深海多金属结核资源开发的“资源-环境-法律”三维平衡探究

王芳 [1,2,3] 张禹 [1,2]

(1.福建理工大学，智慧海洋科学技术学院，福建 福州 350118，2.海洋智能装备福建省高校重点实验室，福建 福州 350118，3.福建省社会科学研究基地福建理工大学海洋文化与科技融合发展研究中心，福建 福州 350118)

摘 要：深海作为地球的特殊区域，蕴藏着多金属结核等高价值矿产资源，多金属结核因富含镍、钴、铜、锰等支撑新能源产业的关键金属，成为人类未来重要的战略接替资源，是保障能源转型与产业安全的关键潜在资源。文章立足“海洋命运共同体”的理念，以全球资源分布与开发实践为核心，论述深海多金属结核的资源禀赋特征、全球开发竞争格局与技术迭代历程，剖析开发活动对深海生态系统的多层次影响，梳理国际法律规则的演进与矛盾，对“资源-环境-法律”的三维平衡治理框架进行了探究，为实现深海资源可持续开发与全球治理体系完善提供理论支撑与操作路径。

关键词：多金属结核；资源开发；环境风险；法律框架

基金项目：2026 年度商业文化与区域协同发展研究课题（项目编号：2026055）；福建理工大学 2026 年研究生教育教学改革提升计划（项目编号：YJG26004）；福建理工大学 2025 年校级本科教育教学改革研究项目（项目编号：JG2025030）；2024 年度福建省社科研究基地重大项目（项目编号：FJ2024JDZ054）。

DOI：doi.org/10.70693/202611167976

"Resource-Environment-Law" in the Development of Deep-Sea Polymetallic Nodule Resources Three-dimensional Balance Exploration

Wang Fang[1,2,3], Zhang Yu[1,2]

1.School of Smart Marine Science and Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou, China, 2.Key Laboratory of Marine Smart Equipment, Fujian Province University, Fuzhou, China, 3.Research Center for the Integration of Marine Culture and Technology Development at Fujian University of Technology, Fujian Provincial Social Science Research

Abstract: As a unique region of the Earth, the deep sea harbors high-value mineral resources such as polymetallic nodules. These nodules, rich in critical metals like nickel, cobalt, copper, and manganese—essential for the new energy industry—have emerged as vital strategic substitute resources for humanity, serving as a key potential resource for ensuring energy transition and industrial security. This article, grounded in the concept of a "Marine Community of

作者简介：王 芳（1978—），男，高级工程师，研究方向：海洋调查与监测、水下智能装备；
张 禹（2002—），男，硕士研究生，研究方向：新一代电子信息技术（含量子通信等）。
通讯作者：张 禹

Shared Future," focuses on the global distribution and development practices of resources. It elaborates on the resource endowment characteristics of polymetallic nodules, the global development competition landscape, and the technological evolution process. It also analyzes the multi-level impacts of extraction activities on deep-sea ecosystems, reviews the evolution and conflicts of international legal rules, and explores a three-dimensional governance framework balancing "resources-environment-law." The study provides theoretical support and actionable pathways for achieving sustainable deep-sea resource development and improving the global governance system.

Keywords: polymetallic nodules; resource development; environmental risk; legal framework

1 全球深海多金属结核的资源开发潜力与竞争格局

1.1 多金属结核资源分布与战略价值

深海多金属结核是一种广泛分布于全球大洋深海盆地表层的自生沉积矿产，富含钴、锰、锂、铁、镍、铜等高价值金属及金、银等贵金属，深海多金属结核作为战略性金属资源的重要储库[1]，主要集中分布于太平洋、大西洋和印度洋的国际海底区域，以及部分沿海国家专属经济区内的深海平原。

太平洋占全球总储量的 60%，东赤道太平洋的克拉里昂-克里帕顿断裂带是目前全球已知的多金属结核丰度最高、连续性最好、经济价值最大的区域，总面积超 700 万平方公里，结核资源量约 210 亿吨，仅该区域钴储量就占全球深海钴总储量的 85%[2]。此外，印度洋的中印度洋盆地、阿拉伯海盆，大西洋的加勒比海盆、巴西海盆均探明规模化结核矿床，且普遍伴生较高含量稀土元素，中印度洋盆地结核的稀土氧化物含量达 0.15%-0.2%，开发潜力极为巨大[3]。

