2021 年 10 月 October 2021

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37978



# 我国深海多金属结核资源的勘探进展及思考

初凤友<sup>1</sup>,姜 静<sup>2</sup>,刘禹维<sup>3</sup>,李怀明<sup>1</sup>,李小虎<sup>1</sup>, 朱克超<sup>4</sup>,吕士辉<sup>5</sup>,罗 祎<sup>2</sup>,曾 轩<sup>3</sup>

(1. 自然资源部第二海洋研究所 海底科学重点实验室, 杭州 310012;

2. 中国大洋矿产资源研究开发协会,北京 100012;

3. 长沙矿冶研究院有限责任公司, 长沙 410012;

4. 广州海洋地质调查局, 广州 510075;

5. 中国地质大学(北京) 海洋学院,北京 100083)

**摘 要:**中国大洋矿产资源研究开发协会是首批获得国际海底区域多金属结核资源矿区的承包者之一,近 年来又先后推动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 CCZ 区和西北太平洋 海山盆地获得多金属结核资源矿区。本文分析了深海多金属结核成矿机制和矿床类型,回顾了中国大洋协 会、中国五矿和北京先驱 3 个承包者结核矿区多金属结核资源勘探工作的主要进展,对比研究了东太平洋 CCZ 区和西北太平洋海山盆地多金属结核资源特征。认为我国的多金属结核资源矿区可为未来国家经济发 展提供重要的战略金属资源保障,建议中国五矿和北京先驱应尽快完成矿址圈定。同时,3 个承包者应合作 解决储量评价的关键技术问题,以能够在国际上率先开展多金属结核资源的储量评价工作。 关键词:多金属结核,国际海底区域;资源勘探;储量评价;资源开发

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2638-11 中图分类号: P71 文献标志码: A

**引文格式:**初凤友,姜 静,刘禹维,等. 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, 2021, 31(10): 2638-2648. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37978

CHU Feng-you, JIANG Jing, LIU Yu-wei, et al. Adavance and implication for polymetallic nodules resources exploration in deep-sea[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2638–2648. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37978

深海多金属结核分布在水深 4000~6500 m、沉 积速率低于 1×10<sup>-5</sup> m/a,且被沉积物覆盖的广阔深 海盆地<sup>[1-5]</sup>,由于其资源量巨大,且富含 Mn、Cu、 Co、Ni、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,被认为是一种 极具商业开发潜力的深海矿产资源<sup>[6-7]</sup>。仅东太平 洋克拉里昂-克里帕顿断裂带(Clarion-clipperton fracture zone, CCZ 区)之间的深海盆地(约 3.83× 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>)干结核资源量预计可达 2.1×10<sup>10</sup> t<sup>[8]</sup>,其中 Mn、Co、Ni 的金属量是陆地储量的 3~9 倍<sup>[8-9]</sup>。 20 世纪 60 年代,第二次世界大战结束后,全 球经济复苏使得 Cu、Ni 等金属价格飙涨,西方财 团(海洋采矿协会、康纳克财团、海洋管理公司、海 洋矿物公司等)掀起了一轮深海多金属结核资源勘 探开发的热潮<sup>[10]</sup>。但随着陆地金属供给持续增加导 致金属价格下降,这轮热潮在 20 世纪 80 年代初戛 然而止<sup>[11]</sup>。1982 年 12 月 10 日,联合国第三次海洋 法会议通过《联合国海洋法公约》,提出"国际海 底区域"包括国家管辖范围以外的海床、洋底及其 底土,并设立国际海底管理局组织和控制国际海底

基金项目:中国大洋协会项目(DY135-N1-01, DY135-N2-01)

收稿日期: 2021-06-03; 修订日期: 2021-09-15

**通信作者**:初凤友,研究员,博士;电话: 0571-88073159; E-mail: chu@sio.org.cn 李怀明,教授级高级工程师,博士;电话: 0571-81961213; E-mail: huaiming\_lee@163.com

区域的资源勘探活动<sup>[12]</sup>,国际海底管理局规则框架 下的深海活动成为近 30 年来深海矿产资源勘探活 动的主体。国际海底管理局已经出台多金属结核、 富钴结壳和多金属硫化物资源的"探矿和勘探规 章",规定了开展深海矿产资源探矿和勘探活动的 程序和要求<sup>[13-15]</sup>。迄今已核准 31 个深海矿产资源 矿区申请,包括 19 个多金属结核资源矿区、5 个富 钴结壳资源矿区和 7 个多金属硫化物资源矿区、6 面积约 150 万 km<sup>2</sup>,分布在东太平洋 CCZ 区、中印 度洋海盆、西北太平洋海山及盆地、南大西洋海山、 北大西洋中脊和印度洋中脊等<sup>[16]</sup>。目前,多金属结 核资源勘探研究程度最高的区域位于东太平洋 CCZ 区,分布了 17 个多金属结核资源矿区。

