



## 深海稀土资源勘查开发研究进展

黄 牧<sup>1,2</sup>, 石学法<sup>1,2</sup>, 毕东杰<sup>1,2</sup>, 于 淼<sup>1,2</sup>, 李 力<sup>1,2</sup>, 李 佳<sup>1</sup>, 张培萍<sup>3</sup>,  
张霄宇<sup>4</sup>, 刘季花<sup>1,2</sup>, 杨 刚<sup>1,2</sup>, 周天成<sup>1,2</sup>, 朱爱美<sup>1</sup>

- (1. 自然资源部第一海洋研究所 自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室, 青岛 266061;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237;
3. 吉林大学 材料与工程学院, 长春 130012;
4. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310027)

**摘 要:** 深海稀土是近 10 年来发现的一种富集中-重稀土元素的新型矿产资源, 潜力巨大, 可能成为最先开发的深海矿产之一。日本等国以太平洋为重点, 开展了深海稀土资源勘查研究及开发利用探索。我国率先在印度洋、太平洋等国际海域发现了大面积富稀土沉积区, 并初步划分了四个深海稀土成矿带。目前深海稀土资源勘查主要采用的是沉积物重力(或重力活塞)岩心取样与浅地层调查相结合的技术方法, 但是获取的岩心长度大多未穿透富集层底部边界, 浅地层剖面难以精确识别富集层位, 影响了深海稀土资源的勘查与评价。今后需要加强深海稀土资源勘查技术和设备的研发, 形成集沉积物长岩心取样+高精度浅地层探测+沉积物元素海底原位测量于一体的勘查技术体系, 深入研究不同空间尺度的稀土元素分布规律, 为指导快速、准确寻找深海稀土“高品位、分布连续、少杂质”的优质富集区和开展稀土资源评价提供技术支撑, 同时需加大深海稀土开发利用技术的研发力度。

**关键词:** 深海稀土; 分布规律; 资源勘查; 开发利用; 技术研发; 研究开发

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2665-17

中图分类号: TD15

文献标志码: A

**引文格式:** 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. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37993

HUANG Mu, SHI Xue-fa, BI Dong-jie, et al. Advances on study of exploration and development of deep-sea rare earth resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2665-2681. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37993

2011 年日本首先在太平洋深海盆地中发现了富稀土沉积<sup>[1]</sup>, 其成因不同于已知的陆地稀土矿床, 属于一种新型稀土矿产资源, 成为继多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物之后, 在深海中发现的第四种金属矿产<sup>[1-2]</sup>。“深海富稀土沉积”, 也称“深海稀土”或“富稀土泥”, 产于深海盆地中, 其稀土总量( $\Sigma$ REY, 即除 Pm 以外的 14 种稀土元素与 Y 元素含量之和)一般大于 700  $\mu\text{g/g}$ , 目前已知最高可达 8000  $\mu\text{g/g}$ , 以富集中-重稀土元素(M-HREY)为特征<sup>[2]</sup>。据初步估算, 太平洋深海沉积物中稀土资

源量相当于陆地稀土储量 800~1000 倍<sup>[1,3-4]</sup>。

众所周知, 稀土元素(REY)具有特殊的光-电-磁等物理属性, 被誉为“工业维生素”和“工业味精”, 广泛应用于传统工业、高科技、新材料和新能源等领域, 是保障全球经济发展和社会进步的关键性矿产<sup>[5]</sup>。目前人类使用的稀土资源全部来自于陆地矿床, 且主要由一批大型、超大型稀土矿床供应<sup>[6]</sup>。

稀土资源是我国为数不多的优势战略矿产资源<sup>[7]</sup>。我国是世界上最大的陆地稀土资源拥有国、

基金项目: 中国大洋协会项目(DY135-R2-1); 国家自然科学基金资助项目(91858209)

收稿日期: 2021-06-03; 修订日期: 2021-08-24

通信作者: 石学法, 研究员, 博士; 电话: 0532-88967491; E-mail: xfshi@fio.org.cn

生产国、消耗国和出口国(2020年我国稀土氧化物产量14.0万t,占全球总产量58.33%;出口量为3.54万t),但分布极不均匀,具有明显“北轻南重、轻多重少”等特点。随着世界科技革命和产业变革的不断深入,中-重稀土的消耗量日益增加,寻找新的中-重稀土资源的需求愈加迫切。富含巨量中-重稀土资源的深海富稀土沉积的发现,为稀土产业的发展提供了新机遇<sup>[4]</sup>。目前深海稀土的勘查与开发尚处于起步阶段,亟需开展深海稀土资源勘查、评价和开发利用等技术研究。

## 1 深海稀土资源调查研究

### 1.1 国外深海稀土资源调查

日本是国际上首个开展并积极推动深海稀土资源调查与开发的国家。KATO等<sup>[1]</sup>(2011)的测试结果表明,太平洋深海富稀土沉积的中-重稀土元素含量( $\Sigma$ M-HREY)已达到或超过我国华南离子吸附型中-重稀土矿床含量的2倍。

2013年,日本宣称在西太平洋南鸟礁附近海域发现大量富稀土沉积<sup>[8]</sup>。南鸟礁附近5000m水深的沉积物中 $\Sigma$ REY最高可达近8000 $\mu$ g/g,特别是镝(Dy)、铽(Tb)和铕(Eu)含量分别是我国华南离子吸附型稀土矿床的20倍、16倍和35倍。日本以南鸟礁南部的平顶海山——拓洋第5海山周边的海盆为重点,区域上首先按照100km间隔布设柱状取样站位。根据柱状样 $\Sigma$ REY测试结果,结合浅地层探测数据,在局部富集区域内按照50km、25km和12.5km的间距进行加密取样,于2015年在拓洋第5海山东部的海盆内圈划出多处平均 $\Sigma$ REY超过2000 $\mu$ g/g的深海稀土“高品位分布区”<sup>①</sup>。2013年,日本科学家对印度洋沃顿海盆东北部DSDP 213钻孔岩心样品测试发现,在该站位表层以下75~120m层位的沉积物中也发现了高 $\Sigma$ REY的富稀土沉积物, $\Sigma$ REY可达1113 $\mu$ g/g,平均 $\Sigma$ REY约700 $\mu$ g/g<sup>[9]</sup>。

日本对深海稀土的研究,一开始就是以开发利用为目的。2013年4月日本内阁会议修订的《海洋基本计划》明确提出“要加强对含稀土的深海沉积物进行基础科学勘查和研究,探讨其作为未来稀土资源的潜力”。2013年12月日本经济产业省制定的《海洋能源矿产资源开发计划》中提出,“为探讨未来的稀土资源潜力,利用3年左右的时间对深

海富稀土沉积物赋存状态进行勘查,确定有前景的稀土富集海域并估算资源量”,由日本石油天然气金属矿物资源机构(Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, JOGMEC)为主体推进和实施。2016年JOGMEC宣称初步完成了南鸟礁周边海域深海稀土资源的初步勘查和潜力评价,并开展了深海稀土的采集、扬矿和冶炼等技术领域的研究,以及经济性评价;以过去10年稀土氧化物的最高价格(即2011年前后的价格)估算,在南鸟礁附近海域深海稀土“高品位分布区”开采稀土资源(当时测得 $\Sigma$ REY最高值为5366 $\mu$ g/g,平均值为1221 $\mu$ g/g),具有经济效益<sup>①</sup>。2018年,日本推断南鸟礁周边海域深海沉积物中稀土氧化物资源量超过1600万t,可供全球使用数百年(以2010年稀土氧化物世界消费量13.4万t计算);仅南鸟礁南部最有前景的105km<sup>2</sup>深海稀土“高品位分布区”内,沉积物中稀土氧化物资源量就可达120万t<sup>[10]</sup>。

2012年,英国科学家对东南太平洋深海沉积物中的REY分布特征进行了初步总结<sup>[11]</sup>;2016年,英国科学家对横跨大西洋的24°N剖面附近深海沉积物中稀土资源潜力进行了初步评估,认为该海域内深海黏土中 $\Sigma$ REY仅为太平洋沉积物的1/4,该剖面沉积物中的稀土资源潜力较小<sup>[12]</sup>。2015年美国Deep Reach Technology公司对太平洋库克群岛附近深海沉积物中的稀土资源潜力进行了调查,并尝试研发深海稀土资源开采技术<sup>②</sup>。

### 1.2 我国深海稀土资源调查

我国是国际上第二个开展深海稀土资源调查研究并取得重大发现的国家。在日本开展深海稀土研究的同一年(2011年),中国大洋协会即组织开展了深海稀土调查研究,先后在印度洋、太平洋预测并发现了大面积富稀土沉积,并对大西洋稀土资源潜力进行了初步分析<sup>[4]</sup>。

2012年,石学法等初步预测了中印度洋海盆富稀土沉积的存在,并于2013年12月在该海域成功获取了富稀土沉积柱状样,该岩心大部分层位沉积物中 $\Sigma$ REY超过1000 $\mu$ g/g,最高超过1500 $\mu$ g/g,重稀土元素含量( $\Sigma$ HREY)可达600 $\mu$ g/g<sup>③</sup>[13]。2015年,我国率先在中印度洋海盆发现了大面积富稀土沉积,并通过后期的调查研究进一步扩展了富稀土沉积的面积<sup>④</sup>;2018年,我国在东南太平洋首次发

现了超过 150 万 km<sup>2</sup> 的大面积富稀土沉积; 2018~2020 年, 我国在西太平洋海域也发现了大面积的富稀土沉积, 其 $\Sigma$ REY 最高可达近 6000  $\mu\text{g/g}$ <sup>⑥</sup>。根据深海稀土富集特征与控制条件, 石学法等<sup>[4]</sup>(2021)初步推断大西洋深海盆地中难以形成大面积富稀土沉积。在持续开展深海稀土资源调查的同时, 我国科学家还开展了深海稀土的地球化学、矿物学、赋存状态和形成机制等理论研究<sup>[13-37]</sup>。

## 2 深海稀土富集规律及控制要素

### 2.1 深海稀土成矿带

在总结区域地质特征和沉积物 REY 特征的基础上, 石学法等基于对太平洋和印度洋的研究, 初

步划分出四个深海稀土成矿带: 西太平洋稀土成矿带、中-东太平洋稀土成矿带、东南太平洋稀土成矿带和中印度洋海盆-沃顿海盆稀土成矿带<sup>②, ④</sup>(见图 1)。