1.2 全球开发布局

目前共有印度、法国、中国、日本、俄罗斯、韩国、国际海洋金属联合组织七个国家或集团获得联合国批准，成为深海采矿先驱投资者，总勘查面积达 80 万平方公里。国际海底管理局（ISA）自 2000 年起陆续颁布《区域内多金属结核探矿和勘探规章》等系列文件，为全球深海矿产勘探提供法律框架[4]。

我国是联合国批准的第五个深海采矿先驱投资者，中国五矿集团有限公司和北京先驱高技术开发公司分别在东太平洋和西太平洋获得超过 7 万平方公里的勘探合同区，使我国成为拥有多金属结核勘探合同区数量最多、面积最大的国家之一，为未来商业化开发提供了坚实基础。

经过半个多世纪持续勘探，已探明多金属结核矿资源量约 4.2 亿吨，含锰、铜、钴、镍等多种金属元素，可满足年产 300 万吨多金属结核矿开采 20 年的资源需求[5]。

全球多金属结核开发技术从最初的拖曳式采集的方式，升级为智能化低扰动开采系统，逐渐形成了勘查、采集、输送、分离、环保全链条技术体系，各国基于自身禀赋形成差异化技术路线。

当前深海多金属结核开采技术仍面临三大技术瓶颈：超深水装备可靠性不足，仅少数国家具备相关技术；羽流扩散预测精度仅 70%左右；伴生元素综合回收利用率不足 30%。技术瓶颈伴随着对环境的破坏和对生态系统的损伤[6]。

2 深海多金属结核开发的环境影响风险

2.1 直接破坏造成不可逆的深海生态损伤

深海生态系统具有生物多样性高、特有种比例高、恢复能力弱等特点，深海多金属结核是数百万年形成的硬质基质，开采活动会对底栖生物栖息地造成显著的物理破坏，对其开采等同于永久性摧毁了该区域特有的生境，导致底栖群落局部灭绝。

开发中的直接生态扰动源于采矿装备的机械干扰，破坏具有不可逆性。1979 年美国海洋矿产公司在太平洋的克拉里昂-克里帕顿断裂带的采矿试验，采用 9 米宽拖曳式集矿头，3 个月采集面积约 10 平方公里，40 年后调查显示海底仍留存设备犁沟，底栖生物种类仅为未扰动区域的 60%，巨型底栖生物数量减少 80%，部分特有种区域性灭绝，该区域生态自然恢复至少需 200 年以上[7]。

现代采矿装备规模更大，风险进一步加剧。当前主流采矿车集矿头宽度达 15-20 米，作业速度 1-2 公里/小时，单台每天作业面积 30-40 平方公里，单台采矿车连续作业一年，100 平方公里范围内底栖生物死亡率超 50%，结核表面附着生

物死亡率接近 100%[8]。采矿装备履带碾压会破坏沉积物稳定性，管道拖拽形成数公里拖拽痕迹，破坏深海平原完整性。

2.2 间接环境风险传导

开采过程中分离结核产生的沉积物羽流，是最主要的间接环境风险。羽流中的颗粒物可扩散至数公里范围，不仅会改变水体浊度、遮挡光合作用，还会掩埋底栖生物栖息地。国际海底管理局数据显示，当羽流中颗粒物浓度超过 50mg/L 时，深海微型生物死亡率将提升 30%，进而破坏大洋食物链完整性[9]。

此外，深海多金属结核开采可能释放钴、铜等重金属及有毒物质，造成局部水体污染，将海底有毒金属重新带入营养丰富的海水层，通过食物链产生生物放大效应。采矿船的作业噪音、灯光也会干扰深海生物的迁徙与繁殖。更值得警惕的是，羽流扩散具有跨区域特性，单一国家的采矿活动可能影响周边海域生态环境，形成跨境传导链条，对全球海洋生态平衡构成威胁。

2.3 深海多金属结核开发环境监测与评估的现实短板

深海区域广阔、调查成本高、技术难度大，多数海域缺乏长期连续监测，难以建立完整生态基线，无法准确判断采矿前系统状态，深海采矿环境评估面临多重结构性挑战，难以满足风险管控需求。

监测标准不统一是核心问题。国际海底管理局颁布的《羽流环境影响评估指南（2023）》仅为推荐性文件，缺乏强制约束力；中国要求开展环境基线调查与过程监测，但未规定统一指标体系；挪威则要求监测 15 项指标，频率每小时 1 次。标准不统一导致数据缺乏可比性，无法开展全球环境风险评估。