近年来, 欧盟、英国和加拿大等国家的深海矿 业公司积极推动深海多金属结核资源的商业开发 活动<sup>[17]</sup>。同时,国际海底管理局 2010 年启动制定 《"区域"内矿产资源开发规章》("开发规章"), 2019年发布"开发规章草案",旨在管理国际海底 区域矿产资源的采矿和开发活动[18]。"开发规章草 案"详细列出了在国际海底区域申请和履行相关 矿产资源开发合同的条件、程序和具体要求,包括 提出申请开发活动的区域(即矿址, Mining site),提 供采矿工作计划、环境影响报告、环境管理和监测 计划、融资计划、关闭计划等7个方面的技术内容。 与此同时,国际海底管理局核准的首批7个多金属 结核资源矿区的承包者,包括中国大洋协会、俄罗 斯海洋地质作业南方生产协会、法国海洋开发研究 所、日本深海资源开发公司、国际海洋金属联合组 织、印度国家海洋研究院、德国联邦地质科学和自 然资源研究院等,已经完成了为期 15 年的"勘探 合同",并将于 2021 年陆续完成第一个五年的勘 探延期工作。在当前深海多金属结核资源尚不具备 进入商业开发阶段的条件下,这些承包者把勘探工 作重点转向开发合同申请的准备,这也将是后续商 业开发的主要工作内容。

根据当前较为常用的深海多金属结核资源开 发技术经济模型,一个多金属结核资源矿址可支撑 年产300万t干结核,连续采矿20年的采矿规模<sup>[19]</sup>。 如果按照矿址内多金属结核平均丰度为5~10 kg/m<sup>2</sup>, 不考虑采矿回采率、不利地形等因素,单个多金属 结核矿址的面积约为6000~12000 km<sup>2</sup>。已有资料表

明首批承包者多已完成了矿址圈定工作<sup>[20]</sup>。例如, 日本深海资源开发公司圈划了约 6000 km<sup>2</sup> 的高丰 度结核区域,国际海洋金属联合组织圈定了面积分 别为 5370 km<sup>2</sup> 和 4150 km<sup>2</sup> 的两块矿址,俄罗斯海 洋地质作业南方生产协会圈划了 38 个富矿块,单 个矿块面积 11~310 km<sup>2</sup>,印度国家海洋研究院圈定 出第一代矿址面积 7858 km<sup>2</sup>。中国大洋协会经过近 30年勘探工作,目前也已经完成矿址圈定<sup>[21-24]</sup>。另 外,2017年以来,中国大洋协会先后推动了中国五 矿集团有限公司(中国五矿)和北京先驱高技术开发 公司(北京先驱)申请并获得东太平洋CCZ区和西北 太平洋海山盆地的多金属结核资源矿区(见图 1)。本 文将重点介绍中国大洋协会、中国五矿和北京先驱 多金属结核矿区的资源勘探工作进展,对比分析东 太平洋 CCZ 区和西北太平洋海山盆地多金属结核 资源特点,结合深海多金属结核资源勘探活动形 势,提出对我国未来勘探活动的思考。

## 深海多金属结核形成机制及矿床 类型

## 1.1 多金属结核形成机制

深海多金属结核的形成过程主要受到水成和 成岩两种沉淀过程的控制,两种沉淀物质围绕着海 底硬质核心包括岩石碎屑、鲨鱼牙等不断沉淀并持 续生长,最终形成球状、椭球状、菜花状、连生体 状等不同形态类型的多金属结核[25-27]。水成沉淀过 程主要发生在沉积速率低、富氧海水的深海海底或 者表层沉积物中。海水中溶解态的 Mn<sup>2+</sup>和 Fe<sup>2+</sup>被氧 化,并以 Mn<sup>4+</sup>和 Fe<sup>3+</sup>氧化物胶体形态在硬质核心表 层持续沉淀,形成水成型的多金属结核(水成结 核)<sup>[27-28]</sup>。水成结核多以中型的球状(3~6 cm)为主, 表面较为光滑。成岩沉淀过程主要发生在高表层海 水生产力、次氧化性的海底环境和表层沉积物中。 深海沉积物中有机质被氧化发生分离和溶解,释放 出 Ni、Cu、Li 等金属离子,这些金属离子在沉积 物孔隙水中向海底表面运移,与富氧的上覆海水混 合并被氧化成锰氧化物,形成成岩型的多金属结核 (成岩结核)<sup>[25, 29]</sup>。成岩结核以中型和大型为主,形 态较为复杂,可见菜花状、盘状、连生体状,结核 常发育多核心。



图1 我国国际海底区域多金属结核矿区位置示意图

Fig. 1 Location of mining areas of polymetallic nodules in international seabed area

#### 1.2 矿物学和地球化学特征

水成结核主要由无定型的铁氢氧化物(FeOOH) 和富 Fe 的水羟锰矿等矿物组成,成岩结核主要以 类质同相的 7-Å 和 10-Å 水羟锰矿为主。结核形成 过程中可有效清扫海水中的溶解态的金属离子,使 其不同程度的富集相应的金属元素。水成结核多具 有低 Mn/Fe(~1)、低 Y/Ho、高 Th/U, 高 Co、Te、 Ce、Pt含量特征,这受控于主要矿物的电化学性质 和吸附作用。海水环境中胶体状的 FeOOH 和锰氧 化物分别呈现正的和负的表面电荷,FeOOH可以吸 引具有负电荷、弱电性或者是电荷中性的溶解组 分,包括 $UO_2(CO_3)_2^{3-}$ 、Ti(OH)<sup>0</sup>4等,胶体状的锰氧 化物易于吸附水体中正电离子,例如 Cu<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>和 Co<sup>2+</sup>等<sup>[30-31]</sup>。成岩结核多具有高 Mn/Fe 和 Y/Ho, 低 Th/U, 高 Ni、Cu、Li 含量, 低 Co、Ce 含量特 征,这主要是由于无序 7-Å 和 10-Å 水羟锰矿中矿 物为了平衡晶格负电荷,趋于结合海水中的 Ni<sup>2+</sup>、 Cu<sup>2+</sup>和Li<sup>+</sup>等金属阳离子<sup>[30-31]</sup>。

