

· 综述与进展 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2025.4167

深海稀土富集机制与资源开发利用研究现状

李旭清¹, 张运迎¹, 邓义楠², 张岗岗²

(1. 中国科学院南海海洋研究所, 热带海洋环境与岛礁生态全国重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 广州海洋地质调查局, 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广东 广州 511458)

摘要: 稀土资源对现代工业发展至关重要, 但陆地稀土资源的过度开采已引发环境和可持续性等一系列问题。深海稀土资源的发现为全球稀土特别是昂贵的中重稀土供应提供了新机遇, 但其稀土元素来源、稀土元素赋存矿物、成矿机制等关键科学问题尚需深入探讨, 开发技术方面亦存在深海开采难度大、成本高、提纯冶炼技术不成熟、环境影响评估不足等问题。本文系统归纳了深海稀土资源的“源-运”过程、赋存状态、成矿机制以及当前面临的技术挑战和环境问题。同时, 文章强调加强基础研究、技术创新以及国际合作, 以促进深海稀土资源的高效、环保开发。同时, 建立全面的环境影响评价体系、优化市场预测模型, 并在国际法律框架下合理利用这些资源, 以保障国家资源安全, 推动全球可持续发展。

关键词: 深海稀土资源; 成矿机制; 持续开发; 资源安全; 绿色发展与生态文明

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)03-0697-13

Current status of research on the mechanism of deep-sea rare earth element enrichment and resource development and utilization

LI Xu-qing¹, ZHANG Yun-ying¹, DENG Yi-nan² and ZHANG Gang-gang²

(1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Key Laboratory of Deep Sea Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 511458, China)

Abstract: Deep-sea rare earth element and yttrium (REY) resources are crucial to the development of modern industry. However, the overexploitation of terrestrial REY resources has led to a series of environmental and sustainability issues. The discovery of deep-sea REY resources offers new opportunities for global REY supply, but key scientific questions such as the sources of REY, the minerals hosting these elements, and the mechanisms of ore formation still require in-depth investigation. On the technical front, challenges include the high difficulty and cost of deep-sea mining, immature purification and smelting technologies, and insufficient environmental impact assessments. This paper systematically summarizes the “source-transformation” processes, the state of existence, the ore-forming mechanisms, and the current technical challenges and environmental issues faced by deep-sea rare earth resources. Moreover, this article emphasizes the needs to strengthen fundamental research, technological innovation, and international cooperation to promote the efficient and environmentally friendly development of deep-sea REY resources. Additionally, it calls for the establishment of comprehensive environmental impact assessment

收稿日期: 2024-08-29; 接受日期: 2025-03-26; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 中国科学院南海海洋研究所自主部署项目(SCSIO2023QY06)

作者简介: 李旭清(2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向为深海矿产资源, E-mail: lixqing23@mails.ucas.ac.cn; 通讯作者: 张运迎(1987-), 男, 研究员, 从事圈层相互作用与化学循环研究, E-mail: zhangyunying@scsio.ac.cn。

systems, the optimization of market forecasting models, and the rational utilization of these resources within the framework of international law to ensure national resource security and promote global sustainable development.

Key words: deep-sea REY; mineralization mechanism; sustainable development; resource security; green development and ecological civilization

Fund support: Chinese Academy of Sciences South China Sea Institute of Oceanology Independent Deployment Project (SCSIO2023QY06)

稀土元素(rare earth element and yttrium, REY), 通常包括镧系元素以及钪和钇, 由于其独特的光、电、磁等物理化学性质, 在国民经济发展中扮演着重要的角色, 它们被广泛应用于新能源、通信、航空航天、国防军工等高新技术领域, 被誉为“现代工业维生素”(Balaram, 2019)。稀土元素的独特性使得它们在改造传统工业、发展高新产业和国防尖端技术中不可或缺, 成为当今世界各国竞相争夺的关键性战略资源。自从西方国家提出以稀土元素为代表的“关键矿产”概念以来, 全球重新掀起稀土找矿的热潮(毛景文等, 2022)。

中国作为全球最大的稀土资源国和生产国, 长期以来为全球提供了大量的稀土原材料。然而, 长期的产/储比失衡和粗放式利用引发了严峻的资源与环境安全问题。我国稀土资源开发利用中存在的问题主要包括: 可采储量增长缓慢、资源消耗过快、出口依存度高、环境破坏严重、科技创新不足以及价格偏低等(刘清华, 2023)。这些问题不仅威胁到稀土资源的可持续供应, 也对环境和生态造成了严重

影响。我国陆地稀土矿床以轻稀土为主, 而重稀土资源在现代工业中的需求更为急迫, 因此富重稀土矿床的寻找更为迫切(何宏平等, 2022)。

2011年, 日本科学家在太平洋地区发现了深海沉积物中的稀土富集现象(Kato *et al.*, 2011), 随后我国也开启了深海稀土资源的勘探工作, 先后在西太平洋、中-东太平洋、东南太平洋、印度洋(图1)发现了4个稀土富集区(石学法等, 2021)。经后太古代澳大利亚页岩(PAAS, Post-Archean Australian Shale)标准化后, 深海富稀土沉积物展现出重稀土元素(HREE)相比轻稀土元素(LREE)更为富集的特征。这与陆地碳酸岩型稀土矿床强烈富集轻稀土的情况形成鲜明对比(樊文泉等, 2023)。深海稀土的发现为全球稀土资源的供应开辟了新的途径, 其资源量远超陆地稀土储量, 具有重要的潜在应用价值。深海稀土资源的勘探和开发, 有望缓解全球稀土资源的供需矛盾, 对保障国家资源安全和经济发展具有重大意义。

作为重要的新型稀土资源, 深海富稀土沉积物

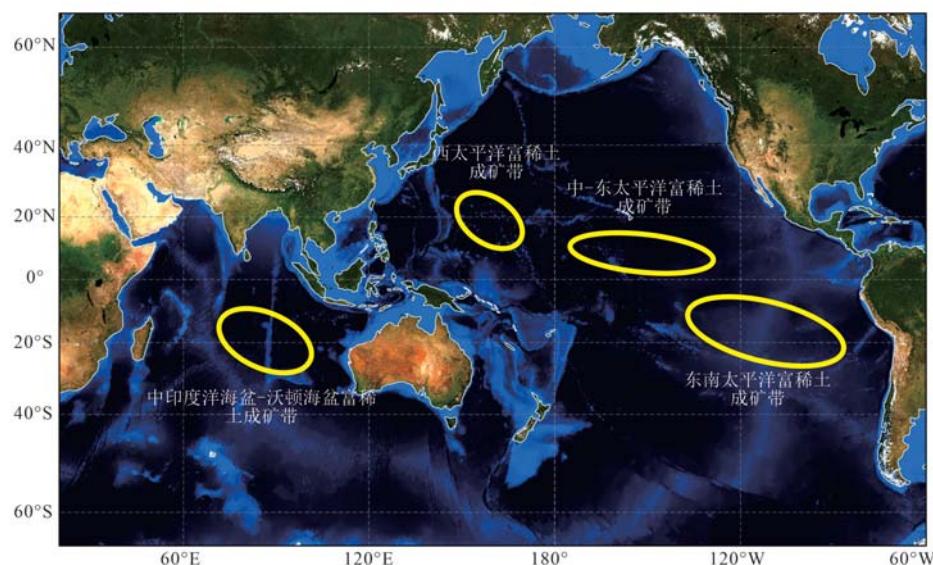


图1 深海稀土成矿带分布(据石学法等, 2021; 底图来源: 美国宇航局全球影像浏览服务)

