

常琳, 张永波, 马哲, 等. 深海稀土矿产资源研究现状及开发利用前景[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(12): 1-7.

CHANG Lin, ZHANG Yongbo, MA Zhe, et al. Research frontiers in exploitation and utilization of rare earth mineral resources in the deep-sea sediments[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(12): 1-7.

# 深海稀土矿产资源研究现状及开发利用前景

常琳, 张永波, 马哲, 张丛, 王言哲, 王继业\*

(山东省海洋科学研究院, 青岛 266104)

**摘要:**随着人类社会对稀土资源的需求日益增加, 资源量丰富的深海稀土逐渐引起各国的关注。深海稀土是近年来发现的一种富集中-重稀土的新型海洋矿产资源, 具有重要的价值并可能成为最先开发的深海矿产资源之一。目前, 深海稀土矿产资源的调查研究工作才开展十余年, 对深海稀土元素的来源富集、分布规律、成矿机理等方向做了较多基础研究工作, 但由于开采设备、环境保护、市场收益等环节还存在诸多技术难题和未知因素, 尚不能实现商业化的开发利用。本文分析了深海稀土矿产资源的研究现状以及存在的关键问题, 重点剖析了中国超前布局其产业化的前景和可行性, 提出未来产业化开发利用的相关对策与建议。今后需继续加大深海稀土开发利用技术的研发力度, 升级改造中国稀土全产业链布局 and 融合发展, 推广深海绿色采矿新概念, 提高中国在国际深海资源勘探开发的话语权。

**关键词:**深海稀土; 矿产资源; 开发利用; 前景分析; 对策与建议

中图分类号: P736; P744 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.313

## 0 引言

稀土金属小到手机大到导弹, 是所有高科技产品必不可缺的材料, 也因此被誉为“工业味精”“军事装备维生素”, 是当今世界最重要的战略性矿产资源<sup>[1-2]</sup>。随着陆地稀土资源的储量越来越少, 尤其是中-重稀土资源危机越发突出。科学家研究发现, 深海富稀土沉积中的重稀土元素含量高, 太平洋地区的重稀土元素品位已达或超过中国南方离子吸附型矿床重稀土的 2 倍<sup>[3-4]</sup>, 资源潜力巨大, 深海稀土矿产资源开始受到各国的广泛关注。2012 年中国就对世界大洋海底稀土资源潜力进行立项研究, 大洋协会组织多个航次开展深海稀土资源调

查, 发现多个富稀土沉积并提出全球 12 个深海稀土资源潜在富集调查区<sup>[5]</sup>。有专家推断, 中国作为稀土资源大国, 近年来随着经济社会的快速发展, 按照现有的陆地稀土资源开采速度, 中-重稀土储备仅能维持 15~20 a<sup>[6]</sup>。因此, 加强顶层设计和前瞻布局, 尽早开展深海稀土矿产资源的开发利用研究, 将成为解决这一难题的潜在可行途径。

## 1 深海稀土矿产资源研究现状

深海富稀土沉积, 也称为深海稀土, 是指产于深海盆地中的富含稀土元素(镧系元素加钇, 简称 REY)的沉积物( $\Sigma\text{REY} > 700 \times 10^{-6}$ ), 主要分布于远离大陆且水深超过 4 000 m 的深海, 边缘海或浅海沉积物中一般不发育富稀土沉积<sup>[7-8]</sup>。深海稀土是由日本科学家于 2011 年首次在太平洋发现并提出深海稀土矿产资源概念后, 开始受到世界各国的广泛重视<sup>[3]</sup>。日本稀土消费居全球第三, 因其国内资源匮乏, 特别重视深海稀土开发研究, 在该领域一直走在世界前列。2013 年日本在南鸟礁附近发现了大量的富稀土沉积, TAKAYA 等<sup>[9]</sup>日本科学家推断南鸟礁周边深海稀土资源量超过 1 600 万 t, 可

收稿日期: 2021-12-07

资助项目: 中国工程院院地合作项目重大项目(202101SDZD02); 中国工程科技发展战略山东研究院咨询研究项目(202103SDYB07, 202103SDYB23)

