

# 着眼长远，多措并举提升深海采矿经济价值

中国金属矿业经济研究院首席专家 左更

随着人类社会的发展和工业化进程的加速，全球对矿产资源消耗与日俱增，根据我国发布的《全球矿产资源报告》中的数据显示，截至 2022 年末，全球每年消耗约 230 亿吨矿产资源，总值接近 6 万亿美元，约占全球 GDP 总量的 6%。在全球矿产资源消耗总量中，金属矿产资源 16 亿吨以上，占比约 7%。

改革开放以来，随着中国经济的快速发展，我国已经跃居全球第二大经济体。作为全球制造业的中心，我国每年消耗的矿产资源约占全球总量的 46%左右，成为全球矿产资源消费的绝对推动力。工业化进程的不断推进使得全球浅表矿产资源基本被消耗殆尽，生产生活的需求迫使人类不得不向地壳深部探索资源，并开始不断寻求发现、尝试走向海洋，谋求资源的有效接续。

## 一、深地金属矿产资源开发经济可行性分析

从深部资源勘探和开发角度上看，目前人类已经在海拔高度-4500 米左右至+4500 米左右的超过 9000 米的作业空间内从事固体矿产资源的勘探与开发，而对于以石油和天然气为代表的液（气）态矿产资源而言，目前的钻井深度已经超过 1 万米。

对于以固体矿产资源为代表的金属矿产资源而言，目前全球最深的十座作业矿山均为黄金矿山，这与黄金始终不断高涨的价格和作为储备货币的性质不无关系。目前这十座矿山的平均作业面深度在-3200 米至-4530 米之间。其中，最深的矿山是南非的姆波尼格金矿，其地下各个矿坑和巷道总长度超过了 370 千米，在地下 4000 米水平附近蜿蜒延伸。姆波尼格金矿与其他两个姊妹矿山 Savuka 和 TauTona 矿山并称为西维兹矿山。由于其黄金资源储量丰富以及品位相对较高，加上其地下采矿自动化设备的应用，西维兹矿山黄金开采成本甚至低于同行业平均水平，具备较高的市场竞争能力。

在金属矿产品中用量最大的铁矿石矿山中，目前最深的在产矿山是瑞典的基律纳山·奥卡索山铁矿公司（LKAB）的基律纳铁矿。该矿山位于瑞典北部，深入北极圈内 200 公里，是世界上纬度最高、最深和最大的地下矿山，同时也是目前欧洲唯一正在开采的特大型铁矿，自 1898 年开始运营至今已经生产了超过 10 亿吨的矿石。基律纳铁矿平均作业深度为海拔-1450 至-1500 米。作为目前全球智能化程度最高的铁矿之一，在其井下作业面，除维修机械的必要工人外，全部采用自动机械作业，无人凿岩台车及其他无人值守设备的应用使得该矿山能够在超深度井下实现 24 小时循环作业。2023 年 LKAB 公司的 FOB 成本为 59.2 美元/吨，高于全球 37.4

美元/吨的平均值,但由于 LKAB 在产品端主推优质球团业务,提高了其产品的附加值,使得其产品在欧洲市场具有较强的影响力。

从金属矿产品的代表品种铜来看,目前,隶属于智利国家铜业公司的特恩尼特(EL Teniente)铜矿是世界最大的地下铜矿,作业面接近海拔-1000 米,年产铜矿(金属量)超过 40 万吨。而俄罗斯的加伊铜矿则是欧洲最深的铜矿,深度达到海拔-1075 米。特恩尼特作为智利国家铜业的主力生产矿山之一,其成本具有完全的市场竞争能力。