#### 2.1.1 西太平洋稀土成矿带

2013 年, 日本宣布在其南鸟礁附近海域发现了大面积富稀土沉积,  $\Sigma$ REY 最高可达 8000  $\mu\text{g/g}$ , 是目前已发现的 $\Sigma$ REY 最高的深海富稀土沉积<sup>[38-41]</sup>。近年来, 我国在西太平洋海域也发现了大面积富稀土沉积,  $\Sigma$ REY 最高接近 6000  $\mu\text{g/g}$ <sup>[4]</sup>。总体来看, 目前在西太平洋海域已发现的 $\Sigma$ REY 远高于全球其他海域, 且主要埋藏于海底表面之下 2 m 以深层位, 具有  $\Sigma$ REY 高、埋深相对较深等特征<sup>[4]</sup>(见表 1)。因此, 西太平洋富稀土成矿带可能是全球富稀土沉积

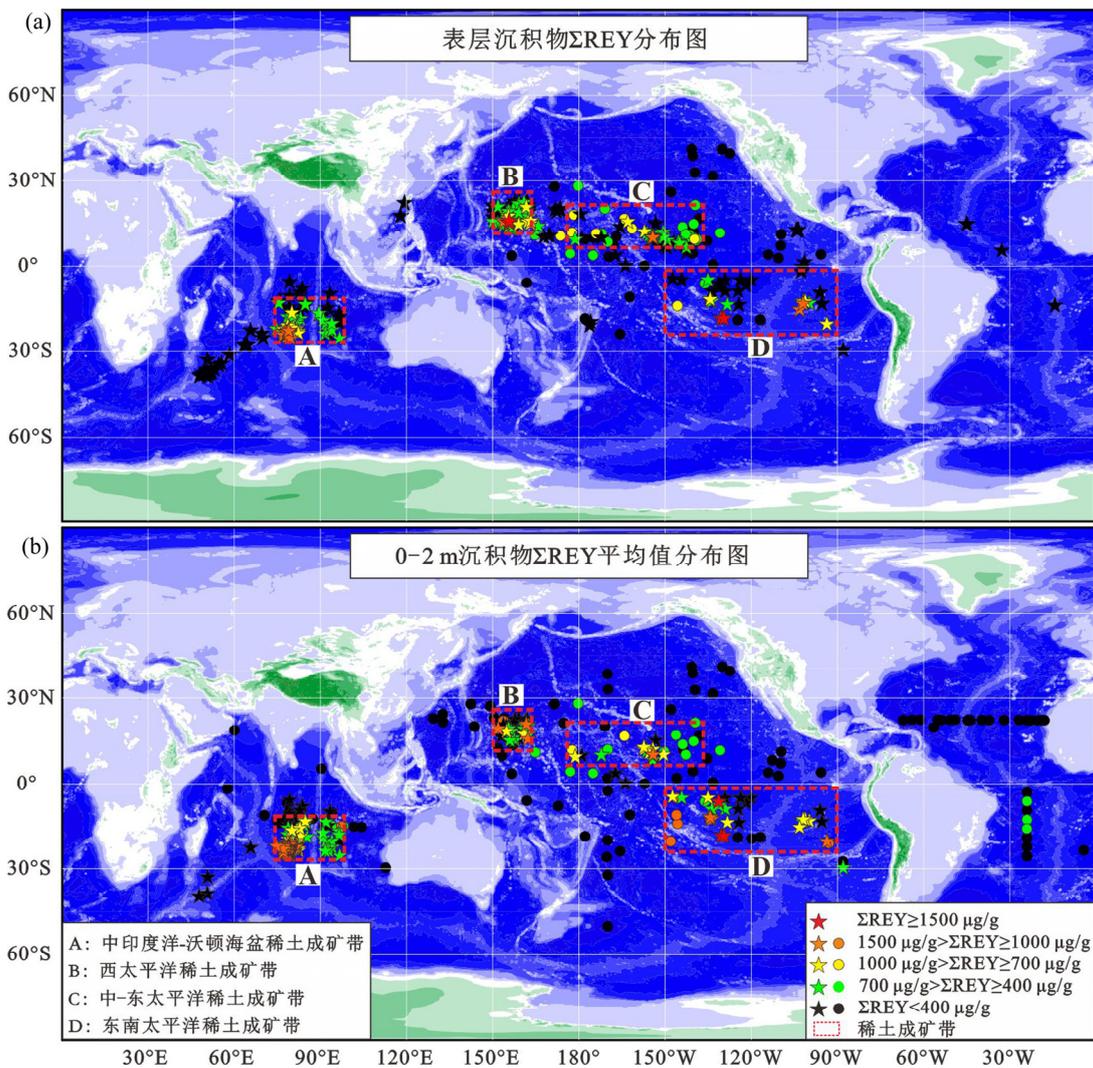


图 1 太平洋和印度洋深海稀土成矿带(据文献[4])

Fig. 1 Metallogenic belts of deep-sea REY in Pacific and Indian ocean(modified from Ref. [4]): (a) Distribution of  $\Sigma$ REY concentrations in surface sediments; (b) Distribution of  $\Sigma$ REY concentrations in 0-2 m thick sediments

表1 深海稀土成矿带特征对比一览表(据文献[4])

Table 1 Characteristics of four metallogenic belts of REY-rich sediments(modified from Ref. [4])

海区	成矿带	沉积物 主要类型	$\Sigma\text{REY}/$ ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$\Sigma\text{REY}$ 平均值/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$\geq 700 \mu\text{g/g}$ 数量	主要发育层位	主要赋存矿物
太平洋	西太平洋		700~7974	1330	819	>1.3 m; 2~12 m 发育 3 层 $\Sigma\text{REY} > 2000 \mu\text{g/g}$ 富集层	生物磷灰石 为主, 其次 为铁锰微结 核
	东南太平洋	深海黏土 (沸石黏土、 远洋黏土)	700~2485	1221	360	0~10 m	
	中-东太平洋		700~1732	910	468	0~64 m; 多层	
印度洋	中印度洋海盆		700~1987	1120	756	0~5 m	
	沃顿海盆		700~1113	815	34	103 m~122 m	

发育最好的成矿带之一<sup>[2,4]</sup>。

### 2.1.2 中-东太平洋稀土成矿带

深海多金属结核经济价值最高的 CC 区 (Clarion-Clipperton area) 就位于中-东太平洋稀土成矿带内<sup>[42]</sup>, 目前全球约 90% 的多金属结核专属勘探区均位于该成矿带内。我国科学家在 20 世纪 90 年代就已注意到 CC 区深海沉积物具有富含稀土的特征, 并进行了比较系统的研究<sup>[43-46]</sup>。近年来我国科学家对该区深海沉积物地球化学特征进行了持续研究<sup>[18, 29-30]</sup>。总体而言, 中-东太平洋稀土成矿带内广泛发育深海富稀土沉积(见图 1), 其  $\Sigma\text{REY}$  中等, 但富稀土沉积厚度大, 是非常重要的富稀土成矿带<sup>[4]</sup>。

### 2.1.3 东南太平洋稀土成矿带

根据 DSDP 样品分析数据, KATO 等<sup>[1]</sup>(2011) 报道了东南太平洋存在深海富稀土沉积; 2018 年, 我国在东南太平洋首次发现了超过 150 万  $\text{km}^2$  的大面积富稀土沉积<sup>⑧</sup>。研究发现, 该区深海富稀土沉积发育广泛, 主要发育于 10 m 以浅层段; 其  $\Sigma\text{REY}$  较高, REY 富集过程受到周围热液活动的显著影响<sup>[1,28]</sup>(见表 1)。可见, 东南太平洋稀土成矿带也是全球富稀土沉积发育最好的地区之一<sup>[4]</sup>。

### 2.1.4 中印度洋海盆-沃顿海盆稀土成矿带

20 世纪 90 年代科学家发现, 中印度洋海盆和沃顿海盆发育  $\Sigma\text{REY}$  较高的深海红黏土<sup>[47-48]</sup>。2014 年, YASUKAWA 等<sup>[9]</sup>对沃顿海盆 DSDP 213 站位岩心研究发现, 该站沉积物中发育约 50 m 厚的富稀土沉积, 但埋深超过 100 m; 我国自 2015 年在中印度洋海盆发现了大面积富稀土沉积以来, 将富稀土沉积区的面积进一步扩展<sup>④</sup>。我国科学家对该成矿

带内沉积物地球化学特征研究发现, 该区富稀土沉积发育面积广泛, 主要赋存于 5 m 以浅层位,  $\Sigma\text{REY}$  与中-东太平洋稀土成矿带相当<sup>[13, 17, 20, 24, 49]</sup>(见表 1)。中印度洋海盆-沃顿海盆稀土成矿带也是非常重要的富稀土成矿带<sup>[4]</sup>。

## 2.2 深海富稀土沉积基本特征

通过对三大洋深海沉积物研究发现, REY 在沸石黏土和远洋黏土中最为富集, 富稀土沉积物大多表现为 Ce 负异常的轻稀土元素(LREE)亏损、M-HREY 富集的特征, 为典型受到海水来源影响的 REY 配分模式<sup>[16,28]</sup>。

深海富稀土沉积物的 M-HREY 和 HREY 占比均随  $\Sigma\text{REY}$  增加明显增大<sup>[4]</sup>。与陆地稀土矿床相比, 深海富稀土沉积物的 M-HREY 占比、HREY 占比虽略低于华南离子吸附型重稀土矿床, 与贵州磷块岩稀土矿床相当, 但远高于白云鄂博稀土矿床和华南离子吸附型轻稀土矿床; 并且其  $\Sigma\text{REY}$  较华南离子吸附型稀土矿床和贵州磷块岩稀土矿床明显偏高<sup>[4]</sup>。此外, 深海富稀土沉积还富集 Mn、Sc、Co、Ni、Cu 和 Zn 等金属元素, 且 Th、U 等放射性元素含量比陆地稀土矿床低 1~2 个数量级<sup>[1, 40, 50]</sup>。可见, 深海稀土经济价值和综合利用价值非常高, 是一种有潜力的深海矿产资源<sup>[4]</sup>。