Fig. 1 Distribution of deep-sea rare earth ore belts (Shi Xuefa *et al.*, 2021; base map source: NASA's global imagery browse services)

在全球海洋中广泛分布,具有巨大的开采潜力。深入研究深海稀土成矿区稀土元素的赋存状态、富集过程和成矿机制,对于理解深海稀土资源的形成和分布规律具有重要的科学意义,同时也可以为这种新型稀土资源的勘探和开发提供重要的理论依据。

1 成矿机制研究现状与问题

1.1 深海沉积物中稀土的“源-运”过程

近期研究显示,深海富稀土沉积物中的 REY 主要来源于上层海水和孔隙水,在 PAAS 标准化下,这些沉积物中稀土元素的主要特点是富含中重稀土元素,并表现出负的铈(Ce)异常和正的钇(Y)异常,表现出与海水相似的配分模式(Deng *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2021)。这表明海水是深海富稀土沉积物中稀土元素的主要来源,这一过程可能受到沉积物-水界面的生物地球化学过程的控制。在西太平洋深海沉积物的孔隙水中,稀土元素(REY)浓度相对较高,特别是在海水-沉积物界面(sea-water interface, SWI)处(Deng *et al.*, 2022a)。在垂向上,孔隙水中的稀土元素具有差异分布:在沉积物的上层和 SWI 附近,孔隙水中轻稀土和中稀土元素的浓度较高,而在更深层的沉积物中,其浓度显著下降。这一垂向分布特征主要受控于生物磷灰石的两阶段富集过程。第一阶段为浅层吸附:在沉积物表层富氧环境中,有机质分解释放稀土元素,低沉积速率延长生物磷灰石与上层海水和孔隙水的接触时间,使得生物磷灰石表面优先吸附轻、中稀土元素。第二阶段为深部迁移:随着埋藏加深,铁锰矿物发生还原溶解,释放重稀土元素至孔隙水中,这些元素通过离子置换进入生物磷灰石晶格内部。这一过程使生物磷灰石成为深海沉积物中重稀土元素的主要载体(Deng *et al.*, 2022a)。因此,上层海水和孔隙水与沉积物之间的相互作用对稀土元素的富集起着至关重要的作用,而区域性物质的输入,如海山物质迁移和热液活动物质的注入,可能导致局部海水和孔隙水中稀土元素浓度的变化,进而显著影响深海稀土元素的富集。

海山地形对深海稀土富集的具体影响机制涉及多个方面,包括物理、化学和生物地球化学过程。在海底山脉附近的沉积物中,孔隙水中溶解的 REY、锰(Mn)和铝(Al)浓度显著高于深海平原区域,这表明海山邻近的沉积物可能通过孔隙水向海洋环境释放

大量稀土元素。海山地形引起的沉积物底层水流加速,导致沉积物的再悬浮,而强烈的水流作用可能进一步促进了稀土元素从沉积物到孔隙水,最终到海水的迁移,这增强了这些元素在海洋中的扩散能力,并推动了沉积物中稀土元素的释放。海山区域的沉积物受到海山物质输入的显著影响,可能展现出与深海平原不同的稀土元素富集机制。这可能涉及碎屑物质的物理吸附作用和化学结合过程(Deng *et al.*, 2022b)。海山地形可能影响沉积物中铁锰氧化物等矿物的稳定性和转变,这些矿物的氧化还原过程可以改变稀土元素的赋存状态,促进稀土元素的释放或固定(Yu *et al.*, 2021)。此外,海山区域的底栖生物通过挖掘和生物扰动改变沉积物的结构,影响孔隙水的流动和稀土元素的分布(Fan *et al.*, 2023)。海山区域的生物群落通过其生理活动参与稀土元素的生物地球化学循环,影响稀土元素的分布和富集。

深海稀土资源的分布与储量还受到热液活动的显著影响。热液影响海区(如东南太平洋和中印度洋,图 2a~2c)的深海富稀土沉积物含有相对更高的 Fe、Co、Ni 元素,这些元素的含量表明这些沉积物有明显的热液物质输入。现有研究证实,深海稀土的形成与热液活动紧密相关,特别是在东太平洋和南太平洋(Kato *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2023a; Li *et al.*, 2023b)。热液作用在深海稀土富集过程中的影响机制可能涉及如下途径:①热液流体可能直接影响周围海水中的 REY 含量。热液流体中的 REY 含量远高于海水,其 REY 主要来源于海底岩石与海水的相互作用以及地幔的释放。因此,热液流体可能通过热液活动与海水混合,将稀土元素引入深海环境(German *et al.*, 1990, German and von Damm, 2004)。此外,热液流体在上升过程中与周围海水混合,改变周围海水的 REY 浓度和配分模式,从而影响 REY 在深海沉积物中的富集。②热液作用影响着深海稀土的载体矿物。例如,在东北太平洋的 Juan de Fuca Ridge 区域,热液过程导致了溶解态磷酸盐的显著降低(Feely *et al.*, 1990),这一过程可能提高了输入热液海区深海沉积物中的磷通量,从而影响 REY 的富集。相比热液作用影响较小的西太平洋,东南太平洋和中印度洋的深海富稀土沉积物表现出更高的 P/Fe 值(图 2d),这也表明热液相关的 Fe-P 共沉淀作用可能提高了热液海区的沉积物 P 通量。此外,热液型铁锰结核

