

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

洋中脊拆离断层面上沉积-火山碎屑岩盖层对热液硫化物矿化的制约: 以赤狐热液区为例

李兵¹, 李传顺^{1*}

1. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

沉积物覆盖型热液区是海底成矿系统的特殊类型, 主要分布于大陆边缘洋脊及裂谷带, 其高沉积速率环境通过沉积物盖层的物理屏障和化学缓冲作用形成独特成矿机制。相较于裸露洋中脊, 这类系统因盖层阻隔热液垂向扩散并促进流体-海水混合, 通过温度-氧化还原梯度调控硫化物富集 (如 Middle Valley 黄铁矿矿床), 且常伴随有机质或微生物参与的硫酸盐还原过程。虽然“半渗透界面模型”已阐释厚层沉积物盖层对成矿物质保存的强化作用 (如硫化物规模显著增大), 但广泛发育在洋中脊离轴热液区的薄层混合盖层 (沉积物-岩石角砾) 的控矿作用可能

被忽视。值得注意的是, 南大西洋赤狐热液区作为拆离断层发育的慢速扩张洋脊案例, 其断层面上覆盖的薄层沉积-蚀变角砾层导致热液流体侧向迁移并形成广泛分布的角砾状硫化物和网脉矿化, 这为揭示薄层盖层通过物理阻隔与化学缓冲双重作用影响成矿过程提供了关键研究载体, 尤其对理解贫沉积物洋中脊 (如大西洋中脊) 中特殊盖层类型的成矿机制具有重要意义。

关键词: 沉积物覆盖型热液区; 半渗透界面模型; 拆离断层; 赤狐热液区

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

南大西洋中脊热液硫化物成矿作用研究

党院^{1,2*}, 李传顺^{1,2}, 石学法^{1,2}

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

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, 大西洋中脊属于典型的慢速扩张洋中脊。相比于研究成熟的北大西洋中脊, 南大西洋近年来新发现了多个热液区, 但其成矿作用研究相对薄弱。允臧热液区 (25.3° S) 是我国在南大西洋中脊新发现的一个热液区。通过对该热液区采集的硫化物样品进行了系统的矿物学、岩相学、地球化学等研究。基于矿物形态、结构、结晶程度、矿物组合及分带等, 可将硫化物烟囱体的生长过程分为五个阶段, 包括低温阶段(主要形成胶状—他形白铁矿)、中温阶段(半自形—自形黄铁矿和闪锌矿)、高温阶段(等轴古巴矿)、高温至中温阶段(黄铜矿)以及低温风化蚀变阶段(铁的氧化物和氢氧化物和次生铜矿物)。从低温—中温阶段到高温—中高温阶段硫化物的形态学和结晶程度变化特征指示成矿条件的演化。开始以大量海水

的混入形成低温-不稳定的环境, 随后逐渐演化成高温稳定的成矿流体环境。允臧热液区硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 呈正值, 通过二端元混合模型计算, 表明硫化物烟囱体和块状硫化物的硫 79%~92%和 69%~79%来自玄武岩的淋滤, 其余来自海水硫酸盐的还原。而块状硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (3.5‰~6.8‰, 平均为 5.1‰±0.9‰) 明显高于硫化物烟囱体 (1.1‰~4.5‰, 平均为 2.8‰±0.8‰), 推测其主要有海底早其形成的硫酸盐与循环的流体相互作用导致的。从硫化物烟囱体的边缘至内部通道其 $\delta^{34}\text{S}$ 呈现明显的上升趋势, 表明允臧热液区硫化物烟囱体的成熟度相对较低, 且热液活动持续较短。该研究结果有助于理解海底热液活动的成矿作用。

关键词: 硫同位素; 硫化物烟囱体; 烟囱体成熟度; 允臧热液区; 南大西洋中脊

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

岩石成因颗粒对大洋锌循环的潜在影响

张兴超¹, 石学法^{1*}, 毕东杰¹, 沈芳宇¹, 黄牧¹, 于森¹, 朱爱美¹, 罗翠华²,
位荀¹, 黄方², 刘季花¹

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. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026

远洋深海沉积物是海洋 Zn 循环中重要的汇, 具有较大资源潜力。尽管岩石成因颗粒是远洋沉积物的主要组分, 其对 Zn 在沉积和埋藏过程中的影响尚未完全明晰。本研究对西太平洋两个受不同程度沙尘与火山物质输入影响的沉积物柱状样开展 Zn 同位素研究, 并通过淋滤实验揭示活性组分与硅酸盐组分的组成特征。综合周边沉积物的文献数据显示, 火山物质的输入和蚀变可促进自生硅酸盐的形成并优先富集轻 Zn 同位素, 这一过程最高可贡献沉积物中约 25% 的自生 Zn。同时, Zn 和 Mn 在全岩样品和活性组分中的较好正相关性, 指示铁锰氢氧化物是自生 Zn 的主要载体。特别的, 受到较高沙尘输入影响的 GC02

沉积柱表现出 Zn 相对于 Mn 更显著的累积, 使得活性组分的 Mn/Zn 和 $\delta^{66}\text{Zn}$ 均较低。而 GC06 沉积柱整体沙尘累积速率较低, 活性组分的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 和 Mn/Zn 最高分别可达 0.57‰ 和 180, 接近铁锰结核和结壳组成。结果表明岩石成因颗粒的沉积和蚀变过程能够显著扰动大洋 Zn 循环, 并优先从海水中移除轻 Zn 同位素。该机制对解释海水高 $\delta^{66}\text{Zn}$ 特征以及认识海洋微量金属的迁移行为有重要意义。同时, 本研究通过淋滤实验定义的沉积物活性组分的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 可有效示踪(古)海洋 Zn 循环变化。

关键词: 深海沉积物; 锌同位素; 岩石成因颗粒

第一作者简介: 张兴超 (1994-), 博士后, 研究方向: 同位素地球化学. Email: zhangxc1994@fio.org.cn

通信作者简介:

石学法 (1965-), 研究员, 研究方向: 海洋沉积学. Email: xuefashi@fio.org.cn

黄方 (1978-), 教授, 研究方向: 同位素地球化学. Email: fhuang@ustc.edu.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

欧亚北极陆架沉积有机碳源汇过程及其 对汞沉积归宿的约束

杜佳宗¹, 胡利民^{1*}, 姚政权², 刘喜停¹, 孙一方¹, 杨刚², Kirill Aksentov³,
Yuriy Vasilenko³, Alexander Bosin³, Anatolii Astakhov³, 石学法²

1. 中国海洋大学, 山东青岛 266100;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061;

3. 俄罗斯科学院远东分院太平洋海洋研究所, 符拉迪沃斯托克市 690041

北极冻土是巨大的碳库和汞库, 在全球变暖背景下, 冻土的快速融化导致陆源冻土有机碳和汞加速释放并迁移入海, 使得北极地区有机碳的源汇过程具有不可估量的气候效应, 且碳-汞的耦合循环还具有重要的环境意义。本研究选取了欧亚北极边缘海(拉普捷夫海、东西伯利亚海和楚科奇海)的表层沉积物样品, 分析了有机碳来源与降解特征以及汞分布的空间异质性。随后选取了两个典型断面进行汞含量与沉积特征和有机参数之间的相关性分析, 分析河流和海岸侵蚀两种输入方式下有机碳对汞吸附的差异性以及跨陆架输运过程中有机碳来源变化对汞沉积的影响。结果表明河流和海岸侵蚀影响区域有机碳陆源信号明显, 随着离岸距离的增加, 陆源有机碳降解增强, 而且初级生产力的增加导致海源有机碳信号增强。但河流和海岸侵蚀影响区域汞与有机碳结合关系表现出很大差异, 河流输入的有机碳和汞含量在跨陆架输运过程中具有很好的对应关系, 且相关性显著; 海岸侵蚀区域汞与有机碳含量不相关, 但和有机碳来源特征($\delta^{13}\text{C}$ 和 TOC/TON)相关性更显著。这种差异性