监测网络不健全。深海长期监测网络覆盖率极低，仅太平洋克拉里昂-克利珀顿断裂带部分区域有连续性数据，其他结核富集区域监测站点极少甚至空白。监测网络缺失导致无法获取连续性数据，难以分析长期演化趋势，突发环境事件难以及时发现。

评估方法不完善。当前采用基线调查、短期监测以及后期的模型预测方法，存在明显局限性：多数企业基线调查周期仅 1-2 年，难以反映生态系统自然波动；监测仅持续至作业结束后 2 年左右，无法评估百年以上的长期影响；现有预测模型多基于实验室数据与浅海参数，缺乏深海验证，实际预测精度仅 60%左右[10]。

此外，还面临技术支撑不足、资金投入有限、国际合作匮乏等问题，发展中国家难以开展自主监测，监测资源重复建设，制约全球协同管控能力。

3 深海多金属结核开发的国际法律规则与制度矛盾

3.1 以 ISA 为核心的国际规则框架治理基础

深海多金属结核开发国际法律规则体系以《联合国海洋法公约》（UNCLOS）为根本遵循，以国际海底管理局规章为核心内容。UNCLOS 第十一部分明确国际海底区域及其资源是“人类共同继承财产”，确立全人类利益、可持续发展、国际管理三大核心原则，赋予 ISA 制定开发规章、审批勘探合同等核心职权。

国际海底管理局自 1994 年成立以来，陆续颁布《区域内多金属结核探矿和勘探规章》（2000 年）、《区域内富钴结壳探矿和勘探规章》（2010 年）等文件，形成覆盖主要深海矿产类型的勘探规章体系。

近年来，国际海底管理局推进多金属结核开发规章制定，2023 年启动草案谈判，2025 年 3 月完成涵盖第 56 至 107 条关键条款的谈判；但由于各国利益分歧，2025 年 7 月年度会议未就核心议题达成共识，计划 2026 年 3 月继续审议。此外，《南极海洋生物资源养护公约》、《生物多样性公约》等区域性公约与国际组织文件，与 UNCLOS、ISA 规章相互补充，形成多层次国际规则框架。

3.2 各国国内制度差异

我国 2016 年颁布《深海海底区域资源勘探开发法》，为深海多金属结核资源开发提供了初步法律保障。确立“生态优先、安全第一、科技支撑、合理开发、合作共享”原则，要求企业开展环境基线调查、编制环境影响报告书，建立环境监测体系。我国在太平洋 CC 区的开发活动严格遵循相关规定，完成多轮环境基线调查，建立完善监测体系。

美国国内制度呈现单边主义、商业导向、放松管制特征。虽未加入 UNCLOS，但 2000 年颁布《深海海底固体矿产资源法》，授权商务部管理深海采矿活动。2025 年 4 月特朗普政府签署行政命令，放松管制，允许企业在联邦水域及国际海域采矿，简化审批程序，降低环保要求，引发国

际争议。美国企业 TMC 公司环境基线调查周期仅 1 年，商业导向突出。

挪威国内制度以严格监管、环保优先、利益平衡为核心。2019 年颁布《海底采矿法》，要求企业提交详细环境影响评估报告、资源开发方案与生态修复计划，缴纳相当于开采总价值 20% 的环境保证金，接受联合监管。其领海采矿许可发放引发环保组织担忧，认为缺乏充分生态数据支撑。

技术驱动、资源保障、国际协同原则是日本在深海采矿中的主要特征，通过《海洋基本法》、《深海资源开发促进法》明确政府职责，鼓励技术研发。JOGMEC 主导勘探开发活动，在专属经济区结核矿床开发中完成 5 年环境基线调查，研发低扰动采矿机器人，计划 2026 年启动小规模商业化开采。

瑙鲁、斐济等中小岛屿国采用资源换技术、利益共享模式，与跨国企业合作开展开发活动，国内制度聚焦合作协议签订与执行，缺乏完善环境监管体系，面临环境风险与利益分配双重挑战。

