘探程度、开发技术成熟度、生态影响等维度,客观对比分析这3类矿产商业化开发的核心优势与关键制约,研判其规模化开发的潜力与可能的落地时序,旨在为科学制定深海资源开发战略布局、构建适配不同矿种的差异化绿色开发技术体系、协同推进深海资源利用与生态环境保护提供科学依据与决策参考。

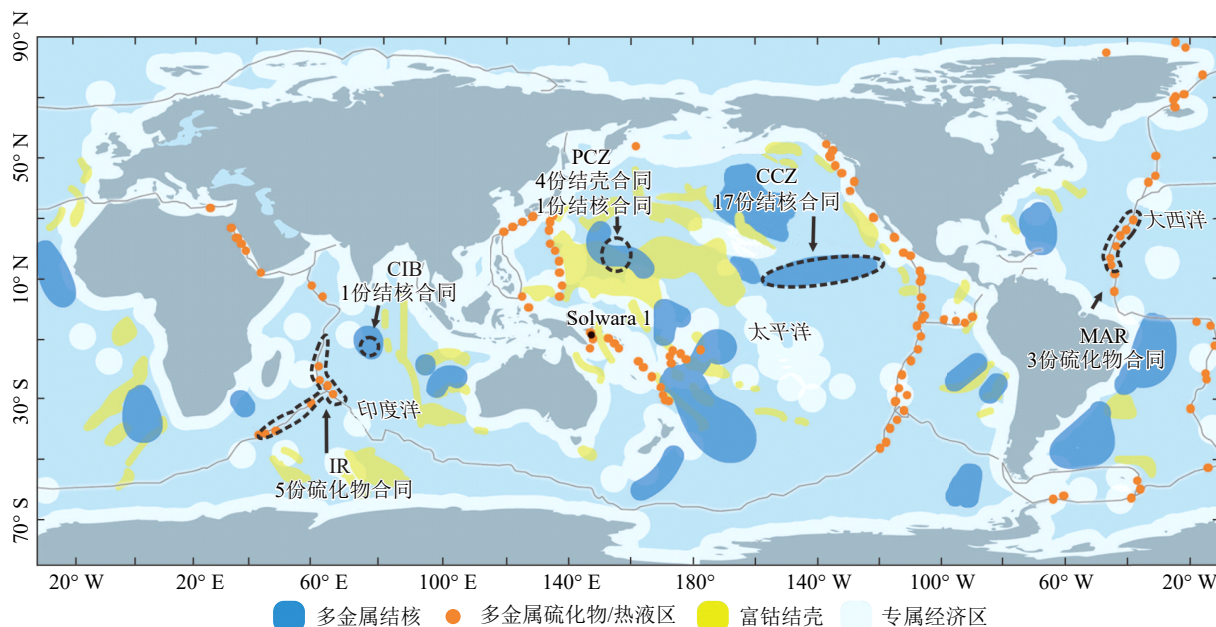


图1 全球深海多金属结核、多金属硫化物、富钴结壳的分布及ISA有效勘探合同区位置(黑色封闭虚线)

Fig. 1 Global distribution of polymetallic nodules, polymetallic sulfides, and cobalt-rich crusts and locations of active exploration contract areas authorized by ISA (black dashed circles)

注: IR. 印度洋中脊; MAR. 大西洋中脊; CIB. 中印度洋海盆; CCZ. 克拉里昂—克利珀顿多金属结核富集区; PCZ. 富钴结壳富集区; Solwara 1. 巴布亚新几内亚深海采矿项目“索瓦拉1号”位置; 据 Hein et al., 2013; Miller et al., 2018 修改。

1 多金属结核的资源禀赋与生态环境特征

1.1 资源禀赋特征

1.1.1 成矿条件与分布规律

多金属结核广泛分布于水深 4 000~6 000 m 的深海平原、海山坡脚及山间盆地,呈球状、椭球状、盘状或连生体状等多种形态,裸露或浅埋于深海沉积物表层 0~30 cm 范围内,由核心(基岩砾屑、生物碎屑、古结核碎块)与铁锰氧化物包壳构成(韩喜球等, 2000)。包壳中的主要成矿元素为 Fe、Mn, 伴生 Ni、Co、Cu, 同时高度富集 Ti、Li、Mo、Te、V、Zr、Nb、Ta、稀土和铂族等十余种稀有和贵金属元素(Hein et al., 2020)。

多金属结核的大规模富集需同时满足环境沉积速率低($<10\text{ mm/ka}$)、富氧底流持续流经、水深位于碳酸盐补偿深度(CCD)之下、成核物质充足等条件(韩喜球等, 1997)。国际海底区域多金属结核富集带主要位于东北太平洋 CCZ、西太平洋山间盆地、中太平洋海盆、东南太平洋海盆、西北太平洋海盆以及中印度洋海盆(图 1)。其中,东北太平洋 CCZ 是目前全球已知资源禀赋最好、勘探程度最高的多金属结核富集区,整体呈东西向条带状展布,总面积约 $450\times 10^4\text{ km}^2$ 。ISA 核准的 19 个国际海底多金属结核勘探矿区中,有 17 个布局在 CCZ 范围内,另 2 个分别位于中印度洋海盆和西太平洋山间盆地。中国持有的 3 块多金属结核勘探合同矿区有 2 块位于 CCZ, 1 块位于西太平洋马尔库斯-威克海山群和麦哲伦海山群的山间盆地,总勘探面积约 $22.2\times 10^4\text{ km}^2$ 。

1.1.2 金属富集特征与资源潜力

根据成矿物质来源,多金属结核可划分为水成型、成岩型和混合型 3 类(Halbach et al., 1981)。水成型结核成矿元素主要来自上覆海水,表面光滑,以隐晶质水羟锰矿、无定形铁氢氧化物为特征矿物,相对富集 Fe、Co, $w(\text{Mn})/w(\text{Fe})<2.5$ (Wegorzewski and Kuhn, 2014);成岩型结核叠加了孔隙水来源的成矿物质,表面粗糙,常呈菜花状,标志性矿物为布塞尔矿和钡镁锰矿,更富 Mn、Ni、Cu, $w(\text{Mn})/w(\text{Fe})>5$ (韩喜球等, 2000; Fan et al., 2026);混合型结核为两者之间的过渡类型,半埋藏在沉积物中,以上部光滑下部粗糙为特征。

多金属结核的成矿机制是数十年来深海矿产地质领域富有争议的科学问题,传统观点认为以无机化学成矿作用为主:在深海富氧底流环境,海水中溶解态二价锰、铁发生氧化,生成铁、锰氢氧化物胶体;胶体附着于海底岩屑、生物骨骼等成核基底,通过吸附作用富集水体中的微量镍、铜、钴等金属元素。铁氧化物胶体与锰氧化物胶体表面电性相反,二者交替沉淀,形成结核内部明暗相间的环带结构(Halbach et al., 1981; Hein et al., 2020);但越来越多的证据指向其为生物-化学二元耦合成矿,微生物及其介导过程对成矿元素的富集与分异起到关键控制作用(韩喜球等, 1997; Han et al., 2003; Liu et al., 2024; He et al., 2025)。