## 1.3 深海多金属结核矿床类型划分

当前,深海多金属结核资源勘探研究程度较高的海区主要位于东北平洋 CCZ 区、西北太平洋海

山盆地、菲林海盆、南太平洋库克群岛的专属经济 区(EEZ)、中印度洋海盆和秘鲁海盆等。根据多金 属结核主要成矿金属元素含量特征,可把这些区域 划分为三种多金属结核矿床类型<sup>[6]</sup>。其中东太平洋 CCZ 区和中印度洋海盆的发育混合成因的多金属 结核矿床类型,该类型的结核矿床以高含量的 Mn、 Ni、Cu 和中含量的 Co、Mo 和 Li 为特征。秘鲁海 盆发育成岩成因的多金属结核类型,该类型矿床以 高含量的 Mn、Ni 和 Li 为特征。西北太平洋海山盆 地、菲林海盆和库克群岛 EEZ 区发育水成成因的多 金属结核矿床类型,该类型结核矿床以高含量的 Ti、Co 和稀土元素(REE)为特征。

## 2 深海多金属结核资源矿区勘探研 究进展

我国在国际海底区域的多金属结核矿区分别 位于东太平洋 CCZ 区和西北太平洋海山盆地(见图 1),其中中国大洋协会和中国五矿结核矿区位于东 太平洋 CCZ 区,发育混合型结核矿床;北京先驱 结核矿区位于西北太平洋海山盆地,发育水成型结 核矿床。

#### 2.1 中国大洋协会多金属结核资源矿区

中国大洋协会矿区位于东太平洋 CCZ 区西部, 根据矿区内区块的地理位置划分分为东、西两个区 域。矿区西区面积 39541 km<sup>2</sup>,包含 KW1 和 KW2 区块, 矿区东区面积 35522 km<sup>2</sup>, 包括 EK1、EK2 和 EK3 区块(见图 2)。中国大洋协会矿区的地质构 造主要受到洋中脊扩张及其后期叠加的岩浆和断 裂活动作用的控制,但是东区和西区具有一定差 别。矿区西区构造格局主要受到强烈的岩浆活动作 用影响,深部熔浆沿着近东西向断裂带上涌,形成 了近乎垂直于扩张方向的规模不等的海山链,地形 地貌格局主要由不同规模的海丘链和规模较大的 单体海山所包围的丘陵区和山间盆地组成<sup>[21]</sup>。矿区 东区构造格局主要由洋中脊增生扩张作用所形成 的系列近南北向的地垒--地堑和近东西向断裂所控 制,其地形地貌格局主要由海底丘陵区和小范围分 布的海脊-海底洼地组成<sup>[21]</sup>。

中国大洋协会在东太平洋 CCZ 区的多金属结 核资源勘探工作开始于 20 世纪 80 年代,采用地质 取样为主的勘探技术。近 30 年来中国大洋协会在 矿区及其邻近区域开展了 2979 个站位的地质取样, 其中矿区西区内地质站位 895 个,矿区东区 593 个。 中国大洋协会在前期勘探工作基础上,依据满足一 个采矿作业项目的资源量、结核丰度大于 5 kg/m<sup>2</sup>、 品位较好、矿体连续性较好、地形相对平坦、矿址 边界相对完整规则等原则,在矿区西区圈定了面积 约为 1.3 万 km<sup>2</sup> 的多金属结核矿址。根据丰度≥ 10 kg/m<sup>2</sup>、镍等量品位(Nickel equivalent grade, NEG (w),利用近十年(2008~2017)金属市场价格换算的 Cu 和 Co 含量,公式为:  $w=0.42 \times w(Cu)+2.64 \times$ (w(Co)+w(Ni))≥1.68%、坡度 $\leq$ 5°等边界条件,在 矿址内圈出 1.1 万 km<sup>2</sup>矿体。矿址内地形较为平坦, 水深约 5480~3796 m,平均 5164 m(标准差为 109 m),矿址内地形坡度 $\leq$ 5°的区域约为 1.1 万 km<sup>2</sup>, 占到矿址总面积的 91%。勘探数据表明矿址内平均 结核丰度为 13.5 kg/m<sup>2</sup>(n=274),Mn、Cu、Co 和 Ni 金属平均含量分别为 24.50%、0.71%、0.29%和 1.03%(n=274),预计干结核资源量超过 1.0 亿 t。

## 2.2 中国五矿多金属结核资源矿区

中国五矿矿区位于东太平洋 CCZ 区,由 8 个 区块组成,但区块位置较为分散,西部 A5 区块与 东部 A4 区块相距约 3800 km。根据区块相对位置 把矿区分为西部、中部和东部 3 个区域,其中 A5 区块位于西部区域,与中国大洋协会 KW1 区块毗 邻; A1、A2、A6、A7 和 A8 这 5 个区块位于中部



图 2 中国大洋协会结核矿区区块位置示意图(修改自国际海底管理局发布的底图)