作者简介: 常琳(1987—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事海洋地质与矿产资源开发利用研究工作. E-mail: changlin01@shandong.cn

\* 通讯作者: 王继业(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋科技与产业战略研究工作. E-mail: wangjiyehyzx@shandong.cn

供全球使用一百多年。此外,据报道称日本计划于近几年利用深海探测船“地球”号对海底稀土进行试开采。

中国是国际上第 2 个开展深海稀土调查研究的国家,并取得国际领先的重大发现。2012 年石学法等<sup>[5]</sup>在总结世界大洋地质特征和沉积物稀土元素特征的基础上,初步划分出了 4 个深海稀土成矿

带:西太平洋深海稀土成矿带、中-东太平洋深海稀土成矿带、东南太平洋深海稀土成矿带和中印度洋海盆-沃顿海盆深海稀土成矿带(图 1)。近年来,中国科学家在中印度洋海盆远景区圈划出稀土超常富集核心区域,在东南太平洋选划出约 150 万 km<sup>2</sup> 的富稀土沉积区,使中国成为目前对印度洋、东南太平洋深海稀土调查研究程度最高的国家<sup>[7]</sup>。

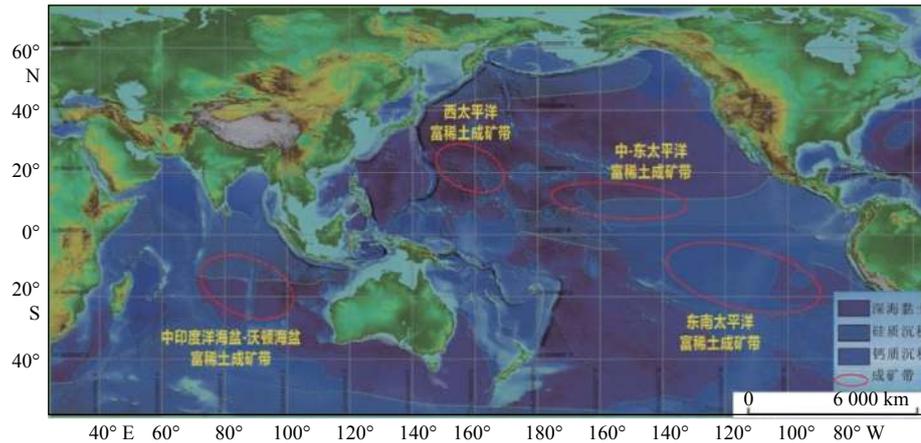


图 1 太平洋和印度洋深海稀土成矿带<sup>[8]</sup>

Fig.1 The metallogenic belts of deep-sea REY (rare earth elements and yttrium) in the Pacific and the Indian oceans<sup>[8]</sup>

在深海稀土富集、成矿机理方面的研究表明,深海稀土元素主要来源于海水和孔隙水<sup>[7]</sup>,并主要赋存在深海黏土中,以生物成因磷灰石矿物为主要载体<sup>[10-12]</sup>,其中的稀土元素配分模式存在明显的正铈(Ce)异常;发育在洋中脊附近盆地的深海稀土,往往受到热液活动中铁-锰水合(氢)氧化物吸附作用的影响<sup>[3-4,13]</sup>,其中的稀土元素配分模式表现出明显的正铕(Eu)异常<sup>[4]</sup>。深海稀土沉积主要富集在低沉积速率和富氧的深海盆地中,水深超过碳酸盐补偿深度(CCD),表层生产力和陆源碎屑输入通量低、底层流发育的环境中<sup>[3,12]</sup>。其中底流活动是大面积成矿富集的重要控制因素,形成的氧化环境有利于重稀土微粒的封闭和沉积物对稀土元素的吸收<sup>[14]</sup>,同时强底流活动冲刷会造成颗粒较大的生物磷灰石富集,更容易形成深海极富稀土沉积<sup>[7,15]</sup>。根据目前大面积成矿机理的初步研究,石学法等<sup>[7]</sup>推断大西洋很难发育大面积深海富稀土沉积。

深海稀土作为除多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物之后的第 4 种深海矿产资源,各国都给予了大量的关注,在其未来的开发利用方面,日本、英国、美国等国率先进行了探索研究。早在 2012 年,英国南安普顿大学就开展了深海稀土采矿的概念