多金属结核的成矿速率极其缓慢,形成厚度数厘米的包壳,通常需要经历数百万至数千万年(Han et al., 2003; Hein et al., 2013; Yi et al., 2020)。作为深海沉积型矿床,其金属品位的空间稳定性可达数百公里,但丰度受局部地形、成核碎屑供给影响,空间连续性仅为数公里至数十公里(张富元等, 1997; Hein et al., 2020)。Mizell et al. (2022) 基于全球多金属结核有利成矿条件划定远景区,结合实际调查取样资料,估算全球干结核总资源量约 $2\ 100\times 10^8\text{ t}$ 。东北太平洋 CCZ 多金属结核类型涵盖水成型、成岩型和混合型,丰度范围为 $0\sim 20\text{ kg/m}^2$, 平均丰度 4.7 kg/m^2 , 平均金属品位 $w(\text{Mn})=28.4\%$ 、 $w(\text{Ni})=1.3\%$ 、 $w(\text{Cu})=1.0\%$ 、 $w(\text{Co})=0.2\%$ 、 $w(\text{Ti})=199\text{ }\mu\text{g/g}$ 、 $w(\text{Y})=96\text{ }\mu\text{g/g}$, 干结核保守资源量达 $211\times 10^8\text{ t}$, 折算全区金属量为锰 $60\times 10^8\text{ t}$ 、镍 $2.7\times 10^8\text{ t}$ 、铜 $2.26\times 10^8\text{ t}$ 、钴 $4\ 400\times 10^4\text{ t}$ 、钛 $420\times 10^4\text{ t}$ 和钇 $200\times 10^4\text{ t}$ 。对比全球陆地矿产基础储量,CCZ 全域 Ni、Co、Ti 和 Y 的资源量分别是陆地的 1.8 倍、3.4 倍、6 000 倍和 4 倍(Hein et al., 2020; Mizell et al., 2022)。西太平洋山间盆地的多金属结核以水成型为主,丰度 $0\sim 30\text{ kg/m}^2$, 平均丰度可达 21.4 kg/m^2 , 其金属富集特征更接近富钴结壳, Ti、Co 和 REE 更富集,其中 Co 品位可达 0.4% 以上(初凤友等, 2021)。中印度洋海盆与东太平洋海盆结核在类型、矿物组成和稀土配分模式上均相似。印度的多金属结核勘探合同区即位于该海盆,区内结核以混合型为主,具有高含量的 Mn、Ni、Cu 和中等含量的 Co、Mo 和 Li, 平均品位 $w(\text{Cu}+\text{Co}+\text{Ni})$ 为 2.39%, 平均丰度为

4.2 kg/m²(何高文等, 2021)。其品位与丰度均略低于 CCZ 典型矿区。

1.2 环境特征与生态脆弱性

多金属结核的赋存环境主要为 4 000~6 000 m 的深海洋盆,海底地形整体平缓开阔,沉积物以深海黏土类远洋沉积物为主,具有低温(1~2℃)、高压(40~60 MPa)、黑暗、有机碳补给匮乏、物质能量输入极度有限、生态环境结构单一的特征。区内典型底栖生物包括:深海海参、蛇尾、海星等巨型移动底栖生物;小型海绵、海葵、冷水珊瑚、水螅虫等附着型生物;多毛类、线虫等沉积物内栖生物。受低温寡营养环境长期约束,底栖生物普遍具备代谢速率缓慢、生长周期漫长、繁殖效率低下、种群扩散能力极弱的特点。

多金属结核是深海平原稀缺的硬质基质,为特化附着型生物提供了唯一稳定的栖息、定殖与繁衍载体,直接维系局地生物多样性(Park et al., 2026)。CCZ 已记录有 5 578 个底栖后生动物类群(Rabone et al., 2023),至少 30%~40% 的物种专性或兼性依赖多金属结核生存(Amon et al., 2016; Smith et al., 2021)。多金属结核的规模化商业开采会对依赖其生存的底栖生物群落造成严重生态胁迫。1989 年在秘鲁海盆开展了深海扰动与生物再定殖实验,时隔 26 年后,海底犁沟痕迹仍然清晰,底栖生物群落结构仍未恢复至基线水平,其中依赖结核硬底生存的固着型巨型底栖类群恢复程度最低,丰度仅为未扰动区的 11% 左右;小型底栖生物与移动型巨型底栖生物的丰度和多样性在 1 年后就开始有一定的恢复迹象(Jones et al., 2017; Vonnahme et al., 2020)。食物网模型研究表明,若 CCZ 内多金属结核被完全移除,将导致约 17.9% 的底栖生物类群消失、30.6% 的营养关联链路断裂,对深海食物网结构造成系统性破坏(Stratmann et al., 2021)。2022 年 TMC 公司在东北太平洋 CCZ 内的 NORI-D 区块开展采矿样机原位扰动试验,2 个月后重返试验区取样调查,发现采矿车履带直接扰动地带大型底栖生物丰度下降 37%、物种丰富度降低 32%;距扰动带 400 m 以外的羽流影响区,大型底栖生物丰度与物种丰富度无统计学显著变化,但群落结构已发生明显偏移,耐扰动多毛类优势度显著上升(Stewart et al., 2026)。

2 富钴结壳的资源禀赋与生态环境特征

2.1 资源禀赋特征

2.1.1 成矿条件与分布规律

富钴结壳通常呈薄壳状直接生长在海山裸露基岩表面,富含钴、镍、锰、铂、稀土元素等多种关键战略金属。其分布严格受基底条件、地形与海洋水文环境约束,大规模富集需同时满足:(1)海山年龄足够老(一般>80 Ma);(2)有大面积裸露基岩;(3)水深处于最低含氧带(OMZ)底部以下;(4)存在中等强度的洋流(流速 0.1~0.3 m/s);(5)周边陆源碎屑输入少,沉积速率低(Hein and Koschinsky, 2014; 韩喜球等, 2014; 何高文等, 2021)。大洋环境最适宜成矿的水深区间为 1 200~2 200 m,尤以大型平顶海山的边缘、外缘斜坡及海流流经的迎流面成矿条件最为优越。

国际海底区域富钴结壳富集带主要位于太平洋中西部海山群及东北太平洋海岭等区域(图 1)。其中,中—西太平洋近赤道带(10°N~22°N、170°E~140°W)构成全球富钴结壳的主要富集带(prime crust zone, PCZ)。该富集带自西向东涵盖麦哲伦海山区、马尔库斯—威克海岭、马绍尔海山群、中太平洋海山群及莱恩海岭北部区段,区内湿结壳丰度多介于 10~30 kg/m²,厚度普遍 2~10 cm,基岩大面积裸露的连片高富集区块结壳丰度可超过 60 kg/m²,是全球富钴结壳勘探与开发的核心目标区域(Mizell et al., 2022)。中国大洋协会富钴结壳合同区——中国唯一的国际海底富钴结壳勘探合同区,即位于麦哲伦海山区的采薇海山群和嘉偕平顶山群,总面积 3 000 km²(何高文等, 2021)。

2.1.2 金属富集特征与资源潜力

富钴结壳的矿物组合、元素组成及成矿速率均与水成型多金属结核类似,但相对更富集 Co、P、稀土元素(REE)及铂族元素(韩喜球等, 2009, 2014)。中—西太平洋 PCZ 内富钴结壳的覆盖率可达 30%~70%,w(Co)可高达 1.7%,w(Ni)可高达 1.1%,w(Pt)可高达 1.3 μg/g,稀土总量平均为 0.16%~0.25%,其中重稀土元素(HREE)质量占比约 25%,具有极高的综合利用价值(Hein and Koschinsky, 2014; Mizell and Hein, 2018)。