3.3 法律规则的核心矛盾与治理挑战

规则滞后与实践发展脱节。现有国际规则主要形成于 20 世纪 90 年代至 21 世纪初，针对勘探活动设计，难以适应商业化开发需求，主要体现在规则覆盖范围不足，对商业开采核心内容缺乏明确规定；内容不具体，对新兴问题规定模糊；缺乏灵活性，难以适应技术发展。

各国利益诉求分歧导致规则制定与执行困难。发达国家聚焦技术标准主导权与市场准入，发展中国家强调资源公平分配与技术转让，环保国家主张严格环保规则。利益分歧导致国际海底管理局开发规章谈判进展缓慢，规则执行层面各国解释与适用存在差异，发展中国家执法能力不足，发达国家则规避义务的履行。

法律规则碎片化与协同性不足。全球深海采矿法律规则包括多个层次，缺乏有效协调机制，存在冲突与重叠。单边主义与多边治理的冲突突出，部分国家还通过区域贸易协定推行自身标准，加剧多边治理体系分裂。

此外，深海多金属结核开发还面临执法能力不足、争端解决机制不完善、发展中国家参与度低等挑战，制约法律治理体系有效性。

4 三维平衡的实现路径

4.1 构建基于“海洋命运共同体”的统筹共享机制

建立全球深海多金属结核资源统一数据库是基础。由国际海底管理局牵头整合各国勘探数据、资源评价报告等信息，涵盖资源分布、储量规模、金属品位等核心指标，建立数据审核机制确保真实性，对敏感数据脱敏处理。通过统一数据库，避免盲目勘探与重复投资，为资源统筹规划提供支撑。

推行开发配额和优先权益的资源分配制度。基于全球资源总量与环境承载能力，协商制定年度开发总量配额，根据人口规模、经济发展水平等因素合理分配。保障七大先驱投资者优先开发权益，为发展中国家预留配额，对环保表现突出、技术先进的主体给予配额奖励。开发配额每 3-5 年动态调整，确保公平合理。

深化深海开发国际合作。呼应开拓深海新领域合作疆域倡议，鼓励联合勘探、技术转让、产能合作、资金支持等多种合作形式。建立资源开发收益公平分配机制，由国际海底管理局设立全球深海资源开发收益基金，企业按开采量的 5%-10%缴纳收益分成，基金向发展中国家与受影响国家倾斜，支持生态保护、技术研发与跨境环境损害修复。

4.2 完善全链条风险管控与生态修复体系

制定统一的全球环境监测标准与规范。由国际海底管理局整合各国技术优势与实践经验，明确物理环境-化学环境-生物环境三维监测指标，规定监测方法、频率与评价阈值。统一监测标准具有强制约束力，国际海底管理局负责监督执行情况。

建立调查-过程监测-动态评估的事中控制机制。企业需进行至少 3 年环境基线调查，委托第三方机构开展并经国际海底管理局审核；建立实时环境监测体系，监测数据实时上传至国际海底管理局全球平台，国际海底管理局实时监督，发现超标立即责令整改；国际海底管理局每半年组织一次环境影响动态评估，及时调整管控措施。

推广低扰动采矿技术与生态友好型开发模式。国际海底管理局组织建立全球深海采矿技术创新联盟，聚焦核心技术联合攻关，加速成果转化与应用。将生态友好型开发模式作为采矿许可重要条件，对采用先进环保技术的企业给予优先审批、配额奖励等激励措施。

4.3 强化国际规则协同与执行力度

推动国际规则与国内制度协同。各国根据UNCLOS与ISA规章修订国内法律制度，确保一致性。国际海底管理局建立协同监督机制，定期评估各国国内制度与国际规则协同程度，提出整改建议。加强区域性公约与国际海底管理局规章协同，避免规则碎片化。

强化法律规则执行力度。国际海底管理局加强执法能力建设，建立独立执法机构，建立企业、政府监管与国际海底管理局监督三级执行体系。完善争端解决机制，发挥国际海洋法法庭作用，建立快速争端解决程序。加强对发展中国家执法能力建设支持，提升其执法水平。

提高发展中国家参与度。建立发展中国家参与规则制定的激励机制，提供资金与技术援助；适当增加发展中国家在国际海底管理局决策机构的代表名额；建立利益诉求表达机制，确保其利益诉求在规则制定中得到充分考虑。