深海富稀土沉积都发育于碳酸盐补偿深度 (CCD) 之下, 沉积物类型、沉积速率、物质组成、氧化-还原环境等都是影响深海 REY 富集的主要因素<sup>[4]</sup>。REY 在沸石黏土和远洋黏土中最为富集, 其次为硅质黏土和硅质软泥, 钙质黏土和钙质软泥的  $\Sigma\text{REY}$  较低, 即从钙质软泥→钙质黏土→硅质软泥→

硅质黏土→远洋黏土→沸石黏土, LREE、HREY 和 $\Sigma$ REY 逐渐增加, HREY 相对富集程度增加; Ce 负异常越来越明显, Eu 正异常逐渐减弱<sup>[4]</sup>。富稀土沉积发育于氧化环境中, 深海底流携带来的溶解氧对富稀土沉积的发育具有重要作用; 且沉积速率越低, 越有利于沉积物中 REY 富集<sup>[4]</sup>。

### 2.3 海水中稀土元素特征

海水中溶解态  $\Sigma$ REY 含量极低, 在皮摩尔量级 ( $10^{-12}$  mol/L, 即 pM)。其中, 大洋中-底层水中 LREE 浓度一般为数十 pM, HREY 为数 pM 至数十 pM。由于海水中 REY 主要以碳酸盐离子络合物的形式存在<sup>[51]</sup>, 且其络合强度随原子数增高而增强<sup>[52-53]</sup>, 导致海水中 LREE 相对亏损、M-HREY 相对富集(见图 2)。此外, Ce 作为一种变价稀土元素, 在具有氧化性的现代海水中极易由  $Ce^{3+}$  氧化为  $Ce^{4+}$  而沉淀, 造成海水中溶解态 Ce 明显亏损<sup>[54]</sup>。在应用后太古代澳大利亚页岩 (Post-Archaean Australian Shale, PAAS<sup>[55]</sup>) 标准化后的 REY 配分模式图中,

海水的 HREY 往往高于 LREE, 且存在显著 Ce 负异常<sup>[56-58]</sup>, 这种特征往往被深海沉积物所继承, 因此海水被认为是深海沉积物 REY 的重要来源。

由于表层海水中 REY 易被悬浮颗粒吸附, 而深层海水因悬浮颗粒的溶解或微生物降解将其携带的 REY 重新释放, 所以海水中 REY (Ce 除外) 一般表现出表层海水低、底层海水高的特征, 且太平洋深层水中  $\Sigma$ REY 明显高于大西洋深层水<sup>[54, 59-60]</sup>。海水中 REY 的垂向分布特征与营养盐相近, 尤其是中-底层水中 REY 与硅酸盐的分布具有较高的相关性<sup>[54, 56]</sup>, 且海水中 REY 分布明显受控于水团的运移<sup>[61-63]</sup>。

### 2.4 稀土元素来源

深海沉积物中 REY 的来源主要涉及两个问题: 一是沉积物中的 REY 来源(直接来源), 二是海水和孔隙水中 REY 的来源(间接来源)<sup>[2]</sup>。由于与生物磷灰石、海水的 REY 配分模式非常类似(见图 2), 因而一直认为深海沉积物中 REY 主要来源于海

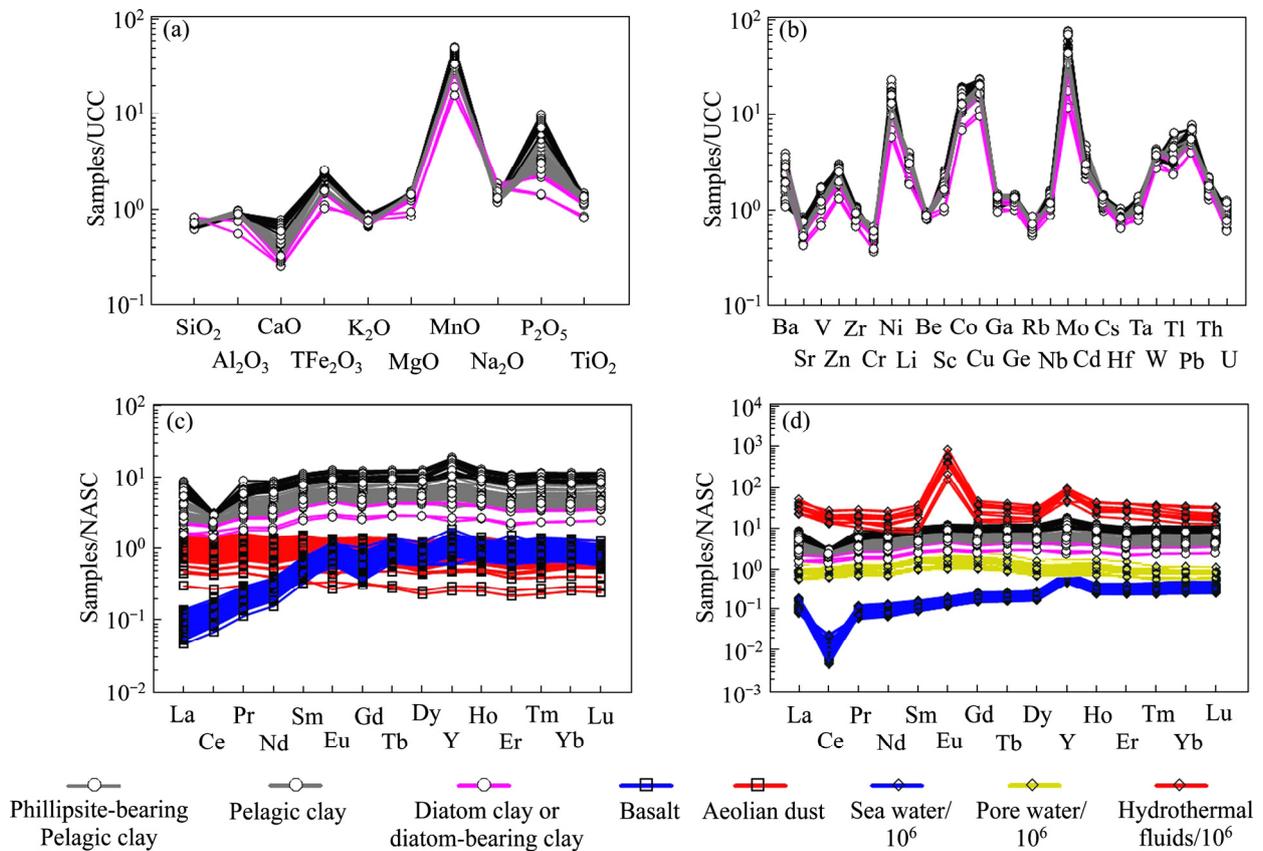


图 2 不同地质体中元素含量蛛网图(据文献[64])

Fig. 2 Spider-web diagrams of elements in different materials(modified from Ref. [64]): (a) UCC-normalized of main elements in different samples; (b) UCC-normalized of trace elements in different samples; (c), (d) NASC-normalized of REY in different samples.

水<sup>[14, 25-26, 28, 44, 49]</sup>。

但近年来的研究发现, 沉积物-海水界面附近孔隙水中的 REY 也可能是富稀土沉积物中 REY 的重要来源<sup>[36]</sup>。生物磷灰石作为深海沉积物中 REY 的主要赋存矿物, 也是 REY 全吸收型的矿物, 可用来示踪 REY 的来源<sup>[65]</sup>。在沉积时间较短或者钙质生物沉积环境中, 生物磷灰石的 REY 主要来自海水; 而对于沉积时间较长, 以及具有陆源碎屑沉积或者火山源沉积区域, 其 REY 则更多地具有后期孔隙水叠加信息, 反映了沉积物的物源信息<sup>[66-67]</sup>。可见, 海水和孔隙水是深海富稀土沉积中 REY 的主要来源。至于海水和孔隙水中 REY 的来源(间接来源)则比较复杂。从理论上讲, 进入海洋的物质都有可能为海水和孔隙水提供 REY, 包括火山蚀变物质、热液喷发物质乃至进入深海的陆源碎屑物质都是深海 REY 的“源”<sup>[2, 28, 45]</sup>。

目前国际上针对富稀土沉积的孔隙水研究极少。DENG 等<sup>[36]</sup>(2017年)对西太平洋沉积物与海水的 REY 特征研究发现, 富稀土沉积物的 REY 配分模式与底层水体、孔隙水相近。LIU 等<sup>[68]</sup>(2021年)对中印度洋海盆富稀土沉积区内沉积物研究发现, 孔隙水中溶解态 $\Sigma$ REY 浓度较高, 达到纳摩尔量级( $10^{-9}$  mol/L, 即 nM), 比海水中 $\Sigma$ REY 高 2~3 个数量级, 且相对富集中稀土(MREE), 其 REY 配分模式与海水差异明显; 此前 HALEY 等<sup>[69]</sup>(2004年)在近海沉积物的孔隙水中也发现过类似的 REY 配分模式。

## 2.5 稀土元素赋存状态

REY 的赋存状态是富稀土沉积研究中的一个关键问题, 涉及到深海稀土富集机制和开发利用。越来越多的学者认为, 生物成因磷灰石可能是富稀土沉积中 REY 的主要赋存矿物<sup>[13, 20-21, 25, 31, 70]</sup>。对于 REY 在生物磷灰石中的赋存状态有两种看法: 一种认为主要以吸附态赋存于矿物表面<sup>[27, 71]</sup>; 另一种则认为 REY 赋存在发生晶格替代的矿物内部, 即 REY 在向磷灰石等矿物中富集之前的早期成岩阶段, 就可能与铁锰氧化物等物质相结合, 在成岩过程中释放 REY 再次分配进入磷灰石等矿物晶格中<sup>[24-25]</sup>。KATO 等<sup>[1]</sup>(2011年)认为微结核(铁锰氧化物或氢氧化物)也是深海富稀土沉积物中 REY 的主要赋存矿物, 其主要通过经典的元素“清扫”机制

