

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

冲绳海槽 Noho 热液区烟囱体的矿物学特征及其对流体的记录

贾鹏飞¹, 曾志刚^{2*}

1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东青岛 266591;

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

近年来, 随着海底热液系统的发现和深海资源开发的需求, 同位素地球化学在揭示海底热液活动的形成演化、成矿规律、流体循环、生命响应及其环境影响方面取得了重要进展。经调查研究, 冲绳海槽中存在活跃的热液喷口、烟囱体、热液硫化物堆积体和生物群落, 其热液产物堆积体中 Fe、Cu 和 Zn 的变化、矿物组合和结构可有效地反映出热液产物堆积体生长过程中流体温度、氧逸度、硫逸度和 pH 的变化情况, 硫、铅及稀有气体同位素的联合分析能够有效揭示热液活动中的流体循环、矿物沉淀及微生物与金属元素相互作用的细节。其中, Noho 热液区 (NHF) 的海底热液硫化物矿石主要由磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和无定形二氧化硅组成, 可见磁黄铁矿

周围有较薄的白色边缘, 硫化物矿物间隙中有闪锌矿形成的他形晶粒, 且其构造背景、岩浆作用、矿化作用、流体-岩石相互作用以及沉积作用与生物响应、适应、记录和活动之间存在耦合关系。尽管如此, 目前对冲绳海槽 Noho 热液区中硫化物矿物的原位元素含量及其分布的研究依然较少。以上可见, 通过对海底热液硫化物的矿物组成、结构构造以及化学组成等特征的了解, 研究硫化物的形成机制以及后期的演化过程, 揭示热液硫化物记录的流体、岩浆活动等深部过程及信息, 可为正确评价海底热液硫化物的资源潜力提供研究基础。

关键词: 海底热液; 矿物学; 冲绳海槽

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42330409、42221005、91958213)、中国科学院战略先导研究计划 (B) (编号: XDB42020402)、国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (编号: 2013CB429700)

第一作者简介: 贾鹏飞 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 海底热液硫化物.Email: jiafeifei61fc@163.com

通讯作者简介: 曾志刚 (1968-), 研究员, 研究方向: 海底热液硫化物.Email: zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

Hydrothermal alteration of basalts in the ultramafic-associated Tianxiu Vent Field, Carlsberg Ridge

周鹏^{1*}

1. 宁波海洋研究院, 浙江宁波 315000

The Tianxiu vent field (TVF) is the first active ultramafic-associated hydrothermal field to be discovered at the termination of a detachment fault on the slow-spreading Carlsberg Ridge. Most hydrothermal chimneys in the TVF are developed on the basaltic apron. The basalt samples can be classified into seafloor-weathered and hydrothermally altered (i.e., slightly saponite-altered, highly saponite-altered, and silicified) types. At the periphery of the TVF, the basalts have experienced seafloor weathering, which has resulted in slight mineralogical and geochemical changes. In the TVF, most basalts have interacted with diffuse low-temperature hydrothermal fluids, leading to variable degrees of saponite alteration. As the distance from the vents decreases, basaltic glass, olivine, and pyroxene are progressively replaced by saponite; Zn, Cu, Co, and U are enriched; and Ca and Mn are depleted. Magnesium, Fe, and Li have been lost due to olivine replacement by saponite, and have been gained due to pyroxene replacement by saponite. In the fluid

flow conduits, the basalts have interacted with focused medium- to high- temperature fluids, which has led to the replacement of saponite by opal; depletion in Mg, Fe, Li, and rare earth elements, and enrichment in Zn, Cu, Co, and U. We propose a new hydrothermal alteration model for basalts in an ultramafic-associated vent field. Based on a comparison with mafic-hosted vent fields along mid-ocean ridges, we propose that: (1) the permeable host rocks promote lateral fluid flow, widespread mixing with cold seawater, and pervasive low-temperature hydrothermal alteration; and (2) H₂S-poor reducing fluids reduce the solubility of U and inhibit the precipitation of Fe, leading to high Cu/Fe and Zn/Fe ratios, and high U concentrations. The hydrothermal alteration model for the TVF is applicable to similar vent fields and can guide exploration for seafloor massive sulfide deposits along slow-spreading ridges.