与物源和输入方式有关, 河流输入的陆源物质主要源于表层冻土, 其中有机碳对汞的富集起到重要作用, 而且河流长时间尺度的输运过程会提高了冻土有机碳对汞的捕获, 因此汞与有机碳以复合物形式入海并输运, 且这种复合物对汞沉积的贡献不受陆源有机碳降解和/或海源有机碳添加的影响。海岸侵蚀主要释放富冰冻土, 其中有机碳对汞的富集不明显, 而且陆源物质的快速入海没有经过长距离输运的改造, 但在跨陆架输运过程中, 高生产力区域的海源有机碳因活性官能团对有机碳的吸附, 能捕获并促进汞沉积。然而, 高生产力的楚科奇海虽然埋藏了大量海源有机碳, 但汞的含量却十分低, 这表明该海区陆源输入的缺失使生物清除作用无法有效促进汞的沉积。该研究不仅为准确评估北极陆架有机碳和汞的源汇过程和埋藏保存奠定了基础, 更在揭示有机碳与汞归宿之间耦合关系方面具有重要意义。

关键词: 汞; 有机碳; 陆源输入方式; 初级生产力; 东西伯利亚陆架

基金项目: 国家自然科学基金项目(42306064)

第一作者简介: 杜佳宗(1992-), 副教授, 研究方向: 海洋沉积与矿物学研究. E-mail: dujiazong@ouc.edu.cn

*通信作者简介: 胡利民(1983-), 教授, 研究方向: 海洋沉积与地球化学研究. E-mail: hulimin@ouc.edu.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

洋脊-地幔柱相互作用导致 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 峰值与地幔柱中心解耦

郭鹏远^{1*}

1. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071

Easter-Salas y Gomez 海山链是由 Easter 地幔柱产生的。前人报道过邻近的东太平洋隆起存在高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (11.7 R_A) 的熔岩, 但截止到目前并未有 Easter 海山链 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 数据的报道。我们对 Easter 海山玄武岩玻璃进行了系统的 He 同位素分析测试。研究结果显示, Easter 海山链 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 峰值 (18-19 R_A) 在 Easter 岛周围的海山 (110° W), 与根据不相容元素和放射性同位素推断的地幔柱中心 (106° W) 偏移了 300~400 km。由于靠近地幔柱中心 (具有厚的岩石圈) 的熔体表现出类似 MORB 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值, 而高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 熔岩喷发在岩石圈较薄的近洋脊区域, 因此我们推测高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 组分比低 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 组分具有更高的固相线, 其成分更亏损, 物理上更难熔。由于洋脊-地幔柱相

互作用, 地幔柱物质会向洋脊之下流动从而发生减压熔融。随着减压熔融的进行, 富集的组分逐渐被熔融、抽离, 而越来越多亏损且难熔的组分参与到熔融过程, 最终产生了空间上从地幔柱到洋脊逐渐降低的 $[\text{La}/\text{Sm}]_N$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 逐渐升高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的岩浆。因此, 我们认为洋脊-地幔柱相互作用是 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 峰值在空间上与地幔柱中心解耦的原因。类似的例子还包括冰岛地幔柱与 Reykjanes 洋脊相互作用, Amsterdam-St. Paul 地幔柱与东南印度脊的相互作用。

关键词: 洋脊-地幔柱相互作用; He 同位素; 大洋玄武岩; 海山链

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

过去 200 ka NPIW 与亚热带西太平洋氧化还原状况演化的耦合关系：钼同位素证据

窦衍光^{1*}, 杨守业², 石学法³, 张勇¹

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266237;

2. 同济大学, 上海 200092;

3. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266073

通过生物生产力和海洋大气 CO₂ 交换, 北太平洋中层通风有可能在冰期时间尺度上调节区域气候变化。然而, 亚热带西太平洋目前缺乏连续的长尺度氧化还原记录, 因此, 目前无法评估这一过程。在这种情况下, 我们提供了来自冲绳海槽沉积物的 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 和氧化还原敏感微量元素数据, 以重建氧化还原条件, 并评估其在过去 200 ka 调节亚热带西太平洋大气 CO₂ 的可能。在海洋同位素 1 期 (MIS1), 黑潮增强引发的氧化增强表明冲绳海槽深水通风和上升流加强, 这可能导致间冰期大气 CO₂ 浓度升高。由于冰期北太平洋中层水 (GNPIW) 和微弱的黑潮,

冲绳海槽在 MIS2 和 MIS6 期间可能处于氧化状态, 并成为区域净碳汇。在间冰期, 东亚夏季风 (EASM) 增强带来的高生产力导致有机物埋藏和耗氧量增加。在 MIS4 和早期 MIS3 期间, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值的显著正偏移可能与甲烷的厌氧氧化 (AOM) 和甲烷水合物分解释放的富甲烷流体有关。我们的发现强调了晚第四纪亚热带北太平洋上升流、GNPIW 扩张和调节大气 CO₂ 收支的潜在过程之间的潜在联系。

关键词: 氧化还原; $\delta^{98/95}\text{Mo}$; NPIW; 耦合关系; 亚热带西太平洋

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

阿曼蛇绿岩壳幔转换带的 Mg 同位素及其 洋中脊深部热液循环示踪

周志宇¹, 张超^{1*}

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069

阿曼蛇绿岩带 Wadi Wariyah 地区的层状辉长岩被一系列复杂的岩脉穿插, 记录了快速扩张洋中脊的壳幔转换带在较宽温度范围内的流体-岩石相互作用, 这已被前期研究的含水蚀变证据和 Sr-O 同位素特征所证实。本项工作对这些样品 Mg (-Fe) 同位素开展研究, 为流体的性质和来源提供了新的制约。广泛的热液活动导致了选择性元素贫化和富集以及 Fe-Mg 同位素分馏的显著差异。Mg 同位素的数据显示, 层状辉长岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.23‰ ~ -0.34‰ , 辉长岩脉的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.28‰ ~ -0.43‰ , 富角闪石脉的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.22‰ ~ -0.35‰ , 富绿帘石脉的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.51‰ ~ -0.58‰ , 富葡萄石脉的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.27‰ ~ -0.28‰ , 蚀变晕的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.29‰ ~ -0.57‰ , 变辉长岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 约为 -0.27‰ 。总体蚀变洋壳的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.21‰ ~ -0.57‰ , 位于新

鲜洋中脊玄武岩和海水 $\delta^{26}\text{Mg}$ 范围之间。层状辉长岩、变辉长岩和富葡萄石脉 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围与新鲜洋中脊玄武岩基本一致, 而辉长岩脉、富角闪石脉、富绿帘石脉以及变质晕 $\delta^{26}\text{Mg}$ 发生较大分馏, 且富集轻 Mg 同位素。富葡萄石脉 Mg 同位素未发生分馏, 解释为低温反应下的长石蚀变。富绿帘石脉 Mg 同位素发生较大程度的分馏, 指示为海水衍生流体的强烈交换导致重 Mg 同位素丢失。部分蚀变晕中绿帘石具有与富绿帘石脉相似的组分, 其 Mg 同位素组成也与富绿帘石脉相似。本项研究表明, 海水衍生流体能够深入至壳幔转换带附近, 并在较宽的温度范围 ($250\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) 触发不同程度的热液蚀变和元素交换, 导致 Mg 同位素的显著变化。

关键词: 阿曼蛇绿岩; 壳幔转化带; Mg 同位素; 热液循环

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41972055)

第一作者简介: 周志宇 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石学、矿物学、矿床学. E-mail: zhouzhiyu0519@outlook.com.

通信作者简介: 张超 (1982-), 教授, 研究方向: 岩浆过程与高温高压实验模拟. E-mail: zhangchao@nwu.edu.cn.