4.4 强化治理能力保障

构建全球深海采矿技术创新联盟。由国际海底管理局牵头联合各国政府、科研机构与企业，聚焦核心技术瓶颈开展联合攻关。建立技术研发共享平台与成果转化机制，设立专项研发基金，为技术研发提供资金保障。通过联盟提升全球深海采矿技术整体水平，为三维平衡治理提供支撑。

推行技术标准认证和激励约束并行的制度。国际海底管理局建立深海采矿技术标准认证制度，对采矿装备、监测技术等进行认证，认证标准聚焦环境友好性、效率性与安全性。对通过认证的技术推荐使用，作为许可审批、配额分配依据；限制使用未通过认证的高污染、高扰动技术。建立激励约束机制，对环境表现突出的企业给予奖励，对造成环境损害的企业给予处罚。

建立“资源-环境-法律”三维动态评估体系。由国际海底管理局组织建立评估体系，定期评估各国开发活动的资源开发合理性、环境影响可控性与法律规则合规性。采用定量和定性的分析、自评加第三方评估及ISA最终审核的综合评估方法，实行年度评估、五年总评制度，评估结果向全球公开，接受监督。根据评估结果提出整改建议，确保资源、环境、法律三维动态平衡。

加强深海科学研究与人才培养。国际海底管理局组织开展深海生态系统结构与功能、采矿长期环境影响等重点领域研究，建立全球科学研究数据共享平台。与各国高校、科研机构合作设立相关专业，培养复合型人才；组织国际培训项目，提升各国技术人员、执法人员与科研人员水平，为三维平衡治理提供长期支撑。

5 小结

深海多金属结核的开发是一个需要在战略资源需求、脆弱生态环境与复杂国际规则之间实现平衡的系统工程，是全球可持续发展的核心议题，更是海洋命运共同体理念在深海治理领域的重要实践。当前，全球多金属结核开发已进入商业化落地关键阶段，资源分布集中性、生态系统脆弱性、法律规则碎片化交织叠加，对治理体系提出严峻挑战。

国际实践表明，成功的深海治理依赖于“资源—环境—法律”三者的动态协同，实现三维平衡，需要各国摒弃单边主义，坚持多边合作；资源维度通过统筹共享实现公平开发；环境维度通过全链条管控防范不可逆损害；法律维度通过规则协同破解治理困境。

面向未来，坚持人类共同继承财产原则，以海洋命运共同体理念为指引，通过全球协同治理，实现资源开发、环境保护与法律规则的动态平衡，才能让深海资源真正成为支撑全人类可持续发展的宝贵财富，推动全球深海治理体系朝着更加公正合理、合作共赢的方向发展。

参考文献：

[1]刘李伟,董春梅,黄威,等.Co在深海多金属结核中的分布与富集[J/OL].海洋通报,1-14[2025-12-24].https://link.cnki.net/urlid/12.1076.P.20251209.1610.004.

[2]段俊,徐刚,汤中立,等.我国钴资源产业发展现状、问题与对策[J].中国工程科学,2024,26(03):98-107.

[3]潘放,金强,郑成荣.深海多金属结核商业开采经济性分析[J].船舶,2024,35(06):136-143.DOI:10.19423/j.cnki.31-1561/u.2024.06.013.

[4]肖飞,曾建鹰,李政,等.全球战略性矿产资源信息感知技术方法构建及模型研究[J].中国矿业,2025,34(02):48-56+2.

[5]欧日媚,邱金莉,黄浩,等.东太平洋多金属结核勘探合同区表层沉积物脂肪酸分布及其物源指示意义[J].应用海洋学学报,2024,43(03):495-504.

[6]李秀,徐立新,窦培林,等.深海采矿羽状流及其监测试验综述[J].船舶工程,2024,46(S1):574-582+588.DOI:10.13788/j.cnki.cbgc.2024.S1.97.

[7]赵斌,何高文,马维林.西太平洋维嘉海山埋藏型富钴结壳生长速率初步研究[J].地质论评,2024,70(S1):101-103.DOI:10.16509/j.georeview.2024.s1.046.

[8]李鑫海,孙治雷,曹红,等.深海重要矿产资源开发研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2024,44(03):160-172.DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2023122901.

[9]苏蓉.东太平洋 CC 区多金属结核生长层形成条件及成矿机制研究[D].吉林大学,2023.DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2023.007576.

[10]李家彪,王叶剑,刘磊,等.深海矿产资源开发技术发展现状与展望[J].前瞻科技,2022,1(02):92-102.