Fig. 2 Location of COMRA's mining area of polymetallic nodules (Modified from http://www.isba.org)

区域; A3 和 A4 区块位于东部区域(见图 3)。A5 区 块构造和地形特征与中国大洋协会矿区西区类似, 主要以海底丘陵区和深海盆地为主。其他区块与中 国大洋协会矿区东区类似,以海底丘陵、海脊-海 底洼地地形为主。

中国五矿矿区是中国五矿向国际海底管理局 申请的保留区,保留区是发达国家申请矿区时向 国际海底管理局提供的同等资源价值的区域,以 供将来发展中国家或者公司申请。中国五矿矿区 主要来自中国大洋协会、俄罗斯海洋地质作业南 方生产协会和国际海洋金属联合组织向国际海底 管理局提供的保留区。保留区已有 265 个地质取样 站位的数据,主要包括丰度和 Mn、Cu、Co 和 Ni 金属含量。中国五矿自 2017 年开始在矿区开展资 源勘探工作,完成了矿区全覆盖多波束测深调查、 99 个地质取样以及约 760 km 海底摄像测线。中国 五矿基于已有勘探数据开展了矿区资源潜力评价 研究,并把 A5 区块选定为下一步勘探工作的重点 区块。 域的海山也被认为是全球富钴结壳资源潜力最好 的区域<sup>[8]</sup>。北京先驱矿区由4个区块组成,其中C1 和C2区块位于北部的马尔库斯-威克海山群,M1 和M2区块位于南部的麦哲伦海山群(见图4)。北京 先驱结核矿区所在的西北太平洋海底显著的地形 地貌特征是数量众多的海山、海山底部不同规模的 浊流扇以及海山之间地形平坦的山间盆地。北京先 驱矿区主要位于多座海山山麓以及不同海山的山 间盆地。

中国大洋协会从 2012 年开始在西北太平洋海 山盆地开展多金属结核资源调查,完成了约 40 万 km<sup>2</sup> 区域的多波束测深调查、154 个站位的地质取 样和约 1600 km 的海底摄像测线。北京先驱基于以 上调查数据,开展了西北太平洋海山盆地的多金属 结核资源潜力研究,圈定了约 18.2 万 km<sup>2</sup> 的多金属 结核资源远景区。根据国际海底管理局勘探规章要 求,北京先驱划定了 9 个区块,共计约 15 万 km<sup>2</sup> 的区域提交国际海底管理局。国际海底管理局核准 了北京先驱 4 个区块,其余区块作为国际海底管理 局的保留区。根据与国际海底管理局签署的勘探合 同,北京先驱在 2021 年开始开展多金属结核资源 的勘探工作。



## 2.3 北京先驱多金属结核资源矿区

北京先驱矿区位于西北太平洋海山盆地,该区

图 3 中国五矿结核矿区区块位置示意图(修改自国际海底管理局发布的底图)

Fig. 3 Location of CMC's mining area for polymetallic nodules (Modified from http://www.isba.org)



#### 图 4 北京先驱结核矿区位置示意图(修改自国际海底管理局发布的底图)

Fig. 4 Location of BPC's mining area for polymetallic nodules (Modified from http://www.isba.org)

#### 西北太平洋海山盆地和东太平洋 3 CCZ 区资源特征对比

可以预计未来我国的深海多金属结核开发活 动很可能发生在西北太平洋海山盆地或者东太平 洋 CCZ 区。我们利用中国大洋协会、中国五矿和 北京先驱矿区的多金属结核资源勘探研究相关数 据的统计结果,对比研究了西北太平洋海山盆地和 东太平洋 CCZ 区的多金属结核资源特征,为评估 西北太平洋海山盆地和东太平洋 CCZ 区的结核资 源开发前景提供参考。这些数据包括箱式取样获得 的丰度和覆盖率(n=1687)和结核主要成矿元素 (Mn, Cu, Co, Ni, Ti, Mo, Nb, Ta, V, W, Zr, REY(REE+Y), Li, Te)(n=557).

### 3.1 丰度和覆盖率

丰度和覆盖率是开展深海多金属结核资源评 价的重要参数<sup>[32]</sup>。丰度指海底单位面积内多金属结 核总质量,一般利用箱式取样获取;覆盖率是海底

单位面积内多金属结核所占面积比例,可通过箱式 取样站位或者海底光学照片获取[33-34]。丰度数据的 统计结果表明,西北太平洋海山盆地结核丰度平均 值约为 21.4 kg/m<sup>2</sup>(n=154), 东太平洋 CCZ 区的结核 丰度平均值为 8.3 kg/m<sup>2</sup>(n=1534),西北太平洋海山 盆地与东太平洋 CCZ 区相比具有更高的结核丰度 (见图 5)。

西北太平洋海山盆地和东太平洋 CCZ 区的结 核丰度和覆盖率都呈现出较好的线性相关性,但二 者相关趋势差别较大(见图 6)。东太平洋 CCZ 区的 多金属结核丰度主要是 0~20 kg/m<sup>2</sup>,在整个区间丰 度与覆盖率相关性变化趋势较为稳定。西北太平洋 海山盆地结核丰度变化较大,结核丰度大于 30 kg/m<sup>2</sup> 后,结核丰度的变化与覆盖率相关性较差。 深海多金属结核丰度和覆盖率多具有较好的线性 相关性<sup>[33-34]</sup>,西北太平洋海山盆地和东太平洋 CCZ 区结核丰度和覆盖率相关性的差异可能与多金属 结核形态类型有关。已有勘探结果也表明西北太平 洋海山盆地结核主要以球状和椭球状类型为主,东 太平洋 CCZ 区结核类型较为复杂,主要以菜花状、



