

西太平洋深海稀土成矿时代及其指示意义

毕东杰, 石学法*, 黄牧, 于淼, 沈芳宇, 刘建兴, 刘季花

(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, 山东省深海矿产资源开发重点实验室, 青岛 266061)

深海富稀土沉积(简称“深海稀土”)是近年来发现的一种新型潜在稀土资源, 发育于水深超过碳酸盐溶解补偿界面的深海盆地中, 其主要特征是富含中-重稀土元素(Kato et al., 2011)。深海稀土资源潜力巨大, 据估算为陆地稀土资源储量的数千倍, 可能是全球最大的稀土资源(特别是中-重稀土资源)储库, 是继多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物之后发现的第四种深海金属矿产(石学法等, 2021; Deng et al., 2022)。深海盆地远离大陆, 陆源物质输入速率低, 且钙质沉积不发育, 以远洋粘土为主, 沉积速率极低($< 0.5\text{m/Myr}$; Plank et al., 2000)。极低的沉积速率、较大的时间跨度及缺乏钙质生物沉积等特征, 使得深海沉积物测年是困扰科学界的一大难题, 极大地制约了深海稀土成矿机制研究。

调查发现, 传统的测年方法应用于深海稀土测年都存在一定的局限性。例如: Sr-Os 等同位素地层学方法, 分辨率低且不可避免的受到成岩作用和生物扰动的影响(Ohta et al., 2020; Wang et al., 2021; Ren et al., 2022); 近期报导的生物磷灰石 U-Pb 定年方法, 不确定度较大, 可能更适用于更大时间尺度的沉积物定年(Li et al., 2023); 古地磁定年适用广泛, 沉积间断等造成古地磁序列不能被完全识别(Yi et al., 2020); ^{10}Be 、U-Th 等分放射性同位素测年方法, 实验流程复杂、费用高, 且仅能进行沉积物相对年龄的限定(Cheng et al., 2006; Simon et al., 2016)。

基于各类测年方法优缺点的充分分析, 本研究采用绝对年龄、相对年龄测试相结合的多指标联合的测年方法。本研究选取西太平洋 1 个站位典型深海沉积物钻孔岩心(水深 5097 m, 长度 3.12 m)为研究对象, 综合使用古地磁测年、铀系(U-Th)测年和自生组分放射性 ^{10}Be 测年的方法准确建立了该钻孔岩心地层年代格架。测年结果显示, 该站位表层和底层沉积物的年龄分别为 0.14 Ma 和 11.71 Ma。该站岩心上、下部沉积物沉积速率存在明显变化, 显示出明显的“二段式”特征。以~175 cm (~1.2 Ma)为界, 上部沉积物沉积连续, 且沉积速率较高, 为 161 cm/Myr; 下部沉积物沉积间断广泛发育, 沉积速率极低, 为 13 cm/Myr。此外, 马里亚纳海沟沉积物也表现出非常相似的沉积速率变化特征, 为本年代框架的准确性提供了佐证(Yi et al., 2020)。

本研究结果表明, 西太平洋深海沉积物形成于~2.5 Ma 之前, $\Sigma\text{REY}>2000 \mu\text{g/g}$ 的极富稀土沉积形成于~11.5-9.5 Ma 之间。西太平洋深海稀土主要发育于低沉积速率期, 指示低沉积速率是控制深海稀土发育的重要因素。在低沉积速率条件下, 稀土元素的主要赋存矿物(生物磷灰石和铁锰微结核)与海水可以长时间接触, 有利于稀土元素富集。同时, 低沉积速率有利于生物磷灰石和铁锰微结核等自生矿物的富集。然而, ~1.2 Ma 之前, 尽管沉积物 ΣREY 变化明显, 但沉积速率并无明显变化。尤其是 $\Sigma\text{REY}>2000 \mu\text{g/g}$ 的极富稀土沉积, 其沉积速率与其他深海富稀土沉积并无明显差别。可见, 深海沉积物中稀土元素含量应该还受到其他因素的控制。分析认为, 12.0-9.2 Ma 之间, 巴拿马深水水道的关闭, 造成的研究区底流活动加强可能是造成研究区西富稀土沉积发育的主要原因, 但仍需进一步研究加以证实。

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 42106085, 42249301, 92262304, 91858209)

第一作者简介: 毕东杰, 男, 1992 年生, 博士, 主要从事深海稀土成矿作用研究。

* 通讯作者, E-mail: xfshi@fio.org.cn

参考文献:

- 石学法, 毕东杰, 黄牧, 等., 2021. 深海稀土分布规律与成矿作用.地质通报, 40(Z1):195-208.
- Cheng, H., Edwards, R.L., Wang, Y., et al., 2006. A penultimate glacial monsoon record from Hulu Cave and two-phase glacial terminations. *Geology*, 34, 217-220.
- Deng, Y., Guo, Q., Liu, C., et al., 2022. Early diagenetic control on the enrichment and fractionation of rare earth elements in deep-sea sediments. *Sci Adv*, 8, eabn5466.
- Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K., et al., 2011. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nat Geosci*, 4 (8), 535-539.
- Li, D., Peng, J., Chew, D., et al., 2023. Dating rare earth element enrichment in deep-sea sediments using U-Pb geochronology of bioapatite. *Geology*.
- 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. *Sci Rep*, 10, 9896.
- Plank, T., Ludden, J.N., Escutia, C., et al., 2000. Proc. ODP, Init. Repts., 185 [Online]. Available from World Wide Web: http://www-odp.tamu.edu/publications/185_IR/185ir.htm.
- Simon, Q., Thouveny, N., Bourlès, D.L., et al., 2016. Authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratios and ^{10}Be -fluxes (^{230}Th s-normalized) in central Baffin Bay sediments during the last glacial cycle: Paleoenvironmental implications. *Quat Sci Rev*, 140, 142-162.
- Wang, F., He, G., Deng, X., et al., 2021. Fish Teeth Sr Isotope Stratigraphy and Nd Isotope Variations: New Insights on REY Enrichments in Deep-Sea Sediments in the Pacific. *J Mar Sci Eng*, 9, 1379.
- Yi, L., Xu, D., Jiang, X., et al., 2020. Magnetostratigraphy and Authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ Dating of Plio-Pleistocene Abyssal Surficial Sediments on the Southern Slope of Mariana Trench and Sedimentary Processes During the Mid-Pleistocene Transition. *J Geophys Res-Oceans*, 125: c2020JC016250.