富集 REY。此外, 在深海沉积物中部分 REY 赋存于细粒的独居石、磷钇矿等稀土独立矿物中<sup>[70]</sup>。

## 2.6 深海稀土的富集机制和控制要素

深海稀土不同于所有已知的陆地稀土矿床, 是一种新资源类型。影响深海稀土富集的主要因素有: 构造环境、物质来源、水深、沉积速率、氧化-还原环境、沉积物类型等; 控制深海稀土大规模成矿的三大要素是: 大水深、低沉积速率和强底流发育(氧化环境)<sup>[2, 4]⑥</sup>。形成大规模富稀土沉积的有利条件是: 构造稳定的深海盆地, 水深在 CCD 之下; 碎屑物质输入量少, 沉积速率低; 南极底流(AABW)发育, 水体为氧化环境; 沉积物类型主要为沸石黏土和远洋黏土等<sup>[2, 4]</sup>。沉积物类型实际上受水深、物质来源和沉积速率控制; 低沉积速率为沉积物中磷灰石的富集和与海水的长时间接触提供了有利条件<sup>[4, 20]</sup>, 沉积速率越低, 越有利于沉积物中 REY 的富集; 富氧底流则为富稀土沉积的发育提供了氧化环境, 有利于重稀土微粒的封闭, 以及磷酸盐、铁锰质氧化物等物质对 REY 的吸附<sup>[37]</sup>, 使稀土成矿作用在海底大范围内发生。深海稀土中生物磷灰石中 $\Sigma$ REY 可达到  $10^4$   $\mu\text{g/g}$  以上, 磷酸盐组分可贡献全岩 $\Sigma$ REY 的 70%<sup>[25-26, 31, 35]</sup>, 是富稀土沉积中 REY 可能的主要赋存矿物。

# 3 深海稀土勘查和开发利用技术研究

## 3.1 深海稀土勘查技术

目前深海稀土资源勘查广泛采用的是沉积物岩心取样与浅地层剖面探测等地球物理相结合的方法, 即根据获取的柱状沉积物岩心样品中的稀土元素含量、矿物组分、物性参数等, 结合浅地层剖面等资料, 综合研究判断深海稀土发育区域与富集层位, 并初步估算资源潜力。

### 3.1.1 沉积物岩心取样

深海沉积物岩心取样主要采用重力取样器(以及重力活塞取样器)和钻探取样(钻探船、深海钻机)等设备。目前在深海稀土资源勘查中主要应用重力取样器和重力活塞取样器调查取样, 并收集深海钻探(DSDP)和大洋钻探(ODP)钻取的岩心样品; 调查间距一般按照 100 km、50 km、25 km 以及更小的间距进行加密<sup>[10]</sup>。

### 1) 重力取样器和重力活塞取样器

国外比较著名的超长型重力活塞取样器包括美国 Woods Hole Oceanographic Institution(WHOI)研制的 Giant Piston Corer、Jumbo Piston Corer(JPC)和 Long Coring, 法国 Institute Polaire Francais Paul-Emile Victor(IPEV)研究所的 Calypso Corer 等。其中 Calypso Corer 于 2002 年在墨西哥湾北部获取了长度为 64.5 m 的岩心<sup>[72-73]</sup>, 2019 年 3 月在印度洋克洛泽群岛北部创造了沉积物岩心长度 69.73 m 的新纪录; 2007 年 Long Coring 取样器在 Bermuda Rise 海域获取了 46 m 的沉积物岩心; 2021 年 5 月, 日本利用 40 m 重力活塞在西太平洋 8023 m 水深处获取了 37 m 沉积物岩心。

目前国内科考船上配备的重力活塞取样器长度一般不超过 30 m, 其中“向阳红 01”“科学号”和“东方红 3”等船配备取样器长度为 30 m, “海洋六号”船配备取样器长度为 24.5 m, “雪龙 2”船配备取样器长度为 22 m。1997 年原国家海洋局第一海洋研究所利用“向阳红 09”船重力活塞取样器(取样器长 20 m)在冲绳海槽北部(水深 703 m)取得了 17.11 m 沉积物岩心<sup>[74]</sup>, 广州海洋地质调查局“海洋六号”船 2017 年在太平洋深海盆地取得 14.45 m 沉积物岩心<sup>[75]</sup>, 中国海洋大学“东方红 3”船 2019 年在东沙群岛附近海域(水深 2500 m)取得 23.6 m 沉积物岩心<sup>[76]</sup>, “雪龙 2”船 2020 年在北极海域(水深 1870 m)取得 18.65 m 沉积物岩心。

深海稀土多发育于海底表层至以下十余米<sup>[4]</sup>, 最深可达表层以下百余米<sup>[9, 77]</sup>。目前在深海稀土资源勘查中, 利用重力取样器和重力活塞取样器获取岩心长度一般为数米至十余米, 岩心长度多未穿透富集层底部边界。

### 2) 深海钻机

在深海钻机研制领域, 美国等发达国家于 20 世纪末就开始了相关研究。1996 年美国(威廉姆逊公司)为日本(日本金属矿业事业团, MMAJ)设计制造的世界首台海底中-深孔岩心取样钻机 BMS 的钻深能力为 20 m(作业水深为 500~6000 m), 2003 年美国威廉姆逊公司研制的首台深孔岩心钻机 PROD 的钻深能力为 125 m(最大作业水深为 2000 m), 2005 年英国地质调查局(BGS)研制的中-深孔岩心钻机 Rock Drill 2 的钻深能力为 15 m(最大作业水深为 3100 m); 2005 年德国不来梅大学研制

的深孔岩心钻机 MeBo 的钻深能力为 50 m(最大作业水深 2000 m)。2006 年, 美国(SEAFLOOR GEOSERVICES 公司)还研制出可搭载在 ROV 等近底作业平台上的 ROV Drill 钻机系列, 其中基本型的钻深能力为 18 m(工作水深为 3000 m), M50 型的钻深能力为 55 m(工作水深为 2200 m), M80 型的钻深能力为 80 m(可扩展到 160 m, 其工作水深与配套带缆遥控水下机器人 ROV 相同)。

2010 年长沙矿山研究院研制了工作水深为 1000~4000 m、钻深能力为 20 m 的海底中-深孔岩心钻机, 2012 年钻深能力扩展到 60 m。2015 年湖南科技大学研制出适用水深 3500 m、钻深能力为 60 m 的国内首台海底多用途深孔钻机“海牛号”, 2017 年将其钻深能力扩展至 90 m。2021 年 4 月, “海牛 II 号”在南海超过成功下钻 231 m(水深 2060 m), 刷新了世界深海海底钻机钻探深度新纪录。

目前, 这些深海钻机主要用于发育水深相对较浅的近海或半深海的石油天然气、多金属硫化物等资源的勘查与研究, 尚未有关于深海钻机在深海稀土资源勘查中取样应用的报道。日本和我国在深海稀土研究中, 都收集了 DSDP 和 ODP 计划钻取的沉积物岩心样品和相关数据。

#### 3.1.2 浅地层剖面探测技术

在深海稀土资源地球物理勘查中, 主要是利用浅地层剖面探测仪等设备获取调查区域内的浅地层剖面资料, 结合沉积物岩心中富集层段的声学特征进行对比, 以探索解决 REY 富集层位的连续性及其三维分布问题。

REY 主要富集于细颗粒的深海沉积物中, 由于其具有黏性大、粒度细、纹层间物性差异小等特点, 目前还未找到直接有效的识别方法。NAKAMURA 等<sup>[78]</sup>(2016)利用在南鸟岛周边海盆获取的 20 m 深度内的浅地层剖面及多波束地形资料, 根据沉积层与下伏地层的平行关系和反射强度, 将沉积物初步划分为非穿透型(O 型)、透明型(T 型)和分层型(L 型)等三种。结合岩心地质特征对比研究发现, O 型具有非穿透和高反射性特点, 无明显沉积结构, 一般为没有沉积层覆盖的基岩露头; L 型分层序列形成多个反射面, 通常覆盖于 T 型之上, 多为非富集的半深海沉积物; T 型具有声学穿透性, 受声学基底反射界面影响, 上边界可分为不规则和平滑两种类

型。初步判断南鸟礁周边海盆中富稀土层主要发育于未被L型覆盖的T型地层内；但精细识别还有待进一步研究，且仍难以有效识别出具体富集层位。

### 3.1.3 沉积物元素原位快速探测技术

沉积物原位参数测量作为一种新型探测技术，近年来开展了相关研究与近海试验<sup>[79-82]</sup>。随着深海拖体、ROV、AUV、HOV等平台的广泛应用，深海沉积物的相关探测技术开始得到重视，但目前整体还处于初步探索阶段，相关探测技术主要为某个特定参数的近底或原位点状测试。

针对深海稀土资源的高效探测，克罗地亚、挪威、美国等国科学家联合，利用放射性同位素 $\text{Lu}^{176}$ 和 $\text{Gd}$ 热中子捕获等放射性核素，探索了基于海底作业平台的表层沉积物中REY快速探测技术的理论与方法，即利用放射性核素法，原位测量沉积物REY中某种元素的含量；根据建立的单个元素含量与 $\sum\text{REY}$ 的线性关系，初步估算表层沉积物的 $\sum\text{REY}$ <sup>[3, 83]</sup>。其中， $\text{Lu}^{176}$ 同位素法主要利用测量放置在屏蔽容器内氧化镧的 $\text{Lu}^{176}$ 同位素发生 $\beta$ 衰变的辐射量，探索性测量沉积物中 $\text{Lu}$ 含量，再推导估算沉积物中 $\sum\text{REY}$ 。实验室模拟结果显示，该方法虽然简单，但由于深海沉积物中低浓度的U、Th等元素会降低其检测限，并延长其检测时间<sup>[3]</sup>。 $\text{Gd}$ 热中子捕获法主要是采用搭载在ROV运载平台上的中子传感器，通过发射14 MeV脉冲的中子，利用远程操控平台捕获并测量沉积物中的 $\text{Gd}$ 含量，进而推导估算沉积物中 $\sum\text{REY}$ <sup>[3]</sup>。该方法探索了在浅海开展沉积物中 $\sum\text{REY}$ 原位快速测量的理论可行性，但其对深海稀土资源的高效探索的可行性与应用需进一步研究。

## 3.2 深海稀土开发利用技术研究

深海稀土是继多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物之后的第四种深海矿产资源<sup>[2,4]</sup>。鉴于深海稀土与多金属结核产出环境相近，二者往往伴生，多金属结核开采技术大多适用于深海稀土，因此一般认为，深海稀土可能会与多金属结核一起，成为首批开发的深海矿产资源之一。在深海稀土开发利用技术方面，日本、英国、美国等国率先进行了探索研究。2012年，英国南安普顿大学开展了深海稀土采矿的概念设计<sup>[11]</sup>。在该设计中，深海富稀土沉积物的采集装置采用了绞吸式履带挖掘采矿车，模拟