Mizell et al. (2022)采用体积法开展全球海山结

壳远景资源测算: 筛选 500~3 500 m 水深区间, 剔除厚沉积物覆盖等不利区域, 结合洋壳年龄分档赋值结壳厚度和海山基岩平均覆盖率, 估算出全球海山富钴结壳干结壳远景资源量达 $9\,300 \times 10^8$ t, 含 Mn 为 $2\,270 \times 10^8$ t、Co 为 51.5×10^8 t、Ni 为 44.8×10^8 t、Cu 为 16.5×10^8 t。其中约 35% 分布于国际海底区域, 干富钴结壳远景资源量约 $3\,255 \times 10^8$ t。PCZ 全域满足厚度 ≥ 2 cm、 $w(\text{Co}) \geq 0.6\%$ 、坡度 $< 15^\circ$ 工业开采阈值的优质可采区资源量约 75.3×10^8 t, 其中钴资源总规模超 $6\,000 \times 10^4$ t, 占全球已探明富钴结壳钴资源总量的 40% 以上。中国大洋协会富钴结壳合同区发育中厚层结壳 (2~4 cm), 平均 $w(\text{Co})$ 为 0.40%, 平均 $\sum \text{REE}$ 为 0.22%, 估算优质区块干结壳资源量超 $8\,000 \times 10^4$ t, 其中钴资源量超 32×10^4 t, 稀土资源量超过 170×10^4 t, 整体具备良好开发前景(何高文等, 2021; 杨耀民等, 2025)。值得指出的是, 结壳空间分布高度不均, 不同海山, 甚至同一海山的不同坡向之间, 富钴结壳的丰度、厚度和金属品位都存在显著差异, 致使现有的全球与区域资源量估算结果存在较大不确定性。

2.2 环境特征与生态脆弱性

富钴结壳主要赋存于 1 000~3 000 m 水深的海山上, 该水深区间温度 2~7 °C、静水压力 10~30 MPa。因洋流与海山相互作用, 流速较高(普遍为 5~20 cm/s), 局部发育上升流。海山地貌起伏多变, 生态环境异质性程度高, 不同海山单元、同一海山不同深度梯度的生物群落结构差异显著。受营养供给与地理隔离限制, 底栖生物整体丰度偏低、种群规模小、物种扩散能力弱, 附着型生物品种特有率可达 60% 以上。代表性生物类群包括: 玻璃海绵、冷水珊瑚和海百合等造架生物; 茗荷藤壶、苔藓虫、软珊瑚等依附结壳生长的附生生物; 以及深海虾、章鱼、合鳃鳗和长尾鳕等自由移动型生物(张均龙和徐奎栋, 2013; Shen et al., 2024)。目前全球绝大多数海山仍缺乏系统性环境与生态基线调查, 学界对海山生物多样性空间格局、生态系统连通性及生态服务功能的认识依旧十分有限。

富钴结壳的开采会导致依赖其生存的特有生物失去栖息场所。与多金属结核矿区相比, 富钴结壳矿区的生物特有率更高、生态环境异质性更强, 其生态系统对采矿扰动的敏感性也更

高。日本海洋研究开发机构(JAMSTEC)于 2020 年在其专属经济区内的 Takuyo-Daigo 海山实施了全球首次富钴结壳海上采矿测试。1 年后的跟踪监测结果表明, 仅有不足 12% 的原有底栖生物类群在扰动区域重新定殖, 且恢复后的群落结构与原生生态环境存在显著差异(Washburn et al., 2023)。

3 多金属硫化物的资源禀赋与生态环境特征

3.1 资源禀赋特征

3.1.1 成矿条件与分布规律

海底多金属硫化物形成于海底热液循环, 属典型的热液成因矿产, 主要分布于大洋中脊、弧后盆地和火山弧等海底构造与岩浆活跃环境, 赋存水深多在 1 500~4 000 m。矿体呈三维丘状, 厚度可达数十米, 单丘横向展布一般为数十至数百米。矿体浅部以块状硫化物堆积为主(seafloor massive sulfide, SMS), 深部发育网脉状矿化结构。矿石富 Fe、Cu、Zn、Pb, 伴生 Au、Ag 等贵金属及 Co、Se、Mo 等关键金属(Wang et al., 2017; Yang et al., 2025), 具有金属品位高、矿体埋藏浅、开采相对容易的特点。形成大型的 SMS 矿床需同时满足: (1) 洋壳深部有岩浆热源持续供热; (2) 发育高角度正断层、低角度拆离断层等高渗透性张性构造, 为海底热液循环提供通道; (3) 热液流体与围岩发生充分水岩反应, 有效淋滤萃取成矿金属; (4) 沉积物盖层薄或缺失, 高温热液能够与冷海水充分混合, 促使金属硫化物沉淀富集; (5) 热液系统长期活跃, 可维持数千年至数万年的成矿时间。海底扩张速率直接控制海底块状硫化物(SMS)矿床发育规模: 快速扩张洋中脊(如东太平洋海隆)热液活动活跃, 但热液系统生命周期较短, 矿点数量众多但矿体体量有限; 慢速和超慢速扩张洋中脊(如大西洋中脊、西南印度洋脊、卡尔斯伯格脊)热液系统较稳定, 热液成矿作用持续周期更长, 利于产出规模大、金属品位优的大型硫化物矿体(Yu et al., 2021; Cai et al., 2024)。

经统计, 全球海域已发现的海底热液区超过 1 000 处, 其中已确认的 SMS 矿床点逾 420 个, 洋中脊占 56%、弧后盆地占 28%、洋内火山弧占 16%。ISA 共核准 8 份多金属硫化物勘探合同, 全部位于中速-慢速-超慢速扩张洋中脊, 其中大

西洋中脊3份(俄罗斯、法国、波兰各1份)、印度洋中脊5份(印度2份,中国、韩国、德国各1份)(图1)。

3.1.2 金属富集特征与资源潜力

海底多金属硫化物矿床的常见矿物成分包括黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等硫化物、硬石膏和重晶石等硫酸盐,伴生自然金、自然银等(Wang et al., 2017; Yang et al., 2025)。对全球108个SMS矿床点近4000组浅表层样品的统计显示,主要关键金属含量中值分别为 $w(\text{Cu})=1.21\%$ 、 $w(\text{Fe})=19.79\%$ 、 $w(\text{Zn})=4.17\%$ 、 $w(\text{Pb})=0.06\%$ 、 $w(\text{Ag})=62\text{ }\mu\text{g/g}$ 、 $w(\text{Au})=0.97\text{ }\mu\text{g/g}$ 。其中,慢速-超慢速洋脊上发育的多金属硫化物矿床,相对于全球SMS的样品中值水平,具有更富Cu、Au、Co、Se等关键金属的趋势(罗洪明等, 2021; Yang et al., 2025; Wang et al., 2025)。相比多金属结核和富钴结壳,海底硫化物Cu、Zn、Au、Ag品位显著更高,但稀土、锰、钴总量远低于铁锰氧化物型矿产(Mizell et al., 2022)。