图 5 西北太平洋海山盆地和东太平洋 CCZ 区结核丰度 统计结果对比

**Fig. 5** Comparison of nodule abundance between seamount basins of Northwest Pacific Ocean and CCZ of Eastern Pacific Ocean

球状、连生体状结核类型为主。

## 3.2 主要金属元素

深海多金属结核富含的十余种金属元素都具 有综合利用的潜力<sup>[6, 8]</sup>,因此结核资源特征对比不 应局限于 Mn、Cu、Co 和 Ni 4 种金属的含量。利

表1 全球主要海区多金属结核主要金属元素平均含量对比 Table 1 Comparison of average contents of nodules from main area



**图 6** 东太平洋 CCZ 区和西北太平洋海山盆地区结核丰度和覆盖率的关系

**Fig. 6** Relationship between nodule abundance and coverage between seamount basins of Northwest Pacific Ocean and CCZ of Eastern Pacific Ocean

用公开发表的库克群岛 EEZ<sup>[7]</sup>、秘鲁海盆<sup>[8]</sup>、中印 度洋海盆<sup>[8]</sup>的多金属结核以及西北太平洋海山的富 钴结壳<sup>[8]</sup>的 14 种金属元素的平均含量数据,与中国 大洋协会、中国五矿和北京先驱矿区的相关金属元 素含量数据进行了对比(见表 1),结果表明西北太平 洋海山盆地与库克群岛 EEZ 区的结核除了 Nb 和 Ta,其他金属元素含量相当,与西北太平洋海山富

Metal	Northwestern Pacific Ocean		CCZ of eastern Pacific Ocean		Cook Islands EEZ <sup>[7]</sup>		Peru Basin <sup>[8]</sup>		Central Indian Ocean <sup>[8]</sup>		Northwestern Pacific Ocean-crusts <sup>[8]</sup>	
	Content	п	Content	п	Content	п	Content	п	Content	п	Content	n
Mn <sup>1)</sup>	20	185	25.78	392	16.1	1158	34.2	-	24.4	1135	22.8	362
$Cu^{1)}$	0.26	185	0.90	392	0.23	1158	0.6	_	1.0	1124	0.01	362
Co <sup>1)</sup>	0.44	185	0.26	392	0.41	1145	0.05	_	0.11	1124	0.67	362
Ni <sup>1)</sup>	0.49	185	1.18	392	0.38	1158	1.3	_	1.1	1124	0.42	362
Ti <sup>1)</sup>	1.66	185	0.61	406	1.2	74	0.16	_	0.4	53	1.16	345
Mo <sup>2)</sup>	338	185	578	406	296	79	547	-	600	38	461	328
Nb <sup>2)</sup>	21	185	37	406	90	67	13	-	98	3	52	43
Ta <sup>2)</sup>	0	185	1	406	2	54	0	-	2	3	2	2
$V^{2)}$	526	185	505	406	508	61	431	-	497	16	641	328
W <sup>2)</sup>	5	185	91	406	64	67	75	-	92	3	36	87
$Zr^{2)}$	635	185	466	406	524	75	325	-	752	3	548	43
REY <sup>2)</sup>	2099	185	1138	406	1665	59	403		1039	3	2454	_
Li <sup>2)</sup>	42	185	118	406	51	54	311	-	110	38	3	33
Te <sup>2)</sup>	26	185	3	34	24	54	2	_	40	3	60	43

1) Content in mass fraction (%); 2) Content in mass fraction  $(10^{-6})$ 

钴结壳相比 Co、REY(REE+Y)、W、V、Te 等金属 含量略低,Cu、Li、Ti、Zr 等金属含量略高。东太 平洋 CCZ 区、秘鲁海盆和中印度洋海盆结核主要 金属含量相当,与西北太平洋海山盆地和库克群岛 EEZ 区结核相比,富集 Cu、Ni、Li、W 等金属元 素,但是亏损 Co、Ti、Zr、REY 等金属元素。西 北太平洋海山盆地多金属结核矿床具有丰度高的 特点,以富集 Co、Ti和 REY 等金属为特征,Zr、 Nb、Ta 和 Pt 等金属元素也具有综合利用的潜力。 东太平洋 CCZ 区结核以富集 Cu 和 Ni 等金属为特 征,Li、W 等金属元素未来也具有综合利用的潜力。

## 4 对深海多金属结核资源开发的思考

全球绿色能源、高技术和可再生能源产业的蓬 勃发展使得国际上对 Co、REE 等关键稀有金属资 源的需求激增<sup>[6]</sup>。深海多金属结核资源富含多种关 键稀有金属元素,加上采矿、选冶等技术储备日趋 成熟,其开发前景近年来再次引起关注。与此同时, 国际海底管理局正在抓紧出台"开发规章",这将 使得国际海底区域活动主体从"勘探"转向"开 发",势必引起深海多金属结核勘探领域发展趋势 的巨大变化。我国拥有3块深海多金属结核资源矿 区,资源量巨大、矿床类型不同,勘探工作程度相 差较大。因此,如何应对未来新一轮深海多金属结 核资源勘探活动领域的变化将是我们面临的一项 巨大挑战。