南大西洋中脊洵美热液区硫化物成矿作用研究

党院, 李传顺, 石学法, 王赛, 叶俊, 李兵, 杨悦, 赵秋魁, 关义立

(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, 山东 青岛 266061;

2. 山东省深海矿产资源开发重点实验室, 山东 青岛 266061)

慢速扩张洋中脊的热液硫化物具有重要的经济价值和科学意义。相比于研究成熟的北大西洋, 南大西洋近年来新发现多个热液区, 但这些热液区硫化物的成矿作用尤其成矿流体演化方面研究较薄弱。洵美作为南大西洋中脊一个典型的火山穹隆型热液区, 具有重要研究价值。本研究基于硫化物烟囱体的矿物组合和分带, 将成矿阶段从低温至高温以及风化作用共划分为 6 个成矿阶段: 以胶状、球丛状白铁矿为主的低温成矿阶段; 以树枝状、半自形黄铁矿为主的中低温成矿阶段; 以半自形、自形黄铁矿、中细粒黄铜矿和闪锌矿为主的中高温成矿阶段; 以大颗粒纯黄铜矿组成的高温成矿阶段; 以大颗粒白铁矿为主的中低温成矿阶段; 以铁的氧化物氢氧化物和铜的次生矿物为主的风化阶段。矿物学研究发现从烟囱的外壁至内部通道黄铁矿/白铁矿的结晶程度和黄铜矿的颗粒大小逐渐增加。硫同位素研究显示所有的硫化物其 $\delta^{34}\text{S}$ 值呈正值, 通过计算表明洵美热液区成矿物质中 62%-91% 的硫来自基底玄武岩的淋滤, 而 9%-38% 来此海水硫酸盐的还原。硫化物微量元素分析显示烟囱体外壁富集 Mn、Ag 和 Tl 等元素, 而内壁富集 Se、In 和 Sn 等元素, 指示在烟囱生长过程中成矿温度逐渐上升。黄铁矿/白铁矿、闪锌矿和黄铜矿中微量元素多以固溶体的形式替代矿物中的 Fe、Zn、Cu 和 S。少量主量元素以矿物包裹体的形式存在。硫化物中微量元素的赋存机制随着流体的物理化学条件(如温度和 pH)和热液作用过程(如相分离和流体混合)变化。黄铁矿的低 Co 含量、低 Tl/Pb、低 Sb/Pb、低 Bi/Pb, 以及高 As、Ag、Cu 和 Pb 含量表明黄铁矿的成矿流体在上升过程中发生了超临界相分离。洵美热液区的热液循环受到辉长岩侵入体的热驱动。高温亏 Cl 富气相热液流体喷入冷的海水经历了多阶段的演化, 利用矿物学和矿物地球化学计算和评估大致成矿温度从低温 (<240°C) 经中温 (~263°C) 和高温 (~317°C) 达到最高温 (~335°C), 然后降至中温至低温 (~270°C 至 <240°C)。硫逸度在中等硫逸度范围内从相对低到高然后降至低硫逸度状态。氧逸度受海水混入的影响, 从相对氧化状态演化至初始相对还原状态。烟囱生长过程中盐度逐渐降低。因此, 本研究表明洵美热液区硫化物沉淀是流体海水混合和相分离共同作用的结果。据此, 我们建立了洵美热液区硫化物烟囱体的生长模型(图 1)和热液成矿模型(图 2), 为后续勘查找矿提供可能的理论指导。

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 42006180); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(批准号: 2021Q01); 山东省自然科学基金(批准号: ZR2020QD072); 中国大洋协会十三五项目(批准号: DY135-S2-2-01)

第一作者简介: 党院, 男, 助理研究员, 主要从事海底热液硫化物成矿作用研究。E-mail: dangyuan1120@163.com

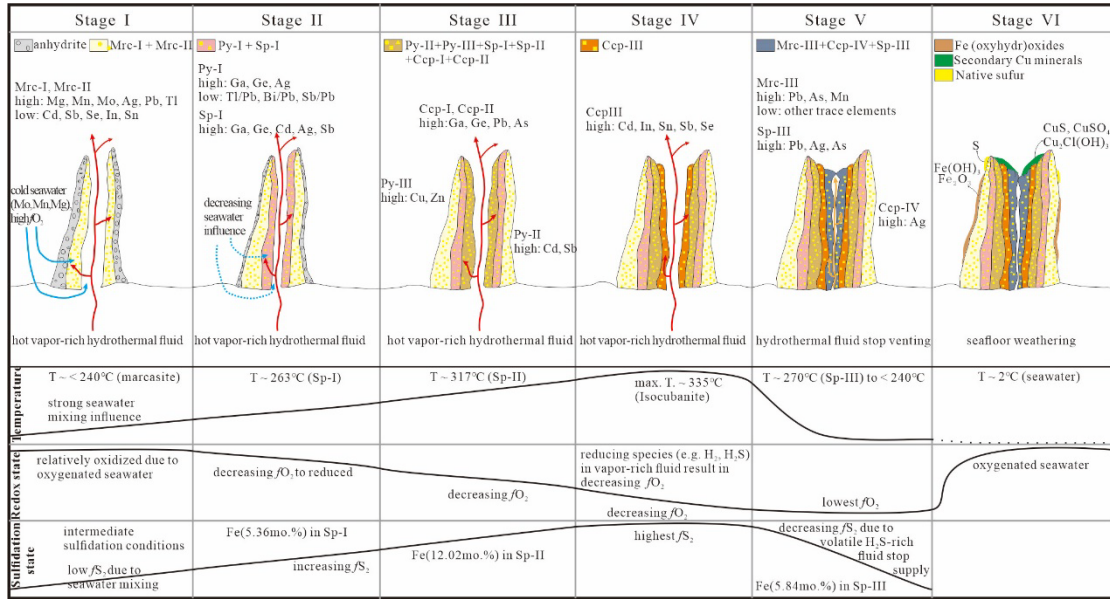


图 1 南大西洋淘美热液区硫化物烟筒体生长模型

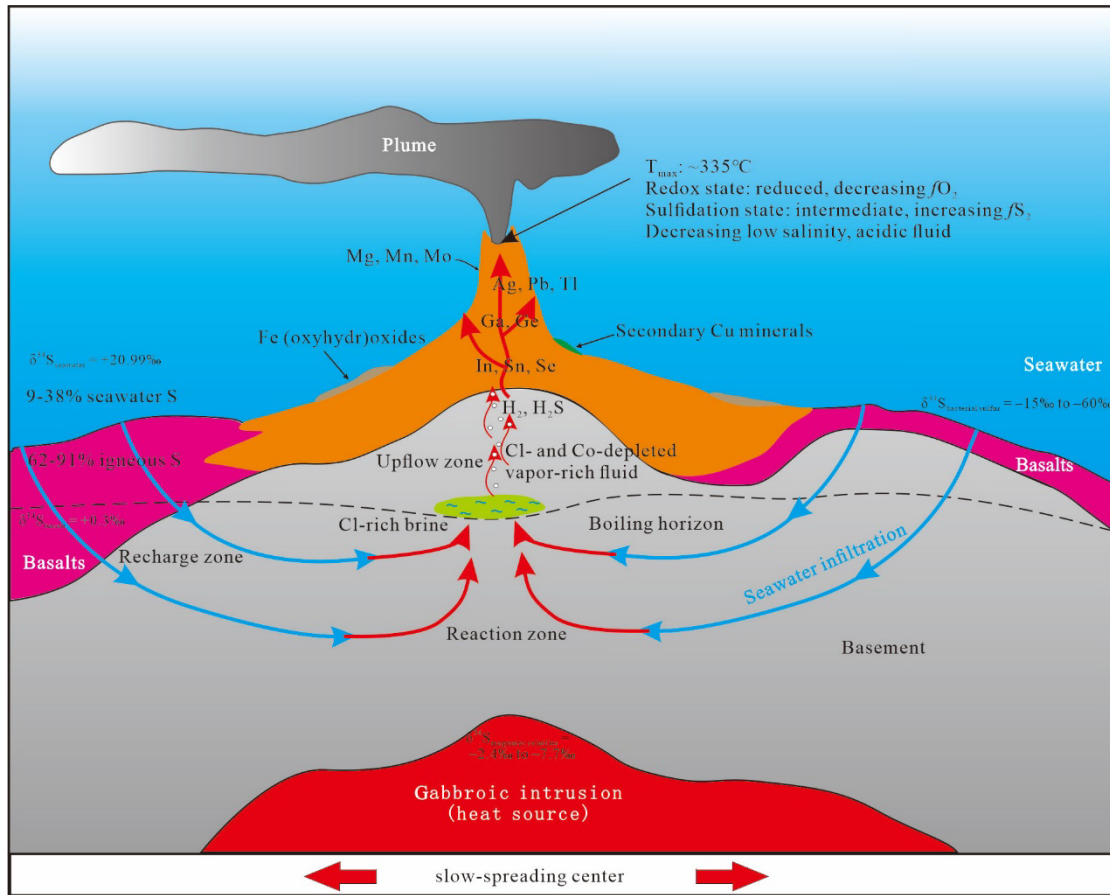


图 2 南大西洋中脊淘美区热液成矿模型

基于近底摄像的多金属结核覆盖率估算

郝越¹, 闫仕娟*, 田先德³, 任向文, 罗益萍¹, 刘大龙¹, 杜德文

(1. 自然资源部 第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 自然资源部 第一海洋研究所 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 国家海洋信息中心, 天津, 300012)