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

悬浮泥沙形貌特征初步研究及其应用潜力

陈坚^{1*}

1. 自然资源部第三海洋研究所 海洋与海岸地质研究室, 福建厦门 361005

以钱塘江和长江南京段枯水期悬浮泥沙为例, 通过 6000 多个悬浮颗粒形貌图像分析, 在边缘识别的基础上初步讨论了周长、圆度和短长轴比等参数在描述颗粒形貌方面的作用。统计分类结果显示, 周长、圆度和短长轴比能够比较有效地刻画悬浮颗粒的形貌特征。钱塘江河口悬沙颗粒的圆度介于长江和钱塘江非河口段之间, 且更接近长江, 表明钱塘江口悬沙颗粒受到长江沿岸流输入的强烈影响。钱塘江下游非河口段与长江南京段悬浮泥沙形貌特征具有较大的差别, 钱塘江颗粒尺寸总体上大于长江, 与钱塘江具有较强的水流有关; 尽管长江片状颗粒中硬度较大的高岭石

含量较高, 但其磨圆的程度总体上仍强于钱塘江, 与长江悬沙经历了较长的搬运时间有关。泥沙颗粒的形貌特征不仅取决于组成矿物的种类、比例及其化学风化程度, 还与经历的搬运输送过程有关。相对于泥沙颗粒的大小, 形貌特征在追溯沉积物的来源和形成环境时可起到更好的作用。从初步研究的结果看, 泥沙形貌特征不仅可用于泥沙物源的解析, 还在近海和深海古气候古环境研究、海底火山颗粒识别, 乃至微塑料方面也可能发挥作用, 具有比较广泛的应用前景。

关键词: 悬浮泥沙; 形貌特征; 长江; 钱塘江

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

边缘海海绿石化作用与关键元素循环

王凤梅¹, 窦衍光^{2*}, 梅西², 张勇², 陈晓辉²

1. 中国地质科学院, 北京 100037;
2. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266237

海绿石是形成于海水-沉积物界面、具有二八面体层状结构的自生铝硅酸盐矿物, 广泛发育于全球大陆边缘浅海环境, 其形成过程消耗 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 等阳离子和碱度, 是反风化作用的直接产物。海底反风化作用是生物硅结合可溶性阳离子生成自生粘土矿物的过程, 其作为调控大气 CO_2 和关键元素循环的重要机制近年来受到广泛关注, 然而, 反风化自生粘土矿物一般结晶较差或为无定形碎屑等化学相变致使对其进行直接观测研究极具挑战性, 这进一步限制了海底反风化过程的深入研究和进展。相较于其他自生粘土矿物, 海洋自生海绿石通过底层孔隙中的自形雏晶自生增大并伴随蚀变和交代而在海水-沉积物界面逐渐形成易分离的球

粒, 是进行反风化研究的良好载体。一直以来, 海绿石作为重要的海相指相矿物广泛应用于宏观尺度的层序地层分析、测定绝对年龄及揭示长时间尺度的海平面变化等研究, 而对其在反风化过程中 REEs 及 Fe、K 等关键元素迁移机制、同位素分馏规律以及如何参与全球关键元素地球化学循环等方面仍未有清晰认识, 亟需对海洋自生粘土矿物成因及其环境指示进行深入研究, 以此推动理解全球海洋不同时空尺度上的反风化作用过程、机制及其对全球海洋关键元素循环的贡献。

关键词: 海绿石; 自生粘土矿物; 反风化; 关键元素循环; 碳循环

基金项目: 国家自然科学基金 (42276084); MIS6 期以来东海外陆架-冲绳海槽沉积汇周期性转换过程与机制研究。

作者简介: 王凤梅 (1996-), 女, 博士研究生, 研究方向: 第四纪地质学。E-mail: 2834379218@qq.com

*通信作者: 窦衍光 (1979-), 男, 研究员, 研究方向: 海洋沉积地球化学研究。E-mail: douyangaung@gmail.com

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

非稳态沉积环境下铁氧化还原调控微量元素循环机制

周哲^{1*}, 李江涛¹, 杨守业¹

1. 同济大学, 上海 200092

海洋表层沉积物在物理或生物扰动下会经历频繁的氧化还原条件的转化, 改变铁、锰等氧化还原敏感元素的生物地球化学循环, 同时潜在影响其结合的微量元素的归趋。本研究选取了非稳态沉积环境广泛发育的陆架边缘海表层沉积物, 利用沉积物培养实验及过流式时间分辨分析技术 (FT-TRA), 探究非稳态早期成岩作用下稀土元素 (REEs) 和重金属在高活性铁、锰相态间的分布特征。结果表明, 铁与稀土元素 (REEs)、Cr、Co 和 Li 的释放模式呈现强相关性, 而 Mn 与 Ni 的释放表现出较强的相关性。此外, 轻稀土元素 (LREEs) 在活性更高的无定型铁氧化物 (如水铁矿) 中富集, 这可能是由于

LREEs 对这类矿物具有较高的吸附亲和力。非稳态沉积环境频繁的氧化还原变化强化了铁在微量元素的结合和分馏过程中的作用, 主要归因于其迅速的再氧化-沉淀特性及更高的丰度。我们认为, 与极高活性铁结合的微量元素具有较高的移动性, 在氧化还原条件振荡过程中可被重新释放。铁作为这种“氧化还原泵”的主要开关, 调控了部分微量元素在沉积物-水界面的通量, 进而影响了沉积物对海洋微量元素的贡献。

关键词: 海洋沉积物; 铁早期成岩; 氧化还原循环; 微量元素

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42230410; 42306052)

第一及通讯作者简介: 周哲 (1991-), 研究员, 研究方向: 沉积生物地球化学. Email: zhezhou_research@tongji.edu.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

菲律宾海板块内的四国海盆 EMI 组分的来源

袁龙¹, 鄢全树^{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, 山东青岛 266061;
2. 山东省深海矿产资源开发重点实验室(筹), 山东青岛 266061

俯冲带是地球最重要的板块边界之一, 对研究地球内部物质循环、陆壳形成以及地震形成机制至关重要。西太平洋区域集中分布了大量的弧后盆地, 这些弧后盆地内存在一系列的板内岩浆活动, 例如西菲律宾海盆、四国海盆和南海等区域内广泛分布有板内岩浆活动。然而, 关于板内火山活动对弧后盆地的形成和演化的影响的研究还较为欠缺, 需要进一步研究。本次研究以深海钻探计划相关航次在四国海盆及南侧的帕里西维拉海盆获取到的基底火山岩样品为研究对象, 对其进行了详细的岩石地球化学研究。结果表明四国海盆遗迹扩张中心轴旁的 444 站位的基底熔岩为板内熔岩, 类似于

Kinan 海山链熔岩, 且四国海盆扩张中心期间的岩浆过程受到了 EMI 组分的影响。模拟计算表明, 四国海盆 EMI 组分很可能来源于日本海之下的富集地幔组分, 该 EMI 组分可能通过地幔环流 (toroidal flow) 运移至四国海盆之下, 或者是四国海盆在向北运动的过程中逐渐迁移到了具有 EMI 组分的软流圈地幔之上。最后, 本研究提出, EMI 组分广泛分布于中国东部、朝鲜半岛、日本海和四国海盆之下的地幔中。

关键词: 富集地幔; 弧后盆地; 俯冲组分; 板内熔岩; 四国海盆

基金项目: 崂山实验室科技创新项目 (LSKJ202204103); 国家重点研发计划 (2024YFF0807402); 山东省泰山学者特聘专家项目 (tstp20230643)

第一作者简介: 袁龙, 博士, 研究方向: 海底岩石学. E-mail: yuanlong@fio.org.cn

*通信作者简介: 鄢全树, 研究员, 主要从事海底岩浆作用与地质演化方面研究. Email: yanquanshu@163.com

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

末次冰消期以来冲绳海槽沉积物钼同位素富集机制及其古环境指示意义

孙呈慧¹, 窦衍光^{2*}, 杨守业¹

1. 同济大学, 上海 200092;