目前,在中国国内金属矿山中,五矿矿业旗下陈台沟铁矿是国内首个超深井、超大规模开采的“双超”矿山。该矿山位于辽宁省鞍山市,与鞍钢矿业的西鞍山铁矿毗邻,储量超过 10 亿吨,矿山建设项目总投资超过一百亿人民币。该矿山一期设计年生产规模 1100 万吨,设计铁精矿年产量 470 万吨。目前,该项目正在积极建设中,预计 2025 年年末投产。陈台沟铁矿设计采用“竖井+胶带斜井+辅助斜坡道”联合开拓方式,是国内首个采用超千米大倾角胶带斜井承担矿山井下矿石运输任务的金属矿山,总提升高度 1125 米,总提升距离长度 3966 米。通过大倾角胶带斜井,陈台沟铁矿将作业面矿石接力提升至地表山体内碎矿系统进行选矿并设计通过管道传输至矿石销售仓库。从设计上看,陈台沟铁矿完全生产成本将可有效控制在全国铁矿石(铁精粉)平均

成本以下，能够在国内市场具有较强的竞争能力。

从采矿方法上看，目前全球深部矿山依然采用传统的自然崩落法和充填法采矿技术。出于环境保护和长期生产安全的角度，我国国内的新建矿山，如陈台沟铁矿、思山岭铁矿等更多地采用了充填法采矿技术。

新中国成立 75 年来，特别是改革开放以来，我国经济的发展主要依赖原生矿产资源的支撑。多年的消耗使得我国浅表资源已消耗殆尽，不得不转向深部谋求资源接续。随着国家对资源安全的重视日益提高以及新一轮找矿行动中对深部优质矿产资源的陆续发现，深部正在且已经成为未来我国金属矿产资源“压舱石”的重点领域。应该说，我国深部矿产资源开发利用已经全面铺开。

## 二、制约深海金属矿产资源开发经济可行性的要素

人类居住的地球表面积 70%是海洋，海洋事业关系民族生存发展状态，关系国家兴衰安危。习近平总书记强调，“建设海洋强国是中国特色社会主义事业的重要组成部分”。要进一步关心海洋、认识海洋、经略海洋，推动我国海洋强国建设不断取得新成就。

对于深海金属矿产资源而言，其表现形式为海底蕴藏的多金属结核 (Seabed Polymetallic Nudules)。目前我国在联合国国际海底协会获取的矿区位于东太平洋的相关区块，由中国五矿和先驱公司牵头研究资源开发工作。2017 年起，

中国五矿对所属区块多次进行科学考察并代表国家向国际海底协会提交多份相关研究策略和建议。

由于人类对海洋的认知依然较少，对于海洋资源，尤其是海底矿产资源开发尚无成熟的经验借鉴，世界各国均停留在探索阶段。从这个意义上讲，海洋矿产资源的开发实属未来产业。目前基于现有技术及相关条件分析，制约深海资源开发主要因素有如下几个方面：

一是复杂的自然环境情况。相比陆地的深部资源开采，海底资源开发面临更深距离的挑战。如勘探区块内水文波动剧烈，平均水深超过 5000 米，作业点距离最近的陆地国家 1000 余海里。日常生活所需补给距离较长。

二是海底作业产生的复杂干扰因素较多。人类对海洋的认知依然较少，海底作为深藏水下的未知世界，可能存在的不确定性因素较多，如：海底脆弱生态环境和有效恢复难度、海底作业产生的声、光、电对水下生物生态系统的影响、日常作业对资源、能源的需要对所在区块海域生物多样性的影响以及相关危机施救能力等。

三是不同深海金属资源开发利用技术路线带来的成本变化。不同的资源利用技术路线会对深海金属的综合成本带来较大的影响，比如：对海底多金属结核中镍的应用，是用以生产电解镍还是镍生铁？对锰结核的应用，是加工成富锰渣还是电解锰？不同路线的金属含量和金属载体的下游应

用均将对未来海底金属资源生产成本带来差异。

四是最终金属消费国对相关海底金属的原产地的界定和定义。原产地证书（CERTIFICATE OF ORIGIN）是出口商应进口商要求而提供的、由公证机构或政府或出口商出具的证明货物原产地或制造地的一种证明文件，是证明货物的原产地的法律文书，是贸易关系人交接货物、结算货款、索赔理赔、进口国通关验收、征收关税等的有效凭证，是出口国享受配额待遇、进口国实行差别关税待遇和国别贸易政策、进行贸易统计、实行数量限制和控制从特定国家进口等的重要凭据，具有特定的、公认的法律效力和经济效用。而海洋是人类的共同财产，不属于任何一个国家和地区，因此，关于如何界定海底金属资源的原产地，如何使海底金属资源享受陆基资源的同等“待遇”问题，至今国际上还没有达到共识。