## 4.1 深海多金属结核资源开发可为国家经济发展 提供重要战略保障

美国和欧盟 2017 和 2018 年相继公布了对其自 身安全和经济发展至关重要的关键金属资源名录, 分别包括 35 种和 27 种金属矿产资源,认为这些金 属资源的供给极易受到影响<sup>[6]</sup>。我国在 2016 年发布 《全国矿产资源规划(2016~2020)》列出了 24 种对 于保障国家经济安全、国防安全和战略新兴产业发 展的战略性矿产目录,这其中包括 19 种金属资 源<sup>[35]</sup>。深海多金属结核资源富含十余种具有综合利 用前景的金属元素<sup>[8]</sup>,这其中分别有 13 种、9 种和 8 种金属被列在了美国、欧盟和我国的战略或者关 键金属矿产名录中。

如果未来我国在西北太平洋海山盆地(以北京 先驱矿区为例)和东太平洋 CCZ 区(以中国大洋协会 矿区为例)同时实施两个深海多金属结核采矿项目, 采矿规模为干结核 300 万 t/a,回采率和综合利用率 采用 100%。通过对比这两个采矿项目供给的金属 量与我国相关金属的年消费量<sup>[35]</sup>(见表 2),可以发 现深海多金属结核采矿活动可有效的改善我国对 于 Co 金属的对外依存度,强化我国对于 Mn、Ti、 Ni 等金属的保障,同时提供一定数量的 Zr、Te、 Li、Nb、Ta 等金属供给。以 Co 金属为例,我国 Co 金属年消费量约为 6.6 万 t,对外依存度超过 90%, 西北太平洋海山盆地和东太平洋 CCZ 区两个多金 属结核采矿项目每年能够分别生产约 1.32 万 t 和 0.81 万 t 的 Co 金属,约占到我国年消费量的 32%。

表2 深海多金属结核采矿项目对于我国相关金属需求的影响

Table 2	Influence of mining	projects for	or polymetallic	nodules on our	consumption of	of metals

Metal	Northwo	estern Pacific Ocean	CCZ of	eastern Pacific Ocean	<b>C</b>	Degree of dependence <sup>[35]</sup>	
	Content	Annual production/ 10 <sup>4</sup> t	Content	Annual production/ 10 <sup>4</sup> t	$10^4 \text{ t}$		
Mn <sup>1)</sup>	20.0	60	24.69	74.07	1516		
Cu <sup>1)</sup>	0.26	0.78	0.83	2.49	1195		
Co <sup>1)</sup>	0.44	1.32	0.27	0.81	6.6	90%	
Ni <sup>1)</sup>	0.49	1.47	01.07	3.21	111.1		
Ti <sup>1)</sup>	1.66	4.98	0.73	2.19	7.86		
$Zr^{2)}$	635	0.1905	532	0.1596	112	90%	
Te <sup>2)</sup>	26	0.0078	2	0.0006	0.015		
Li <sup>2)</sup>	42	0.0126	108	0.0324	3.24	75.30%	
Nb <sup>2)</sup>	21	0.0063	43	0.0129	1.5	95%	
Ta <sup>2)</sup>	0.24	0.000072	0.57	0.00017	0.055		

1) Content in mass fraction (%); 2) Content in mass fraction  $(10^{-6})$ 

### 4.2 对我国深海多金属结核资源勘探工作的建议

东太平洋 CCZ 区是多金属结核资源勘探程度 最高的海底区域,中国大洋协会和中国五矿矿区均 位于此,区内多数多金属结核资源矿区承包者已完 成矿址圈定。CCZ 区内结核矿床类型单一, 过多的 采矿项目同时实施势必会增加市场的金属供应,从 而导致金属价格的迅速下降,未来只能有少数承包 者的矿区能够进入开发阶段。因此, 东太平洋 CCZ 区必将是未来开发活动竞争最大的区域,区内所能 容纳的"开发合同"数量必定少于"勘探合同"。 北京先驱矿区是目前唯一发育水成型结核矿床类 型的区域,将在 2021 年开展勘探工作。但是,南 太平洋的库克群岛已在 2020 年 12 月发布了其专属 经济区内多金属结核资源勘探项目的招标信息,该 区与北京先驱的结核矿床类型类似。为了能够缩小 与早期承包者之间的差距,以在未来开发活动占据 一席之地,北京先驱和中国五矿应加大勘探工作投 入,尽快完成多金属结核矿址的圈定,以期具备申 请开发合同的必要条件。

国际海底管理局发布的"开发规章草案"中 明确指出申请"开发合同"需要提交"采矿工作 计划",其中基于可行性(预可行性)研究的多金属 结核储量及相关数据是强制要求内容。国际海底管 理局在 2015 年提出了"海管局矿物勘探结果评估、 矿产资源和矿产储量报告标准",明确了矿产资源 量和储量转换因素。我国在 2020 年发布的"固体 矿产资源储量分类"(GB/T 17766-2020), 与国际 海底管理局标准一致。目前,在国际上尚未看到开 展深海矿床资源储量评价工作的报道,各国在深海 多金属结核资源储量评价方面处于同等水平。基于 此,中国大洋协会、中国五矿、北京先驱可考虑共 同建立深海多金属结核采矿示范区,统筹考虑采 矿、选冶、环境监测等工作,解决回采率、回收率、 综合利用率等储量评价的关键技术参数,以期在国 际上率先开展深海多金属结核资源的储量评价工 作,这将有助于我国在新一轮的深海多金属结核开 发活动中发挥重要作用。