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266237

Mo 元素及其同位素由于其对氧化还原敏感的性质, 被广泛地用于研究全球古海洋氧化还原环境变化。本研究利用冲绳海槽中部 OKT-3 岩芯重力活塞沉积物样品, 基于氧化还原指标 (Mo 同位素、氧化还原敏感元素等) 以及沉积地球化学参数, 探讨同位素富集机制, 研究末次冰消期以来氧化还原条件和古海洋环境演化。结果显示, 钻孔全岩沉积物 Mo 元素含量介于 0.29~1.30 ppm, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值变化范围为 -1.31‰~0.11‰, 指示氧化/次氧化环境; 末次冰消期 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值变化较复杂, 响应高纬千年尺度的气候波动。其中, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值在 HS1 期偏负, BA 时期偏正,

YD 时期又偏负, 表现出与北太平洋中层水增强的同步性。同时 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值与大西洋经向翻转流的变化趋势呈反相位变化趋势, 支持大西洋-太平洋之间存在跷跷板效应。全新世时冲绳海槽底层水含氧量进一步增加, 与黑潮增强引起的通风增强有关, 受海水表层生产力的影响较小。研究还揭示, 输出生产力和有机碳埋藏之间存在解耦现象, 底层水氧化状态的变化是影响有机碳埋藏的重要因素。

关键词: 冲绳海槽; Mo 同位素; 富集机制; 氧化还原

基金项目: 国家自然科学基金“MIS6 期以来东海外陆架-冲绳海槽沉积汇周期性转换过程与机制研究”(批准号: 42276084)

第一作者简介: 孙呈慧, 博士研究生, 研究方向: 海洋沉积地球化学研究. E-mail: 2311561@tongji.edu.cn

*通信作者简介: 窦衍光, 研究员, 研究方向: 海洋沉积地球化学研究. E-mail: douyanguang@gmail.com

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

深海沉积物稀土元素富集成矿过程中的早期成岩作用研究

王樱静¹, 石学法^{1*}, 黄牧¹, 胡宁静¹, 朱爱美¹, 毕东杰¹,
张艳¹, 方习生¹, 刘季花¹

1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061

深海富稀土沉积物中的稀土元素主要赋存在生物磷酸盐(鱼类骨骼碎片)和铁-锰(氢)氧化物中。已发表的研究表明, 在沉积物-水界面位置, 生物磷酸盐的稀土元素含量在千年尺度即可从几个 $\mu\text{g/g}$ 增加至 7000 $\mu\text{g/g}$ 。通过对从西太平洋采集的沉积物岩芯 GC12 的主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素特征进行研究发现, 在沉积物-水界面发生的硅酸盐水解是生物磷酸盐中稀土元素的来源之一。沉积物的 Nd 同位素则是指示沉积物硅酸盐物源的良好指标。而沉积物 Sr 同位素特征因为易受沉积物中生物磷酸盐累积的影响, 使全样 Sr 同位素偏向海水的 Sr 同位素, 不利于指示硅酸盐物源。对从 GC12 沉积柱的沉积物中筛分的生物磷酸盐的微量元素和 Sr-Nd 同位素特

征研究发现火山物质水解是生物磷酸盐在海水中沉降时稀土元素的重要来源, 而风尘和火山灰的水解是生物磷酸盐在沉积物-水界面(埋藏深度 100 cm 以浅)的稀土元素来源。在生物磷酸盐深埋藏过程中(埋藏深度大于 100 cm), 风尘是生物磷酸盐的主要来源。此外, 在沉积物-水界面位置的硅酸盐水解释放的 Fe、Mn 等元素会形成铁-锰(氢)氧化物, 吸收亲金属氧化物元素例如 Co、Ni 等, 促进沉积物中稀土元素和亲金属氧化物元素的富集。因此, 早期成岩作用过程的硅酸盐水解是深海沉积物稀土元素富集成矿的重要过程。

关键词: 深海沉积物; 稀土元素; 硅酸盐水解; 沉积物-水界面

基金项目: 国家自然科学基金项目(92262304, 2023YFC2811205)和中国科学院地球化学研究所开放基金(202405)

第一作者简介: 王樱静(1990-), 助理研究员, 研究方向: 斑岩型铜矿床和深海沉积物稀土元素富集成矿机制. Email: jhyingjwang@126.com.

*通信作者简介: 石学法(1965-), 研究员, 研究方向: 海洋沉积与矿产资源勘查. Email: xfshi@fio.org.cn

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

深海沉积物孔隙水在稀土元素迁移富集中的重要作用

沈芳宇^{1,2}, 石学法^{1,2*}, 李力^{1,2}, 王小静^{1,2}, 刘洪娜¹, 李杰军¹,
任艺君¹, 黄牧^{1,2}, 刘季花^{1,2}

1. 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;
2. 山东省深海矿产资源开发重点实验室(筹), 山东青岛 266061

稀土元素(包括镧系元素和钇)作为支撑新能源、电子信息和国防科技发展的战略资源,是绿色转型与数字革命的和新材料,但受地缘分布不均、开采环境成本高及需求激增等因素,正面临日益严峻的稀土供应危机。近年来在深海盆地中发现的富稀土沉积物资源潜力大、富含中重稀土,是陆地稀土的潜在替代资源。然而,海水中超低浓度的稀土元素无法解释沉积物中的高含量特征,其富集机制尚未明晰。本研究通过系统分析西太平洋、东南太平洋和印度洋富稀土沉积物发育区的沉积物孔隙水地球化学特征,识别出孔隙水发生的早期成岩作用改变主要为孔隙水中稀土元素含量的升高和中稀土元素的富集,结合沉积物及

上覆海水数据,发现沉积物-水界面发生的有机质降解、铁锰(氢)氧化物的微还原溶解或晶体转变以及粘土矿物溶解均可能贡献于孔隙水的早期成岩改变,孔隙水中的稀土元素进一步被磷酸钙吸收或在氧化环境中被铁锰(氢)氧化物重新吸附。孔隙水可以储存高含量的溶解稀土元素,因而是重要的溶解稀土元素储库,胶体态在稳定和保存孔隙水中的稀土元素中可能发挥关键作用。同时,孔隙水还是沉积物中稀土元素以及稀土元素海底通量的来源。孔隙水稀土元素浓度的差别可能是多种因素共同作用的结果。

关键词: 稀土元素; 孔隙水; 富稀土沉积物

基金项目: 国家自然科学基金项目(42430408, 42402097)

第一作者简介: 沈芳宇(1992-), 助理研究员, 研究方向: 海洋地球化学. Email: fangyushen@fio.org.cn

*通讯作者简介: 石学法(1965-), 研究员, 研究方向: 海洋地质学. Email: xfshi@fio.org.cn

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

络合物水热实验和模拟计算刻画锇 (Os) 从岩石圈到海水的迁移和分布

严海波¹, 丁兴^{2*}

1. 福州大学 紫金地质与矿业学院, 福州 350100;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

金属络合物是金属元素在流体中的基本载体, 也是地球浅部多圈层物质循环和热液成矿作用的主要角色, 其稳定性决定了金属元素的基本地球化学行为, 比如金属的溶解度、分异、分配和共生组合等等。因此, 定量化表征金属络合物的稳定性有助于更加深入地理解这些地球化学行为, 更是未来实现地球多圈层物质循环模拟的关键。基于此, 本研究采用金属络合物的高温高压水解法以及相关的热力学计算, 旨在获得表征金属络合物稳定性的关键热力学数据和地球化学模型, 并将该方法首次应用于金属锇 (Os) 在深海中的分布和循环研究。研究表明, Os (IV) -Cl 络合物随着温度升高, 触发+4 价 Os 离子的水解并发生沉淀, 导致 Os (IV) -Cl 络合物稳定性降低, 伴随着 Os 价态和络合物种型的变化。在 150~450 °C 和 100 MPa 条件下, Os 在流体中主要以 OsCl_6^{2-} 种型形式存在; 而在 450 °C 以上可能主要以 Os(IV)-OH-Cl 和 Os (II) -Cl 络合形式存在。并且, 根据水解实验的结果, 我们首次获得了 OsCl_6^{2-} 络合物种型在高温高压下的一系列热力学数据, 如累积水解平衡常数 ($\text{Ln}K$), 系统焓变 ($\Delta_r H_m^\ominus$)、熵变 ($\Delta_r S_m^\ominus$)、吉布