设计<sup>[16]</sup>;2013—2015 年,日本以南鸟礁周边深海富稀土沉积为对象,初步设计了扬泥量为 3500 t/d 的海上浮式生产-存储-卸载系统及作业流程方案<sup>[17]</sup>;美国深海矿业有限责任公司于 2016 年获得了勘探和开采南太平洋库克群岛稀土元素的专有权<sup>[18]</sup>;美国、英国、澳大利亚等主要发达国家对于深海稀土在高科技、绿色能源以及创造更强、更耐腐蚀的航空航天和国防用途的铝合金方面的应用非常迫切。

## 2 深海稀土矿产资源开发利用存在的问题

深海稀土矿产资源调查工作虽然才开始十余年,对深海稀土元素的来源富集、分布规律、成矿机理等已经开展了较多的基础研究。然而,其开发利用研究尚处于探索阶段,首先对海盆沉积物富稀土程度的调查度比较低,没有形成精准的勘探技术体系,难以获得符合开发条件“高品位、分布连续、少杂质”<sup>[19]</sup>的富集区;其次,对开采装备的研发、开采的生态环境评价刚刚起步;此外,开采成本、产品价格、现有存量等诸多市场因素导致产业收益评价难以满足商业化开发。

## 2.1 深海矿产资源开采所需装备和技术要求高

深海稀土主要分布在水深超 4 000 m 的海底, 由于深海可视性差、水压大、海底地质结构复杂、海况复杂等特殊性质, 开采难度大、成本高, 需要更先进的开采船舶以及专业的勘探开采装备、存储运输设备等, 亟需逐步完善由“深海富稀土沉积”到“深海稀土资源”链条装备。目前, 对深海稀土的勘查主要使用常规的取样设备, 其获取的岩心一般为数米至十余米, 但有些富稀土沉积最深处可达百余米, 因而目前的调研方法无法获取富集层的详细信息, 无法标定符合开采的矿源<sup>[19]</sup>。由于要考虑深海的复杂条件以及开发后对环境的影响, 不仅仅是深海稀土, 其他的深海矿产资源在世界范围内也尚未形成商业化开采<sup>[20]</sup>。抛开环境问题, 美国、欧洲、日本等发达国家和地区已储备了资源开发的关键技术和装备制造能力<sup>[20]</sup>。目前, 深海采矿相关高新技术多由国外先进厂商所垄断, 技术专利主要集中在泰克尼普、大宇造船、卡梅伦国际等传统能源企业<sup>[21]</sup>。近年来, 中国在深海多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物等领域设计研发了相关装备并完成一些海上试验, 尤其是长沙矿冶研究院、上海交通大学、中南大学等科研院所取得了丰富成果, 但与发达国家仍存在一定差距, 缺少全系统的联合海试和完整的环境影响评估<sup>[20]</sup>, 尤其是关键技术、核心器件主要依赖进口, 势必会阻碍技术的发展。

## 2.2 开发及采后海洋环境污染研究和相关配套技术跟不上

深海稀土资源开采利用除技术难题外, 还存在严重的污染问题。稀土沉积中所含的重金属或有害元素一旦混入水体会严重影响生态环境, 开采过程中还伴随有噪音污染<sup>[22]</sup>, 可能给渔业、海洋环境带来不可预知的风险。目前, 中国对深海稀土资源的评价标准、资源量估算方法、环境评价体系等的研究刚刚起步<sup>[3,7-8,19]</sup>, 还没有建立起完整的环境影响评估方法<sup>[20]</sup>, 深海矿产资源的开发装备也存在诸多基础科学问题不清晰、关键核心技术依赖进口的问题, 智能、绿色的发展理念考虑不足<sup>[20]</sup>。目前, 为数不多的深海采矿模拟实验是 1989 年在秘鲁海盆进行的扰动和再迁入实验(DISCOL)<sup>[23]</sup>, 通过模拟采矿产生的扰动来测试其对海洋环境的影响, 结果表明扰动发生后实验区内的生物密度和种群丰富度