## 5 结论

1) 中国大洋协会和中国五矿的多金属结核矿

区位于东太平洋 CCZ 区,发育混合型多金属结核 矿床类型。其中,中国大洋协会在矿区西部圈定了 1处可用于未来申请开发合同的多金属结核矿址, 中国五矿确定了重点勘探工作区块。北京先驱结核 矿区位于西北太平洋海山盆地区,是国际上唯一一 个发育水成型结核矿床类型的矿区,其勘探工作将 于 2021 年开始实施。

2) 西北太平洋海山盆地多金属结核矿床具有 丰度高、结核类型单一特点,以富集 Co、Ti 和 REY 等金属为特征,Zr、Nb、Ta 和 Pt 等金属元素也具 有综合利用的潜力。东北太平洋 CCZ 区结核类型 较为复杂,以富集 Cu 和 Ni 等金属为特征,Li、W 等金属元素未来也具有综合利用的潜力。

3) 基于已有勘探工作基础和国际形势需要,建 议北京先驱和中国五矿应尽快完成多金属结核矿 址的圈定,以具备申请开发合同的必要条件。同时, 中国大洋协会、中国五矿和北京先驱可合作建立采 矿示范区,统筹考虑采矿、选冶和环境影响监测等 工作,以期在国际上率先开展多金属结核的储量评 价工作。

## REFERENCES

- MERO J L. The mineral resources of the sea[M]. Amsterdam: Elsevier, 1965: 1–312.
- [2] BISCHOFF J L, PIPER D Z. Marine geology and oceanography of the pacific manganese nodule province[M]. New York: Plenum Press, 1979: 651–679.
- [3] GLASBY G P, STOFFERS P, SIOULAS A, et al. Manganese nodule formation in the Pacific Ocean: A general theory[J]. Geo-Marine Letter, 1982, 2: 47–53.
- [4] TUREKIAN K K, HOLLAND H D. Treatise on geochemistry[M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013: 273–291.
- [5] SHARMA R. Deep-sea mining[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017: 1–229.
- [6] HEIN J R, KOSCHINSKY A, KUHN T. Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials[J]. Nature Review (Earth and Environment), 2020, 1: 158–169.
- [7] HEIN J R, SPINARDI F, OKAMOTO N, et al. Critical metals in manganese nodules from the Cook Islands EEZ, abundance and distribution[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 68: 97–116.

- [8] 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.
- U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries[R]. Washington D. C.: U.S. Geological Survey, 2013.
- [10] LIPTON I T, NIMMO M J, PARIANOS J M. TOML Clarion Clipperton Zone project, Pacific Ocean [R]. Brisbane: Nautilus Minerals, 2016.
- [11] GLASBY G P. Lessons learned from deep-sea mining[J]. Science, 2000, 289: 551–553.
- [12] 张海文.《联合国海洋法公约》释义集[M].北京:海洋出版社,2006:267-372.
  ZHANG Hai-wen. "United nations covention on the law of the sea" Shi Yi Ji[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 267-372.
- [13] ISBA/16/A/12/REV.1. Regulations on prospecting and exploration for polymetallic sulphides in the Area [S]. Kingston: International Seabed Authority, 2010.
- [14] ISBA/18/A/11.Regulations on prospecting and exploration for cobalt-rich ferromanganese crusts in the Area[S]. Kingston: International Seabed Authority, 2010.
- [15] ISBA/19/C/17. Regulations on prospecting and exploration for polymetallic nodules in the Area[S]. Kingston: International Seabed Authority, 2013.
- [16] WU Zi-yin, YANG Fan-lin, TANG Yong, et al. Highresolution seafloor survey and application[M]. Beijing: Science Press, 2020: 564–588.
- [17] Global Sea Mineral Resources N V. Environmental impact statement: Small-scale testing of nodule collector components on the seafloor of the Clarion- Clipperton Fracture Zone and its environmental impact[R]. Zwijndrecht: Global Sea Mineral Resources, 2018.
- [18] ISBA/25/C/WP.1. Draft regulations on exploitation of mineral resources in the Area[S]. Kingston: International Seabed Authority, 2019.
- [19] LÉVY J P. Delineation of mine-sites and potential in different sea areas[M]. Amsterdam: Elsevier, 1987: 1–80.
- [20] International Seabed Authority and Ministry of Earth Science. Polymetallic nodules resources classification[R]. Kingston: International Seabed Authority, 2014.
- [21] 金翔龙. 东太平洋多金属结核矿带海洋地质与矿床特征[M]. 北京: 海洋出版社, 1997.
  JIN Xiong-long. Characteristics of marine geology and deposit of the mineral belts in the eastern Pacific[M]. Beijing: China Ocean Press, 1997.

[22] 朱克超,李振韶,何高文,等.东太平洋多金属结核矿产
[M].北京:地质出版社,2000.
ZHU Ke-chao, LI Zhen-shao, HE Gao-wen, et al. The mineral resources of polymetallic nodules in the eastern

Pacific Ocean[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.