斯自由能 ($\Delta_r G_m^\ominus$) 以及 OsCl_6^{2-} 的形成常数 ($\text{ln } \beta$)。作为 Os-Cl 络合物中最为稳定的种型, 高温高压下 OsCl_6^{2-} 络合物的热力学数据对于模拟富 Cl 热液中 Os 的地球化学行为极为重要。在此基础上, 我们通过地球化学建模, 实现了 OsCl_6^{2-} 络合物稳定性与流体温度、pH 和氯浓度之间的定量化表征, 明确 OsCl_6^{2-} 络合物的稳定环境为相对低温强酸 (≤ 300 °C 和 $\text{pH} < 5$) 以及高温近中性 (> 300 °C 和 $\text{pH} < 7$) 流体环境, 进一步证实 OsCl_6^{2-} 络合物可稳定存在于大部分深海热液系统中。由此, 本研究认为 Os 在深海中的分布主要受控于热液和相关的扩散羽状流与海水的混合。在此过程中, 溶解态的 Os 会经历+2 价向+4 价以及 OsCl_6^{2-} 络合物种型向 OsCl_6^{2-} 、Os-OH-Cl 和 Os-OH 种型的转变。考虑到深海热液系统的特点以及 Os-Cl 络合物的稳定性, 洋中脊、弧后和沉积物系统起源的热液对全球海洋溶解态 Os 储库以及 Os 从岩石圈到水圈的迁移发挥了主要作用。

关键词: 铂族元素; 水热实验; 深海迁移; 模拟计算

基金项目: 中国科学院战略重点研究项目 (XDB42000000) 和国家自然科学基金项目 (41730423、41973055、42130109 和 42303031)

第一作者简介: 严海波 (1991-), 男, 副研究员, 研究方向: 元素地球化学研究. E-mail: 1141600188@qq.com

*通信作者简介: 丁兴 (1978-), 男, 副研究员, 研究方向: 元素地球化学, 实验地球化学研究. E-mail: xding@gig.ac.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

合成铁、锰矿物对 Te 的吸附和共沉淀实验

符亚洲^{1*}, 张健¹, 黄艳¹

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

稀散元素碲 (Te) 是一种全球稀缺性关键矿产, 在传统工业和高科技领域具有广泛应用。海洋多金属结核和富钴结壳是重要的海底矿产资源, 高度富集碲, 不仅可作为潜在的碲资源储备, 又是了解碲在表生环境中地球化学行为的重要介质。由于海洋结核和结壳中铁、锰矿物结晶程度差、颗粒极为细小、铁锰矿物密切共生, 难以挑选单矿物进行研究。为了揭示碲在结核和结壳中的富集过程, 我们在实验室人工合成水羟锰矿、钡镁锰矿、六方纤铁矿和针铁矿代替天然样品开展了矿物对碲的吸附和共沉淀实验。在不同合成铁、锰矿物对 Te 的等温吸附和吸附动力学实验中, 吸附剂用量保持恒定, 温度为 25 °C, 溶液基质为 0.7 M NaCl 溶液, 对等温吸附实验结果使用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型评估了不同矿物对 Te 的吸附容量, 对吸附动力学实验结果采用拟一级动力学方程和拟二级动力学方程研究了不同吸附剂对 TeO_3^{2-} 和 TeO_4^{2-} 的吸附动力学。四种矿物对于 Te(IV) 的等温吸附 Freundlich 模型较之 Langmuir 模型更加贴合, 表明对 Te (IV) 的吸附可能是不均匀的多层吸附, 比如吸附剂对 Te (IV) 的氧化作用可能会通过改变吸附剂表面的化学性质从而影响吸附行为; 对 Te (VI), 水羟锰矿、六方纤铁矿和针铁矿的等温吸附结果更符合 Langmuir 模型, 表明其为

均匀的单层吸附, 而钡镁锰矿则更贴合 Freundlich 模型, 可能是不均匀的多层吸附。动力学吸附结果显示在吸附过程初期阶段吸附量迅速增加, 之后吸附呈现缓和上升趋势, 直至平衡; 在 NaCl 和模拟海水介质中, 对 Te (IV) 的吸附能力, 六方纤铁矿>水羟锰矿>钡镁锰矿>针铁矿; 对于 Te (VI), 六方纤铁矿>水羟锰矿>钡镁锰矿>针铁矿。不同合成铁、锰矿物与 Te 的共沉淀实验结果显示, 当 Te (IV) 与 Te (VI) 分别与针铁矿、六方纤铁矿共沉淀后, XRD 衍射峰位置基本无变化, 但衍射峰强度增强, 表明 Te 共沉淀会进入针铁矿和六方纤铁矿结构并扩大了相应晶面间距, 增强了针铁矿和六方纤铁矿的结晶度。当 Te (IV) 与 Te (VI) 与水羟锰矿共沉淀, 衍射峰位置无变化, 而衍射峰强度降低, 特别是与 Te (VI), 表明 Te 与水羟锰矿的共沉淀过程, Te 会干扰水羟锰矿晶体的正常生长, 导致结晶度下降。当 Te (IV) 与 Te (VI) 与钡镁锰矿共沉淀时, 会经历形成中间阶段水钠锰矿, 最终形成钡镁锰矿, XRD 衍射峰出现部分峰强降低而部分增强, 表明 Te 的共沉淀会干扰钡镁锰矿一些晶面正常生长, 而同时会增强一些晶面的结晶度。

关键词: 碲; 铁锰矿物; 等温吸附; 吸附动力学; 共沉淀

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

上新世以来东亚陆缘沉积源汇系统及大陆风化演变

李芳亮^{1*}

1. 海南热带海洋学院 海洋科学技术学院, 海南三亚 572022

硅酸盐风化被视为维持地球气候稳态的关键过程; 但由于风化指标记录常常受到多种(非风化)因素的干扰, 风化强度如何响应晚新生代气候仍不清楚。东亚大河流域整合了大陆尺度的风化信息, 但“从源到汇”系统的演变如何影响风化信号需进一步厘清。本研究汇编了东亚陆缘及流域各沉积物源区的钕同位素(ϵNd)、锆石铀-铅年龄和化学蚀变指数(CIA)等已发表数据以及大陆架 CSDP-2 站位新数据, 以了解大河演变历史、评估其对风化指标记录的影响。东亚陆缘沉积物 ϵNd 值从 3.6 Ma 之前的 -18.8 增加到 1.0 Ma 以来的 -11.3, 分别与华北克拉通和青藏高原-黄土高原的同位素值对应。锆石年

龄进一步表明该物源变化, 显示类似现代的黄河水系在早更新世末期已完全贯通。全流域贯通促进了从内陆高原向边缘海的沉积物输送, 因此, 在上新世以来全球降温背景下, 东亚陆缘风化强度(CIA)下降幅度显著大于其他亚洲地区。总之, 本研究认为大河水系向上游高地扩展以及全球变冷共同控制了风化强度记录的下降趋势和幅度; 强调了在解译大陆边缘沉积物风化信号时, 深入理解源汇系统的演变的重要性。

关键词: 源汇系统; 水系演化; 大陆风化; 晚新生代变冷

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0800504)和国家自然科学基金项目(42230410和41991324)

第一作者/通讯作者: 李芳亮(1990-), 讲师, 研究方向: 大陆边缘沉积学与古海洋, Email: fangliang@hntou.edu.cn

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

深海多金属结核微观结构特征及其资源效应

周军明¹, Toshihiro Kogure², 袁鹏³, 任江波⁴, 杨胜雄^{1*}

1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

2. The University of Tokyo, 日本东京 130033;

3. 广东工业大学, 广州 510006;