并初步估算了掘进速率、绞吸头转速、绞吸刀片尺寸、设备功率等。在海底进行REY的冶炼，并将冶炼产品装在反应罐中，利用绞车系统提升至海面平台。在海底的冶炼流程中，首先将采集的富稀土沉积物转移至浸出槽内，加入酸溶液进行混合与处理；在物理分离后将渗滤液导入沉淀容器内，采用沉淀法、溶剂萃取法、离子交换法和滤膜法等方式对其中的REY进行回收；采用电析法对多余的废酸液进行回收利用(见图3)。常温下深海沉积物REY的酸浸出回收率在80%以上<sup>[10]</sup>。

2013~2015年，日本以南鸟礁周边海盆中富稀土沉积为对象，进行了深海稀土开发利用研究，提出了与多金属结核采矿模式相类似的深海稀土资源开发理念，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>①</sup>(见图4)。该方案主要包括以下6个部分：①海底采泥与选矿：针对富稀土沉积物黏度大等特性，对比疏浚型、旋转型、桨型等3种钻取刀头的性能模拟试验，初步确定了旋转型和桨型的钻取方式，刀头的理想转速为78 r/min；利用水力旋流分离器在海底对粗颗粒的生物成因磷灰石进行选择与回收。②海底扬泥：对气举技术改良后，初步提出了多次加压、连续扬泥的气举方式扬矿方案。③泥浆现场脱水：在采矿母船上对泥浆进行离心脱水，并将残液回流返至海底。④泥样海上运输：将脱水后的泥块从采矿母船转运至陆地上进行冶炼。⑤选冶与分离：用盐酸进行淋洗、用碳酸钠进行沉淀，之后按照现有分离工艺对REY进行分离、回收。⑥尾矿综合利用：对尾矿进行酸中和、脱水、固化等处理后，制作成建筑材料加以综合利用<sup>[10,50]</sup>。此外，日本对该开采系统提进行了成本估算，计划近年进行深海稀土资源试采<sup>①</sup>。

我国也开展了深海稀土的选冶流程、技术方法等探索，认为盐酸作为较理想的浸出剂，能够浸出富稀土沉积物中90%以上的Y和40%~50%的Ce，并从深海沉积物中提取出了稀土氧化物<sup>[4,70]</sup>。熊文良等<sup>[84]</sup>(2018年)提出了选冶条件温和、能耗低、效率高、环境友好的以浮选为主的稀酸浸出流程，主要包括沉积物脱泥预处理、研磨浮选与粗精矿分离、粗精矿浸出与渣液分离、浸渣浮选分离等。范艳青等<sup>[85]</sup>(2019年)从综合利用的角度，提出了利用98%的浓硫酸与沉积物混合稀释放热和化学反应放

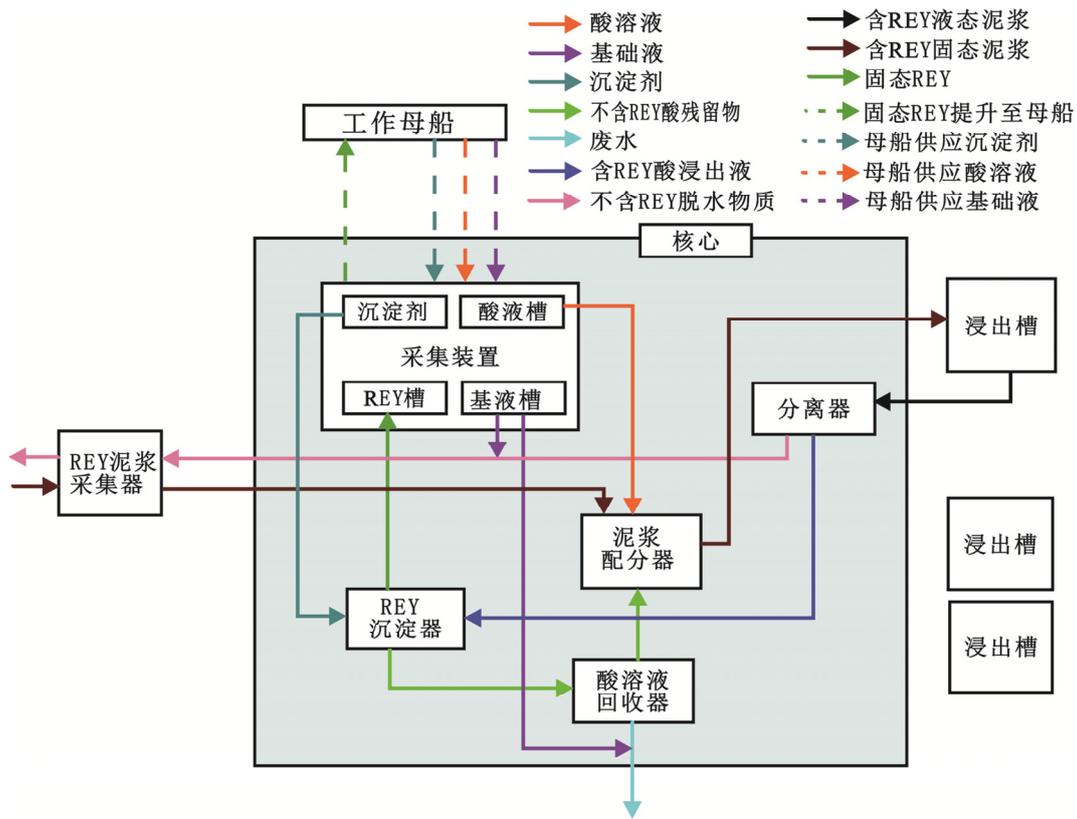


图 3 深海稀土采矿的概念设计(修改自参考文献[11])

Fig. 3 Concept for seabed rare earth mining(Modified from Ref. [11])

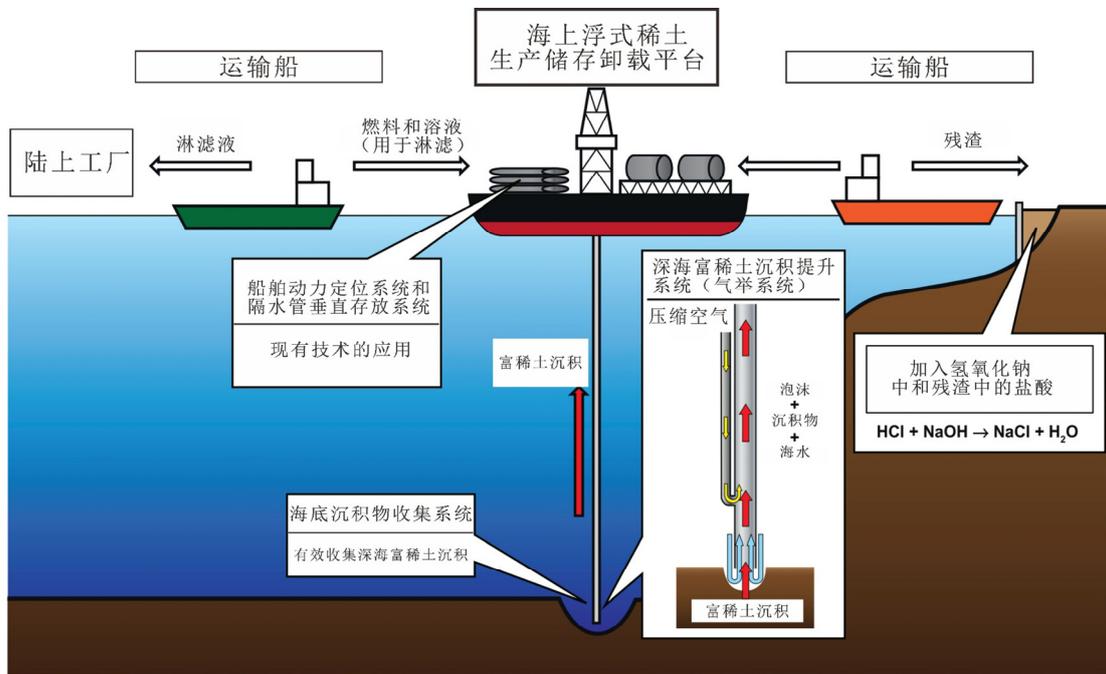


图 4 深海稀土开发利用模式(修改自参考文献[50])

Fig. 4 Model for exploitation and utilization of deep-sea rare earth resources(Modified from Ref. [50])

热, 实现低能耗、自熟化的池浸提取深海沉积物中 REY, 以及 Al、K 等金属的综合利用方法。

此外, 我国科学家还开展了富稀土沉积相关的矿物或同类结构物质在催化剂、吸附剂、充填剂等

高附加值新材料的功能化应用或潜在应用的机理研究<sup>[86-89]</sup>。以深海沉积物为对象,通过制浆、分离、酸洗等工艺流程,获取了高纯度黏土样品(非黏土矿物含量 $\leq 1\%$ ),制备合成了方沸石晶体、八面沸石晶体和钙霞石晶体等矿物,对比研究深海黏土系列分子筛的孔径范围、最大孔径、结晶程度等,认为合成八面沸石因孔径分布范围窄、孔容大,作为分子筛的应用效果最好;利用远洋黏土中的无定形物质结晶形成的大量羟基矿物,研制开发了可作为光催化剂、污染物降剂和水消毒剂的  $\text{MoS}_2$  与黏土的复合材料<sup>[89]</sup>;利用黏土中的—OH 基团与表面改性剂 3-氨基丙基三甲氧基硅烷(APS),改进了抑制热带高膨胀性黑棉土的膨胀性<sup>[86]</sup>。

## 4 未来研究展望

深海沉积物中的 REY 经过稀酸淋滤就可实现分离、提取<sup>[1]</sup>,深海稀土常与多金属结核伴生,二者的开采环境相似、开采技术相近,因此深海稀土虽然发现较晚,但可能会与多金属结核一起,成为首批开发的深海矿产资源之一。

深海稀土作为一种与陆地稀土矿床成因完全不同的新型稀土资源,目前对其成矿规律的认知程度很低、成矿理论研究明显不足,资源勘查评价技术方法与开发利用技术研究也还处于起步阶段。未来在加大深海稀土勘查力度的同时,应加强深海稀土分布规律和成矿作用,以及资源勘查评价、绿色开发、综合利用等技术领域的研究。