多金属结核生长于海底平原或山间盆地, 富含 Co、Mn、Ni、Li、Mo、W 等关键金属, 是全球关注的战略矿产资源。20 世纪 50 年代, 迎来各国对深海矿产勘探的热潮, 形成全球大洋金属矿物分布图 (Hein et al., 2013)。1991 年, 中国大洋协会与国际海底管理局签订了勘探合同, 首次获得了东太平洋克拉里昂-克里帕顿 (CC) 区多金属结核的专属勘探权和优先开采权。目前, 我国已在 CC 区、西太平洋共获得 3 个多金属结核矿区。据深海多金属结核资源开发技术经济模型, 一个矿址应该能够支撑年产 300 万吨干结核, 连续采矿 20 年的采矿规模, 因此矿址的选择非常重要。这就迫切需要高效率、高精度、低成本的勘探技术和相应的数据快速处理分析技术作为支撑, 加快勘探进程。近海底摄像或照相连续走航, 不间断获取海底图像, 是最直观、高精度、低成本的勘探技术, 且已被较多用于海底矿产资源勘查。

多金属结核资源参数包括丰度、覆盖率、品位等, 是多金属结核资源评估的重要指标。多金属结核覆盖率, 即单位面积内多金属结核所占面积的百分比 (Gazis et al., 2018), 是多金属结核资源评价的重要参数之一 (Ellefmo et al., 2020)。资源评价是矿址圈定和未来采矿决策的重要依据。开辟快速、有效、精准估算多金属结核发育程度参数空间变化的方法模型, 获取多金属结核矿体地质连续性, 是资源评估要解决的问题, 也同时是一个重要的科学问题。

多金属结核资源参数可以由摄像识别得到, 其粒径和破碎程度也可由摄像数据得出, 丰度数据可由覆盖率数据估算得出, 因此可用空间代表性更好的摄像测线覆盖率数据表征多金属结核资源参数的空间变化, 获得矿区摄像区域的资源分布信息。

随着人工智能技术的迅速崛起, 深度学习技术 (Hari et al., 2017; Reddy et al., 2019; Liu et al., 2021; Cui et al., 2021) 已经开始被尝试应用于海底摄像数据分析, 对海底岩性进行判识。

本研究基于 YOLOv7 图像分割方法 (Chien-Yao Wang et al., 2022), 构建图像语义分割网络模型, 将摄像数据进行图像分割和目标识别, 通过结核在图像中的占比, 估算结核空间覆盖率, 从而获得资源评估参数。模型的构建首先基于 CC 区近底光学探测摄像数据, 每隔 6s 提取一帧图像, 实际空间距离约 6 米。结合资源属性和图像特征, 根据图像质量、亮度、对比度、颜色、结核数量、结核形状等差异以及是否有再悬浮物、生物、镜头等遮盖情况, 筛选具有代表性的图像作为样本数据集, 为方便计算, 将样本数据集裁剪出 512×512 (Shao, M et al., 2023) 大小的图像作为模型训练数据集, 之后用 X-Anylabelling (Wei Wang, 2023) 对图像进行标注, 得到标注结果集。为了增大数据集, 提高模型泛化能力, 用 Augmentor 数据增强工具库对标注结果集中的图像和标签同时进行随机旋转、缩小、倾斜、水平或竖直翻转, 改变亮度、对比度、颜色等, 建立增强数据集。将增强数据集按比例 9:1:1 随机划分成训练集、验证集、测试集, 并用混淆矩阵作为图像分割模型 (Muhammad Rizwan Munawar, 2022) 的训练评价指标, 结核识别正确率达到 90%, 普通电脑运行识别计算速度 0.01 秒/帧。选择训练较好的模型对摄像视频逐帧检测, 计算图像中结核占比, 即该图像点位的结核覆盖率。将系列空间顺序排列的结核覆盖率与校正后的定位数据进行匹配, 得到整条摄像测线的结核覆盖率。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC2803600); 崂山实验室科技创新项目 (LSKJ202203602); 国家自然科学基金项目 (42276080; 41173057; 41373007)

第一作者简介: 郝越, 女, 1997 年生, 硕士研究生, 主要从事深海矿产资源评价研究。E-mail: haoyue@fio.org.cn

* 通讯作者, E-mail: yanshijuan@fio.org.cn

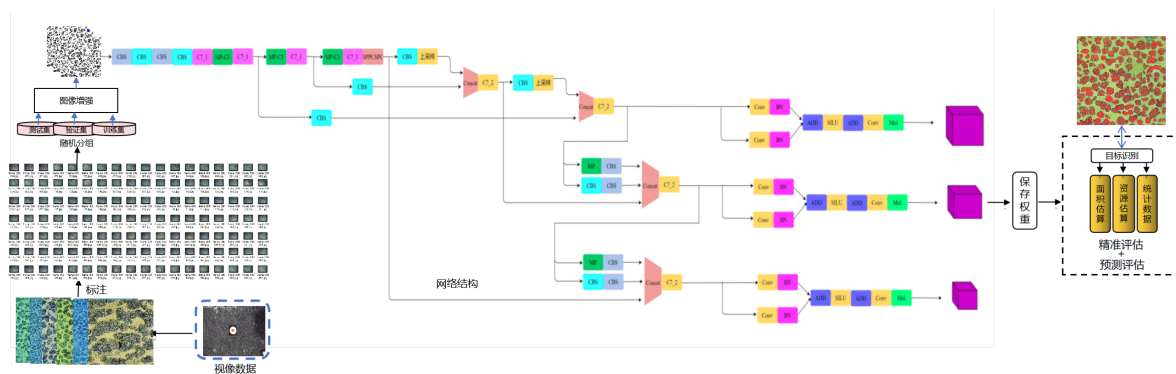


图 1 基于摄像数据的图像分割技术流程图 (YOLOv7 网络结构, 引自 Mrs.Gril,2022)

研究表明, 基于摄像数据, 构建 YOLOv7 图像分割方法, 计算多金属结核覆盖率等资源参数, 是快速且有效的。通过专业数据集的构建和算法的改进, 能够提高结核覆盖率的计算准确度并极大地提升计算效率。对连续的摄像测线数据进行识别和解译能够更准确地反映该探测区域结核分布的特点和差异性, 为多金属结核的地质连续性研究提供了解决方案, 也为资源精准评估提供了基础和手段。因此, 在深海多金属结核详细勘查中获取近底高精探测数据条件下, 引入深度学习等分析技术, 实现多金属结核的自动识别和计算, 能够为多金属结核矿区资源评价提供依据, 能够促进高精探测技术与人工智能的集成, 为开发高效、高精度、定量和自动化的结核调查技术链条提供方法思路。