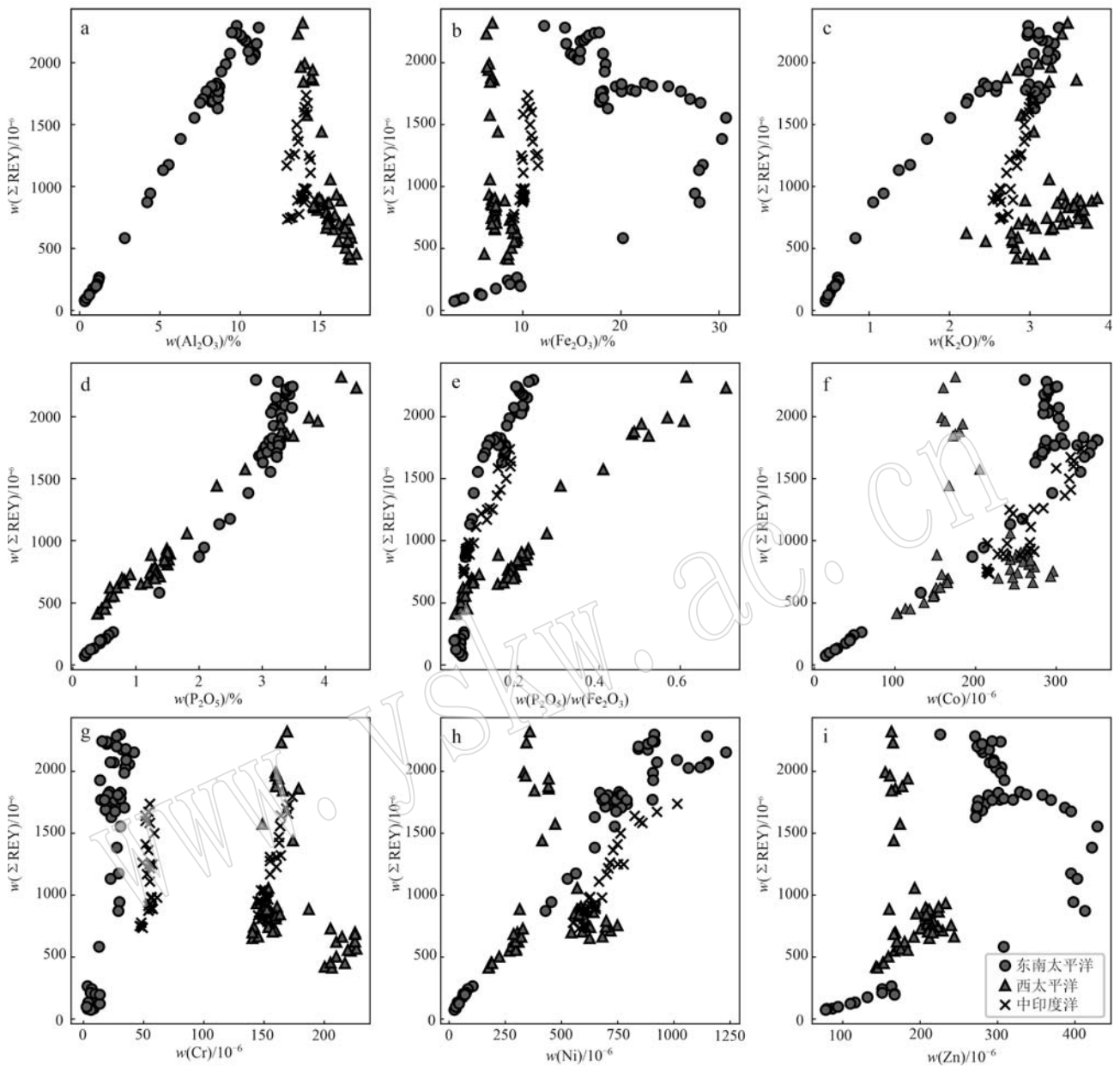


图2 深海富稀土元素沉积物 REY 含量与各主微量元素的关系

Fig. 2 Relationships between REY and various major/trace element contents for deep-sea REY-rich sediments

东南太平洋与西太平洋数据来源于 Zhang *et al.*, 2024, 中印度洋数据来源于 Yu *et al.*, 2021

Southeast Pacific and Western Pacific data from Zhang *et al.*, 2024, Central Indian Ocean data from Yu *et al.*, 2021

在 REY 富集过程中扮演着重要角色 (Bau *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2020a), 这些结核在深海沉积物中的分布和丰度虽已得到了一定程度的评估 (German *et al.*, 1990; Hein *et al.*, 2013), 但其具体贡献和形成机制仍需深入研究。

总之, 海山物质输入与热液活动对深海稀土元素“源-运”过程的影响有待进一步研究。尽管已经认识到海山与热液作用对稀土富集有重要影响, 但

具体的物理、化学和生物地球化学过程仍需进一步阐明。当前缺乏准确模拟影响深海稀土富集的物理和生物地球化学过程的模型, 开发这类模型有助于预测和解释观测到的现象。深海稀土“源-运”过程是一个多学科问题, 涉及海洋学、地质学、化学和生物学等多个领域, 需要加强跨学科的合作和整合研究。为了全面理解这一过程, 必须加强不同学科之间的合作与知识整合。通过深入分析海山与热液活

动对稀土元素富集的影响,可以识别出稀土元素富集的关键区域,为稀土资源的勘探和开发提供科学指导,进而优化资源的利用效率和可持续性。

1.2 深海沉积物中稀土的载体矿物与赋存机制

深海富稀土沉积物中的载体矿物是未来勘探开采深海稀土资源和进行稀土选冶的直接对象。深入探究这些载体矿物及稀土赋存状态将有助于开发更高效的提取技术,提高深海稀土资源利用效率。

近年来,对深海富稀土沉积物 REY 富集机制的研究主要集中在生物磷灰石(鱼牙和鱼骨; Auer *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2021; Yasukawa *et al.*, 2022)。生物磷灰石中的稀土元素含量极高,可占沉积物中总稀土元素的 69.3% 至 89.4% (Liao *et al.*, 2022)。稀土元素通过离子替代机制进入生物磷灰石结构中,尤其是重稀土元素显示出较高的富集度。此外,以结核和微结核形式存在于深海沉积物中的铁锰氧化物,也是稀土元素的重要赋存相。这些矿物通过表面络合吸附的形式富集稀土元素,尤其是铈(Ce),铁锰(氢)氧化物中的稀土元素占沉积物中总稀土元素的 8.2% 至 22.0%,而其中 Ce 的比例则占沉积物总 Ce 含量的 70.0% 至 80.5% (Liao *et al.*, 2022)。Ce 在铁锰(氢)氧化物中的异常富集涉及其氧化还原敏感性,Ce(III)在与铁锰氧化物相互作用时可被氧化为 Ce(IV),在这些矿物表面形成 CeO₂(s),使得大量 Ce 元素保留在铁锰(氢)氧化物中(German *et al.*, 1991)。

值得注意的是,黏土矿物在深海沉积物中的稀土元素富集中可能扮演着关键角色。特别是钙十字沸石等黏土矿物,因其广泛分布,与稀土元素的赋存密切相关(Li *et al.*, 2023b)。这些黏土矿物通过其独特的孔隙结构和表面活性特性,能有效地吸附稀土阳离子,从而在深海环境中促进稀土元素的富集。此外,黏土矿物的形成和演变记录了沉积环境的地球化学过程,包括水-岩反应、成岩作用以及后期的地质改造等,这些过程直接影响稀土元素的分布和赋存状态(Etame *et al.*, 2012; Cai *et al.*, 2023)。因此,黏土矿物的类型和含量的变化可以作为推断沉积环境变化的重要指标,对深海稀土元素分布具有重要的指示意义。然而,尽管黏土矿物对稀土元素有吸附作用,其本身的稀土含量通常远低于磷灰石组分和铁锰结核,导致关于其在稀土元素富集中的具体作用机制还存在较大的争议。

深海富稀土沉积物中的 REY 与 P 含量高度正相关(图 2e),磷灰石组分中的生物磷灰石也被认定为深海稀土最主要的载体矿物。然而,关于其他含磷相对 REY 富集的影响以及生物磷灰石在沉积磷矿物中所占比例较低时是否仍能显著促进 REY 的富集尚不清楚。

不同类型含磷相中 REY 的分配比例存在显著差异(图 3)。以 Fe-P(铁结合态磷)和 Ca-P(钙结合态磷)为例,这两种组分在西太平洋 REY 富集过程中扮演着重要角色(Fan *et al.*, 2023),但它们的占比和对 REY 的吸收能力尚不明确。Fe-P 可能通过还原过程中稳定组分的形成影响 REY 的富集;而 Ca-P 中的生物磷灰石和自生磷灰石可能由于其在沉积物中的比例及 REY 含量的变化对 REY 的富集产生影响(Ruttenberg, 1992)。然而,由于区域环境条件的差异,例如东南太平洋热液作用的存在,可能会影响磷相的组成和 REY 的富集机制(载体矿物的组成与西太平洋存在显著差异)。热液活动可能促进 Fe-Mn 微粒的磷化,而改变 REY 的富集模式(Feely *et al.*, 1990; Geoffrey *et al.*, 1996; Föllmi, 1996; Anderson *et al.*, 2000)。此外,受热液影响的沉积物中可能存在其他类型的含磷相,如与火山碎屑有关的自生磷酸盐矿物,这些矿物可能在 REY 的富集过程中发挥着关键作用(Poulton and Canfield, 2006)。

目前,对于不同类型的磷相富集稀土元素(REY)的机制尚未完全被阐明,尤其是稀土元素在矿物中的赋存形式(如类质同象替换)及其控制因素仍需深入研究。深入探究这些矿物将有助于开发更高效的提取技术。例如,对生物磷灰石和其他含磷相采取差异化的处理方法,能显著提升稀土的提取效率并降低生产成本(Zhang *et al.*, 2023c)。因此,进一步从不同磷相的角度深入研究载体矿物的性质和分布,不仅对于理解深海稀土的富集机制至关重要,也对优化资源开采技术和提升提取效率具有实际的应用价值。