- [23] 张富元. 大洋多金属结核资源评价原理和矿区圈定方法[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.
  ZHANG Fu-yuan. Principles of mineral resources assessments of the polymetallic nodules and method of mining areas delineation[M]. Beijing: China Ocean Press, 2001.
- [24] 吕文正,张国祯,黄永祥,等.太平洋多金属结核中国开 辟区矿床地质[M].北京:海洋出版社,2008.
  LÜ Wen-zheng, ZHANG Guo-zhen, HUANG Yong-yang, et al. Deposit geology of the polymetallic nodules in the Chinese Pioneer Area, Pacific Ocean[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008.
- [25] DYMOND J, LYLE M, PIPER D Z, et al. Ferromanganese nodules from MNAOP sites H, S, and R- control of mineralogical and chemical composition by multiple accretionary processes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48: 931–949.
- [26] HALBACH P, GIOVAANOLI R, BORSTEL D. Geochemical processes controlling the relationship between Co, Mn, and Fe in early diagenetic deep-sea nodules[J]. Earth and Planetary Science Letter, 1982, 60: 226–236.
- [27] KOSCHINSKY A, HALBACH P. Sequential leaching of marine ferromanganese precipitates: Genetic implications[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59: 5113–5132.
- [28] KOSCHINSKY A, HEIN J R. Uptake of elements from seawater by ferromanganese crusts: Solid-phase associations and seawater speciation[J]. Marine Geology, 2003, 198: 331–351.
- [29] KOSCHINSKY A, HEIN J R. Marine ferromanganese encrustations: Archives of changing oceans[J]. Elements, 2017, 13: 177–182.
- [30] HOLLAND H D, TUREKIAN K K. Treatise on geochemistry[M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2014: 273–291.
- [31] BAU M, SCHMIDT K, KOSCHINSKY, et al. Discriminating between different genetic types of marine ferromanganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium[J]. Chemical Geology, 2014, 81: 1–9.
- [32] ELLEFMO S L, KUHN T. Application of soft data in nodule resource estimation[J]. Natural Resources Research, 2020,

23: 1-23.

- [33] GAZIS I, SCHOENING T, ALEVIZOS E, et al. Quantitative mapping and predictive modelling of Mn-nodule's distribution from hydroacoustic and optical AUV data linked by Random Forests machine learning[J]. Biogeosciences Discuss, 2018, 3: 1–44.
- [34] WASILEWSKA-BLASZCZYK M, MUCHA J. Possibilities and limitations of the use of seafloor photographs for

estimating polymetallic nodule resource- case study from IOM Area, Pacific Ocean[J]. Minerals, 2020, 10: 1–21.

[35] 陈甲斌, 霍文敏, 冯丹丹, 等. 中国与美欧战略性(关键) 矿产资源形势分析[J]. 中国国土资源经济, 2020, 8: 9-17. CHEN Jia-bin, HUO Wen-min, FENG Dan-dan, et al. Analysis of strategic (critical) mineral resources situation in China and the U.S. and the EU[J]. Natural Resource Economics of China, 2020, 8: 9-17.

# Adavance and implication for polymetallic nodules resources exploration in deep-sea

CHU Feng-you<sup>1</sup>, JIANG Jing<sup>2</sup>, LIU Yu-wei<sup>3</sup>, LI Huai-ming<sup>1</sup>, LI Xiao-hu<sup>1</sup>, ZHU Ke-chao<sup>4</sup>, LÜ Shi-hui<sup>5</sup>, LUO Yi<sup>2</sup>, ZENG Xuan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China;

2. China Ocean Mineral Resources Research and Development Association, Beijing 100012, China;

3. Changsha Research Institute of Ming and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, China;

Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China;
 School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: As one of the first group of contractors for the polymetallic nodules mining areas in the international seabed areas, China Ocean Mineral Resources Research and Development Association (COMRA) has conducted mineral exploration and research of polymetallic nodules for nearly 30 years in the abyssal plain of the Clarion-Clipperton Fracture Zone (CCZ), eastern Pacific Ocean. In recent years, COMRA also promoted the application of the mining areas of the China Minmetals Corporation (CMC) and the Beijing Pioneer High-Tech Corporation (BPC) in the CCZ and seamount basins of the northwest Pacific Ocean. Here, the forming process of polymetallic nodules and deposit types was analyzed, and then the mineral exploration and research of the mining areas for the COMRA, CMC and BPC were reviewed. Comparisons of the mineral resource characteristics between the CCZ of the eastern Pacific Ocean and seamount basins of the northwest Pacific Ocean were conducted based on the previous data of the mineral exploration. According to the trending of the critical metals with our economic development. The CMC and the BPC would delineate the mining sites in order to have the capacity to apply for the exploitation contract. Meanwhile, the COMRA, CMC and BPC could cooperatively resolve the key questions about the reserve assessment, and firstly conduct reserve assessment of polymetallic nodules in the world.

Key words: polymetallic nodules; international seabed area; mineral resource assessment; reserve assessment exploitation

Foundation item: Projects(DY135-N1-01, DY135-N2-01) supported by China Ocean Mineral Resources Research and Development Association

**Received date:** 2021-06-03; Accepted date: 2021-09-15

LI Huai-ming; Tel: +86-571-81961213; E-mail: huaiming\_lee@163.com

Corresponding authors: CHU Feng-you; Tel: +86-571-88073159; E-mail: chu@sio.org.cn