急剧下降, 26 a 后该实验区内底栖生物多样性仍影响严重<sup>[24]</sup>。可见当前在尚未完全了解深海稀土矿产资源开采对生态环境的影响、形成成熟的绿色化深海采矿装备研发体系前, 开发利用需谨慎。

## 2.3 市场因素的决定性影响

大量的前期投入、装备技术的短板以及未知的采后污染等问题, 使深海稀土资源开采利用能否盈利变成未知数。中国陆上稀土资源丰富, 产品价格较低, 国内矿业企业对深海稀土资源的开采利用关注度低, 产业化面临市场因素。日本石油天然气金属矿物资源开发机构在其专属经济区南鸟礁周边海域进行稀土资源评价和开采性经济评价时表明, 只有稀土价格保持在 2011 年前的历史最高价长达 20 a 才具备经济上的可采性<sup>[25]</sup>, 一旦稀土元素市场价格稍有波动, 很可能面临巨大的经济损失<sup>[26]</sup>。根据稀土元素含量和价格因素 2 个角度分析, 即使稀土元素含量和经济价值较高的东南太平洋沸石黏土沉积物和南鸟礁附近沉积物, 其经济价值和效益也远远落后于中国陆地白云鄂博稀土矿床<sup>[26]</sup>。可见, 市场因素是目前很长一段时间内决定开发一种新资源的关键。

## 3 中国深海稀土矿产资源产业化前景和可行性分析

稀土作为中国为数不多的优势战略矿产资源, 近年越来越受到国家的重视。2011 年, 出台《国务院关于促进稀土行业持续健康发展的若干意见》, 对稀土行业开发乱象进行整合和整治工作; 2021 年 6 月国务院印发《稀土管理条例》, 提出国家对稀土开采、稀土冶炼分离实行总量指标管理, 实行稀土资源地和稀土产品战略储备。随着全球科技创新进入空前密集活跃的时期, 在新一轮科技革命和产业变革重构全球创新版图、重塑全球经济结构的关键阶段, 深海稀土矿产资源储备和开采技术成为重要的一环, 具有重要的战略意义, 超前布局势在必行。

中国是国际上最早开展深海稀土资源调查研究的国家之一, 并取得了许多领先的成果。在选冶流程、浸出技术、新材料绿色开发等方向也在积极探索<sup>[7,10,19,27]</sup>, 提出选冶条件温和、能耗低、效率高、环境友好的以浮选为主的稀酸浸出流程等<sup>[27]</sup>, 进一步推动以环境保护为前提的开发研究, 以期尽早实现商业化开采作业。同时, 中国也开展了多次深海

矿产资源开发装备的海上测试工作,包括2016年中国五矿集团长沙矿山研究院有限公司研制的深海富钴结壳采矿头在南海完成了富钴结壳采掘试验;2018年中国科学院深海科学与工程研究所在中国南海海域完成了富钴结壳规模采样车试验<sup>[20]</sup>。2021年由大连理工大学牵头自主研发的中国首套深海采矿智能化混输装备系统“长远号”在南海成功开展500 m海试,完成整套系统的布放回收;同年,由湖南科技大学领衔研发的“海牛Ⅱ号”在超2 000 m深水中,成功下钻231 m,刷新了深海海底钻机的世界纪录。中国在深海矿产资源开采研究领域取得的众多原创性成果,为深海稀土资源的开发奠定了一定的技术基础,也让我们看到了深海稀土资源开发利用的未来,超前布局其产业化具有可实现性。

科学研究表明深海稀土与多金属结核产出环境相近,二者往往伴生,开采技术大多可通用。目前,国际上对于多金属结核的开采技术研究还处在试采探索阶段,早在20世纪70年代,以美国为首的三大跨国公司就进行了5 000 m深的多金属结核的海试工作<sup>[28]</sup>,日本曾在北太平洋水深2 200 m的Marcus-Wake海山上进行过多金属结核的采矿试验并取得成功<sup>[29]</sup>。2018年,中国首次自主研发500米级海底多金属结核集矿系统海试成功,自主研发的“鲲龙500”海底集矿车单次行驶最长距离2 881 m,水下定位精度达0.72 m,多金属结核采集能力每小时10 t<sup>[30]</sup>,为深海多金属结核的开采利用奠定了基础。一般认为深海稀土可能会与多金属结核一起,将成为首批开发的深海矿产资源之一<sup>[19]</sup>。此外,耐高压测绘声呐等多种新一代信息技术的商业化应用,水下通讯、动力等技术的发展,使深海矿产资源的开发可行性不断提高<sup>[31]</sup>,超前布局深海稀土的产业化具有可行性。