近年对大西洋中脊TAG(Trans-Atlantic Geotraverse)、Semenov热液区硫化物的调查发现,非活动热液区海底面以下300 m范围内的隐伏型硫化物资源量可能是活动热液区海底表层资源量的2~4倍,据此估算全球表层及浅埋藏的硫化物总远景资源量可能达 $(12\sim 24)\times 10^8\text{ t}$ (Pelletier et al., 2024)。中国在西南印度洋脊硫化物勘探合同区内的玉皇硫化物矿床是全球已知规模最大的隐伏硫化物矿床之一,预测资源量高达 $4\,500\times 10^4\text{ t}$,其中至少含有 $75\times 10^4\text{ t}$ 铜和锌,以及18 t金(Han et al., 2010; Yu et al., 2021)。需要注意的是,SMS矿体品位空间分异显著,特别是深部网脉区,不同部位金属品位差异可达数倍乃至一个数量级;现阶段全球SMS矿床勘查程度偏低,多数仅作浅表层取样,缺少钻探与高精度地球物理探测资料联合约束。SMS矿床精细勘探与资源量的精准评估是实现商业化开发的首要前提。

3.2 环境特征与生态脆弱性

海底多金属硫化物赋存区的生态环境可划分为活动热液区与非活动热液区2个类型。两者的生态环境特征迥异,在活动热液区,高温热液喷口(温度可达 $300\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$)持续释放富含 H_2S 、 CH_4 和 H_2 等还原性物质的流体,在喷口周围形成陡峭的氧化还原梯度,孕育出以化能合成

微生物为基础生产力的独特生态系统。典型底栖生物包括螺、贻贝、蛤等软体动物,虾、蟹等节肢动物及巨型管状蠕虫等环节动物,具有极高的物种特有性(Zhou et al., 2022; He et al., 2023)。对于非活动热液区,由于还原性热液供应中断,喷口周边特殊的理化环境逐渐恢复为正常海水环境,依赖化能合成作用的特有物种会因食物来源消失而自然消亡,逐渐被海绵和冷水珊瑚等典型海山环境物种所取代。对东太平洋海隆 9°N 热液区2005—2006年火山喷发后的原位长期观测显示,活动热液喷口的大型底栖生物群落在喷发后4年已恢复较高物种丰富度,完整成熟群落可在10~30年尺度内重建(Gollner et al., 2020);非活动热液区的生态脆弱性远高于活动热液区,底栖生物群落以海绵、水螅、棘皮动物等异养型生物为主,而此类生物生长速率缓慢、繁殖能力弱,一旦硫化物矿体被彻底移除,群落恢复周期可达千年尺度,甚至永久无法复原(Gollner et al., 2026)。因金属硫化物丘分布局限,其开采的环境影响范围较小。值得指出的是,裸露海底的多金属硫化物在富氧海水和微生物作用下本身也会自然发生氧化作用,释放出重金属等有毒有害物质,并导致局部环境缺氧和酸化(Hou et al., 2024)。该自然过程对周边生态环境的影响目前还未充分评估。

4 国际海底区域关键矿产开发前景

4.1 深海典型矿区的吨矿基准地质毛价值对比

为定量刻画深海多金属结核、富钴结壳与多金属硫化物的先天资源禀赋差异,本文选取太平洋CCZ、PCZ及大西洋中脊TAG,分别作为多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物3类矿产的代表性矿区,基于各矿区目标资源的平均金属品位估算每吨矿石的基准地质毛价值测算。参与价值核算的金属种类,参照各矿种对应的圈矿工业指标确定。多金属结核与富钴结壳选取Ni、Cu、Co;多金属硫化物选取Cu、Zn、Au、Ag。其他有价金属元素仅作为远期资源潜力考量,暂不纳入核算。各代表性矿床的平均金属品位及近10年各金属的平均价格详见表1。测算结果显示,CCZ多金属结核、PCZ富钴结壳与TAG区多金属硫化物的吨矿基准地质毛价值分别约为308.5 USD/t、362.9 USD/t和334.7 USD/t,即三者的单位矿石地

表 1 国际海底区域多金属结核、富钴结壳、硫化物资源禀赋与环境特征及商业化开发潜力综合对比

Table 1 Comparison of resource endowments, environmental characteristics, and commercial exploitation potential of polymetallic nodules, cobalt-rich crusts, and seafloor massive sulfides in the Area