参考文献:

- 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. *Ore Geology Reviews*, 2013, 51: 1-14.
- Gaziz I Z, Schoening T, Alevizos E, et al. Quantitative mapping and predictive modeling of Mn nodules' distribution from hydroacoustic and optical AUV data linked by random forests machine learning. *Biogeosciences*, 2018, 15(23): 7347-7377.
- Ellefmo S L, Kuhn T. Application of Soft Data in Nodule Resource Estimation[J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30(2): 1069-1091.
- Hari V N, Kalyan B, Chitre M, et al. Spatial modeling of deep-sea ferromanganese nodules with limited data using neural networks [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2017, 43(4): 997-1014.
- Reddy A., Juliet D. Transfer learning with ResNet-50 for malaria cell-image classification[C].2019 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSPP). IEEE. 2019: 0945-0949.
- Liu Z, Lin Y, Cao Y, et al. Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows[J]. 2021.
- Cui X., P. Yang, X. Wang, B. Ai. Y. Luo, D. Ma. Deep learning model for seabed sediment classification based on fuzzy ranging feature optimization. *Marine geology*. 2021, 432 106390.
- Chien-Yao Wang, Alexey Bochkovskiy, Hong-Yuan Mark Liao. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-art for real-time object detectors. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2022
- Shao, M.; Song, W.; Zhao, X. Polymetallic Nodule Resource Assessment of Seabed Photography Based on Denoising Diffusion Probabilistic Models. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, 11, 1494. <https://doi.org/10.3390/jmse11081494>
- Wei Wang. Advanced Auto Labeling Solution with Added Features. Github repository, 2023
- Muhammad Rizwan Munawar. YOLOv7 Training on Custom Data? Medium, 2022
- Mrs.Gril, <https://blog.csdn.net/zhangdaoliang1/article/details/125731979>, 2022

深海稀土资源勘查技术方法研究进展

黄牧, 石学法*, 毕东杰, 于淼, 李佳, 沈方宇, 刘季花, 石丰登

(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, 山东 青岛 266061;

2. 自然资源部 第一海洋研究所 山东省深海矿产资源开发重点实验室, 山东 青岛 266061)

深海稀土是最近 10 多年来在深海中发现的一种富集中-重稀土元素的新型稀土矿产资源。据估算, 其资源潜力是陆地稀土储量的数千倍, 是陆地稀土的战略潜在替代资源, 且具有“层状分布易于勘探、开发面积小、不需硬岩剥离、与多金属结核发育环境相近、放射性有害组分低”等特征, 可能与多金属结核一起, 成为最先开发的深海矿产资源之一。作为国际上首批开展深海稀土资源勘查研究并取得重大发现的国家, 我国率先在中印度洋、西太平洋、东南太平洋等国际海底区域发现了大面积富稀土沉积, 并初步划分了 4 个深海稀土成矿带。研究表明, 深海稀土富集层多发育于海底表层至以下 10 余米, 最深可达海底表层以下百余米。目前, 深海稀土资源勘查广泛采用的是沉积物岩心取样与以浅地层剖面探测为主的地球物理相结合的方法, 即利用重力柱取样器获取柱状沉积物岩心, 通过对岩心样品中的稀土元素含量、主微量元素含量、矿物组分等测试分析, 结合浅地层剖面、多波束地形等资料, 综合研究判断深海稀土的发育区域与富集层位, 并估算其资源潜力。

在沉积物岩心取样方面, 近年来, 随着国内多艘大型远洋科考船(如“向阳红 01”、“科学号”和“东方红 3”等)先后配备了 30 米贯入能力的重力活塞取样器, 并逐渐实现了长岩心取样的业务化运行(以“向阳红 01”船为代表), 在西太平洋和中印度洋等深海稀土富集区实现了多个考察航次的业务化运行, 不仅连续创造了我国在国际海底区域内沉积物岩心取样的长度新纪录(目前最长为 25.81m), 而且获取了贯穿富集层顶底边界的优质沉积物岩心样品。

在富集层连续性探测与解译方面, 在统计沉积物类型、构造环境、水深、稀土及相关元素含量、土工力学等参数的基础上, 通过测试不同类型沉积物的颜色反射率、电阻率、伽马射线、磁化率等特征对比, 探索了富集层与非富集层样品中稀土元素富集程度与物理化学特征的关系, 为有效识别深海稀土富集层位及发育边界提供了新的思路与方法。

综合应用地质学、地球化学、地球物理等方法, 总结提出了“富集特征研究与富集区预测+沉积物岩心取样验证+区域地球物理探测”相结合的深海稀土资源勘查模式, 并在勘查实践广泛应用, 为深入研究不同空间尺度的稀土元素分布规律、指导快速探寻深海稀土“品位高、分布连续、杂质少”的优质富集区, 以及深海稀土资源潜力评价等提供了可靠的技术支撑。

参考文献:

Yasuhiro Kato, Koichiro Fujinaga, Kentaro Nakamura, 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.

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.

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.

基金项目: 国家自然科学基金项目(92262304, 91858209), 中国大洋协会项目(DY135-R2-1-01, DY135-R2-1-02), 崂山实验室项目(LSKJ 202203601)。

第一作者简介: 黄牧, 男, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事深海稀土资源勘查与成矿规律研究, E-mail: huangmu@fio.org.cn。

*** 通讯作者:** 石学法, 男, 1965 年生, 研究员, 0532-88967491, E-mail: xfshi@fio.org.cn。

大洋富钴铁锰结壳中稀土元素吸附富集过程

黄朋^{1,2,3}, 胡宁静^{2,4*}, 刘季花^{2,4}, 石学法^{2,4}

(1. 中国科学院 海洋研究所 海洋地质与环境中国科学院重点实验室, 山东 青岛 266071;
2. 崂山实验室, 山东 青岛 266237; 3. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;
4. 自然资源部 第一海洋研究所 海洋地质与地球物理研究室, 山东 青岛 266061)

稀土是我国重要的战略性资源, 在国防安全、清洁能源以及信息产业等新兴、重要领域的重要性日益凸显 (Cai et al., 2023)。总体上我国稀土资源较为丰富, 但稀土元素分布模式具有“北轻南重”的特点, 即北方矿床富轻稀土, 南方富重稀土; 我国稀土矿床主要于北方。大洋环境中的稀土矿床, 如铁锰结壳 (特别是磷酸盐化部分), 重稀土相对富集 (Kato et al., 2011), 为缓解我国重稀土供给压力提供了潜在的方向。

铁锰结壳作为一种典型的海洋沉积矿产, 尽管其形成受多种成矿作用影响, 但水生成矿作用无疑是其中最为广泛、最为重要的一种成矿作用过程。然而, 受大洋铁锰沉积物成矿机制、时空分布、生成环境和保存条件影响, 开展原位成矿作用研究难度较大。吸附作用是稀土水生成矿过程的重要表现形式, 通过稀土元素吸附模拟实验, 将有助于深入了解海洋铁锰沉积 (如铁锰结壳) 的稀土水生富集成矿机制。

水羟锰矿 (δMnO_2) 是富钴结壳主要矿物相, 也是稀土元素的重要载体 (Koschinsky et al., 1997)。本次研究通过人工制备水羟锰矿, 分析其对稀土吸附的动力学特征, 以及温度、酸碱度、溶质浓度对吸附动力学过程的影响, 以期深入理解大洋铁锰结壳稀土元素的富集机制。