## 4 对策与建议

即便面临种种困难,深海稀土矿产资源的巨大吸引力仍使其开发利用提上日程。中国在充分利用研究优势的基础上,亟需进行前瞻性研究开发和产业化超前布局,以期占领未来资源战略国际制高点。

### 4.1 继续加强深海稀土领域的基础研究工作

深海稀土作为一种新型的矿产资源,目前对其

元素来源、赋存状态、成矿规律等研究程度还较低,资源勘查和开发利用研究处于起步阶段,还没有建立完整的深海采矿环境影响评估方法<sup>[20]</sup>,尤其是在成矿规律、成矿理论方面认识明显不足。为加快深海稀土领域研究,应聚集科研力量,以多学科交叉融合为突破点,集中优势资源建立国家深海稀土资源探测研发中心,形成全链条的研究体系,积极突破关键科学问题,尤其是探明深海稀土超常富集的成矿背景和控矿要素,为未来海底找矿和开发利用提供必要的理论基础。

### 4.2 以国家需求为导向明确关键研发任务,强化政策扶持

深海稀土作为重要的战略储备资源,应建立以国家需求为导向的任务清单,着重解决关键科学问题和核心技术难点,尤其是被美国、德国等垄断的各类传感器,仅由美国三家公司生产的水下连接器就占据了全球主要市场份额,以及制约水下焊接机器人研发的焊接电源技术和大多数抗腐蚀性海洋材料等。目前,在深海矿产资源开发系统、关键开采设备、实时监测和预报预警技术、污染控制和修复等方面亟待突破技术壁垒,解决环境评估技术体系的建设以应对深海矿产资源开采的环保要求,加快推进新一代信息技术、高端装备、新材料与深海勘探技术、制造技术等领域的深度融合。围绕国家“十四五”规划培育先进制造业集群、壮大海洋工程装备重点任务,在技术创新体系、产业格局方面打破常规谋划布局,进一步出台相关支持政策,吸引人才聚集,强化项目支持,凝聚企业合力,加大投资力度,推动深海稀土产业化超前布局的步伐。

### 4.3 加强产业技术链各环节的互补融合,实现以环境保护为前提的绿色开发和循环利用

战略储备需求、经济因素和环境问题是实现产业化开发利用的核心,在解决深海稀土成矿机理等基础研究和深海开采的一系列装备自主研发难题后,开采前、开采中以及开采后的环境问题将成为产业化开发利用的关键。针对全产业链的环境评估,建议考虑在底栖生境的模拟重建、开采废弃物及污染物物理化学性质的分析和治理、开采过程中噪声污染的影响以及开采过程中的污染控制和采后修复等方面开展研究,推进绿色环保的采矿、