尽管已有研究对西太平洋沉积物 REY 在不同磷相之间的分布进行了探讨,但对东南太平洋的相关研究相对较少。因此,需要进行更多的区域性研究以揭示不同地质构造和环境条件下 REY 的富集机制,以及不同磷相在这一过程中的作用。这将有助于全面理解深海稀土元素的富集规律,为未来的资源开发和环境保护提供科学依据。

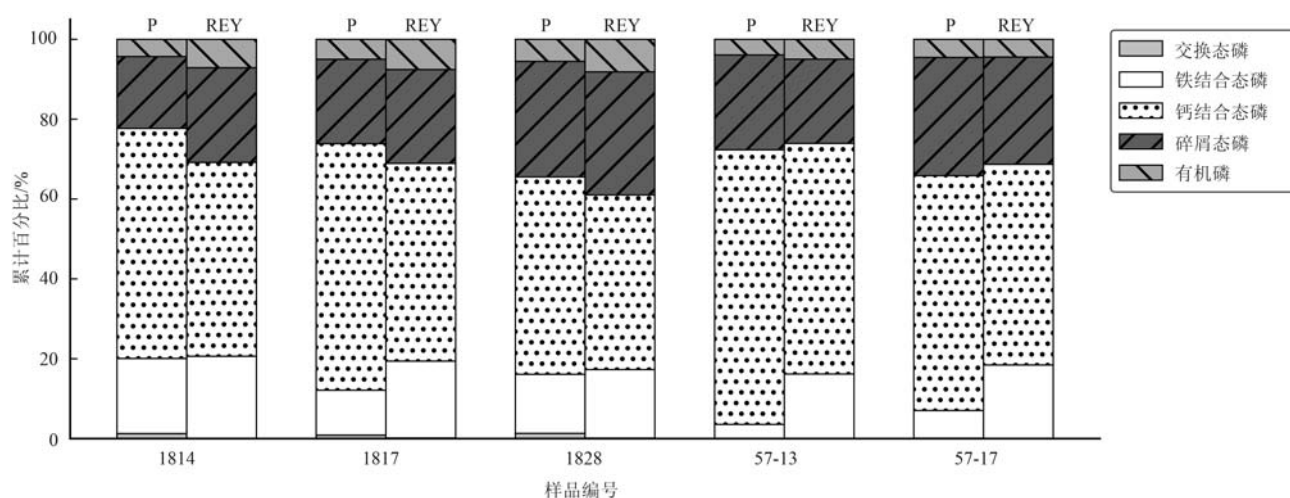


图3 深海沉积物中不同磷相的分配及其 REY 组分差异(数据来源: Fan *et al.*, 2023)

Fig. 3 Variations in different phosphorus phases and their REY components in deep-sea sediments (data source: Fan *et al.*, 2023)

1.3 深海稀土的成矿年代学

深海富稀土沉积物的成矿年代不仅有助于理解其成因机制,且对于确定最具开采价值的沉积层至关重要。精确的成矿时间信息可以帮助制定精确的开采计划,减少不必要的资源浪费,提高开采效率。然而,目前对深海稀土成矿年代的认识仍相对有限,这限制了我们对深海稀土资源形成过程和控制因素的全面理解。

在以往的研究中,精确测定深海稀土成矿时间是一项具挑战性的任务,主要受到3个方面的限制。首先,富稀土元素的深海沉积物通常位于碳酸盐补偿深度(carbonate compensation depth, CCD)以下,此处大量的碳酸盐已发生溶解,这限制了生物地层年代学方法的应用。其次,低沉积速率下,沉积物的再沉积作用以及侵蚀导致的沉积间断等因素均对古微生物年代学研究的开展构成了障碍,并可能对磁性地层记录产生干扰,从而使得生物地层学和古地磁学综合方法在富稀土深海沉积物中的应用变得复杂。最后,深海沉积物中缺乏可用于精确测定年代的自生矿物,这进一步增加了年代学研究的难度(Li *et al.*, 2023a; Wang *et al.*, 2023)。

令人振奋的是,近几年通过应用高精度的定年技术,已经能够获得有关 REY 富集沉积物成矿年龄的重要信息(图4)。例如,利用鱼牙 U-Pb 定年技术在西太平洋测得了约 6.5~2.2 Ma 的成矿年龄(Li *et al.*, 2023a); 利用鱼牙 Sr 同位素获得了中东太平洋 CCFZ 海区约 32~24 Ma 的成矿年龄(Wang *et al.*, 2023)。此外,通过分析沉积物的 Os 同位素,

确定了太平洋西部和中部区域大约 34.4 Ma 发生了 REY 富集,且与晚始新世环境变化有关(Ohta *et al.*, 2020)。这些成矿时间的初步成果可能揭示了与深海稀土成矿有关的地质事件,例如巴拿马地峡(~9 Ma)的闭合与南极底流的形成(~33 Ma)。尽管这些研究提供了宝贵的年代数据,但目前对各海区深海稀土成矿时间的整体认识仍然有限,特别是对东南太平洋等数据稀缺区,需进行更广泛的深海稀土成矿年代研究。其次,需采用多种定年技术,例如结合 U-Pb 和 Sr 同位素等定年技术,提供更精确和全面的成矿年龄数据。最后,需结合年代数据深入研究 REY 富集相关的环境和生物地球化学过程,如海洋环流、生物活动和热液作用等,这些因素都可能对 REY 的富集和分布有着重要影响。

1.4 深海稀土成矿模型的初步建立

在过去十年内,国内外学者通过应用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)、激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)以及顺序提取等地球化学与矿物学方法,对深海稀土的赋存状态、富集过程和成矿年代进行了研究,并在深海稀土成矿模型的建立方面取得了初步进展(Kon *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017; Kashiwabara *et al.*, 2018; Liao *et al.*, 2019, 2022; Li *et al.*, 2020b; Fan *et al.*, 2023; 樊文泉等, 2023)。

初步的成矿模型(Liao *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2021; Deng *et al.*, 2022a; Zhang *et al.*, 2023b)认为,在低沉积速率的条件下,生物磷灰石和铁锰结核在海水-沉积物界面处首先吸附海水中的 REY。随

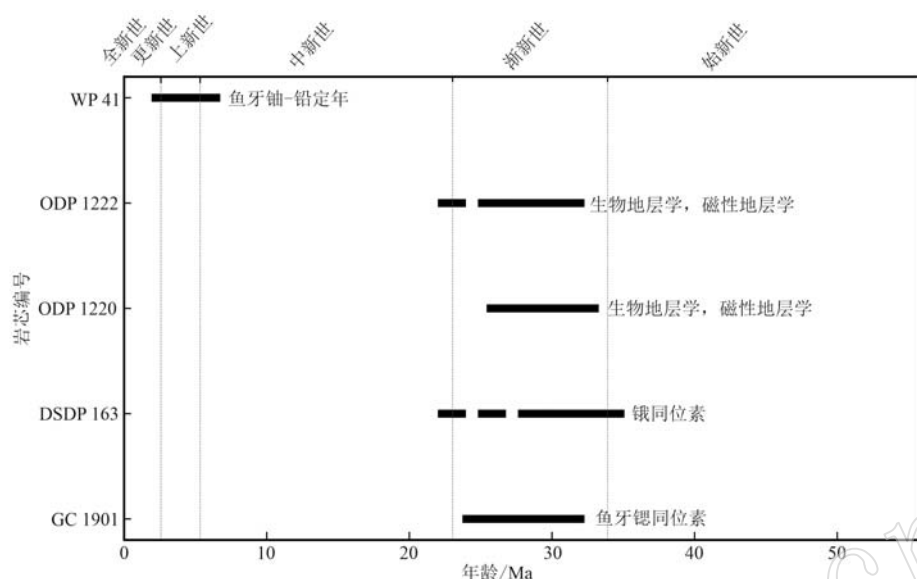


图4 深海稀土成矿时间汇总

Fig. 4 Summary of the mineralization time of deep-sea rare earth

虚线表示年龄下限不确定; 年龄数据整理自 Li *et al.*, 2023a; Wang *et al.*, 2023; Ohta *et al.*, 2020

dashed lines indicate uncertain lower limits of age; age data are compiled from Li *et al.*, 2023a; Wang *et al.*, 2023; Ohta *et al.*, 2020