对比维度	多金属结核	富钴结壳	多金属硫化物
构造环境	深海洋盆、海山间盆地	海山	洋中脊
赋存水深	4 000~6 000 m	800~2 500 m	1 500~4 000 m
生态特征	生物丰度低, 特有种丰富	生物丰度低, 特有种丰富	活动热液区: 化能生态系统, 物种特有序度极高; 非活动热液区: 与海山生态环境相近
矿床形态与规模	二维, 呈结核状离散分布于沉积物表层, 规模大	二维, 薄壳状生长于海山基岩上, 规模较大	三维, 丘状(海底面以上)、锥状、网脉状(海底面以下), 规模有限
主要矿物成分	水羟锰矿、钙锰矿、水钠锰矿、针铁矿、水铁矿等	水羟锰矿、水钠锰矿、水铁矿、针铁矿、磷灰石等	黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、斑铜矿等
金属富集情况	Mn、Fe、Ni、Cu、Co、Mo、Zr、Li、Y、稀土、Ti等	Fe、Mn、Co、Ni、Ti、Mo、Cu、Bi、Pb、稀土、Zr、Te、W、Pt等	Cu、Fe、Zn、Pb、Au、Ag、Mo、Co、In、Te、Sn、Cd等
资源评价指标	湿结核丰度 $\geq 5 \text{ kg/m}^2$; $w(\text{Ni}+\text{Cu}+\text{Co}) \geq 2.0\%$ 或用 Ni 当量品位评价(行业常用参考阈值)	结壳厚度 $\geq 3 \text{ cm}$; $w(\text{Co}) \geq 0.6\%$ 或用 Co 当量品位(折合 Ni、Cu)区分矿体优劣(行业通用参考阈值)	Cu 当量品位 2.6%(折合 Zn、Au、Ag); 附加: 矿体厚度 $\geq 2 \text{ m}$ 、矿石量 $\geq 100 \times 10^4 \text{ t}$ (参考 Solwara 1 项目)
典型矿床金属平均品位	CCZ 可采区: $w(\text{Mn})=28.4\%$ 、 $w(\text{Ni})=1.3\%$ 、 $w(\text{Cu})=1.0\%$ 、 $w(\text{Co})=0.21\%$ 、 $\sum \text{REY}=0.08\%$ (Hein et al., 2020)	PCZ 可采区: $w(\text{Co})=0.9\%$ 、 $w(\text{Mn})=23.8\%$ 、 $w(\text{Ni})=0.59\%$ 、 $w(\text{Cu})=0.19\%$ 、 $\sum \text{REY}=0.13\%$ (Hein and Koschinsky, 2014)	TAG 热液区主硫化物丘上部 20 m 平均品位: $w(\text{Cu})=4.3\%$ 、 $w(\text{Zn})=1.4\%$ 、 $w(\text{Au})=1.1 \text{ g/t}$ 、 $w(\text{Ag})=26 \text{ g/t}$ (Herzig et al., 1998)
全球及典型矿区资源量	全球结核资源量约 $2.100 \times 10^8 \text{ t}$; 东太平洋 CCZ 可采干结壳资源量约 $211 \times 10^8 \text{ t}$, 含锰 $60 \times 10^8 \text{ t}$ 、镍 $2.7 \times 10^8 \text{ t}$ 、铜 $2.3 \times 10^8 \text{ t}$ 、钴 $0.04 \times 10^8 \text{ t}$ (Hein et al., 2020)	全球干结壳远景资源量约 $211 \times 10^8 \text{ t}$, 钴金属量约 $10 \times 10^8 \text{ t}$; 中西太平洋 PCZ 优质可采区资源量 $75.3 \times 10^8 \text{ t}$, 含钴 $(3\ 200 \sim 3\ 800) \times 10^4 \text{ t}$ 、稀土 $1 \times 10^5 \text{ t}$ (Hein and Koschinsky, 2014)	全球新火山脊硫化物资源量约 $6 \times 10^8 \text{ t}$; 玉皇矿床资源量可能超 $4\ 500 \times 10^4 \text{ t}$; 大西洋 TAG 矿区资源量超 $2\ 100 \times 10^4 \text{ t}$ (Hannington et al., 2011; Yu et al., 2021; Pelleter et al., 2024)
典型矿床吨矿基准地质毛价值*	CCZ 多金属结核: 308.5 USD/t (计价组分: Ni、Cu、Co)	PCZ 富钴结壳: 362.9 USD/t (计价组分: Ni、Cu、Co)	TAG 海底块状硫化物: 334.7 USD/t (计价组分: Cu、Zn、Au、Ag)
采矿对生态环境的扰动	大面积扰动, 影响范围大, 生态恢复周期数百年尺度	中度扰动, 影响范围较大, 生态恢复周期数千年尺度	局部扰动, 影响范围有限。活动热液区: 生态恢复周期数年至数十年尺度; 非活动热液区: 生态恢复周期数千年尺度
勘探程度	高, 19 份 ISA 勘探合同, 部分区块已完成详查与选址	偏低, 4 份 ISA 勘探合同, 整体处于概查阶段	低—中等, 8 份 ISA 勘探合同, 多数矿点仅完成浅表取样查证, 少数重点靶区完成详查
技术成熟度	系统海试成熟, 接近商业化应用	单体试验为主, 系统集成度低	单体采掘成熟, 较接近商业化应用
综合开采难度	★☆☆☆☆	★★★★★	★★★☆☆
短板与风险	金属品位偏低、单位金属产出占地大; 大面积沉积物扰动, 生态争议大	基岩剥离损耗大、分选难度高、开采成本高; 海山生态极脆弱, 环保阻力大	矿体离散、单矿规模有限, 品位稳定性差、难以连续规模化开采; 热液生态特有种保护压力大
商业化开发潜力	最高, 资源体量巨大、开采技术成熟、规模化成本低	中等, 战略价值极高但经济可行性弱	较高, 金属品位高、选冶工艺成熟、吨矿价值高, 但千万吨级大型矿床稀缺, 规模化难度大
商业化时序预判	近期(2030 年前后有望实现商业投产)	远期(中长期战略储备)	近—中期(个别高品位大型矿床可能具备较早投产潜力, 但整体规模化商业开发可能滞后多金属结核 5~10 年)

注: *为 1 t 矿石核心计价金属(结核/结壳 Ni、Cu、Co, 硫化物 Cu、Zn、Au、Ag)的理论价值, 未扣除开采、选矿、冶炼、运输、税费、环境成本, 无回收率折扣; 金属价格采用 2016—2025 年世界银行(World Bank)大宗商品市场数据库(CMO)+伦敦金属交易所(LME)年度结算均价; 贵金属(Au、Ag)伦敦金银市场协会(LBMA)年度现货均价 10 年均价: Mn=1 650 USD/t, Ni=13 500 USD/t, Cu=7 000 USD/t, Co=30 000 USD/t, Zn=2 400 USD/t, Ag=20.22 USD/oz (0.65 USD/g), Au=1 710.69 USD/oz (55 USD/g)。数据来源: World Bank commodity markets outlook; LBMA historical prices; LME annual settlement prices。

质毛价值处于同一量级,富钴结壳相对突出。值得指出的是,该指标仅表征单位矿石的理论价值,未扣除采矿、选矿、海上作业等开发成本,矿床实际开发价值还受矿体规模、海底赋存环境、开采难度、选冶工艺等条件约束。

4.2 开发前景与商业化落地时序研判

为系统对比3类深海关键矿产的商业化开发前景,下面再结合典型矿床的经济评价结果,从经济潜力、勘探程度、开采技术成熟度、生态环境约束4个维度开展综合分析(表1),研判其商业化落地的可能时序。

(1)多金属结核

多金属结核资源总量巨大,锰、镍、钴等关键金属储量可观;矿区多位于地形平缓的深海平原,是3类矿产中最适配大范围工业化作业的资源类型。经济潜力方面,以CCZ内的NORI-D区块为例,该区块面积25 160 km²,结核平均丰度11.6~12.8 kg/m²,全生命周期可回收湿结核资源量1.64×10⁸ t。项目设计服务年限18年,进入稳态生产阶段后,年产湿结核1 080×10⁴ t,年均产出镍9.7×10⁴ t、锰238.9×10⁴ t、铜7×10⁴ t、钴7 400 t。根据工业经济评价模型,考虑湿法冶金回收率、副产品折价及精矿计价扣减等工程参数,测算得出多金属结核干矿稳态销售收入为595~640 USD/t,项目税后净现值(NPV)55.08×10⁸美元,内部收益率(IRR)达27%,静态投资回收期仅约2年,经济收益优势显著(AMC Consultants Pty Ltd., 2025)。勘探进展方面,目前多处国际海底勘探合同区已完成精细勘探与矿址优选。TMC公司规划于2027年末投产NORI-D区块。开采技术层面,自20世纪70年代起,国际上便已启动多金属结核集矿-扬矿技术攻关。2022年,TMC联合Allseas公司在CCZ的NORI-D区块完成4 300 m水深全套采矿装备联动海上中试,采用履带式水力集矿方式采集结核约4 500 t,采集效率达86.4 t/h,并通过立管系统将超3 000 t结核提升至水面支持船,验证了多金属结核规模化开发的技术可行性。中国方面,中国五矿集团、北京先驱高技术开发有限责任公司于2024年先后向ISA提交采矿装备海上试验环境影响报告书,2025年获正式核准,将分阶段开展海上装备验证试验。生态约束方面,多金属结核单位面积资源丰度偏低,大规模履带式集矿易引发大范围沉积物再悬浮,对

底栖生态系统带来胁迫和损伤。目前,悬浮式低扰动智能集矿装备已由概念设计步入试验阶段,结合条带式采矿路径规划及年度开采面积管控等生态友好措施,可有效降低采矿作业对生态环境的扰动强度,为底栖生物群落自然恢复创造有利条件(Jones et al., 2017; Vonnahme et al., 2020; Stewart et al., 2026)。综上,多金属结核有望成为全球首个实现规模化商业开发的深海矿产类型,若ISA开发规章如期落地,商业化投产窗口或将在2030年前后到来。