运输、加工等设备研发以及在采后造成的环境污染的持续性实时监测和预报预警等方向开展大量的

实验研究(图 2)。

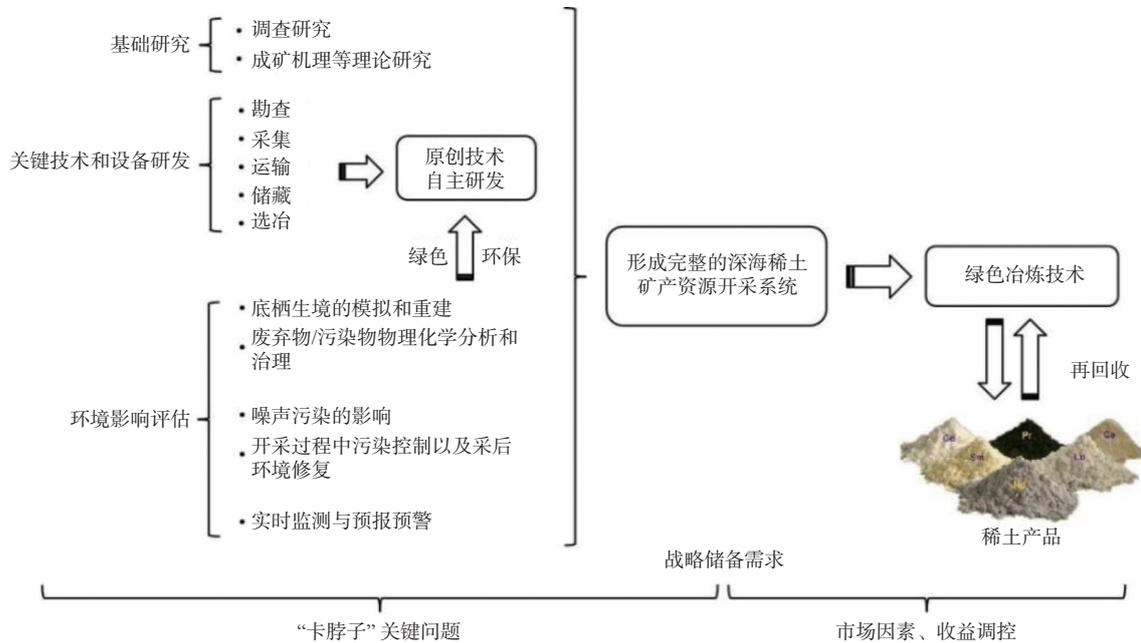


图 2 深海稀土矿产资源产业化开发利用模式技术过程

Fig.2 The model of the technical route for industrialized exploitation and utilization of deep-sea rare earth mineral resources

#### 4.4 发展深海绿色采矿新概念，推动系统研发智能化变革

深海稀土矿产资源是未来众多绿色技术所需的原材料,是大规模增加低碳经济转型发展的关键战略储备资源。绿色、智能是未来深海采矿的必由之路,尤其在当前“双碳”目标驱动下,亟待大力开展以云计算、大数据、物联网、人工智能等新一代信息技术为支撑,创新思维为引领,突破全要素数字海洋技术、水下多场景自主感知技术、深海多系统协同作业技术、深远海大型智能化运维保障系统技术、智能运输系统技术、深海环境生态恢复技术等多方面的核心共性和颠覆性技术壁垒,进一步形成新概念深海采矿范式。国际海底管理局(ISA)组织制定的《“区域”内矿物开发规章(草案)》中明确强调,开发的前提是在考虑切实有效地保护海洋环境包括生物多样性和生态完整性的背景下进行。不仅需要进行环境评估体系的研发,还应打破传统模式将“绿色”的概念渗透到深海采矿装备系统的设计、研发、组建、安装以及开采的全链条各环节中,进一步推动未来深海采矿装备体系的构建,推动绿色技术理念的发展。

#### 4.5 提高中国在国际深海资源勘探开发的话语权

国际海域的海底资源、战略资源的勘探开采,有着比较复杂的国际规则制约。中国 1996 年加入 ISA 协议,经过 10 年的努力进入到 A 组(代表各类海底矿物所含金属的主要消费国,包括经济实力最强的国家)<sup>[32]</sup>,并在 2021 年召开的 ISA 第 26 届大会上连任。要充分发挥作为理事会成员国的作用和影响力,通过提高议题设置能力、积极提出补充意见或修正主张等方式,深度参与《“区域”内矿物开发规章(草案)》的制定,提出海洋环境保护等中国立场,进一步推动“人类共同继承财产”原则的落实。要紧抓时代机遇,以深海稀土矿产资源的开发为突破口,在“一带一路”倡议和积极实施海洋强国建设的背景下,发挥中国深海稀土调查研究领先的优势,积极开展前瞻性产业化布局,以原创的科研成果、领先的技术装备占领国际深海稀土资源开发研究制高点,增强中国在国际海洋事务中的话语权和影响力,走好深海开发先手棋。