4. 广州海洋地质调查局, 广州 511458

水成型多金属结核富含钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、稀土(REE)等多种关键金属元素,是保障国家安全的重要深海矿产资源。水成型多金属结核由海水中Fe(II)、Mn(II)离子氧化沉积形成:氧化形成的纳米铁/锰(氢)氧化物矿物沉积形成微纳米级纹层(SMLs),纹层进一步生长形成多种微观结构(如树枝状结构、柱状结构、平行层状结构等),最终聚集形成多金属结核。解析多金属结核的微观特征,对认识多金属结核的形成和生长机制具有重要意义。例如,纳米铁/锰(氢)氧化物矿物组成的SMLs是水成型多金属结核的基本结构单元,具有指纹效应,精确记录着成矿信息,探明SMLs形成机制和生长过程,是认识水成型多金属结核成矿的重要基础,可从微观尺度系统地揭示结核成矿机制。但现阶段对于多金属结核的微观特征(包括SMLs)的认识存在明显不足。针对这一问题,本研究以典型水成型多金属结核为研究对象,采用微区X射线

荧光光谱、微区X射线衍射、扫描电子显微镜、聚焦离子束和高分辨透射电子显微镜等多种微区矿物学分析方法,探究了结核中SMLs结构特征。研究表明:(1)铁锰结核存在背散射图衬度对比明显的SMLs-D和不明显的SMLs-I两种类型,SMLs-D主要由10 Å和7 Å的层状锰酸盐矿物组成,由粒径较大和较小的锰氧化物矿物交替排列所致。(2)SMLs-D中Mn元素价态随纹层出现规律性变化,指示短地质历史时间尺度下成矿海水的氧化还原环境存在规律性波动。(3)系统揭示了多金属结核孔隙/裂隙中广泛存在的成岩作用——矿物溶解重结晶过程,发现成岩作用产物具有典型水成作用的矿物学和地球化学特征。相关研究结果对进一步认识铁锰结核的形成和生长机制提供了依据。

关键词: 多金属结核; 微观结构; 微纳米级纹层; 矿物学特征; 关键金属

基金项目: 中国博士后科学基金(2022M720888), 国家高层次人才特殊支持计划领军人才项目, 自然资源部海底矿产资源重点实验室开放基金(KLMMR-2022-G02)

第一作者简介: 周军明(1992-), 博士后, 研究方向: 海洋矿物演化及其资源环境效应. Email: zhoujunming@gmlab.ac.cn

*通信作者简介: 杨胜雄(1964-), 高级工程师, 研究方向: 海洋地质与矿产资源. Email: yangsx@gmlab.ac.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

沉积再悬浮作用调控颗粒态微量金属元素 在长江-河口-陆架的输运和埋藏

孙学诗^{1*}

1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

Understanding the processes influencing the transport and fate of particulate trace metals (PTM) at the land-ocean margin is important for quantifying the contributions of trace metals from land and rivers to the global budget of the coastal ocean. Despite this importance, constraining the delivery and marine fate of riverine PTM in estuarine and coastal settings remains challenging and is so far incomplete, due to their dynamic nature. Here, we employed geochemical—including inorganic and organic tracers—alongside sedimentological data to investigate the impact of

sediment transport processes, such as seasonal variations in riverine discharge and sediment resuspension, on the transport and fate of PTM along the Yangtze River-estuary-shelf continuum. We find that sediment resuspensions influence the transformation of mineral-associate PTM, thereby regulate the fate of PTM across the river-coastal ocean continuum.

关键词: Yangtze River; Particulate trace metals; Transport; Fate

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42476060)

第一作者简介: 孙学诗 (1988-), 副教授, 研究方向: 海洋沉积地球化学. Email: sunxueshi@ouc.edu.cn

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

中始新世东南印度洋曼达岬海盆沉积物地球化学特征及其地质意义

王薇¹, 徐兆凯², 杨承帆¹, 胡忠亚¹, 杨守业^{1*}

1. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092;

2. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

始新世 (53~34 Ma) 发生过多次极端气候变暖事件 (EECO, LLTM 和 MECO), 这些事件与火山活动、全球碳循环扰动和海洋-陆地环境变化密切相关, 因此是研究温室效应背景下地球系统多圈层相互作用的典范。然而, 目前对始新世气候变暖事件的驱动机制及其环境效应还不甚清晰。在始新世处于南半球高纬度地区 (50~60° S), 对古环境变化尤为敏感。因此, 本研究利用国际大洋发现计划 (IODP) 在东南印度洋曼达岬海盆获取的 U1514 站位的始新世高分辨率沉积物岩芯样品, 进行了沉积学、元素地球化学、同位素地球化学和有机地球化学等的综合分析, 开展了始新世沉积物源-汇过程及其与构造和气候变化间耦合关系的研究。结果表明, 早-中始新世 (52~43 Ma) 曼达岬海盆的碎屑沉积物主要来自澳大利亚西南大陆中元古代地块; 中始新世后期 (43~38

Ma), 研究区火山物质输入增多主要响应于澳大利亚与南极大陆的快速分离, 晚始新世 (38~34 Ma), 沉积物源由远源陆地 (如伊尔岗克拉通) 转变为近源陆地 (珀斯盆地和露纹杂岩), 受澳大利亚西南大陆区域性构造抬升和全球气候变冷的影响。始新世中期偶发性火山活动释放的大量温室气体 CO₂ 导致澳大利亚南部出现较长时间 (~5 Ma) 的气候升温, 同时南半球中-高纬度地区陆地水文循环加剧, 硅酸盐风化强度增加。本次研究重建了始新世曼达岬海盆对南半球中-高纬度地区构造运动和气候变化的沉积响应, 这为深入理解暖室气候条件下地球系统演变规律以及构造-气候-海洋变化提供了参考实例。

关键词: 中始新世暖期; 东南印度洋; 火山活动; 大陆风化; IODP 369

第一作者简介: 王薇 (1993-), 博士后, 研究方向: 海洋沉积地球化学. E-mail: wangwei24@tongji.edu.cn

通信作者简介: 杨守业 (1971-), 教授, 研究方向: 东亚大陆边缘物质的源汇体系与环境响应. E-mail: syyang@tongji.edu.cn

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

强烈的软流圈地幔不均一性引发北冰洋加克洋中脊地区壳幔的解耦

许阳^{1*}, 刘传周^{1,2}, 林音铮¹

1. 崂山实验室, 山东青岛 266237;
2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100049

软流圈地幔在洋中脊上涌并发生减压熔融, 形成的熔体向上迁移形成洋壳(以洋中脊玄武岩为代表), 而固体残留则形成大洋岩石圈地幔。洋中脊玄武岩的获取相对便利, 这使得它成为最被广泛使用的研究洋中脊下方软流圈地幔成分特征的岩石探针。但是, 软流圈地幔中存在大量古老难熔的地幔组分, 它们难以发生熔融而对现今洋脊处的岩浆活动贡献极少。因此, 仅仅通过对洋中脊玄武岩的研究不能全面约束软流圈地幔的特征。深海橄榄岩作为软流圈地幔部分熔融后的残留能够保存更为完整的软流圈成分信息。在本研究中我们展示了来自北冰洋加克洋中脊的中部贫岩浆区(SMZ)和东部火山活动区(EVZ)的约 70 块深海橄榄岩样品的主量元素和微量元素数据, 这些数据表明加克洋中脊深海橄榄岩经历了小于 15% 的部分熔融程度。它们的单斜辉石矿物可以划分