五是相关最近陆地国家（地区）对海洋环保及相关金属选矿与冶炼加工的限制。对于海洋矿产资源的开发，目前，人类最有经验的还是对海底大陆架石油和天然气的勘探与开发。现阶段，我国最大的海洋石油开采平台是位于南海的“深海一号”平台，该平台是我国自行研发的首座 10 万吨级深水半潜生产出油平台，总重 5 万吨，高度 120 米，最大作业深度 1000 米，作业投影面积相当于两个标准的足球场大小，但此面积根本无法满足一个 10 万吨级的金属采选冶

一体化场地所需，而且还需要考虑配套相关能源动力供给。基于现有条件考虑，目前最好的办法是将开采出的金属结核运输到距离最近的陆地进行选冶。就距离而言，我国负责的勘探海洋区块位于东太平洋中部，距离最近的陆地资源国（基里巴斯等）约 1000 海里，运输线路较长。更为关键的是基里巴斯及其周边邻邦均属于岛屿国家，经济基础较为薄弱，属于全球最不发达国家序列。这些国家的居民主要赖以生存的资源就是海洋，很难接受大规模工业生产对海洋的威胁。

六是未来海底多金属结核富含的相关金属资源需求增长情况。海底多金属结核中富含铜、镍、锰、钴，是中国稀缺且消费占比较高的战略金属资源。海洋的未知性使得对海洋金属资源的开发具有很大的不确定性，而且陆基金属资源供给格局也将对海底金属矿产资源开发的经济可行性产生影响，尤其是如果中国对相关资源的消费见顶，势必会对海底多金属结核中金属资源的开发产生较大影响。以铜为例，历史数据显示，美国人均铜消费呈现 M 形态势，两次峰值均在 120 吨/万人左右，按此数据计算，我国铜消费量峰值将接近 1700 万吨，如果考虑到中国作为全球制造业中心等客观因素的影响，未来中国年消费铜金属量可能接近 2000 万吨，与 2023 年中国精炼铜消费量 1560 万吨之间还有一定的增长空间。镍、钴、锰等金属的消费也基本具有相同的趋势。

综上所述，即便不考虑海洋资源开发过程中的不确定性因素，仅中国驱动下的全球相关金属消费是否见顶就将对海底资源的开发与利用产生极大的影响。

### 三、深海金属矿产资源开发经济可行性探讨

作为未来产业之一，对于深海金属资源的开发经济可行性，各国都在探索和研究中，至今全球各海底金属资源勘探与开发的意向国、签约国尚无成熟、统一的经济可行性评估模型。目前，业内较为权威的是俄罗斯自然科学院和美国哈佛大学分别在 2020 年发表的关于海底多金属结核开发经济可行性的研究报告。根据报告内容，其一致观点是海底多金属结核的开发与陆基金属资源开发（DLBPS）存在着一定的关联关系。

#### （一）深海金属矿产资源开发经济可行性探讨的前提

借鉴参考俄罗斯自然科学院和美国哈佛大学的研究报告观点并结合中国金属矿产品未来发展趋势，目前看，陆基资源供给相对紧张且未来传统陆基资源持续供给来源不足的金属品种才是人类走向深蓝的主要驱动力，比如对于美日欧等西方国家而言，海底丰富的稀土资源就是他们主张进军海洋资源的主要动力所在，这也是对海底多金属结核中相关主要金属矿产品实施实质性开发的首要前提。

同时，深海资源开发技术方案的可行性及实地测试的成功成为探索深海资源开发的又一前提。

而海洋作业面距离最近陆地国家至少应具备相关金属资源选冶合作意愿或具备相关金属资源选矿及冶炼能力，是对海底多金属结核中相关重要金属矿产品实施实质性开发的第三个前提条件。