着沉积物的埋藏和早期成岩作用的进行,铁锰结核中的 REY 被释放,并最终富集到生物磷灰石中 (Yu *et al.*, 2021)。对西太平洋沉积物孔隙水的研究进一步表明,在沉积物表面和内部浅层存在两次 REY 富集事件 (Deng *et al.*, 2022a),表明 REY 在沉积物中经过两阶段的转移过程,最终富集到磷灰石中 (图 5)。

富稀土深海沉积物的分布和稀土浓度受到多种因素的制约。富稀土深海沉积物主要分布在太平洋和印度洋各大海区,只发现于 CCD 以下 (Kato *et al.*, 2011)。该深度以下极低的沉积速率为稀土富集提供了充足的时间,碳酸钙组分的缺失也显著提高了载体矿物的浓度。西太平洋海山的分布对深海稀土的富集也有显著影响,海山的存在可能促进了 REY 的释放和循环 (Deng *et al.*, 2022b)。此外,富氧底流的存在也可能有效促进了深海稀土的形成。

从研究区的分布来看,先前的研究工作主要集中在西太平洋、中太平洋和印度洋等典型深海稀土富集区。相比之下,对东南太平洋热液区深海稀土的研究相对匮乏。然而,在东南太平洋 (尤其是 Tiki 海盆和 Yupanqui 海盆) 的深海沉积物中发现了高浓度的稀土元素 (Zhou *et al.*, 2020, 2021),这些区域沉积物中的 REY 含量显著高于其他海域,突显出重要的资源潜力。东南太平洋的深海稀土沉积物主要

位于东太平洋海隆扩张中心附近,该地区的地质环境独特,包括活跃的海底热液活动和火山活动,这些过程为稀土元素的富集提供了理想条件。此外,东南太平洋深海稀土沉积物的稀土元素配分模式与其他海域显著不同,表现出更明显的铈 (Ce) 亏损和钇 (Y) 富集,还发现了大量可能与热液相关的铁锰结核 (Kashiwabara *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2021)。这些特性不仅体现了东南太平洋深海稀土资源的独特价值,而且对于理解稀土元素在海洋环境中的生物地球化学循环至关重要,同时也预示着该区域在未来稀土资源开发方面的巨大潜力。

2 深海稀土资源开发利用现状与展望

2.1 开采难度高

开发深海稀土资源的技术和环境挑战重重,尤其是在复杂的海洋环境中,这些资源位于海平面以下 3 000~6 000 m 的深海区域,设备必须承受极高的水压、极低的温度和强腐蚀性的环境。尽管现有的海底采矿设备 [如遥控潜水器 (remotely operated vehicle, ROV) 和自律水下机器人 (autonomous underwater vehicle, AUV)] 在浅海和海底油气开采方面取得了一些进展,但它们在深海稀土资源的商业化开采中仍然存在适应性和可靠性不足的问题 (Sharma, 2017)。

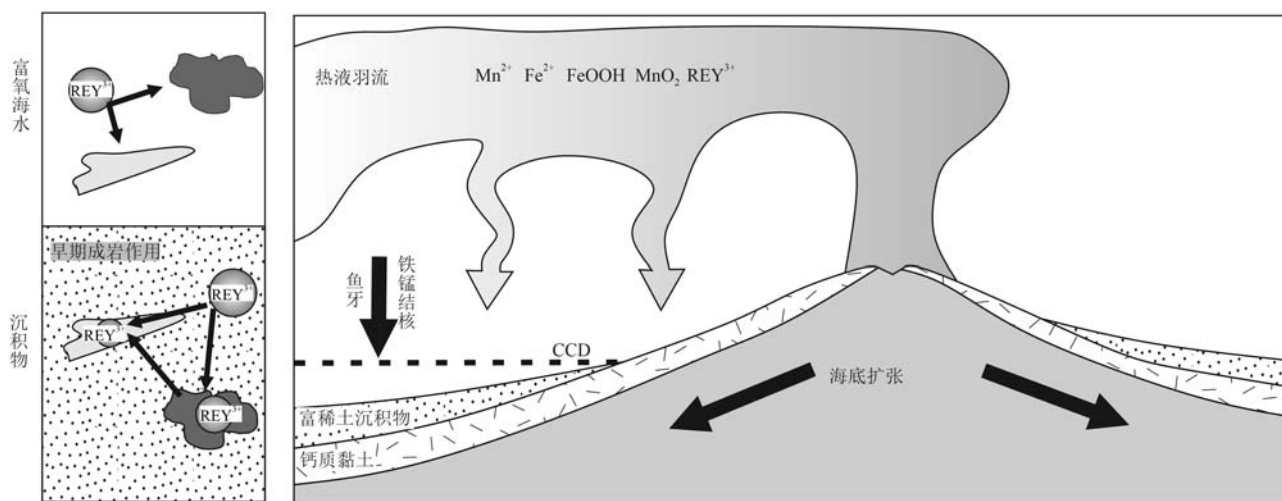


图5 深海稀土元素富集过程示意图(据 Yu *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023a; CCD 为碳酸钙补偿深度)

Fig. 5 Schematic diagram of the enrichment process of deep-sea rare earth elements (Yu *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023a; CCD refers to the carbonate compensation depth)

深海采矿作业需要解决海底地形复杂多变、沉积物厚度不均、海流速度变化以及潜在的地质灾害等多种不利因素。此外,深海采矿设备的开发和维护成本高昂,运输、定位和作业的复杂性进一步增加了开采的难度(常琳等, 2022)。

日本在开采深海稀土方面取得了显著的技术进展。近年来,在日本专属经济区内的南鸟岛附近发现了大量富含 REY 的深海泥浆,这些储量足以满足全球需求几十年。为了提取这些深海稀土,日本政府开发了一系列技术,以提高开采的经济性和环境可持续性。例如,在茨城县海域成功测试了一项涉及从 2 470 m 深的海底提取样本的技术 (Takaya *et al.*, 2018)。

此外,日本还研究了原位化学富集 (*in situ* chemical concentration) 方法,通过在海底直接进行化学处理,将稀土元素从泥浆中分离出来,从而提高开采的经济效益。这种方法能够减少对环境的影响,因为在海底进行处理和富集可以减少悬浮的泥浆量,降低对海洋环境的潜在污染 (Takaya *et al.*, 2018)。有研究提出了深海稀土与铁锰结核的联合开采模式。这种模式考虑了两种资源的共生分布特性,提出了使用浆料提升系统来提升高浓度的稀土泥和铁锰结核混合物,旨在通过综合利用提高经济效益 (Tetsuo *et al.*, 2021; Yamazaki *et al.*, 2021)。