### 1) 加强深海稀土分布规律研究

作为近 10 年来在深海新疆域内发现的一种新型矿产资源,虽然各国科学家已经对深海稀土的地球化学特征、物质来源、相关矿物、富集控制要素等进行了广泛的探讨,但是对深海稀土的成矿规律和超常富集成矿机制认识程度仍然较低,成矿理论研究明显不足。

深海稀土分布广泛,但又表现出极强的非均质性。从目前已发现富集区的分布海区来看,主要发育于太平洋和印度洋<sup>[1, 4, 14, 28]</sup>,但是在同一大洋的不同海域、同一海域内不同位置,乃至同一站位的不同层位,沉积物中 REY 的富集程度差异非常大,符合开发条件的“高品位、分布连续、少杂质”的优质富集区并不常见。控制深海稀土在不同时空尺

度超常富集的因素到底是什么?深海稀土的主要赋存状态、赋存矿物以及微观赋存相态是什么?深海稀土在生物磷灰石等矿物中的富集过程是怎样的?这一系列的问题,目前尚不清楚。需要加强深海稀土基础调查研究,利用大数据方法与高新技术以及海陆对比等,阐明深海稀土的成矿规律和分布规律,揭示深海稀土超常富集的成矿背景和控矿要素,建立深海稀土富集成矿理论,实现海底成矿理论创新和指导找矿突破。

### 2) 强化深海稀土资源勘查评价技术研究

目前深海稀土资源勘查广泛使用的是沉积物岩心取样与浅地层探测相结合的方法。其中常规取样设备获取岩心长度一般为数米至十余米,获取的岩心多未穿透富集底部边界,而深海稀土富集层最深可达表层以下百余米<sup>[9, 77]</sup>;浅地层剖面探测仪等地球物理方法对于富稀土沉积层的三维分布边界的识别效果也不理想<sup>[78]</sup>。为经济、高效探寻到符合开发条件的深海稀土优质富集区并进行评价,需要研发适合深海稀土发育环境的百米尺度取心能力的深海沉积物钻探技术和设备,能够高效解析深海稀土富集层位顶-底界面的浅地层精细探测与精准解译技术,能够快速测量深海沉积物中 REY 的近底测量技术和仪器,形成集“长岩心取样+高精度浅地层探测+海底沉积物元素原位探测”于一体的勘查技术体系。

近 10 年来虽然对深海稀土资源的评价标准、资源量估算方法等进行了初步探讨,并初步估算了深海沉积物中 REY 资源量<sup>[1, 4, 10, 14]</sup>,但由于深海稀土调查研究程度较低,取样间距大、取样站位少,加之对富稀土沉积的三维分布缺乏有效、全面的掌握,对其评价还非常粗浅,需要进一步研究资源评价方法和资源量估算方法,确定有效评价参数。

### 3) 重视深海稀土开发利用技术和设备研究

作为一种新型深海矿产资源,深海稀土的开发利用技术研究目前处于起步阶段。日本等国已开展了探索性研究,初步提出了深海稀土开发的采矿概念设计、开发技术理念;我国也在选冶流程、加工处理方法、新材料等方面进行了初步探索。随着深海稀土资源勘查的深入以及试采脚步的加快<sup>①</sup>,应重视深海稀土资源绿色开发、综合利用技术研发,尤其是开发利用中核心技术和关键设备的研发,包括深海稀土的海底采矿与集矿、选矿与分离、扬矿

与传输、冶炼与分离,以及废渣废液的无害化处理、回收与再利用,甚至是高附加值的功能性新材料、新工艺、新方法等综合利用技术,为实现深海稀土的绿色、高效、综合开发利用提供技术储备。

### 致谢:

本文部分资料数据来源于中国大洋矿产资源研究项目的基础资料和成果报告,谨向项目实施过程中一直给予支持和帮助的领导、同事们表示诚挚的谢意。

### 注释:

- ① 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. 海洋地质信息, 2016: 1-45.
- ② 第四十四届世界海洋矿产大会(Underwater Mining Conference, UMC), 2015.
- ③ 石学法,黄牧,张霄宇,等. 大洋调查 DY30 航次报告, 2014.
- ④ 石学法,杨刚,黄牧,等. 中国大洋 39 航次第五航段调查现场报告, 2016.
- ⑤ 石学法,杨刚,于淼,等. 中国大洋 62 航次调查现场报告, 2020.
- ⑥ 石学法,李传顺,黄牧,等. 国际海域资源调查与开发“十二五”课题“世界大洋海底稀土资源潜力评估报告”, 2015.
- ⑦ 石学法,任向文,黄牧,等. 中国大洋 46 航次第四航段调查现场报告, 2018.
- ⑧ 石学法,任向文,黄牧,等. 中国大洋 46 航次第五航段调查现场报告, 2018.

### REFERENCES

- [1] 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.
- [2] 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.  
SHI Xue-fa, FU Ya-zhou, LI Bing, et al. Research on deep-sea minerals in China: Progress and discovery (2011-2020)[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2021, 40(22): 1-14.
- [3] OBHOĐAŠ J, SUDAC D, MERIC I, et al. In-situ measurements of rare earth elements in deep sea sediments using nuclear methods[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 1-7.
- [4] 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(2/3): 195-208.  
SHI Xue-fa, BI Dong-jie, HUANG Mu, et al. Distribution and metallogenesis of deep-sea rare earth elements[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(2/3): 195-208.
- [5] 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.
- [6] 李振,胡家祯. 世界稀土资源概况及开发利用趋势[J]. *现代矿业*, 2017(2): 97-105.  
LI Zhen, HU Jia-zhen. World rare earth resources survey and development utilization trend[J]. *Modern Mining*, 2017(2): 97-105.
- [7] 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): 3378-3793.  
FAN Hong-rui, NIU He-cai, LI Xiao-chun, et al. The types, ore genesis and resource perspective of endogenic REE deposits in China[J]. *Science China Press*, 2020, 65(33): 3378-3793.
- [8] KON Y, HOSHINO M, SANEMATSU K, et al. Geochemical characteristics of apatite in Heavy REE-rich deep-sea mud from Minami-Torishima Area[J]. *Southeastern Japan Resource Geology*, 2014, 64: 47-57.
- [9] YASUKAWA K, LIU Han-jie, FUJINAGA K, et al. Geochemistry and mineralogy of REE-rich mud in the Eastern Indian Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 93: 25-36.
- [10] 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.
- [11] BASHIR M, KIM S H, KIOSIDOU E, et al. A concept for seabed rare earth mining in the Eastern South Pacific[J]. *The LRET Colloquium*, 2012, 1: 1-138.
- [12] MENENDEZ A, JAMES R H, STEPHEN R, et al. Controls on the distribution of rare earth elements in deep-sea sediments in the North Atlantic Ocean[J]. *Ore Geology*

- Reviews, 2017, 87: 100–113.
- [13] ZHANG Xiao-yu, TAO Chun-hui, SHI Xue-fa, et al. Geochemical characteristics of REY-rich pelagic sediments from the GC02 in Central Indian Ocean Basin[J]. *Journal of Rare Earths*, 2017, 10(35): 1047–1058.
- [14] 黄 牧. 太平洋深海沉积物稀土元素地球化学特征及资源潜力初步研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2013.
- HUANG Mu. Geochemical characteristics and resource potential of rare earth elements in deep-sea sediments of the Pacific Ocean[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography State Oceanic Administration, 2013.
- [15] 张霄宇, 邓 涵, 张富元, 等. 西太平洋海山区深海软泥中稀土元素富集的地球化学特征[J]. *中国稀土学报*, 2013, 31(6): 729–737.
- ZHANG Xiao-yu, DENG Han, ZHANG Fu-yuan, et al. Enrichment and geochemical characteristics of rare earth elements in deep-sea mud from seamount area of Western Pacific[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2013, 31(6): 729–737.
- [16] 黄 牧, 刘季花, 石学法, 等. 东太平洋CC区沉积物稀土元素特征及物源[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(2): 175–187.
- HUANG Mu, LIU Ji-hua, SHI Xue-fa, et al. Geochemical characteristics and material source of rare earth elements in sediments from CC area in the Eastern Pacific Ocean[J]. *Advance in Marine Science*, 2014, 32(2): 175–187.
- [17] 黄大松, 张霄宇. 中印度洋洋盆深海沉积泥的稀土元素载体和来源[J]. *矿物学报*, 2015, 35(S1): 761.
- HUANG Da-song, ZHANG Xiao-yu. Carriers and sources of rare earth elements of deep sea sediments from the Central Indian Ocean Basin[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, 35(S1): 761.
- [18] 任江波, 姚会强, 朱克超, 等. 稀土元素及钇在东太平洋CC区深海泥中的富集特征与机制[J]. *地学前缘*, 2015, 22(4): 200–211.
- REN Jiang-bo, YAO Hui-qiang, ZHU Ke-chao, et al. Enrichment mechanism of rare earth elements and yttrium in deep-sea mud of Claiion-Clipperton Region[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(4): 200–211.
- [19] 萨日娜, 孙晓明, 潘晴晴, 等. 中太平洋深海沉积物的粒度特征及其对稀土元素含量的控制[J]. *矿物学报*, 2015, 35(S1): 779–780.
- SA Ri-na, SUN Xiao-ming, PAN Qing-qing, et al. Grain size characteristics and their control of rare earth elements content of deep sea sediments in the Central Pacific[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, 35(S1): 779–780.
- [20] 于 淼, 石学法, 李传顺, 等. 中印度洋海盆富稀土沉积物物质来源[C]//中国矿物岩石地球化学学会第17届学术年会. 杭州: 中国矿物岩石地球化学学会, 2017.
- YU Miao, SHI Xue-fa, LI Chuan-shun, et al. Sources of REE rich sediments in the Central Indian Ocean Basin[C]// The 17th Annual Meeting of Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Hangzhou: Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017.
- [21] SA Ri-na, SUN Xiao-ming, HE Gao-wen, 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.
- [22] 杨宝菊, 刘季花, 李传顺, 等. 南大西洋中脊含金属沉积物稀土元素特征[C]//第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集(南京). 南京: 矿物学报, 2019: 387.
- YANG Bao-ju, LIU Ji-hua, LI Chuan-shun, et al. Characteristics of rare earth elements in metal bearing sediments from the Mid-South Atlantic Ridge[C]// Abstracts of the 9th National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods (Nanjing). Nanjing: *Acta Mineralogica Sinica*, 2019: 387.
- [23] 张霄宇, 石学法, 黄 牧, 等. 深海富稀土沉积研究的若干问题[J]. *中国稀土学报*, 2019, 37(5): 517–529.
- ZHANG Xiao-yu, SHI Xue-fa, HUANG Mu, et al. Some problems in research of deep sea rare earth rich deposit[J]. *Journal of the Society of Rare Earths*, 2019, 37(5): 517–529.
- [24] 刘 明, 孙晓霞, 石学法, 等. 印度洋钙质软泥和硅质软泥稀土元素组成和富集机制[J]. *海洋学报*, 2019, 41(1): 58–71.
- LIU Ming, SUN Xiao-xia, SHI Xue-fa, et al. Composition and enrichment of rare earth elements in calcareous and siliceous ooze in the Indian Ocean[J]. *Acta Oceanographica*, 2019, 41(1): 58–71.
- [25] LIAO Jian-lin, SUN Xiao-ming, LI Deng-feng, et al. New insights into nanostructure and geochemistry of bioapatite in REE-rich deep-sea sediments: LA-ICP-MS, TEM, and Z-contrast imaging studies[J]. *Chemical Geology*, 2019, 512: 58–68.
- [26] LIAO Jian-lin, SUN Xiao-ming, WU Zhong-wei, et al. Fe-Mn (oxyhydr) oxides as an indicator of REY enrichment