实验结果表明, 除 Ce 元素外, 其它稀土元素具有相似的吸附动力学特征。Ce 元素具有吸附量大、平衡时间长 (>20h) 动力学特征; 其它稀土元素则表现为平衡时间短 (<0.5h)、吸附量小的动力学特征。上述吸附动力学上的差异, 在一定程度上解释了天然铁锰沉积中 Ce 元素含量正异常现象, 以及铁锰沉积过程对海洋水体中稀土元素快速“清扫”作用。此外, 数据拟合显示, Elovich 方程能较好地表达水羟锰矿稀土元素吸附动力学行为。

水羟锰矿稀土元素 (Ce 元素除外) 具有相似的等温吸附特征。低温 (~4°C) 条件下, 溶液浓度较低时, 水羟锰矿拥有更高的稀土吸附量; 随溶液浓度进一步上升, 吸附量出现下降趋势, 其峰值出现在溶液浓度在 0.2-0.3mg/L 范围内。环境温度较高时 (~10°C), 吸附量随溶液浓度上升保持增大趋势, 未见峰值。水羟锰矿对 Ce 元素的吸附量随溶液浓度上升保持增高趋势, 对温度变化不敏感。实验条件下, Langmuir 方程可以较好的描述水羟锰矿稀土等温吸附过程。

环境酸碱度对水羟锰矿吸附的影响较为复杂。低初始浓度 (<2.5mg/L) 时, 水羟锰矿稀土吸附量随初始浓度上升而显著升高, pH 值变化对吸附平衡浓度和吸附量影响不明显。初始浓度较高 (>2.5mg/L) 时, 中性和弱碱性环境中, 水羟锰矿对稀土元素的吸附特征相似; 弱酸性环境中, 水羟锰矿稀土吸附量随初始浓度上升而升高的趋势迅速减弱。

参考文献:

- 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. *Ore Geology Reviews*, 161: 105679.
- Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K., et al. 2011. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience*, 4 (8): 535-539.
- Koschinsky A, Stascheit A, Bau M, Halbach P. 1997. Effects of phosphatization on the geochemical and mineralogical composition of marine ferromanganese crusts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61: 4079-4094.

基金项目: 中国科学院科技先导专项 (XDB42020303)

第一作者简介: 黄朋, 男, 1972 年生, 博士, 主要从事地球学研究。E-mail: huangpeng@qdio.ac.cn

* 通信作者, E-mail: huningjing@fio.org.cn

南大西洋中脊凯风核杂岩体上氯铜矿的发现及意义

李兵, 石学法*, 李传顺, 范蕾

(1. 自然资源部 第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室, 青岛 266061; 2. 山东省深海矿产资源开发重点实验室, 青岛 266061)

氯铜矿($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$)是一类只有在极度干旱的沙漠或者海底才能稳定存在的矿物。然而, 它却是现代海底热液硫化物风化剖面中的重要矿物之一(Bonatti et al.,1976; Hannington et al.,1993), 主要存在于硫化物矿体风化后形成的铁帽中。其产生大致经过如下过程:(1) 硫化物在海底被冷的海水被氧化后, 释放出大量的酸性流体,(2) 酸性流体与硫化物中高温黄铜矿发生反应, 释放出 Cu^{2+} 及 Cl 络合离子,(3) 这些离子向外迁移, 穿过铁帽并接触到海水, 最终以铜盐的形式沉淀。同时还可以以充填脉的形式发育在铁帽中。氯铜矿的沉淀, 往往代表着海底暴露硫化物水化的最后阶段。

南大西洋 23°S 附近的凯风核杂岩体, 位于洋中脊与转换断层的内角处, 是长期拆离断层活动的产物。在该核杂岩表面, 离轴大约 12km 位置处, 我们调查发现了大量的含氯铜矿的 Fe-Si 氧化物样品(图 1), 这些样品代表了铁帽的成分。一方面指示核杂岩体上该铁帽下部必然存在隐伏的硫化物矿床, 另一方面指示在离轴较远的核杂岩体上, 依然可以发生高温热液活动形成黄铜矿, 这些黄铜矿之后经历海底风化最终在铁帽子沉淀出氯铜矿。而凯风内角高地上, 如此远的离轴距离(12km)下为何仍可以发育高温热液活动? 这对于进一步理解洋中脊核杂岩体上热液成矿机制具有重要意义。

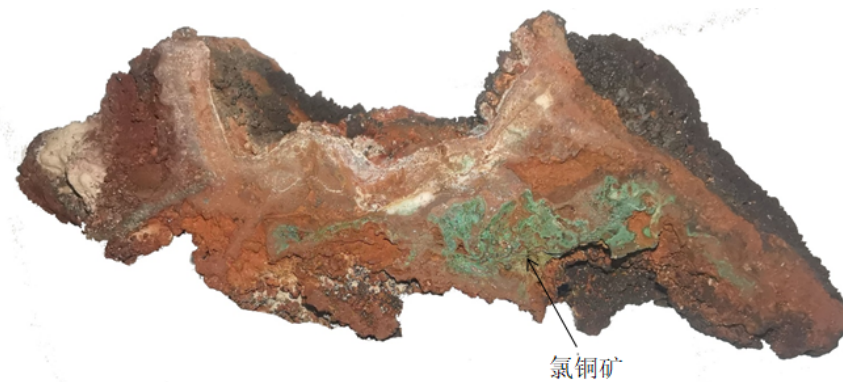


图 1 南大西洋凯风核杂岩体上含氯铜矿的铁帽样品

参考文献:

Bonatti E., Guerstein-Honnorez B. M., Honnorez J. Copper-iron sulfide mineralizations from the equatorial Mid-Atlantic Ridge. *Economic Geology*, 1976, 71(8):1515-1525.

Hannington M.D. The formation of atacamite during weathering of sulfides on the modern seafloor. *Canadian Mineralogist*, 1993, 31(4):945-956.

基金项目: 中国大洋协会“十三五”研究课题(批准号: DY135-S2-2-06)

第一作者简介: 李兵(1986-), 副研究员, 研究方向: 海底成矿作用(综合实验观测与计算模拟). E-mail: bli@fio.org.cn.

南大西洋中脊 26°S 环带黄铁矿的拉曼光谱特征及成因指示意义

刘逸凡, 付于真, 李娜

(成都理工大学, 地球科学学院, 四川, 成都 610059)

研究区位于南大西洋 26° S 脊段, 该段为典型低速-超低速生长洋脊, 呈弯曲的“S”型南北走向, 占全球洋中脊总长度的 40%。(Heezen,1968; Macdonald, 2001; Dicketal.,2003; Deveyetal.,2010)。2015 年中国大洋矿产资源研究开发协会 (COMRA) 将此热液区拟命名为淘美区。

该热液区北起 RioGrande 转换断层, 南至 Moore 断裂带, 总长约 100km (范蕾, 2020)。由于前人对于大西洋黄铁矿的标型矿物缺少详细研究, 因此本文选取大西洋 26° S 区的黄铁矿为研究对象。利用拉曼光谱检测黄铁矿的成分, 对照电子探针的研究结果用以证实拉曼光谱测试的可行性。进一步将拉曼光谱检测作为一个无损的定性鉴定仪器, 推广适用于地学矿物鉴定。