国际上正在积极研究和开发新型的深海采矿技术和装备,例如基于声学 and 光学精准定位系统、高

强度耐压材料以及自动化控制技术等,以实现深海稀土资源的高效、安全开采 (Miller *et al.*, 2018)。然而,深海采矿技术的成熟度和可靠性仍有待提升。未来需要更多跨学科的协同研究和技术创新,以克服现有的技术障碍并实现深海稀土资源的可持续开发。

2.2 深海稀土提纯冶炼技术尚不成熟

近年来,深海稀土资源提纯冶炼技术已取得初步进展,但仍面临诸多挑战。首先原料预富集技术的进步为后续提纯冶炼提供了关键支撑。例如, Takaya 等 (2018) 探索的离心分离技术,利用水动力旋流分离器有效分离出富含稀土的颗粒,从而提高了稀土元素的富集度,这一预处理环节显著降低了后续提纯冶炼的原料处理难度。然而,该技术在设备大型化和操作成本控制方面仍存在难题。中国地质科学院提出了一种新的深海沉积物中提取稀土元素的方法,包括脱泥预处理、磨矿与浮选分离、浸出以及擦洗与再浮选等步骤 (欧阳安妮等, 2023)。该技术优化了稀土元素的前处理环节,具有环境友好、资源循环利用和技术创新等特点,有效提升了稀土元素的提取效率和富集度,显著降低了后续提纯过程的难度。然而,其技术复杂性、成本问题和潜在环境影响还需进一步研究和评估,以实现大规模生产中的应用。Zhang 等 (2023b) 提出的酸浸法作为一种典型的深海稀土提纯技术,通过使用硫酸作为浸出剂,实现了深海泥中稀土元素的高效提取。该方法优化了浸出条件,显著提高了稀土元素的浸出率,

但酸消耗和废液处理问题亟需解决。

目前,深海稀土资源的提纯和冶炼技术还处于早期探索和应用阶段。深海稀土矿石通常含有多种杂质,如钛、锆、铀等,这些杂质的存在显著增加了稀土元素提取和分离的难度。传统的陆地稀土矿石处理方法(如酸浸法、碱分解法和离子交换法),虽然在某种程度上适用于深海稀土矿石的处理,但由于深海矿石成分复杂,这些方法的效率和经济效益尚未得到充分验证。海底采矿过程中的物理和化学变化也必须在提纯过程中考虑。例如,海底高压环境可能导致矿石形态和结构在开采过程中发生变化,影响后续提纯和冶炼工艺。深海环境中的低温条件可能影响化学反应速率和选择性,使得传统的高温处理方法不适用于深海矿石的初步处理(Sharma, 2017)。国际上正在研究低温低压条件下的新型稀土元素提纯技术,如低温等离子体技术和超临界流体萃取技术,这些技术在实验室阶段显示出一定的应用潜力,但距离大规模应用还有一段距离(常琳等, 2022)。

深海稀土的提纯和冶炼技术在产业化和商业化方面还面临众多技术难题和经济挑战。未来必须强化对深海稀土的基础理论研究和开采冶炼技术的创新。在基础研究方面,深入探索成矿机制将有助于理解 REY 在深海沉积物中的富集过程,这为提纯和冶炼技术的创新提供了理论基础。通过研究不同载体矿物对稀土元素的吸附机制,可以开发出更高效的分离和提纯技术,从而提高资源利用效率。在技术层面,优化提纯工艺、改进冶炼设备以及开发环境友好型工艺是当前的紧迫任务。只有通过各方的共同努力才能实现深海稀土资源的高效利用和可持续发展。

2.3 生态环境影响尚未合理评估

深海稀土资源的开采虽具有重要的经济和战略意义,但其潜在的环境污染问题尚未得到合理评估,值得深入探讨和重视。长期扰动和再定殖实验(disturbance and recolonization experiment, DISCOL)显示,受到采矿活动干扰的区域,大型底栖生物的多样性指数显著降低,干扰区域的生物群落结构和功能可能发生了长期变化(Simon-Lledó *et al.*, 2019)。采矿活动产生的扰动对海底生物的影响可能比预想的要深远得多。近年来日本在其经济专属区进行了原位预富集再抽取的试开采实验,相关技术可能在未来应用于深海稀土开采。尽管这项技术旨在减少

采矿活动对环境的影响,降低对海洋环境的潜在污染,但其对海底生态系统的长远影响尚未得到确认,现有的采矿技术对海底生态系统的影响仍有待进一步评估。

深海热液喷口附近的生态系统具有独特性和脆弱性。这些系统是海洋生物多样性的关键区域,拥有众多仅在特定热液环境中演化而来的特有种(van Dover, 2019)。深海采矿活动可能对这些生态系统造成严重威胁,包括物理扰动导致的栖息地破坏、喷口窒息、堵塞和环境污染(Halfar and Fujita, 2007)。热液喷口的食物网高度依赖于化学合成作用,这一过程由微生物主导,它们通过氧化硫化物获取能量,支撑着整个生态系统的生产力(Orcutt *et al.*, 2020)。采矿活动可能会干扰这一基础能量过程,影响食物网的稳定性,进而对生态系统的健康产生负面影响。

此外,热液喷口区域的微生物群落对生态系统功能至关重要,并且拥有独特的遗传资源,这些资源在生物技术和医药领域具有潜在的应用价值(Orcutt *et al.*, 2020)。深海采矿可能导致这些遗传资源的丧失,限制未来生物技术和创新发展。热液喷口生态系统的形成和演化过程非常缓慢,一旦遭受破坏,可能需要数十年甚至数百年才能恢复(Simon-Lledó *et al.*, 2019; van Dover, 2019)。因此,对于深海采矿活动的管理和监管必须考虑到这些长期影响,并采取预防措施以保护这些珍贵的海洋资源。

环境影响评估(EIA)对于深海采矿活动至关重要,但目前尚不完善。现有的 EIA 方法主要针对陆地和浅海区域,深海环境的复杂性和独特性使得现有评估方法难以全面覆盖其潜在风险(Drazen *et al.*, 2020)。深海区域的水文、地质和生态环境具有显著的异质性,传统的评估方法难以准确预测采矿活动对不同区域的具体影响。

2.4 深海稀土开采长期经济效益尚不明晰

深海稀土资源具有重大战略价值和经济潜力,但其长期经济效益尚不明朗。目前,深海稀土大规模商业开采技术尚未完全成熟,实际开采产量和成本控制仍存在不确定性。特别是,深海采矿的环境保护成本和法律监管成本也需要纳入经济效益综合评价中,有效评估这些成本还存在一定困难(Sharma, 2017)。

首先,深海采矿前期投资成本极高。深海采矿需要在先进采矿设备、勘探工具以及运输和维护设

施的研发和采购上投入大量的资金,由于深海环境极其复杂,设备的研发和维护成本也相应增加(Heffernan, 2019)。与陆地矿产资源开发相比,深海稀土资源开发成本明显较高,经济回报的不确定性较大。

此外,深海稀土资源市场价格波动较大,加大了投资风险。稀土元素广泛应用于电子产品、新能源汽车、风力发电机等诸多高科技领域,其市场需求受全球经济状况和技术发展影响较大。近年来,国际市场稀土资源供给结构不断变化,特别是主要生产国的政策变化和市场策略,对全球稀土价格产生重要影响,不仅影响企业的盈利预期,也增加了投资决策的难度(Sakellariadou *et al.*, 2022; 王春娟等, 2020)。