为轻稀土亏损和轻稀土平坦两种类型, 后者很可能在洋中脊下的熔融区经历了瞬时熔体加入的再富化过程。加克洋中脊地区深海橄榄岩的成分沿着洋脊存在强烈的变化, 这不能归结于软流圈温度的变化。由于研究的橄榄岩的部分熔融程度比利用地震获得的洋壳厚度所推测的值更高, 因此我们推测加克洋中脊下软流圈中存在继承了古老熔融事件的难熔地幔。这些难熔组分的存在引起加克洋中脊地区的洋壳和岩石圈地幔存在解耦现象。特别是在 SMZ 地区, 难熔地幔很可能构成了软流圈地幔的主体, 因此该区域富集的玄武岩组分很可能来源于软流圈中少量的富集地幔物质。

关键词: 深海橄榄岩; 地幔不均一性; 壳幔解耦; 超慢速扩张脊; 加克洋中脊

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

水圈-岩石圈相互作用的地球化学记录： 来自蚀变洋壳玄武岩的约束

田丽艳^{1*}, 沈晨曦¹, 韦懿倩¹

1. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南三亚 572000

玄武质洋壳从大洋中脊/弧后扩张中心生成至俯冲进入地幔的过程中, 在海底表面和洋壳内部发生了广泛的水-岩相互作用, 这个过程所伴随的物质和元素交换控制了蚀变洋壳和海水的成分。此外, 蚀变洋壳作为俯冲带输入物质, 对岛弧火山和大陆地壳的形成具有重要贡献, 是导致地幔化学组成不均一性的主要原因。因此, 对蚀变洋壳的地球化学组成以及相关的水-岩相互作用研究是理解地

球系统物质和元素循环的基础。本研究以采自 IODP 368 航次 U1502B 钻孔基岩岩芯的蚀变玄武岩为研究对象, 分别对全岩、蚀变矿物、基岩岩脉开展详细的岩相学和地球化学特征分析, 进而约束海底洋壳的蚀变过程。

关键词: 水-岩相互作用; 蚀变玄武岩; 大洋钻探岩芯; 地球化学

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

印度洋沃顿海盆沉积物中生物磷灰石的原位地球化学和 Sr 同位素特征及其指示意义

李佳¹, 石学法^{1*}, 黄牧¹, 于淼¹, 毕东杰¹, 沈芳宇¹

1. 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 266000

稀土元素(镧系元素加钇, 简称 REY), 特别是中-重稀土元素因其在高科技领域的广泛应用和重要的战略价值, 是地质资源研究的核心对象。“深海富稀土沉积”(REY-rich deep-sea sediments)是指产于深海盆地(水深大于 4000 m)中的富含稀土元素的沉积物, 也称“深海稀土”, 其稀土元素总量(Σ REY)一般大于 700 $\mu\text{g/g}$, 最高含量接近 8000 $\mu\text{g/g}$ 。深海富稀土沉积作为一种具有前景的新型深海矿产资源, 已引发了广泛关注。富 REY 的深海沉积物中磷(P)与 REY 呈正相关关系, 生物磷灰石(鱼类残骸, 如牙齿和骨骼)被认为是 REY 的主要载体。本文通过对印度洋沃顿盆地 GC26 岩芯中生物磷灰石

的显微观察和原位地球化学特征分析, 从纳米尺度揭示了 REY 的富集机制。同时, 通过原位 Sr 同位素比值分析, 探讨了生物磷灰石对 Sr 元素的富集及其指示意义。研究表明, REY 通过牙本质的狭窄通道进入生物磷灰石。海洋沉积物中生物磷灰石的 REY 和同位素特征可用于重建古海水环境和演化过程。基于原位 Sr 同位素地层学结果, 我们推测 GC26 岩芯的上部主要受到大陆壳风化产物的影响, 而下部则主要受到地幔来源热液输入的影响。

关键词: 深海富稀土沉积; 生物磷灰石; Sr 同位素; 沃顿海盆

国家重点研发计划项目: 深海稀土资源高效探测评价技术与示范(2023YFC2811200)

第一作者简介: 李佳(1990-), 工程师, 研究方向: 深海稀土矿产资源. Email: lijia@fio.org.cn

*通信作者简介: 石学法(1965-), 研究员, 研究方向: 海洋沉积学、海底成矿作用. Email: xfshi@fio.org.cn

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

南大西洋地幔不均一性与大洋岩石圈地幔再循环

王纪昕^{1,2}, 王赛^{1,2}, 鄢全树^{1,2}, 李传顺^{1,2}, 石学法^{1,2*}

1. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061;

2. 山东省深海矿产资源开发重点实验室, 青岛 266061

软流圈地幔的不均一性因板片俯冲、大陆拆沉、热点/地幔柱活动等过程的搅动而尤为复杂。洋中脊玄武岩 (MORB) 通常被认为是不同来源熔体混合的产物, 其携带的地幔不均一性信号在混合过程中被均一化。然而, 近年来研究发现, 在慢速和超慢速扩张中脊, 由于岩浆活动较弱, 岩浆混合程度低, 洋中脊玄武岩能够保留不同尺度和来源的地幔不均一性信息, 为揭示软流圈地幔组成和演化提供了重要窗口。南大西洋中脊是典型的慢速扩张洋中脊, 洋盆内存在多个板内岩浆活动中心。南大西洋位于 17°~39°S 之间的洋脊段, 北端在圣赫勒拿 (St. Helena) 火山链延伸线附近, 靠近圣赫勒拿岛, 南端在沃尔维斯海岭 (Walvis Ridge) 和特里斯坦-达库尼亚岛 (Tristan da Cunha) 附近。圣赫勒拿岛和特里斯坦-达库尼亚岛属于热点/地幔柱活动的产物。因洋脊与热点/地幔柱相互作用, 该区域的洋中脊玄武岩表现出显著的洋岛玄武岩的同位素特征。然而, 该区域洋中脊玄武岩的微量元素组成却呈现两种截然不同的特征: 第一类介于全球 E-MORB 均值与 D-MORB 均值之间, 微量元素配分模式与圣赫勒拿以及特里斯坦-达库尼亚洋岛玄

武岩的微量元素配分模式相近; 第二类位于全球 D-MORB 均值以下, 微量元素配分模式与两处洋岛玄武岩几乎呈镜像对称, 具有显著的 Nb-Ta 负异常, 表明这两类玄武岩的源区迥然不同。尽管南大西洋中脊 17°~39°S 显著受到热点的影响, 但第一类玄武岩在洋中脊呈零星分布, 而第二类玄武岩沿脊轴广泛分布, 这一现象表明南大西洋地幔整体上比正常 MORB 地幔更为亏损。我们在第二类玄武岩的橄榄石熔体包裹体中识别出两组 D-MORB 熔体: 第一组熔体包裹体的 Rb、Ba、U、K 含量较第二组更高。两组熔体包裹体均表现出明显的 Nb-Ta 负异常, 且 Th-Pb 极低, 低于检测限。结合全岩同位素和微量元素组成, 我们推测且源区地幔更可能是再循环的脱水的蛇纹石化大洋岩石圈地幔。这种源区不仅能够解释 Nb-Ta 负异常, 也可以解释熔体中极低的 Pb 含量。考虑到南大西洋中脊 17°~39°S 区域远离俯冲带等地质事实, 我们推测这些蛇纹石化的大洋岩石圈地幔, 在经历俯冲脱水作用后, 在南大西洋打开之前就囤积于上地幔底部。