### 5 结语

研究表明,目前全球对于深海稀土矿产资源的

开发利用仍处于调查研究和试开采探索阶段,各国均在发力试图抢占国际发展先机。尤其是日本,通过勘查开发研究和相关模拟实验提出了深海稀土海上浮式生产-存储-卸载系统及作业流程方案<sup>[17]</sup>,由于实验规模小、模拟环境与实际复杂海底情况差距较大,还有待进一步开展大规模实验研究<sup>[33]</sup>。据报道,日本东洋工程公司(Toyo Engineering Corporation)和新加坡油田设备供应商(Nustar Technologies)拟共同设计和制造一套深海稀土资源调查和萃取系统,可在日本近海6000 m水深海底进行稀土采矿作业;挪威与英国两家公司也计划联合研发用于大陆架海底采矿的自主生产系统。可见深海稀土矿产作为重要的战略储备资源亟需引起重视。为此,应继续加大深海稀土资源开发利用技术的研发力度,升级改造中国稀土全产业链布局和融合发展,尤其是核心技术攻关和关键装备研发能力,包括深海稀土的采矿与集矿、选矿与分离、扬矿与传输、冶炼与分离等<sup>[19]</sup>。同时随着深海稀土资源勘查的深入和试开采脚步的加快,亟需推广深海绿色采矿新概念,提高中国在国际深海资源勘探开发中的话语权。

#### 参考文献:

- [1] GULLEY A L, NASSAR N T, XUN S. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115: 4111-4115.
- [2] 范宏瑞,牛贺才,李晓春,等. 中国内生稀土矿床类型、成矿规律与资源展望[J]. *科学通报*, 2020, 65(33): 3778-3793.
- [3] 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.
- [4] ZHOU T C, SHI X F, HUANG M, et al. The Influence of Hydrothermal Fluids on the REY-rich deep-sea sediments in the Yupanqui Basin, eastern South Pacific Ocean: constraints from bulk sediment geochemistry and mineralogical characteristics[J]. *Minerals*, 2020, 10(12): 1141.
- [5] 石学法,李传顺,黄牧,等. 世界大洋海底稀土资源潜力评估[R]. 青岛:自然资源部第一海洋研究所, 2015.
- [6] 王汾连,何高文,姚会强,等. 深海沉积物中稀土矿产资源研究进展[J]. *中国地质*, 2017, 44(3): 449-459.
- [7] 石学法,毕东杰,黄牧,等. 深海稀土分布规律与成矿作用[J]. *地质通报*, 2021, 40(Z1): 195-208.
- [8] 石学法,符亚洲,李兵,等. 我国深海矿产研究: 进展与发现(2011—2020年)[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(22): 1-14.
- [9] TAKAYA Y, YASUKAWA K, KAWASAKI T, et al. The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements[J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 1-8.
- [10] 方明山,石学法,肖仪武,等. 太平洋深海沉积物中稀土矿物的分布特征研究[J]. *矿冶*, 2016, 25(5): 81-84.
- [11] 王汾连,何高文,孙晓明,等. 太平洋富稀土深海沉积物中稀土元素赋存载体研究[J]. *岩石学报*, 2016, 32(7): 2057-2068.
- [12] SA R, SUN X M, HE G W, et al. Enrichment of rare earth elements in siliceous sediments under slow deposition: A case study of the Central North Pacific[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 94: 12-23.
- [13] 周天成,石学法. 东南太平洋尤潘基海盆富稀土沉积研究进展[C]//专题11: 现代海底成矿与找矿,第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集, 2019.
- [14] 邓义楠,任江波,郭庆军,等. 太平洋西部富稀土深海沉积物的地球化学特征及其指示意义[J]. *岩石学报*, 2018, 34(3): 733-747.
- [15] TANAKA E, NAKAMURA K, YASUKAWA K, et al. Chemostratigraphy of deep-sea sediments in the western North Pacific Ocean: implications for genesis of mud highly enriched in rare-earth elements and yttrium[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 119: 103392.
- [16] BASHIR M B, KIM S H, KIOSIDOU E, et al. A concept for seabed rare earth mining in the Eastern South Pacific[J]. *The LRET Colleium*, 2012, 1: 1-138.
- [17] 王淑玲,吴西顺,田黔宁,等. 日本对南鸟礁周边海域稀土沉积物的资源潜力评估[R]. 北京:中国地质图书馆(中国地质调查局地学文献中心), 2016: 1-45.
- [18] W2016085美国获得库克群岛稀土的专属勘探开采权[J]. *中国有色冶金*, 2016, 45(6): 1.
- [19] 黄牧,石学法,毕东杰,等. 深海稀土资源勘查开发研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(10): 2665-2681.
- [20] 杨建民,刘磊,吕海宁,等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 1-9.
- [21] 石亮,张善杰,刘晓琴. 专利视角下的全球深海采矿技术发展态势分析与对策建议[J]. *情报探索*, 2019(4): 41-51.
- [22] 丁忠军,孙永福,高伟,等. 深海采矿潜在环境影响因素及监测技术体系研究[J]. *海洋开发与管理*, 2021, 38(7): 73-83.
- [23] THIEL H, SCHRIEVER G, AHNERT A, et al. The large-scale environmental impact experiment DISCOL: reflection and foresight[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(17/18): 3869-3882.
- [24] SIMON-LLEDÓ E, BETT B J, HUVENNE V A I, et al. Biological effects 26 years after simulated deep-sea mining[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 8040.
- [25] 王淑玲,白凤龙,黄文星,等. 世界大洋金属矿产资源勘查发现现状及问题[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(3): 160-170.
- [26] 王春娟,王玺茜,刘大海,等. 基于价格因素的深海富稀土沉积物价值评价: 与陆地稀土矿床比较分析[J]. *资源开发与市场*, 2020, 36(10): 1074-1079.
- [27] 熊文良,邓杰,陈达,等. 一种从深海沉积物中提取稀土的方法[P]. 中国, CN201711202665.0. 2018-05-04.