(2)多金属硫化物

多金属硫化物富含铜、锌、金、银等高价金属,金属品位高,矿体多呈丘状,利于集中开采。经济潜力方面,以巴布亚新几内亚俾斯麦海Solwara 1项目为例,这是全球首个完成系统预可行性研究的深海硫化物采矿项目,鸚鵡螺矿业公司于2011年获得巴布亚新几内亚政府的采矿许可。该矿床水深约1 600 m,探明矿石总储量220×10⁴ t,综合铜当量品位6.8%~8.1%,金品位4.8~6.4 g/t;设计日开采规模5 900 t,服务周期30个月,年均可产铜8×10⁴ t、黄金(15~20)×10⁴ oz(1 oz=28.349 5 g),全生命周期预估销售收入超25亿美元,投资回报潜力显著(AMC Consultants Pty Ltd., 2018)。不过,该项目最终因社区环保反对、项目融资断裂等问题,开发商鸚鵡螺矿业公司于2019年终止了开发计划。冲绳海槽伊是名硫化物矿床位于日本专属经济区,资源量为390×10⁴ t,铜当量品位为5.25%。近期经济评估表明,该矿床在常规开采模式下不具备商业可行性,核心制约因素包括矿体分布分散、作业点位频繁搬迁压缩有效生产工时、深海提升系统运维成本高以及重金属污染治理投入大等。仅当金属价格上涨30%或铜当量品位提升至8.25%以上时,该项目方可实现正向收益(Yamazaki et al., 2023)。开发技术层面,日本石油天然气金属矿产资源机构(JOGMEC)于2017年在冲绳海槽完成了采掘-扬矿一体化海上试验,验证了核心采矿装备的作业可靠性。生态影响方面,多金属硫化物开采以局域点状作业为主,无大范围沉积物扩散,空间影响尺度远小于结核开采。但矿区生态系统独特,特别是热液喷口作为深海特殊极端生态环境,物种特有度高,开采造成的生态环境损毁具有不可逆性,环保争议大。相比多金属

结核,多金属硫化物资源规模有限,千万吨级的大型矿床稀缺,而项目盈利水平高度依赖于矿体规模、铜当量品位及大宗商品市场行情,收益稳定性较弱。此外,硫化物资源的整体勘查程度也低于多金属结核。其相对优势在于后端产业配套,海底硫化物矿床的矿物组分与陆域硫化矿床相似,选冶工艺成熟,有价金属综合回收率高,工业化适配性优良,可直接对接现有成熟冶炼产线,产业落地配套优势显著。总体而言,多金属硫化物有望成为继多金属结核之后实现规模化商业开发的深海矿产类型,但其商业化落地节奏可能较结核滞后 5~10 年。

(3) 富钴结壳

富钴结壳的核心优势为钴品位高,但该类资源赋存于海山斜坡及顶部,空间分布零散,整体储量规模有限;开采需剥离基岩,矿石贫化率高、分选难度大,虽然其吨矿基准地质毛价值居于 3 类深海矿产之首,但实际收益折减幅度显著高于多金属结核,经济可行性在 3 类矿产中最低。[Cardno\(2016\)](#) 针对西太平洋典型海山富钴结壳项目的测算显示,项目全生命周期内部收益率不足 4%,低于国际资源开发行业通用的 10% 最低投资基准,市场化开发吸引力较弱。开采技术层面,适配复杂海山地貌的专用开采装备研发进展缓慢,尚未形成可支撑规模化作业的技术体系。生态约束方面,海山生态环境生物多样性丰富、特有物种多,是深海重要生态功能区,剥离式开采会造成硬质基岩生态环境永久性损毁,生态破坏不可逆。勘探进展方面,目前 ISA 核准的富钴结壳有效勘探合同仅 4 份,全球工作重心仍以资源勘查与潜力评价为主,公开的预可行性研究成果稀缺。整体而言,富钴结壳商业化面临经济效益、工程技术、生态保护三重约束,短期内实现规模化商业开发的难度较大,适宜作为远期战略后备资源,持续开展资源勘探与开采技术攻关。

需要指出的是,虽然多金属结核在理想状态下有望在 2030 年前后开启商业化开采,但产业化落地仍面临多重不确定性:一是核心开采装备的长期运行可靠性尚未经过规模化深海作业充分检验;二是对于采矿活动对深海生态环境的影响,现有科学认知尚不充分;三是国际环保舆论压力持续加大,深海开发制度与监管规则仍存在

较大变数;四是全球金属价格存在周期性大幅波动,将直接影响项目投资收益。上述因素均可能为产业进程带来较大不确定性,包括扰动商业化开发时序、推迟项目落地进度,并影响项目经济效益。

5 结论与展望

本文系统梳理了国际海底区域多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物的资源禀赋与生态环境特征,横向对比 3 类矿产的商业化开发前景,主要结论如下。

(1) 国际海底区域的多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物富集 Mn、Co、Ni、Cu、Au 等关键金属,资源潜力巨大,其开发利用对缓解全球关键金属供需矛盾、保障产业链供应链安全具有重要战略意义。基于 2016—2025 年国际金属平均价格和代表性矿床平均品位测算,三者的吨矿基准地质毛价值区间为 308.5~362.9 USD/t,基本上处于同一量级。

(2) 随着深海开采技术的进步,国际海底区域这 3 类矿产有望逐步实现商业化开发。整体开发时序大概率呈现“结核先行、硫化物接续、结壳储备”的梯次格局:多金属结核资源量最大、品位稳定、规模化开采成本优势显著,产业化成熟度最高,若 ISA 开发规章于 2027 年前后落地,个别已完成详勘的矿区有望 5 年内实现商业化投产;多金属硫化物金属品位高,但勘探难度较大,勘探程度相对不足,而且资源规模较小,其规模化产业开发进程预计可能会滞后多金属结核 5~10 年;海山富钴结壳钴、镍等关键金属富集,战略价值突出,但受开采技术难度与生态成本制约,短期内尚不具备规模化商业开采条件。

(3) 深海矿产开采会对海底生态系统造成不同程度的影响:多金属结核开采的空间扰动范围最广;富钴结壳开采会造成附着生物生境大面积损毁;多金属硫化物开采空间影响范围最小,但其生态环境物种特有性强、生态保护压力大。目前对深海生态系统的结构功能、物种分布与生物多样性的认知仍十分有限,对深海采矿的确切生态效应尚不明确。

基于上述认识,未来可从基础科学、工程技术与国际海底治理 3 个维度持续深化研究与实践:

(1)在基础科学研究层面,应深化全球深海多学科交叉协作,持续推进深海基础地质调查、资源精细勘查与生态环境本底长期监测,进一步掌握深海矿产资源的分布规律,了解深海生态系统的基线特征、自然变率与驱动机制,深化对采矿活动生态扰动过程与恢复机理的科学认知,为深海资源绿色开发、生态保护修复与规范化监管提供坚实的理论依据与数据支撑。

(2)在工程技术与产业发展层面,针对3类矿产资源及其生态环境特点,分类研发差异化的低扰动绿色开采技术与作业模式;同时围绕高精度资源勘查、智能采掘、高效矿物输送、清洁选冶与矿区生态修复等全产业链关键环节,持续推进核心技术攻关,支撑深海采矿产业向安全、高效、低碳、可持续的方向发展。

(3)在深海治理与国际规则构建方面,结合不同资源类型的赋存环境差异与生态脆弱性特征,建立分区分类的精细化生态保护策略与分级管控的环境监管体系,平衡资源开发与生态保护的关系,推动国际海底区域资源开发向着公平有序、绿色低碳、多方共赢的方向演进。

总体而言,深海矿产资源开发具备突出的战略价值,同时伴随严峻的破坏生态环境的风险,需协同推进科学认知、技术创新与国际海底制度建设,方能达成深海资源可持续开发与海洋生态保护的平衡。

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明: 韩喜球负责论文构思与撰写,郭航成参与资料收集、绘图、校对与修改,李波、王春生、李小虎、王叶剑、邱中炎参与讨论与修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

[参 考 文 献]

初凤友,姜静,刘禹维,等,2021.我国深海多金属结核资源的勘探进展及思考[J].中国有色金属学报,31(10): 2638—2648.