样品来源为中国大洋第 22 航次“大洋一号”科学考察船执行科考任务期间, 在南大西洋中脊 26° S 脊段所抓取的富铁块状多金属硫化物。手标本为玄武岩, 灰褐色, 具有块状构造, 斑状结构, 可见白色的长石矿物斑晶, 表面可见一层黑灰色的风化面, 推测为火山玻璃包裹在样品之上。显微镜下的矿物大部分是晶粒状黄铁矿, 具有较好的自型程度, 矿物颗粒之间为基质胶结, 颜色为浅黄色, 干净的表面和粒度极小为其矿物特征, 矿物的长度为 50 μm—200 μm。按其镜下特征进行分类可以分为自型柱状黄铁矿微晶和自形粒状黄铁矿微晶。也可以看出内核与外侧有明显的不同, 交界处有一圈明显的黑色环带, 可以明显看出其有两个世代, 电子探针结果可以很明显的看出从 Ca, Fe, S, Si 四种元素种看出明显的环带, 而 Ni 元素也有较为明显的环带, 对比之前的电子显微镜下的黄铁矿可以看出从内到外可分为两个世代。还有样品 2 的电子探针面扫。

Si, S, Fe, Ni 三个微量元素可以明显的看出黄铁矿的环带, 而黄铁矿二号样品的钙元素分布和一号相比并没有那么大的差异, 说明即使是同一块矿物的元素成分也会有所不同, 这说明了矿物形成时的条件有所差异。环带说明有不同的成矿期次, 早期生成并且成矿的黄铁矿在后期物化条件改变情况下, 发生出溶, 然后随着温度的下降, 环境中的 Fe、S 元素相互混合, 以前期出溶的黄铁矿为核心, 持续生长, 形成新的黄铁矿并包裹核心, 这也是环带的形成过程。对样品中带有明显的环带性质的黄铁矿进行拉曼面扫的结果可以看出内部与外部的结构成分是有明显差别的。对样品 1 扫描范围为 300~450cm⁻¹, 每个点打 3s, 本样品累计打了 60×60 即 3600 个点。总体耗时 8.3 个小时获得其面扫数据, 然后使用 origin 软件可对数据进行分析, 拉曼光谱线图 (图 1) 及面扫结果 (图 2) 可知, 拉曼光谱的数据产生明显差异的原因就是矿物在产出的时候外部条件的差异造成的。我们可以通过差异性以及数据之间的联系来初步判断

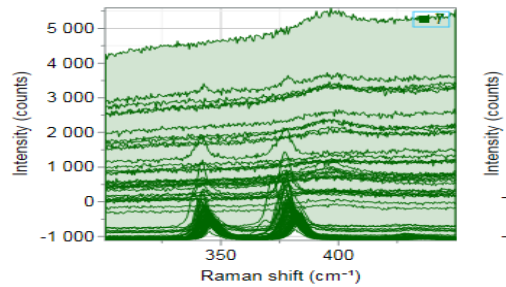


图 1 黄铁矿拉曼面扫成分图

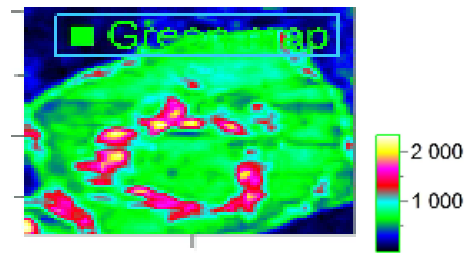


图 2 黄铁矿拉曼面扫图

其生成时,外部温压条件的相对高低。根据拉曼光谱图出的数据显示,在 $300\sim 450\text{m}^{-1}$ 范围内,本区黄铁矿的拉曼谱峰集中在 $337\sim 342\text{cm}^{-1}$ 和 $373\sim 378\text{cm}^{-1}$ 之间。差别地质位置、差异时期产出黄铁矿样品的拉曼光谱峰位移数据具有很大的相似性:环带状黄铁矿的成矿期次有明显的差异。

我们对环带内与环带外的拉曼位移进行了分析,相关峰值数据可以得出随着 Ag 位移的增加,体现的是压力的增强,本数据为四个拉曼点,分别是两个样品的环带内外各一个点,由拉曼位移可以看出样品 1 由内到外为递增,而样品 2 由内到外为递减,这表明了黄铁矿形成于两个世代。明显的可以看出相较于电子探针相似的结论,从成分与结构两个方面都可以得到相似的结果,而且拉曼光谱仪相较于电子探针时间更快,更精准,最重要的是其无损的特性。可以定性的判断矿物的结构差异。

黄铁矿于 379cm^{-1} 附近的特征拉曼数据能有效地展示黄铁矿的结晶有序度,其 FWHN(半高宽)数据与黄铁矿的结晶有序度时呈反比的。该黄铁矿 379cm^{-1} 附近峰(即 Ag 峰)的半高宽(FWHN),在 3.5cm^{-1} 附近,中心矿化区域半高宽值波动较小。对于同一种矿物,有序度反映了矿物结构和结晶状态的不同。随着有序度的不同,矿物的形成温度和形成环境也会随之发生变化。从内核黄铁矿到环带外部的矿物,FWHN 升高,晶体内部的组合向无序转变,暗示着矿物形成温度逐渐升高,而从内核到外部的黄铁矿,半高宽降低,无序不断向有序转化,暗示着结晶程度较高,矿物形成温度较低(LIU Shan-qi, LI Yong-bing, 2018)。这正好和电子探针的数据相对应,环带外部的温度低于内核。

本次研究黄铁矿整体电子探针数据可以看出,黄铁矿的环带是由于形成期次不同而形成的环带,由 Cu 与 Zn 含量可以推断出验证了外部矿物生成时温度条件是相对于内核温度低的。拉曼光谱 Ag 位移可以表示,受海水影响或矿化带附近构造作用力影响,让该地区中黄铁矿形成压力发生改变,导致矿化带拉曼位移发生了相对的变化。而 FWHN(半高宽)数据从内核到外部越来越低,黄铁矿样品结晶有序度从内核到外部呈现出升高的分布特征,即黄铁矿环带外形成的温度相比于内核逐渐降低,这和电子探针 Cu 和 Zn 含量的推断是相似的。我们团队认为拉曼光谱学研究对于黄铁矿的环带形成展示是一种有效的测试方法和研究手段,通过与电子探针面扫的结论也可以证明拉曼光谱测试方法的可行性,推广其成为一个更好的检测工具在地学中。

参考文献:

- 范蕾,王国芝,石学法,等.2020.南大西洋中脊 26°S 热液区成矿物质来源探讨.吉林大学学报(地球科学版),50(6): 1648-1659
- 李滔.中国优秀硕士学位论文全文数据库.2014.大西洋中脊 26°S 热液区多金属硫化物成矿作用分析
- 唐鑫,杨耀民,王国芝,等.2016.南大西洋 15°S 热液区玄武岩中熔融包裹体组成及意义.成都理工大学学报(自然科学版),43(3): 363-371.
- Xucyin Yuan and Haifei Zheng, In situ Raman spectroscopic studies of FeS₂ pyrite up to 675 K and 2100 MPa using a hydrothermal diamond anvil cell, Mineralogical Magazine, February 2015, Vol. 79(1), pp. 1-10
- Zhang, Y, Shao, Y.J, Zhou, X, Liu, Z.F, and Zheng, M.H., 2013, Major and trace elements characteristics of colloidal pyrites in Xinqiao Cu-S-Fe deposit, Tongling, Anhui Province, China: Chinese Journal of Nonferrous Metals, v. 23, p. 3492-3502 (in Chinese with English abs.).