此外,国际法律 and 政策的缺失限制了深海稀土资源的长期经济潜力。深海采矿行业缺乏明确的监管规定,令投资者犹豫不决。法律的不确定性可能增加项目的法律风险,影响其长期盈利能力(Heffernan, 2019)。深海资源开发涉及多个国家和地区的参与,必须遵守《联合国海洋法公约》等国际法。实际操作中,获取资源开采许可证的过程复杂,法律和政策的不确定性增加了企业的合规成本和经营风险(常琳等, 2022)。因此,如何在遵守国际法的同时有效利用深海稀土资源,同时保证经济效益,保护海洋环境,维护国际关系稳定,是亟待解决的问题。

综上所述,深海稀土资源开采的长期经济效益尚不明确,需要从技术、市场、法律和环境等多个方面进行综合评估。未来的研究应侧重于研究深海稀土资源的经济可行性,探索新的开采技术和成本控制方法,改进市场预测模型,构建完善的法律和政策框架,促进深海稀土资源的可持续开发利用。

3 结语与展望

深海稀土资源是21世纪的重要战略资源,全球对其勘探和利用极为重视。文章综合分析了深海稀土资源的地质背景、赋存状态、成矿机制以及当前面临的技术挑战和环境问题,指出深海稀土成矿年代学、稀土元素载体矿物、热液成矿影响以及稀土资源勘探技术等研究尚处于发展阶段。尽管已取得一些进展,但对成矿机制的全面认识、稀土元素在不同磷相中的分配问题以及热液活动对稀土元素富集的具体影响的研究还需深入。同时,深海稀土资源的开

采和利用也面临诸多难题,如采矿技术复杂、提炼和精炼技术不成熟、环境影响评估不足以及经济效益不确定等。解决这些问题需要行业内外专家共同努力,并在技术创新、环境保护、法规制定和市场监管等方面进行综合考虑。

高效和可持续地开发深海稀土资源需依赖跨学科合作和不同部门的协作。未来研究重点应包括提高探测精度、改善采矿技术、开发环境友好的提纯技术以及建立全面的环境影响评价体系。此外,我国应增强国际合作,积极参与全球深海资源管理规则的制定,以增强在国际深海资源开发领域的影响力。

最后,深海稀土资源的开发利用关系到国家长远利益和全球可持续发展。必须在确保海洋环境安全的前提下,合理开发利用这一宝贵资源,为实现人类社会的绿色发展和生态文明建设贡献力量。

References

- Anderson L D and Delaney M L. 2000. Sequential extraction and analysis of phosphorus in marine sediments: Streamlining of the SEDEX procedure[J]. *Limnology and Oceanography*, 45(2): 509~515.
- Auer G, Reuter M, Hauzenberger C A, *et al.* 2017. The impact of transport processes on rare earth element patterns in marine authigenic and biogenic phosphates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 203(8): 140~156.
- Balaran V. 2019. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact[J]. *Geoscience Frontiers*, 10(4): 1 285~1 303.
- Bau M, Schmidt K, Koschinsky A, *et al.* 2014. Discriminating between different genetic types of marine ferro-manganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium[J]. *Chemical Geology*, 381(18): 1~9.
- Cai Y C, Shi X F, Zhou T C, *et al.* 2023. Evaluating the contribution of hydrothermal fluids and clay minerals to the enrichment of rare earth elements and yttrium (REY) in deep-sea sediments[J]. *Ore Geology Reviews*, 161(10): 105679.
- Chang Lin, Zhang Yongbo, Ma Zhe, *et al.* 2022. Research frontiers in exploitation and utilization of rare earth mineral resources in the deep-sea sediments[J]. *Marine Geology Frontiers*, 38(12): 1~7 (in Chinese).
- Deng Y N, Guo Q J, Liu C Q, *et al.* 2022a. Early diagenetic control on the enrichment and fractionation of rare earth elements in deep-sea

- sediments[J]. *Science Advances*, 8(25): eabn5466.
- Deng Y N, Guo Q J, Zhu J, *et al.* 2022b. Significant contribution of seamounts to the oceanic rare earth elements budget[J]. *Gondwana Research*, 112(12): 71~81.
- Deng Y N, Ren J B, Guo Q J, *et al.* 2017. Rare earth element geochemistry characteristics of seawater and porewater from deep sea in western Pacific[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 16539.
- Drazen J C, Smith C R, Gjerde K M, *et al.* 2020. Midwater ecosystems must be considered when evaluating environmental risks of deep-sea mining[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(30): 17 455~17 460.
- Etame J, Suh C E, Gerard M, *et al.* 2012. Phillipsite formation in nephelinitic rocks in response to hydrothermal alteration at Mount Etinde, Cameroon[J]. *Geochemistry*, 72(1): 31~37.
- Fan W X, Zhou J M, Yuan P, *et al.* 2023. Identifying the roles of major phosphorus fractions in REY enrichment of Pacific deep-sea sediments using sequential extraction and mineralogical analysis[J]. *Ore Geology Reviews*, 157(6): 105430.
- Fan Wenxiao, Zhou Junming, Zhang Huan, *et al.* 2023. Research progress and prospects of rare earth element carrier minerals in REE-rich deep-sea sediments[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 43(2): 145~156(in Chinese with English abstract).
- Feely R A, Massoth G J, Baker E T, *et al.* 1990. The effect of hydrothermal processes on midwater phosphorus distributions in the north-east Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 96(3~4): 305~318.
- Föllmi K B. 1996. The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 40(1~2): 55~124.
- Geoffrey W C, Feely R A and Mottl M J. 1996. Phosphate removal by oceanic hydrothermal processes: An update of the phosphorus budget in the oceans[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(19): 3 593~3 608.
- German C R, Holliday B P and Elderfield H. 1991. Redox cycling of rare earth elements in the suboxic zone of the Black Sea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12): 3 553~3 558.
- German C R, Klinkhammer G P, Edmond J M, *et al.* 1990. Hydrothermal scavenging of rare-earth elements in the ocean[J]. *Nature*, 345(6 275): 516~518.
- German C R and von Damm K L. 2004. Hydrothermal processes[J]. *Treatise on Geochemistry*, 6(1): 181~222.
- Halfar J and Fujita R M. 2007. Danger of deep-sea mining[J]. *Science*, 316(5 827): 987~987.
- He Hongping and Yang Wubin. 2022. REE mineral resources in China: Review and perspective[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(5): 829~841 (in Chinese).
- Heffernan O. 2019. Seabed mining is coming—Bringing mineral riches and fears of epic extinctions[J]. *Nature*, 571(7 766): 465~468.
- Hein J R, Mizell K, Koschinsky A, *et al.* 2013. 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*, 51(6): 1~14.
- Kashiwabara T, Toda R, Nakamura K, *et al.* 2018. Synchrotron X-ray spectroscopic perspective on the formation mechanism of REY-rich muds in the Pacific Ocean[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 240(21): 274~292.
- Kato Y, Fujinaga K, Nakamura K, *et al.* 2011. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements[J]. *Nature Geoscience*, 4: 535~539.
- Kon Y, Hoshino M, Sanematsu K, *et al.* 2014. Geochemical characteristics of apatite in heavy REE-rich deep-sea mud from minami-torishima area, southeastern Japan[J]. *Resource Geology*, 64(1): 47~57.
- Li D F, Fu Y, Liu Q F, *et al.* 2020a. High-resolution LA-ICP-MS mapping of deep-sea polymetallic micronodules and its implications on element mobility[J]. *Gondwana Research*, 81(5): 461~474.
- Li D F, Fu Y, Sun X M, *et al.* 2020b. Critical metal enrichment mechanism of deep-sea hydrogenetic nodules: Insights from mineralogy and element mobility[J]. *Ore Geology Reviews*, 118(3): 103371.
- Li D F, Peng J Z, Chew D, *et al.* 2023a. Dating rare earth element enrichment in deep-sea sediments using U-Pb geochronology of bioapatite[J]. *Geology*, 51(5): 428~433.
- Li S Y, Fu Y, Li D F, *et al.* 2023b. Phillipsite in pelagic REY-rich sediments and ferromanganese nodules from the Western Pacific: Geochemical characteristics and implications for REY enrichments[J]. *Ore Geology Reviews*, 161: 105631.
- Liao J L, Chen J Y, Sun X M, *et al.* 2022. Quantifying the controlling mineral phases of rare-earth elements in deep-sea pelagic sediments[J]. *Chemical Geology*, 595: 120792.
- Liao J L, Sun X M, Li D F, *et al.* 2019. 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*, 512: 58~68.
- Liu Qinghua. 2023. Current situation of rare earth mineral resources in China and countermeasures for sustainable development[J]. *China Metal Bulletin*, (1): 7~9 (in Chinese).