- in deep-sea sediments from the Central North Pacific[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 112: 103044.
- [27] 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]//第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文集摘要集(南京). 南京: 矿物学报, 2019.
- ZHOU Tian-cheng, SHI Xue-fa. Research progress of the REY-rich deep-sea sediments in the Yupanqui Basin[C]// Abstracts of the 9th National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods (Nanjing). Nanjing: *Acta Mineralogica Sinica*, 2019.
- [28] ZHOU Tian-cheng, SHI Xue-fa, HUANG Mu, 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): 1141–1162.
- [29] 朱克超, 任江波, 王海峰, 等. 太平洋中部富 REY 深海粘土的地球化学特征及 REY 富集机制[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2015, 40(6): 1052–1060.
- ZHU Ke-chao, REN Jiang-bo, WANG Hai-feng, et al. Enrichment mechanism of REY and geochemical characteristics of REY-rich pelagic clay from the Central Pacific[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 2015, 40(6): 1052–1060.
- [30] 朱克超, 任江波, 王海峰. 太平洋中部富 REY 深海沉积物的地球化学特征及化学分类[J]. *地球学报*, 2016, 37(3): 287–293.
- ZHU Ke-chao, REN Jiang-bo, WANG Hai-feng. Geochemical characteristics and chemical classification of REY-rich deep sea sediments in the Central Pacific Ocean[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(3): 287–293.
- [31] 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.
- WANG Fen-lian, HE Gao-wen, SUN Xiao-ming, et al. The host of REE+Y elements in deep-sea sediments from the Pacific Ocean[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(7): 2057–2068.
- [32] 王汾连, 何高文, 王海峰, 等. 马里亚纳海沟柱状沉积物稀土地球化学特征及其指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 67–75.
- WANG Fen-lian, HE Gao-wen, WANG Hai-feng, et al. Geochemistry of rare earth elements in a core from Mariana Trench and its significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 67–75.
- [33] 王汾连, 何高文, 姚会强, 等. 深海沉积物中的稀土矿产资源研究进展[J]. *中国地质*, 2017, 44(3): 449–459.
- WANG Fen-lian, HE Gao-wen, YAO Hui-qiang, et al. The progress in the study of REE-rich deep-sea sediments[J]. *Geology in China*, 2017, 44(3): 449–459.
- [34] 王汾连, 何高文, 赖佩欣. 太平洋富稀土深海沉积物及粘土组分( $<2\ \mu\text{m}$ )的 Nd 同位素特征及物源意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(2): 292–302.
- WANG Fen-lian, HE Gao-wen, LAI Pei-xin. Nd isotopes of the pelagic sediments and clay fractions ( $<2\ \mu\text{m}$ ) from the Pacific Ocean and their provenance significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2019, 43(2): 292–302.
- [35] 任江波, 何高文, 朱克超, 等. 富稀土磷酸盐及其在深海成矿作用中的贡献[J]. *地质学报*, 2017, 91(6): 1312–1325.
- REN Jiang-bo, HE Gao-wen, ZHU Ke-chao, et al. SUN Wei-dong. REY-rich phosphate and its effects on the deep-sea mud mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(6): 1312–1325.
- [36] DENG Yi-nan, REN Jiang-bo, GUO Qing-jun, et al. Rare earth element geochemistry characteristics of seawater and porewater from deep sea in Western Pacific[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 16539.
- [37] 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.
- DENG Yi-nan, REN Jiang-bo, GUO Qing-jun, et al. Geochemistry characteristics of REY-rich sediment from deep sea in Western Pacific, and their indicative significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(3): 733–747.
- [38] FUJINAGA K, YASUKAWA K, NAKAMURA K, et al. Geochemistry of REY-rich mud in the Japanese Exclusive Economic Zone around Minamitorishima Island[J]. *Geochemical Journal*, 2016, 50(6): 575–590.
- [39] IJIMA K, YASUKAWA K, FUJINAGA K, et al. Discovery of extremely REY-rich mud in the Western North Pacific Ocean[J]. *Geochemical Journal*, 2016, 50(6): 557–573.
- [40] YASUKAWA K, OHTA J, MIMURA K, et al. A new and prospective resource for scandium: Evidence from the geochemistry of deep-sea sediment in the western North Pacific Ocean[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 102:

- 260–267.
- [41] YASUKAWA K, MIYAZAKI T, VAGLAROV B S, et al. Statistic and isotopic characterization of deep-sea sediments in the Western North Pacific Ocean: Implications for genesis of the sediment extremely enriched in rare earth elements[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2019, 20(6): 3402–3430.
- [42] 许东禹. 大洋矿产地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.  
XU Dong-yu. *Ocean mineral geology*[M]. Beijing: China ocean press, 2013.
- [43] 沈华梯. 深海沉积物中的稀土元素[J]. *地球化学*, 1990, 19(4): 340–348.  
SHEN Hua-ti. Rare earth elements in deep sea sediments[J]. *Geochimica*, 1990, 19(4):340–348.
- [44] 刘季花. 太平洋东部深海沉积物稀土元素地球化学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1992, 12(2): 33–42.  
LIU Ji-hua. Geochemistry of REE of deep sea sediments in the East Pacific Ocean[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1992, 12(2): 33–42.
- [45] 刘季花. 东太平洋沉积物稀土元素和 Nd 同位素地球化学特征及其环境指示意义[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2004.  
LIU Ji-hua. The Geochemistry of REEs and Nd isotope in deep-sea sediments from the Eastern Pacific and their geological implications[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [46] 刘季花, 梁宏锋, 夏宁, 等. 东太平洋深海沉积物小于 2  $\mu\text{m}$  组分的稀土元素地球化学特征[J]. *地球化学*, 1998, 27(1): 49–58.  
LIU Ji-hua, LIANG Hong-feng, XIA Ning, et al. REE geochemistry of <2  $\mu\text{m}$  fractions in deep-sea sediments from East Pacific[J]. *Geochimica*, 1998, 27(1): 49–58.
- [47] PATTAN J N, RAO C M, HIGGS N C, et al. Distribution of major, trace and rare-earth elements in surface sediments of the Wharton Basin, Indian Ocean[J]. *Chemical Geology*, 1995, 121(1/4): 201–215.
- [48] PATTAN J N, PARTHIBAN G. Geochemistry of ferromanganese nodule-sediment pairs from Central Indian Ocean Basin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(2): 569–580.
- [49] 张霄宇, 黄牧, 石学法, 等. 中印度洋洋盆 GC11 岩心富稀土深海沉积的元素地球化学特征[J]. *海洋学报*, 2019, 41(12): 51–61.  
ZHANG Xiao-yu, HUANG Mu, SHI Xue-fa, et al. The geochemical characteristics of rare earth elements rich deep sea deposit of core GC11 in Central Indian Ocean Basin[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(12): 51–61.
- [50] NAKAMURA K, FUJINAGA K, YASUKAWA K, et al. Chapter 268-REY-rich mud: A deep-sea mineral resource for rare earths and Yttrium[C]/Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. [S. l.]: Elsevier Science & Technology, 2015.
- [51] CANTRELL K J, BYRNE R H. Rare earth element complexation by carbonate and oxalate ions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51: 597–605.
- [52] BYRNE R H, KIHYUN K. Rare earth element scavenging in seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 2645–2656.
- [53] ZHANG Jing, NOZAKI Y. Behavior of rare earth elements in seawater at the ocean margin: A study along the slopes of the Sagami and Nankai troughs near Japan[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62: 1307–1317.
- [54] BAAR H J W D, BREWER P G, BACON M P. Anomalies in rare earth distributions in seawater: Gd and Tb[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(9): 1961–1969.
- [55] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 312.
- [56] ELDERFIELD H, GREAVES M J. The rare earth elements in seawater[J]. *Nature*, 1982, 296: 214–219.
- [57] BERTRAM C J, ELDERFIELD H. The geochemical balance of the rare elements and Neodymium isotopes in the oceans[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 1957–1986.
- [58] ALIBO D S, NOZAKI Y. Rare earth elements in seawater: particle association, shale normalization, and Ce oxidation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63: 363–372.
- [59] ELDERFIELD H, CHARNOCK H, LOVELOCK J E, et al. The oceanic chemistry of the rare-earth elements[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1988, 325: 105–126.
- [60] GOLDSTEIN S L, HEMMING S R. Long-lived isotopic tracers in oceanography, paleoceanography, and ice-sheet dynamics[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, 6: 453–483.
- [61] STICHEL T, HARTMAN A E, DUGGAN B, et al. Separating biogeochemical cycling of Neodymium from