关键词: 南大西洋 洋中脊玄武岩 岩石圈地幔

第一作者简介: 王纪昕, 助理研究员, 研究方向: 海洋岩石地球化学. Email: jxwang@fio.org.cn

*通信作者简介: 石学法, 研究员, 研究方向: 海洋地质与成矿作用. Email: xfshi@fio.org.cn

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

长江口及东海反风化过程

武雪超¹, 许心宁¹, 胡忠亚¹, 杨守业^{1*}

1. 同济大学 海洋地质全国重点实验室, 上海 200092

海洋环境中的反风化(又称可逆风化)作用是指硅(主要是生物硅)与可溶性阳离子结合形成自生铝硅酸盐矿物(粘土), 消耗海洋碱度并释放 CO₂ 的过程。反风化作用一直被认为是全球海洋碳、硅和关键元素(Fe、K、Mg、Li 等)循环以及海洋碱度的重要调控机制, 但其作用机制和对全球海洋要素的影响尚不清楚。长江口—东海陆架断面独特的海洋地质环境使其成为研究反风化作用的天然实验室。通过对该断面代表地点沉积物和孔隙水样品的矿物学和化学分析, 探讨该地区的反风化过程并揭示其对大陆边缘关键元素循环的影响。以钾为例, 我们发现海洋颗粒物的钾/铝比明显高于长江, 平均值分别为

0.31±0.04 和 0.25±0.02。根据孔隙水中钾浓度随深度降低以及向陆架方向绿色颗粒(大多为海绿石状)丰度增加的结果, 我们认为这些地球化学变化是由自生从海水中吸收钾引起的。有趣的是, 我们观察到多管样中溶解和颗粒态钾和镁浓度以及它们同位素的不同变化。我们推测全球河流碎屑主导大陆边缘钾的吸收通量约为 81±62 Tg·yr⁻¹, 与全球河流入海的溶解通量相当。该研究揭示大陆边缘地区反风化和自生矿物形成在改变海水和海洋沉积物地球化学中的重要作用。

关键词: 反风化; 边界交换; 东海; 长江

基金项目: 国家自然科学基金(42230410)

第一作者/通信作者简介: 杨守业(1971-), 教授, 研究方向: 海洋地质学. Email: syyang@tongji.edu.cn

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

西太平洋底流增强对深海稀土超常富集的驱动

毕东杰^{1,2}, 石学法^{1,2*}, 黄牧^{1,2}, 沈芳宇¹, 于淼^{1,2}, 张颖¹,
石丰登¹, 刘季花^{1,2}

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 山东省深海矿产资源开发重点实验室, 山东青岛 266061;
2. 青岛海洋科技中心 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东青岛 266037

深海稀土 (又称“深海富稀土沉积物”; Σ REY > 700 $\mu\text{g/g}$), 是近年来发现的一种新的稀土资源类型, 主要分布于水深超过 4000 m 的深海盆地, 富含中-重稀土, 资源潜力巨大, 是陆地稀土资源的战略接替, 推测可能是最早实现开采的深海矿产之一。西太平洋深海富稀土沉积稀土总量高、发育连续性好, 可能是全球富稀土沉积发育最好的成矿带之一。深海富稀土沉积主要为棕色/红棕色远洋粘土沉积, 发育于强氧化环境。深海底流作为深海氧气主要来源, 其演化造成的氧化还原环境、水动力条件、营养物质供应等变化可直接影响稀土元素主要赋存矿物 (生物磷灰石、铁锰微结核等) 富集, 是控制深海稀土超常富集的关键因素, 但控制机制尚不清楚。本研究聚焦全球深海稀土发育最好的西太平洋深海稀土富集区, 基于沉积物自生铁锰组分 Nd-Pb 同位素、全岩 Mn/Ti 和 Mn/Al 比值等指标, 系统恢复了研究

区~12 Ma 以来底流演化历史及其造成的氧化还原环境、营养物质供应等变化过程, 发现研究区深海极富稀土沉积发育期底流活动、生物生产力明显增强, 显示强底流活动应该是控制深海稀土超常富集的关键因素。基于自生铁锰组分 Pb 同位素等指标, 分析认为研究区该期底流增强事件应该与区域构造活动造成的底流改道有关; 底流活动增强导致“海山效应”以及深海通风增强, 造成的沉积物中生物磷灰石和铁锰微结核富集是深海稀土超常富集的重要机制。本研究初步提出了西太平洋深海稀土成矿模型, 对于揭示深海稀土成矿机制、发展深海稀土成矿理论具有重要理论意义, 同时也对厘清深海稀土分布规律、指导深海稀土精准勘查具有重要现实意义。

关键词: 深海稀土; 底流演化; 富集机制; 海山效应; 西太平洋

基金项目: 重点研发计划项目 (2023YFC2811200), 国家自然科学基金项目 (42106085, 42249301, 91858209, 92262304)

第一作者简介: 毕东杰 (1992-), 副研究员, 研究方向: 深海稀土成矿作用. Email: dongjiebi@fio.org.cn

*通讯作者简介: 石学法 (1965-), 研究员, 研究方向: 海洋沉积学、海底成矿作用. Email: xfshi@fio.org.cn

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

北冰洋陆-海-气-冰多圈层作用下的陆架有机碳沉积及其环境效应

胡利民^{1*}, 石学法²

1. 中国海洋大学, 山东青岛 266100;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061

北冰洋作为全球气候变化和多圈层相互作用的敏感区域, 其陆-海-气-冰的圈层相互作用对区域生态系统、碳循环和全球气候变化及反馈具有重要影响。随着全球变暖, 北极海冰加速消融, 陆源物质输入增加, 海洋生产力变化显著, 这些因素共同调控着有机碳的来源、输运和埋藏。了解圈层作用背景下的极地边缘海系统有机碳的沉积埋藏对预测未来气候变化及其生态影响具有重要意义。2016~2019 中俄北极联合科考在喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海、楚科奇海进行了系统的调查研究, 围绕有机碳的源汇过程及其环境响应这一科学主题, 初步研究发现, 在 AO 年际变化驱动的大气强迫作用下, 河流羽流路径也随之发生改变, 这种变化不仅会影响拉普捷夫海的水文

状况, 还会调节欧亚陆架 POC 的输运和动态, 从而影响不同海区的有机碳供应和沉积记录; 海岸冻土侵蚀排放是陆源冻土碳入海的重要方式, 识别了西伯利亚近岸海岸侵蚀导致的冻土碳对沉积黑碳物质组成的贡献 (约 30%), 这类冻土碳的输入对近海黑碳物质的组成分布特征、地球化学行为和沉积埋藏格局具有直接影响; 同时, 发现河流输入的土壤碳基质更有利于与颗粒汞的结合和稳定; 而海岸侵蚀的冻土碳基质与汞的结合作用较弱, 影响沉积汞的进一步输运和埋藏, 具有重要的环境效应和指示意义。

关键词: 圈层相互作用; 有机碳; 源汇过程; 陆架沉积; 北冰洋

· 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 ·

东南太平洋富稀土沉积物粘土组分地球化学与矿物组成特征分析

胡倩男¹, 石学法^{1*}

1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与重点实验室, 山东青岛 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稀土资源,富含镧系元素和钇,据估算,深海稀土资源量是陆地探明储量的数千倍,资源潜力巨大,可能成为最先开发的深海矿产之一。为了解深海富稀土沉积物物质来源及其对稀土富集产生的影响,本研究对东南太平洋沸石粘土分别进行全岩和粘土组分($<2\ \mu\text{m}$)的地球化学和矿物学对比分析。结果表明,位于东太平洋海隆西侧提基海盆富稀土沉积物粘土组分中粘土矿物含量较低,铁羟基氧化物相结晶程度相对较高。与此相反,东

太平洋海隆东侧尤潘基海盆富稀土沉积物粘土组分主要以蒙脱石和无定形相的铁锰羟基氧化物为主。稀土元素主要赋存于结晶程度较低的铁锰羟基氧化物相。稀土元素配分模式表明粘土组分和全岩组分具有与海水相似的稀土配分特征。源于热液羽状流的粘土组分会不断的从海水中清扫出稀土组分,这为受热液影响的东南太平洋富稀土沉积提供了全新的稀土富集机制。

关键词: 南太平洋; 粘土组分; 富稀土沉积物

第一作者简介: 胡倩男(1990-), 博士在读, 研究方向: 海洋地球化学. Email: huqiannan808@126.com

*通信作者简介: 石学法(1965-), 研究员, 研究方向: 海洋地质. Email: xfshi@fio.org.cn