我国深海矿产资源研究进展与展望

石学法^{1,2*}, 符亚洲³, 李兵^{1,2}, 黄牧^{1,2}, 任向文^{1,2},
刘季花^{1,2}, 于森^{1,2}, 李传顺^{1,2}

(1. 自然资源部 第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室, 青岛 266061; 2. 山东省深海矿产资源开发重点实验室, 青岛 266061;
3. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

深海发育有丰富的矿产、能源和生物资源, 是地球上尚未被人类充分认识和利用的最大的潜在战略资源基地。迄今已经发现的深海金属矿产主要有多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物和深海稀土, 这四类矿产资源潜力巨大, 其中的 Mn、Cu、Ni、Co、Pb、Zn、REY、PGE 等经济价值尤高。近年来我国在该领域的研究取得了重要进展。在太平洋国际海底区域申请到 2 块多金属结核勘探区、1 块富钴结壳勘探区, 在西南印度洋中脊申请到 1 块多金属硫化物勘探区。研究阐明了我国多金属结核和富钴结壳勘探区小尺度成矿规律, 揭示了其成矿作用过程及古海洋古气候记录, 探讨了关键金属元素富集机制。在西南印度洋、西北印度洋和南大西洋中脊发现了多处热液区, 阐述了其成矿作用及控制因素, 建立了超慢速扩洋中脊热液循环模型, 探讨了拆离断层型热液成矿系统的成矿机制。在太平洋和印度洋划分了 4 个深海稀土成矿带, 在中印度洋海盆、东南太平洋和西太平洋深海盆地发现了大面积富

我国今后特别需要重视深海勘查设备技术研发, 在继续加大深海矿产调查研究力度的同时, 加强深海成矿规律和成矿作用研究, 主要包括: (1) 加强多圈层相互作用对深海金属元素成矿的控制研究; (2) 聚焦深海关键金属成矿作用和分布规律研究; (3) 开展深海成矿作用模拟实验研究; (4) 开展海陆成矿作用对比研究。

基金项目: 崂山实验室科技创新项目 (批准号: LSKJ202203600) 和国家自然科学基金项目 (批准号: 91858209)

第一作者简介: 石学法 (1965-), 研究员, 研究方向: 海洋沉积学、海底成矿作用. E-mail: xfshi@fio.org.cn.

海洋多类型水合物探测技术体系创新及应用

孙治雷^{*}, 孙运宝, 张喜林, 曹红, 耿威, 翟滨, 徐翠玲,
张栋, 陈焘, 徐思南

(1. 自然资源部 天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局 青岛海洋地质研究所, 青岛 266237;
2. 崂山实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237)

瞄准我国天然气水合物产业化的重大需要, 以地球物理技术手段为核心, 创新搭建一整套面向海洋多种赋存类型的天然气水合物探测与评价技术体系, 并在我国重点海域调查区开展了有效应用。通过识别中深层地球物理异常和浅表层的冷泉活动异常, 圈定一系列成矿区带, 对水合物储层进行了精细描述, 研究了本区多类型水合物的成藏模式, 并分类评价了渗漏型和扩散型的资源量, 有效支撑了我国海洋水合物产业化后备先导区的建设。

基金项目: 国家自然科学基金“海洋甲烷拦截带对冷泉流体的消耗研究:来自南海东沙海域的观测与研究”(42176057); 崂山实验室科技创新项目课题“适于海底水合物资源探测的爬行车作业平台研制”(LSKJ202203504); 国家地质调查专项“CSHC 中北部海洋区域地质调查”(DD20230402)

第一作者简介: 孙治雷, 男, 1975 年生, 博士, 研究员, 主要从事深海矿产资源勘探评价及探测技术研发工作。

*通讯作者: E-mail: zhileisun@yeah.net

中印度洋海盆富稀土沉积物成矿机制研究

于淼, 石学法*, 黄牧, 毕东杰, 石丰登, 李佳, 沈芳宇, 王樱静, 张兴超,
胡倩男, 孙懿, 陈忠保

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 崂山实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061;
3. 山东省深海矿产资源开发重点实验室, 山东 青岛 266061)

稀土元素是一种广泛应用于新兴高科技领域以及传统领域的关键矿产资源。我国是稀土资源大国, 拥有开采、冶炼和应用的全产业链。近年来, 在大洋深海盆地中发现一种新型潜在的海底稀土资源—深海富稀土沉积物 (REY-rich deep-sea sediments)。深海富稀土沉积物的富含中重稀土和资源潜力巨大等特征引起了国内外学者的广泛关注 (Kato et al, 2011; 石学法等, 2015)。目前的研究发现, 在全球深海大洋中主要发育有西太平洋、中-东太平洋、东南太平洋和中印度洋四个深海稀土成矿带。2015 年我国调查团队首次在中印度洋海盆发现了大面积深海富稀土沉积物并开展了系统取样, 为我国开辟了稀土资源的新领域。

测试分析显示, 中印度洋海盆富稀土沉积物类型主要为沸石粘土和远洋粘土, 其稀土含量为 736.3-1731 ppm, 主要表现为富集中-重稀土和负 Ce 异常。整体上, 中印度洋沉积物稀土含量由南向北逐渐降低, 富稀土沉积埋藏较浅且向北逐渐加深沉积物元素相关分析显示, 富稀土沉积物中, 稀土元素和 P、Fe、Mn 和 Co 元素呈明显的正相关关系。再结合涂片、X 射线衍射及稀土配分模式的分析结果, 可确定磷灰石是研究区沉积物中稀土元素主要赋存矿物, 其次为铁锰微结核。

综合研究显示, 富稀土沉积主要是其内的生物磷灰石在海水-沉积物界面处从海水中捕获稀土, 少量的铁锰微结核在形成时直接从海水中吸收稀土元素。然而, 无论是磷灰石还是铁锰微结核, 其从海水中富集稀土的过程都极其缓慢, 因此低沉积速率是沉积物中稀土元素富集的关键因素。低沉积速率需要满足低于碳酸盐补偿深度 (CCD) 的海深、低表层生产力和低陆源碎屑输入三个条件就成为指示富稀土沉积的必要条件。在此基础上, 较强的南极底流 (AABW) 活动也有利于沉积物中稀土元素的富集。

参考文献:

Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K., et al., Nat. Geosci. 2011, 4, 535-539.

石学法, 李传顺, 黄牧, 等. 国际海域资源调查与开发“十二五”课题研究报告“世界大洋海底稀土资源潜力评估”. 2015.

基金项目: 国家自然科学基金基目 (批准号: 42372116, 42106085, 42249301, 92262304, 91858209)

第一作者简介: 于淼, 男, 1986 年生, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: myu@fio.org.cn

* 通信作者, E-mail: xfshi@fio.org.cn

特里斯坦地幔柱与南大西洋中脊系统 相互作用研究

张海桃^{*}, 李传顺, 关义立

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东青岛, 266061;
2. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东青岛, 266590)

板内热点与洋中脊分别作为地幔柱与板块构造的产物, 开展二者之间的相互作用研究将为揭示地球深部物质组成与动力学机制提供重要线索 (Zhang et al., 2023)。自晚侏罗纪至白垩纪早期以来, 伴随着西冈瓦纳古陆的裂解, 南大西洋自南向北逐渐打开, 形成了目前南美洲与非洲大陆之间的现代海陆分布格局。在冈瓦纳裂解和南大西洋打开的过程中, 该地区诸多位置相对固定的著名板内热点, 如阿森松、圣赫勒拿与特里斯坦热点等, 与南大西洋中脊系统发生了复杂的洋中脊与地幔柱相互作用 (Zhang et al., 2021)。