Chu F Y, Jiang J, Liu Y W, et al., 2021. Advance and implication for polymetallic nodules resources exploration in deep-sea[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 31(10): 2638—2648. (in Chinese)

韩喜球,方银霞,金翔龙,等,2000.东太平洋多金属结核的叠层

石包壳及其沉积环境意义[J].海洋学报,22(5): 73—81.

Han X Q, Fang Y X, Jin X L, et al., 2000. The stromatolite coats of manganese nodules from the East Pacific Ocean and their sedimentary environment significance[J]. Acta Oceanologica Sinica, 22(5): 73—81. (in Chinese)

韩喜球,邱中炎,马维林,2014.海山富钴结壳:高分辨率年代框架与古环境记录研究[M].北京:地质出版社.

Han X Q, Qiu Z Y, Ma W L, 2014. Seamount cobalt-rich crusts: high resolution age framework and paleo-environment records[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

韩喜球,邱中炎,马维林,等,2009.富钴结壳高分辨率定年:地球轨道周期印记法与 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年法对比研究[J].中国科学D辑:地球科学,39(4): 497—503.

Han X Q, Qiu Z Y, Ma W L, et al., 2009. High-resolution dating of Co-rich crusts: a comparative study using the methods of orbital pacing and $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ dating[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 52(4): 484—488.

韩喜球,沈华梯,陈建林,等,1997.太平洋多金属结核的生物成因与生物-化学二元成矿机制初探[J].中国科学(D辑),27(4): 349—353.

Han X Q, Shen H T, Chen J L, et al., 1997. Biogenesis and binary mineralization of organism and chemism of polymetallic nodules from Pacific Ocean[J]. Science in China (Series D), 40(6): 656—661.

何高文,杨永,韦振权,等,2021.西太平洋中国富钴结壳勘探合同区矿床地质[J].中国有色金属学报,31(10): 2649—2664.

He G W, Yang Y, Wei Z Q, et al., 2021. Mineral deposit characteristics of cobalt-rich Fe-Mn crusts in COMRA contract area, western Pacific Ocean[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 31(10): 2649—2664. (in Chinese)

罗洪明,韩喜球,王叶剑,等,2021.全球现代海底块状硫化物战略性金属富集机理及资源前景初探[J].地球科学,46(9): 3123—3138.

Luo H M, Han X Q, Wang Y J, et al., 2021. Preliminary study on the enrichment mechanism of strategic metals and their resource prospects in global modern seafloor massive sulfide deposits[J]. Earth Science, 46(9): 3123—3138. (in Chinese)

杨耀民,任悦,刘永刚,等,2025.深海富钴结壳资源评价方法研究进展[J].海洋科学进展,43(1): 1—17.

Yang Y M, Ren Y, Liu Y G, et al., 2025. Progress in the evaluation of deep-sea cobalt-rich crust resources[J]. Advances in Marine Science, 43(1): 1—17. (in Chinese)

张富元,沈华梯,韩喜球,1997.太平洋多金属结核富集区结核丰度和品位的地质统计学分析[J].沉积学报,15(3): 126—132.

Zhang F Y, Shen H T, Han X Q, 1997. Geostatistical analysis of the abundance and grade of the polymetallic nodule enriched

- area of the Clarion-Clipperton zone in the Pacific[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(3): 126—132. (in Chinese)
- 张均龙, 徐奎栋, 2013. 海山生物多样性研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 28(11): 1209—1216.
- Zhang J L, Xu K D, 2013. Progress and prospects in seamount biodiversity[J]. *Advances in Earth Science*, 28(11): 1209—1216. (in Chinese)
- AMC Consultants Pty Ltd., 2018. Preliminary economic assessment of the Solwara Project, Bismarck Sea, PNG (NI 43-101 Technical Report)[R]. Toronto: Nautilus Minerals Niuqini Ltd.
- AMC Consultants Pty Ltd., 2025. Technical report summary of prefeasibility study of NORI area D, Clarion Clipperton zone[R]. Melbourne: AMC Consultants Pty Ltd.
- Amon D J, Ziegler A F, Dahlgren T G, et al., 2016. Insights into the abundance and diversity of abyssal megafauna in a polymetallic-nodule region in the eastern Clarion-Clipperton Zone[J]. *Scientific Reports*, 6: 30492.
- Cai Y Y, Han X Q, Petersen S, et al., 2024. Mineralization of sulfide mound at Wocan-1 hydrothermal field based on geological mapping, mineralogy and sulfur isotope studies, Carlsberg Ridge, Northwest Indian Ocean[J]. *Ore Geology Reviews*, 171: 106180.
- Cardno, 2016. An assessment of the costs and benefits of mining deep-sea minerals in the Pacific Island Region[R]. Suva: Secretariat of the Pacific Community: 1—229.
- Carvalho L, 2026. Agenda item 9: information reported by the secretary-general of the International Seabed Authority[R]. Kingston: International Seabed Authority.
- Fan Z D, Li X H, Dong Y H, et al., 2026. Distribution and evolution of manganese minerals in polymetallic nodules from the Clarion-Clipperton fracture zone: implications for nickel and copper enrichment[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 424: 300—315.
- Gollner S, Govenar B, Martinez A P, et al., 2020. Animal community dynamics at senescent and active vents at the 9°N East Pacific Rise after a volcanic eruption[J]. *Frontiers in Marine Science*, 6: 832.
- Gollner S, Jaeckel A, Robb S, et al., 2026. Three-dimensional management needs of deep-sea hydrothermal vent ecosystems[J]. *Marine Policy*, 185: 106959.
- Halbach P, Scherhag C, Hebisch U, et al., 1981. Geochemical and mineralogical control of different genetic types of deep-sea nodules from the Pacific Ocean[J]. *Mineralium Deposita*, 16(1): 59—84.
- Han X, Wu G, Cui R, et al., 2010. Discovery of a hydrothermal sulfide deposit on the Southwest Indian Ridge at 49.2°E[C]//American Geophysical Union Fall Meeting 2010. San Francisco: American Geophysical Union: OS21C—1531.
- Han X Q, Jin X L, Yang S F, et al., 2003. Rhythmic growth of Pacific ferromanganese nodules and their Milankovitch climatic origin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 211(1/2): 143—157.
- Hannington M, Jamieson J, Monecke T, et al., 2011. The abundance of seafloor massive sulfide deposits[J]. *Geology*, 39(12): 1155—1158.
- He X Y, Liu Q, Li X H, et al., 2025. Bacterial contributions to the formation of polymetallic nodules in the Pacific Ocean[J]. *Frontiers in Marine Science*, 12: 1533654.
- He Z G, Lou Y Z, Zhang H Y, et al., 2023. The role of hydrodynamics for the spatial distribution of high-temperature hydrothermal vent-endemic fauna in the deep ocean environment[J]. *Science of the Total Environment*, 904: 166714.
- Hein J R, Koschinsky A, 2014. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules[M]//Holland H D, Turekian K K. *Treatise on geochemistry* (Second Edition). Oxford: Elsevier: 273—291.
- Hein J R, Koschinsky A, Kuhn T, 2020. Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(3): 158—169.
- Hein J R, Mizell K, Koschinsky A, et al., 2013. 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*, 51: 1—14.
- Herzig P M, Petersen S, Hannington M D, 1998. Geochemistry and sulfur-isotopic composition of the TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge, 26°N[J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results*, 158: 47—70.
- Hou X F, Han X Q, Hu X K, et al., 2024. Formation mechanism of Fe oxyhydroxides and behavior of metals during the oxidation of submarine sulfides at the Wocan-1 hydrothermal field, Carlsberg Ridge[J]. *Ore Geology Reviews*, 174: 106307.
- IEA, 2025. Global critical minerals outlook 2025[R]. Paris: International Energy Agency: 1—312.
- ISA, 2026. Report of the secretary-general of the International Seabed Authority under Article 166, paragraph 4, of the United Nations convention on the law of the sea[R]. Kingston: International Seabed Authority: 1—105.
- Jones D O B, Kaiser S, Sweetman A K, et al., 2017. Biological responses to disturbance from simulated deep-sea polymetallic nodule mining[J]. *PLoS One*, 12(2): e0171750.
- Liu Y, Liu S C, Piedrahita V A, et al., 2024. Insights into a correlation between magnetotactic bacteria and polymetallic nodule distribution in the Eastern Central Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(8): e2024JB029062.
- Miller K A, Thompson K F, Johnston P, et al., 2018. An overview