## （二）深海金属矿产资源开发经济可行性探讨的思路

在前提满足的情况下，从事深海金属矿产资源开发的总体思路如下：

一是以美国地质调查局（USGS）公布的陆基金属矿产资源储量为基础依据。由于海底金属矿产资源尚未被系统性开发，即便在未来一段时间内能够实现有效开采，实际出产能力也受限严重。在此情况下，应将深海金属矿产资源作为USGS数据中的一项资源来源，与其他公布的数据共同参与某一金属矿产品的可采储量、有效出产量以及商品市场供需平衡的计算。

二是建立高效运行、依法合规、面向未知深海的大数据分析模型。参考价格竞争力分析、成本分析、百分位模型等工具，分析、推导深海金属矿产资源开发的有效产量、实际产量、获得成本，并根据相关信息源数据分析其在全球含陆基金属矿产资源产出国在内的整体排名情况。同时，将深海金属矿产资源有效开采数量（金属吨）与USGS公布的陆基金属矿产资源国储量、产量数据加以汇总，得出总供给数量。

三是对海底多金属结核中的主要金属成份铜、镍、钴、

锰的未来需求按乐观、中观、悲观设置增速固定值，并以某年份为基数进行未来需求数量的核算，实现的需求与供给数量对比，得出供需平衡。

四是在假设技术方案完全可行以及环保措施完全符合联合国海底资源开发协议要求前提下，充分考虑相关资源开发中开采区与最近可供选冶的陆地之间的运距和相关运输、环保、施救等费用后，叠加计算论证并得出深海资源开发的可行性。

### （三）现有条件下深海金属矿产资源开发经济可行性探讨的初步结论

依照目前铜、镍、钴、锰的市场价格和市场供需情况，在对海底采矿与目前陆基资源开采成本充分对比后发现，作为未来行业之一，现有条件下进军深蓝的难度极大，开产、量产、达产均需时日，无法形成有效供给。仅海洋开发作业面与距离最近的陆地间有效运输的问题就将对后期金属成本、企业利润产生极大负面影响。现阶段条件下，深海金属矿产资源开采尚不具备充分的市场竞争能力。

### （四）对未来深海金属矿产资源开发的建议

随着经济发展，未来全球对陆基资源的消费还将长期持续，陆基资源的供给能力将受到极大挑战。我国已经踏上建设中国特色社会主义现代化的新征程，中国国内巨大的内需市场、人口基数以及现代化国防、国家安全的需要，将对战

略性金属矿产资源的有效供给提出更加严格的要求。即便目前深海资源开发尚不具备条件，但是深海丰富的金属矿产资源依旧是我国乃至全球各国未来赖以持续发展的重要来源之一。着眼深蓝，探索深海将成为必然。为此提出以下四点建议。

一是加强科技研发。科学技术是探索深蓝的关键。我国正在从海洋大国迈向海洋强国，必须加强相关领域专有技术研发，将先进的数字、网络、自动化技术与海洋工程相结合，创造性地提出深海重要勘探开发的适用性、实用性技术。

二是发挥央企主力军作用。以负责任的中央企业为核心，配套有实力的国家级科研院所，辅以国家转向资金支持，全力加快完善深海相关技术可行方案。

三是加强设备装备自主研发和自主制造能力。我国正在从制造大国迈向制造强国，未来迈向深蓝必须有可行、可靠的设备装备保障，必须充分考虑深海复杂水域环境的变化对相关设备的要求和相关干扰的影响因素，大力提高机械设备自主创新水平和自主制造能力，加大生产装备的研发与测试力度，如海底采矿作业自动化单体采矿机器人（车）的承载能力设计与测试。

四是根据国家相关战略性金属矿产资源国内资源的勘探结果与目前市场价格运行情况，建议未来我国海底金属矿产资源开发的相关顺序为钴、铜、镍、锰。

随着人类社会发展，资源越来越成为各国关注的重点。目前各国更多的着力点是向地壳深部要资源。未来，占地球表面积 70%的海洋必将成为人类资源获取的又一重要来源。但是我们对海洋的认识还很少，需要更多更加努力的探索。上天、入地、下海，深海资源勘探开发与利用将成为未来大国竞争的又一主战场。着力深部，也要远眺深蓝。