玄武岩作为深部地幔物质熔融的直接产物, 是认识深部地幔过程的“探针”, 可为揭示南大西洋中脊与地幔柱热点相互作用过程及南大西洋的构造演化历史提供直接的依据 (Zhang et al., 2020)。本研究对南大西洋中脊 25.3–27.7°S 地区玄武岩开展主、微量元素地球化学与 Sr-Nd-Pb 放射性成因同位素组成测试分析。岩浆演化分离结晶模拟结果显示: 南大西洋中脊 27.1°S 与 27.7°S 脊段地区的玄武质岩浆经历了橄榄石、斜长石与单斜辉石分异结晶作用; 而在 25.3°S 脊段地区的岩浆主要经历橄榄石和斜长石分异结晶作用。同时, 全岩组分中 Ce/Yb、(Tb/Yb)_N 与 Fe/Mn 比值特征指示研究区内的地幔源区岩相主要由尖晶石二辉橄榄岩组成。Mg# 数值与 TiO₂、Ba 含量和 Zr/Nb 比值之间的线性相关性指示研究区内的原始地幔熔体组分具有相似的地球化学组成与部分熔融程度。研究区玄武岩中的 Sr-Nd-Pb 同位素组成与经过分异结晶修正后的 Ba 含量、Zr/Nb 与 (La/Sm)_N 比值, 在沿南大西洋中脊 20–40°S 脊段轴部地区的变化特征指示特里斯坦地幔柱物质存在于南大西洋中脊软流圈地幔, 并且自特里斯坦附近的 35°S 脊段至北部的 25.3–27.7°S 脊段, 洋中脊下伏软流圈地幔中所含的特里斯坦地幔柱物质含量逐渐减少。进一步, 研究开展 Sr-Nd-Pb 同位素与分异结晶修正后的 Ba 含量与 (La/Sm)_N 比值之间的端元混合模拟计算, 结果指示南大西洋中脊 20–40°S 脊段地区下伏地幔源区组分不均一性的成因受控于特里斯坦地幔柱物质对亏损地幔源区不同比例的混染程度。目前特里斯坦地幔柱相关物质残留在南大西洋中脊 20–40°S 地区下伏软流圈地幔的比例小于 10%, 并且沿洋脊轴部自南向北逐渐减少。

研究进一步结合南大西洋的形成演化历史、特里斯坦地幔柱与南大西洋中脊系统之间的相互作用过程, 指出南大西洋中脊 25.3–27.7°S 地区玄武岩系统性的地球化学组成变化规律是特里斯坦地幔柱相关物质存在于南大西洋中脊系统南部地区软流圈地幔中的结果 (Li et al., 2023)。

参考文献:

- Li C.H., Zhang H.T., Guan Y.L., Zhu A.M., Shi X.F., 2023. South Mid-Atlantic Ridge 25.3–27.7°S segment basalts: Implications for entrainment of the Tristan plume material in the mid-ocean ridge system. *Chemical Geology*. 640, 121743.
- Zhang, H.T., Shi, X.F., Li, C.S., Yan, Q.S., et al., 2020. Petrology and geochemistry of South Mid-Atlantic Ridge (19°S) lava flows: implications for magmatic processes and possible plume-ridge interactions. *Geosci. Front.* 11, 1953–1973. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.06.007>.
- Zhang, H.T., Yan, Q.S., Li, C.S., Shi, X.F., et al., 2021. Tracing material contributions from Saint Helena plume to the South Mid-Atlantic ridge system. *Earth Planet. Sci. Lett.* 572, 117130. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117130>.
- Zhang, H.T., Yan, Q.S., Li, C.S., Shi, X.F., 2023. The involvement of deep plume-related materials in the South Atlantic Ocean asthenosphere as indicated by isotopic independent component analysis of basalts. *Int. J. Earth Sci.* 112, 1293–1309.

基金项目: 本文为国家自然科学基金项目 (编号 42276078)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金 (编号 2022Q04)。

第一作者简介: 张海桃, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事海底岩石学与多金属硫化物研究。

^{*} 通讯作者, E-mail: zht@fio.org.cn

中印度洋洋盆富稀土深海沉积物 Te 的赋存特征及物源指示

张霄宇^{1*}, 卢艳芳¹, 徐智杰¹, 朱孔阳¹, 于淼², 石学法²

(1. 浙江大学 地球科学学院, 浙江 杭州 310058;

2. 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)

中印度洋洋盆和沃顿海盆是目前已经探明的全球四大深海富稀土成矿带之一, 在中印度洋洋盆发现的富集稀土深海沉积物中稀土元素和钇的含量 (Rare Earth Elements and Yttrium, REY) 最高可达 2000×10^{-6} , 与中-东太平洋富稀土成矿带中稀土元素含量相当。目前关于富稀土深海沉积物中稀土元素的赋存矿物和形态、物质来源、富集机制、以及年代学特征等方面都有了广泛深入的研究, 为开展富稀土深海矿产资源勘探和评价提供了理论支持。

越来越多的研究表明, 富稀土深海沉积物中稀土元素并不是最富集的元素, 富集程度最高的元素是 Te, Te 也是一种重要的战略资源, 是太阳能电池 TeCd 的主要原材料。但是目前有关 Te 在深海沉积物中富集机制和赋存矿物和形态等尚不清楚, 有鉴于此, 本次研究对采集自中印度洋洋盆的 3 根富稀土深海沉积物岩心进行系统研究, 对富稀土深海沉积物中 Te 的富集程度、赋存矿物和贡献量, 以及可能的物质来源等进行了探讨。

考虑到中印度洋洋盆富稀土深海沉积物的粒径极微, 因此, 本次研究提出了全样主微量元素分析、TIMA 矿物面扫, 并对大于 $100 \mu\text{m}$ 以上的矿物颗粒采用 LA-ICP-MS 技术进行了单矿物原位检测的工作流程。结果表明, 富稀土深海沉积物中 Te 的最高富集系数达 650 (以上大陆地壳 UCC 的 Te 元素克拉克值为参考)。沉积物中广泛发育的斜发沸石-K 和大隅石被认为是 Te 主要的寄主矿物, 由此将 Te 的来源与火山成因物质和陆源岩石的风化产物联系起来。进一步采用元素间相关性、聚类分析和因子分析表明了沉积物中存在着热液成因物质, 因此, 我们提出了 Te 主要来源于海底火山热液活动的假设, 这些活动与中新世晚期的局部板内火山活动密切相关。然而, 由于这些沉积物中大量存在检测不到的纳米级矿物, 铁锰氧化物和 Te 粘土矿物的贡献需要更多的研究。

本研究首次尝试对不同矿物中的 Te 进行量化, 揭示其在深海沉积物中的地球化学行为, 这将有助于了解深海 Te 的储集和循环, 以及富 REY 深海沉积物的综合利用。

参考文献:

- 石学法, 毕东杰, 黄牧, 于淼, 罗一鸣, 周天成, 张兆祺, 刘季花. 深海稀土分布规律与成矿作用[J]. 地质通报, 2021, 40(2/3):195.
卢艳芳, 张霄宇*, 朱孔阳, 王静雅, 于淼, 黄牧, 石学法. 中印度洋洋盆岩心沉积物中稀土元素赋存特征[J/OL]. 中国稀土学报:1-22[2022-06-19].
Hein, J.R., Koschinsky, A., Halliday, A.N., 2003. Global occurrence of tellurium-rich ferromanganese crusts and a model for the enrichment of tellurium. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 67 (6), 1117-1127..

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 41173057; 41373007)

第一作者简介: 张霄宇, 女, 1972 年生, 博士, 主要从事海洋沉积地球化学研究。

* 通讯作者, E-mail: zhang_xiaoyu@zju.edu.cn