- of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps[J]. *Frontiers in Marine Science*, 4: 418.
- Mizell K, Hein J R, 2018. Ferromanganese crusts and nodules: rocks that grow[M]//White W M. *Encyclopedia of geochemistry: a comprehensive reference source on the chemistry of the Earth*. Cham: Springer: 477—483.
- Mizell K, Hein J R, Au M, et al., 2022. Estimates of metals contained in abyssal manganese nodules and ferromanganese crusts in the global ocean based on regional variations and genetic types of nodules[M]//Sharma R. *Perspectives on deep-sea mining: sustainability, technology, environmental policy and management*. Cham: Springer: 53—80.
- Park C, Simon-Lledó E, Fleming B F M, et al., 2026. Environmental drivers of abyssal benthic megafaunal biodiversity in the south-central Clarion-Clipperton Zone, Pacific Ocean[J]. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 14(1): 00060.
- Pelletier E L, Principaud M, Alix A S, et al., 2024. Diversity, spatial distribution and evolution of inactive and weakly active hydrothermal deposits in the TAG hydrothermal field[J]. *Frontiers in Earth Science*, 12: 1304993.
- Rabone M, Wiethase J H, Simon-Lledó E, et al., 2023. How many metazoan species live in the world's largest mineral exploration region?[J]. *Current Biology*, 33(12): 2383—2396.e5
- Shen C C, Yan R X, Lu B, et al., 2024. Dissimilarity of megabenthic community structure between deep-water seamounts with cobalt-rich crusts: case study in the northwestern Pacific Ocean[J]. *Science of the Total Environment*, 945: 173914.
- Smith C R, Clark M R, Goetze E, et al., 2021. Editorial: biodiversity, connectivity and ecosystem function across the Clarion-Clipperton Zone: a regional synthesis for an area targeted for nodule mining[J]. *Frontiers in Marine Science*, 8: 797516.
- Stewart E C D, Wiklund H, Neal L, et al., 2026. Impacts of an industrial deep-sea mining trial on macrofaunal biodiversity[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 10(2): 318—329.
- Stratmann T, Soetaert K, Kersken D, et al., 2021. Polymetallic nodules are essential for food-web integrity of a prospective deep-seabed mining area in Pacific abyssal plains[J]. *Scientific Reports*, 11(1): 12238.
- TMC, 2025. Technical report summary: pre-feasibility study for NORI-D polymetallic nodule project[R]. Vancouver: The Metals Company: 1—248.
- USGS, 2025. Mineral commodity summaries 2025[R]. Reston: U. S. Geological Survey.
- Vonnamme T R, Molari M, Janssen F, et al., 2020. Effects of a deep-sea mining experiment on seafloor microbial communities and functions after 26 years[J]. *Science Advances*, 6(18): aaz5922.
- Wang Y J, Han X Q, Petersen S, et al., 2017. Mineralogy and trace element geochemistry of sulfide minerals from the Wocan hydrothermal field on the slow-spreading Carlsberg Ridge, Indian Ocean[J]. *Ore Geology Reviews*, 84: 1—19.
- Wang Y J, Yang M, Han X Q, et al., 2025. Trace element and sulfur isotope study of sulfide chimneys from the mafic-hosted Daxi vent field: implications on the genesis of seafloor massive sulfide deposit at a segment end[J]. *Chemical Geology*, 686: 122825.
- Washburn T W, Simon-Lledó E, Soong G Y, et al., 2023. Seamount mining test provides evidence of ecological impacts beyond deposition[J]. *Current Biology*, 33(14): 3065—3071.
- Wegorzewski A V, Kuhn T, 2014. The influence of suboxic diagenesis on the formation of manganese nodules in the Clarion Clipperton nodule belt of the Pacific Ocean[J]. *Marine Geology*, 357: 123—138.
- Yamazaki T, Nakatani N, Arai R, 2023. Economic feasibility analyses for seafloor massive sulfide mining in Okinawa Trough area, Japan[C]//2023 IEEE Underwater Technology (UT). Tokyo: IEEE: 1—5.
- Yang M, Wang Y J, Petersen S, et al., 2025. Gold mineralization in the hydrothermal field at the termination of a detachment fault: a case study of the Tianxiu vent field[J]. *Mineralium Deposita*, 60(5): 911—935.
- Yi L, Medina-Elizalde M, Kletetschka G, et al., 2020. The potential of marine ferromanganese nodules from Eastern Pacific as recorders of Earth's magnetic field changes during the past 4.7 Myr: a geochronological study by magnetic scanning and authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ dating[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(7): e2019JB018639.
- Yu J Y, Tao C H, Liao S L, et al., 2021. Resource estimation of the sulfide-rich deposits of the Yuhuang-1 hydrothermal field on the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge[J]. *Ore Geology Reviews*, 134: 104169.
- Zhou Y D, Chen C, Zhang D S, et al., 2022. Delineating biogeographic regions in Indian Ocean deep-sea vents and implications for conservation[J]. *Diversity and Distributions*, 28(12): 2858—2870.