- Mao Jingwen, Song Shiwei, Liu Min, *et al.* 2022. REE deposits: Basic characteristics and global metallogeny[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(11): 3 675~3 697 (in Chinese).
- Miller K A, Thompson K F, Paul J, *et al.* 2018. An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps[J]. *Frontiers in Marine Science*, 4: 418.
- Ohta J, Yasukawa K, Nozaki T, *et al.* 2020. Fish proliferation and rare-earth deposition by topographically induced upwelling at the late Eocene cooling event[J]. *Scientific Reports*, 10(1): 9 896.
- Orcutt B N, Bradley J A, Brazelton W J, *et al.* 2020. Impacts of deep-sea mining on microbial ecosystem services[J]. *Limnology and Oceanography*, 65(7): 1 489~1 510.
- Ouyang Anni, Xiong Wenliang, Zhou Zheng, *et al.* 2023. Mineral features and current extraction situation of rare earth resources in deep-sea deposit [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 44(4): 71~77 (in Chinese).
- Poulton S W and Canfield D E. 2006. Co-diagenesis of iron and phosphorus in hydrothermal sediments from the southern East Pacific Rise: Implications for the evaluation of paleoseawater phosphate concentrations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(23): 5 883~5 898.
- Ruttenberg K C. 1992. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 37(7): 1 460~1 482.
- Sakellariadou F, Gonzalez F J, Hein J R, *et al.* 2022. Seabed mining and blue growth: Exploring the potential of marine mineral deposits as a sustainable source of rare earth elements (MaREEs) (IUPAC Technical Report) [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 94(3): 329~351.
- Sharma R. 2017. Deep-Sea Mining: Resource Potential, Technical and Environmental Considerations[M]. Springer Cham, 1~535.
- Shi Xuefa, Bi Dongjie, Huang Mu, *et al.* 2021. Distribution and metallogenesis of deep-sea rare earth elements[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(2): 195~208 (in Chinese with English abstract).
- Simon-Lledó E, Bett B J, Huvenne V A I, *et al.* 2019. Biological effects 26 years after simulated deep-sea mining[J]. *Scientific Reports*, 9(1): 8 040.
- Takaya Y, Yasukawa K, Kawasaki T, *et al.* 2018. The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements[J]. *Scientific Reports*, 8(1): 5 763.
- Tetsuo Y, Naoki N, Rei A, *et al.* 2021. Combined mining and pulp-lifting of ferromanganese nodules and rare-earth element-rich mud around minamitorishima island in the western north Pacific: A prefeasibility study[J]. *Minerals*, 11(3): 310.
- van Dover C L. 2019. Inactive sulfide ecosystems in the deep sea: A review[J]. *Frontiers in Marine Science*, 6: 461.
- Wang Chunjuan, Wang Xiqian, Liu Dahai, *et al.* 2020. Value evaluation of deep sea rich-REE sediments based on price factor—A comparative analysis of terrestrial REE deposits[J]. *Resource Development & Market*, 36(10): 1 074~1 079 (in Chinese with English abstract).
- Wang T Y, Dong Y H, Chu F Y, *et al.* 2023. In situ strontium isotope stratigraphy of fish teeth in deep-sea sediments from the western Clarion-Clipperton fracture Zone, eastern Pacific Ocean [J]. *Chemical Geology*, 636: 121624.
- Yamazaki T, Nakatani N, Arai R, *et al.* 2021. Combined mining and pulp-lifting of ferromanganese nodules and rare-earth element-rich mud around Minamitorishima Island in the Western North Pacific: A prefeasibility study[J]. *Minerals*, 11(3): 310.
- Yasukawa K, Ohta J, Hamada M, *et al.* 2022. Essential processes involving REE-enrichment in biogenic apatite in deep-sea sediment decoded via multivariate statistical analyses[J]. *Chemical Geology*, 614: 121184.
- Yu M, Shi X F, Huang M, *et al.* 2021. 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*, 136: 104269.
- Zhang G, Zhu Y, Deng Y, *et al.* 2024. Balancing the oceanic Zn isotope budget: The key role of deep-sea pelagic sediments[J]. *Geology*, 52(10): 5.
- Zhang H, Zhou J M, Yuan P, *et al.* 2023a. Highly positive Ce anomalies of hydrogenetic ferromanganese micronodules from abyssal basins in the NW and NE Pacific: Implications for REY migration and enrichment in deep-sea sediments [J]. *Ore Geology Reviews*, 154: 105324.
- Zhang K F, Wei B H, Tao J Z, *et al.* 2023b. Recovery of rare earth elements from deep-sea mud using acid leaching followed by selective solvent extraction with N1923 and TBP[J]. *Separation and Purification Technology*, 318: 124013.
- Zhang X Y, Lu Y F, Miao Y, *et al.* 2023c. Radiogenic Nd in bioapatite from rare earth elements rich deep sea sediments from Central Indian Oceanic Basin and its implication in material sources[J]. *Ore Geology Reviews*, 154: 105295.
- Zhang X Y, Tao C H, Shi X F, *et al.* 2017. Geochemical characteristics of REY-rich pelagic sediments from the GC02 in central Indian

Ocean Basin[J]. Journal of Rare Earths, 35(10): 1 047~1 058.

Zhou T C, Shi X F, Huang M, *et al.* 2021. Genesis of REY-rich deep-sea sediments in the Tiki Basin, eastern South Pacific Ocean: Evidence from geochemistry, mineralogy and isotope systematics[J]. Ore Geology Reviews, 138: 104330.

Zhou T, Shi X, Huang M, *et al.* 2020. 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, 10: 1 141.

附中文参考文献

常琳, 张永波, 马哲, 等. 2022. 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, 38(12): 1~7.

樊文泉, 周军明, 张欢, 等. 2023. 富稀土深海沉积物中稀土元素

载体矿物的研究进展与展望[J]. 矿物学报, 43(2): 145~156.

何宏平, 杨武斌. 2022. 我国稀土资源现状和评价[J]. 大地构造与成矿学, 46(5): 829~841.

刘清华. 2023. 中国稀土矿产资源现状及其可持续发展对策[J]. 中国金属通报, 1(1): 7~9.

毛景文, 宋世伟, 刘敏, 等. 2022. 稀土矿床: 基本特点与全球分布规律[J]. 地质学报, 96(11): 3 675~3 697.

欧阳安妮, 熊文良, 周政, 等. 2023. 深海富稀土沉积物中稀土资源特征及其分离提取现状[J]. 矿产综合利用, 44(4): 71~77.

石学法, 毕东杰, 黄牧, 等. 2021. 深海稀土分布规律与成矿作用[J]. 地质通报, 40(2): 195~208.

王春娟, 王玺茜, 刘大海, 等. 2020. 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, 36(10): 1 074~1 079.