- water mass mixing in the Eastern North Atlantic[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 412: 245–260.
- [62] BASAK C, PAHNKE K, FRANK M, et al. Neodymium isotopic characterization of Ross Sea Bottom Water and its advection through the Southern South Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 419: 211–221.
- [63] HATHORNE E C, STICHEL T, BRUCK B, et al. Rare earth element distribution in the Atlantic sector of the Southern Ocean: The balance between particle scavenging and vertical supply[J]. *Marine Chemistry*, 2015, 177: 157–171.
- [64] YU Miao, SHI Xue-fa, HUANG Mu, et al. The transfer of rare earth elements during early diagenesis in REY-rich sediments: An example from the Central Indian Ocean Basin[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 126: 1–11.
- [65] BRIGHT C A, CRUSE A M, LYONS T W, et al. Seawater rare-earth element patterns preserved in apatite of Pennsylvanian conodonts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(6): 1609–1624.
- [66] ELDERFIELD H, PAGETT R. Rare earth elements in ichthyoliths: Variations with redox conditions and depositional environment[J]. *Science of the Total Environment*, 1986, 49: 175–197.
- [67] ZHAO Lai-shi, CHEN Zhong-qiang, ALGEOCB T J, et al. Rare-earth element patterns in conodontalbid crowns: Evidence for massive inputs of volcanic ash during the latest Permian biocrisis[J]. *Global Planetary Change*, 2013, 105(6): 135–151.
- [68] LIU Hong-na, LI Li, WANG Xiao-jing, et al. Determination of rare earth elements in pore water samples of marine sediments using an offline preconcentration method[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00793-0>
- [69] HALEY B A, KLINKHAMMER G P, MCMANUS J. Rare earth elements in pore waters of marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(6): 1265–1279.
- [70] 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.
- FANG Ming-shan, SHI Xue-fa, XIAO Yi-wu, et al. Research on distribution characteristics of rare earth mineral of deep sea sediments in the Pacific Ocean[J]. *Mining & Metallurgy*, 2016, 25(5): 81–84.
- [71] 刘志强, 吴宇坤, 朱克超, 等. 太平洋中部深海粘土中稀土的赋存状态及浸出研究[J]. *中国稀土学报*, 2015, 33(4): 506–512.
- LIU Zhi-qiang, WU Yu-kun, ZHU Ke-chao, et al. Occurrence state and leaching of rare earth in pelagic clay from Central Pacific[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2015, 33(4): 506–512.
- [72] WINTERS B, LORENSON T. Gas hydrate studied in the North Gulf Mexico[N]. 2019-03-29. <https://www.institut-polaire.fr/2019/03/29/record-length-of-sediment-core-still-be-aten/>
- [73] 张鑫, 栾振东, 阎军, 等. 深海沉积物超长取样系统研究进展[J]. *海洋地质前言*, 2012, 28(12): 40–45.
- ZHANG Xin, LUAN Zhen-dong, YAN Jun, et al. A review of development in deep-sea long coring system[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(12): 40–45.
- [74] 臧启运, 韩贻兵, 徐孝诗. 重力活塞取样器取样技术研究[J]. *海洋技术*, 1999, 18(2): 56–61.
- ZANG Qi-yun, HAN Yi-bing, XU Xiao-si. Study on the coring technique with gravity piston corer[J]. *Ocean Technology*, 1999, 18(2): 56–61.
- [75] 乔思伟. “海洋六号”深海地质调查 2017 第一航段任务圆满完成[N]. 2017-11-23. [https://www.cgs.gov.cn/gzdt/zsdw/20171123\\_445739.html](https://www.cgs.gov.cn/gzdt/zsdw/20171123_445739.html)
- QIAO Si-wei. The 2017I of the deep sea geological survey of “Hai Yang Liu Hao” was successfully completed[N]. 2017-11-23. [https://www.cgs.gov.cn/gzdt/zsdw/20171123\\_445739.html](https://www.cgs.gov.cn/gzdt/zsdw/20171123_445739.html)
- [76] 杨荣民. “东方红3”船成功获取23.6米柱状沉积物样品[N]. 2019-06-05. <https://news.oug.edu.cn/20190605/c91a93964/page.htm>
- YANG Rong-min. “Dong fang hong 3” successfully obtained 23.6 m columnar sediment samples[N]. 2019-06-05. <https://news.oug.edu.cn/20190605/c91a93964/page.htm>
- [77] MIMURAA K, NAKAMURA K, YASUKAWA K, et al. Significant impacts of pelagic clay on average chemical composition of subducting sediments: New insights from discovery of extremely rare-earth elements and yttrium-rich mud at Ocean Drilling Program Site 1149 in the Western North Pacific Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 186: 1–21.
- [78] NAKAMURA K, MACHIDA S, OKINA K, et al. Acoustic characterization of pelagic sediments using sub-bottom profiler data: Implications for the distribution of REY-rich

- mud in the Minamitorishima EEZ, Western Pacific[J]. *Geochemical Journal*, 2016, 50: 605–619.
- [79] 葛良全, 赖万昌, 周四春, 等. 海底 X 射线荧光探测技术及其应用研究[J]. *物探与化探*, 2002, 26(4): 283–286.
- GE Liang-quan, LAI Wan-chang, ZHOU Si-chun, et al. The application of in-situ X-ray fluorescence technique to determining element concentrations of seabed sediments[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2002, 26(4): 283–286.
- [80] 丁忠军, 刘保华, 刘忠臣, 等. 海洋沉积物多参数原位探测微探针研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, 23(12): 44–48.
- DING Zhong-jun, LIU Bao-hua, LIU Zhong-chen, et al. Research on multi-function in-situ detect miniature probe of sea sediment[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2009, 23(12): 44–48.
- [81] 阚光明, 刘保华, 韩国忠, 等. 原位测量技术在黄海沉积声学调查中的应用[J]. *海洋学报*, 2010, 32(3): 88–94.
- KAN Guang-ming, LIU Bao-hua, HAN Guo-zhong, et al. Application of in-situ measurement technology to the survey of seafloor sediment acoustic properties in the Huanghai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(3): 88–94.
- [82] 亓夫军, 叶旺全, 任立辉, 等. 深海拉曼光谱仪多平台作业模式的设计与海试[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(1): 147–152.
- QI Fu-jun, YE Wang-quan, REN Li-hui, et al. Multi-platform-based operating schemes of DOCARS and the performance in sea trials[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, 38(1): 147–152.
- [83] VALKOVIC V, SUDAC D, OBHOĐAŠ J, et al. The use of alpha particle tagged neutrons for the inspection of objects on the sea floor for the presence of explosives[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2013, 703(1): 133–137.
- [84] 熊文良, 邓杰, 陈达, 等. 一种从深海沉积物中提取稀土的方法. 中国, CN201711202665.0[P]. 2018–05–04.
- XIONG Wen-liang, DENG Jie, CHEN Da, et al. A method of extracting rare earth from deep sea sediments. China, CN201711202665.0[P]. 2018–05–04.
- [85] 范艳青, 蒋训雄, 张登高, 等. 一种硫酸自熟化池浸提取深海沉积物中稀土的方法. 中国, CN201710556314.3[P]. 2019–01–08.
- FAN Yan-qing, JIANG Xun-xiong, ZHANG Deng-gao, et al. A method of extracting rare earth from deep sea sediment by sulfuric acid self-curing tank leaching. China, CN201710556314.3[P]. 2019–01–08.
- [86] ZHANG Pei-ping, HUANG Jin-qiu, ZHANG Peng, et al. Swelling suppression of black cotton soil by means of liquid immersion and surface modification[J]. *Heliyon*, 2019, 5(12): 1–8.
- [87] ZHANG Pei-ping, WANG Zi-yan, ZHANG Yan, et al. Preparation of semi-hydrogenation catalysts by embedding Pd in layered double hydroxides nanocages via sacrificial template of ZIF-67[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2020, 597: 177540.
- [88] WANG Jian, WANG Cong-cong, WANG Hong-chao, et al. Synthesis of N-containing porous aromatic frameworks via Scholl reaction for reversible iodine capture[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2021, 310: 110596.
- [89] SUN Qi-wei, LIU Yu-hua, LIU Zhi-peng, et al. Symbiotic composite composed of MoS<sub>2</sub> and pelagic clay with enhanced disinfection efficiency[J]. *Royal Society of Chemistry*, 2021, 11: 9621–9627.

## Advances on study of exploration and development of deep-sea rare earth resources

HUANG Mu<sup>1,2</sup>, SHI Xue-fa<sup>1,2</sup>, BI Dong-jie<sup>1,2</sup>, YU Miao<sup>1,2</sup>, LI Li<sup>1,2</sup>, LI Jia<sup>1</sup>, ZHANG Pei-ping<sup>3</sup>,  
ZHANG Xiao-yu<sup>4</sup>, LIU Ji-hua<sup>1,2</sup>, YANG Gang<sup>1,2</sup>, ZHOU Tian-cheng<sup>1,2</sup>, ZHU Ai-mei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography,  
Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;

2. Laboratory for Marine Geology,

Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China;

3. School of Materials Sciences and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

4. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China.)

**Abstract:** Discovered in the past decade, rare earth elements and yttrium (REY) in the deep-sea sediments became a new type of marine mineral resource that enriched in the middle and heavy REY. Focusing on the Pacific Ocean, Japan and other countries have conducted deep-sea REY resource survey and research, as well as the development and utilization of the resource. China has successively found large areas of REY-rich sediments in the Indian Ocean and the Pacific Ocean, and preliminarily divided four REY metallogenic belts in the Open Ocean. At present, the deep-sea REY resource detection methods are mainly gravity/piston gravity coring combined with the sub-bottom profiling. However, most of the acquired cores cannot reach the bottom boundary of the REY-rich layers. It is also difficult to precisely determine the REY-rich layer by the sub-bottom profiling, which seriously compromised the exploration and assessment of deep-sea REY resource. In the future, it is necessary to strengthen the research and development of the deep-sea REY resource exploration technology and equipment, establishing the integrated exploration technology system of long-length coring, high precision sub-bottom profiling and *in situ* elemental analysis on sediment samples. Meanwhile, we should conduct more research on the governing rules of the REY spatial distributions, and enhance the exploitation and utilization technology for the deep-sea REY resource, in order to provide support for rapid and accurate search of “high grade, continuous distribution, less impurities” deep-sea REY-rich areas, and for the REY resource assessment.

**Key words:** deep-sea REY resource; regularities of distribution; resource survey; development and utilization; technologies research; research and development

---

**Foundation item:** Project(DY135-R2-1) supported by China Ocean Mineral Resources Research and Development Association; Project(91858209) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2021-06-03; **Accepted date:** 2021-08-24

**Corresponding author:** SHI Xue-fa; Tel: +86-532-88967491; E-mail: xfshi@fio.org.cn

(编辑 何学锋)