- [28] 肖林京, 方涓, 张文明. 大洋多金属结核开采研究进展与现状[J]. *金属矿山*, 2000(8): 11-14.
- [29] 钟祥, 牛京考. 日本大洋多金属结核开采试验的进展[J]. *国外金属矿山*, 2000, 25(3): 33-38.
- [30] 彭建平. 中国深海多金属结核采矿车研究的发展[J]. *矿山机械*, 2020, 48(3): 8-11.
- [31] 黄博, 王健, 李友训, 等. 深海矿产资源勘探开发产业创新发展短板与对策[J]. *中国矿业*, 2021, 30(10): 32-37.
- [32] 于莹, 刘大海. 日本深海稀土研究开发最新动态及启示[J]. *中国国土资源经济*, 2019, 32(9): 46-51.
- [33] 王淑玲, 吴西顺, 孙张涛, 等. 日本对南鸟礁周边海域海洋稀土资源潜力的评价[J]. *中国矿业*, 2017, 26(12): 28-35.

## Research frontiers in exploitation and utilization of rare earth mineral resources in the deep-sea sediments

CHANG Lin, ZHANG Yongbo, MA Zhe, ZHANG Cong, WANG Yanzhe, WANG Jiye \*

(Marine Science Research Institute of Shandong Province, Qingdao 266104, China)

**Abstract:** With the increasing demand of the rare earth resources for the development of human society, rare earth resources in deep-sea sediments have gradually attracted the attention from all countries because of their abundant reserves. Rare earth elements and yttrium (REY) in the deep-sea sediment is a new type of marine mineral resource rich in middle-heavy rare earth discovered in recent years. In the last decade, we have seen a number of basic researches on enrichment feature, distribution pattern, occurrence state, and ore-forming process of rare earth from the deep-sea sediments. However, due to many technical problems and unknown factors in mining equipment, environmental protection, market revenue etc, the commercial development and utilization cannot be realized, which in turn preclude the efficient and industrial extravagation of these rare earth mineral resources from the deep-sea sediments. We summarized the research status and key problems of deep-sea rare earth mineral resources, focused on the prospect and feasibility in the advanced layout of industrialization in China, and put forward some constructive countermeasures and suggestions for industrialization exploitation and utilization in the future. It is necessary to continue to increase the basic research work, upgrade the whole rare earth industrial chain in China to strengthen the layout and the integrated development, develop new concepts of deep-sea green mining, and improve China's voice in the field of international deep-sea resource exploration and development.

**Key words:** deep-sea rare earth; mineral resources; exploitation and utilization; prospect analysis; measures and suggestions