关键词: Hydrothermal field; Alteration; Basalt; Chemical exchange; Detachment fault

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

北冰洋加克洋中脊 85°E 火山与热液活动耦合关系：来自海底观测和火山玻璃组分的证据

王涵林¹, 王叶剑^{1*}, 张涛¹, 丁巍伟¹, 鲁江姑¹, 杨驰¹

1. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

北冰洋加克洋中脊的 85° E 新火山脊上存在热液异常和罕见的深海爆炸式火山活动。本文利用 2021 年 JASMIN-E 航次所采集的火山玻璃样品和近底光学探测等资料, 开展该区域火山喷发与热液活动耦合关系的研究。在近底视频资料分析中, 我们观测到在 Oden 火山北部侧翼具有最厚级别 (大于 10 cm) 的火山碎屑沉积, 并伴随覆盖着约 2 km 宽范围的热液菌席区域。通过火山玻璃组分分析, 我们发现 Oden 火山样品的具有较低的 Mg# (63-66), 这指示了其岩浆经历了更程度的演化。其挥发分的 CO₂ 平衡饱和特征, 表明在喷发前发生了较大程度的脱气, 岩浆房位于较浅的区域。Oden 火山样品中显示出高

H₂O/Ce、高 Cl/Nb 和 Cl 过量 (最大达 150 ppm) 的趋势, 说明浅层岩浆驱动了爆炸式火山喷发和热液循环。我们的研究结果显示研究区爆炸式喷发与其表面的热液活动是同一因素造成的不同方面的结果, 爆炸式喷发增强了海底渗透性, 为热液活动提供通道和热量, 同时热液作用又影响着岩浆的组分。本研究增进了对爆炸式喷发与热液系统驱动机制的认识, 丰富了超慢速扩张洋脊岩浆区小尺度上的复杂地质背景及支撑形成的生境, 有利于拓展深海多圈层相互作用的理

关键词: 加克洋中脊, 爆炸式喷发, 海底热液活动, 火山玻璃, CO₂

第一作者: 王涵林 (1999-), 硕士, 研究方向: 洋中脊火山与热液活动, 地球化学. Email: wanghlin@sio.org.cn

*通信作者: 王叶剑 (1984-), 研究员, 研究方向: 海底热液成矿系统. Email: yjwang@sio.org.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

冲绳海槽中部贫晶流纹质熔体的演化及其 对岩浆房状态的启示

罗鑫宇^{1*}

1. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071

贫晶流纹质浮岩是岩浆极端分异的产物, 具有高气孔度(蜂窝状)的特点。然而, 形成浮岩的熔体的演化历史和挥发份饱和时间仍不清楚。冲绳海槽是西太平洋一个年轻的大陆边缘弧后盆地。本研究对采自冲绳海槽中部 Yoron Hole 热液区的贫晶流纹质浮岩(TVG7-1)中的斜长石、斜方辉石和 Fe-Ti 氧化物进行了详细的纹理和化学成分分析, 揭示了可喷发硅质熔体的演化过程、储存状态和喷发触发因素。矿物的纹理和化学组成表明开放的岩浆演化历史。斜长石的中空凹入结构以及斜长石-熔体湿度计证实了一个富水的熔体区。熔体区中挥发份(H₂O 等)的出溶将促进局部氧化条件的形成, 这一过程可能被斜长石中

FeO 和 An 的一致行为记录下来。此外, 挥发份出溶将导致储库超压, 将使岩浆房处于不稳定状态。岩浆房最终将因岩浆混合/补给而失稳, 并排出富水熔体。最后, 晶体尺寸分布(CSD)为理解冲绳海槽岩浆混合/补给的动力学效应提供了一个新的视角, 尤其是对矿物群的影响。我们的研究在晶粥模型框架内揭示了贫晶流纹岩的成因, 细化了岩浆演化历史, 并表明形成浮岩的岩浆在喷发前就已经达到挥发份饱和的状态。

关键词: 晶体尺寸分布; 贫晶流纹岩; 晶粥模型; 冲绳海槽

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42330409、42221005、91958213)、中国科学院战略先导研究计划(B)(编号: XDB42020402)、国家重点基础研究发展计划(973)项目(编号: 2013CB429700)和泰山学者工程。

第一作者简介: 罗鑫宇(1999-), 博士研究生, 研究方向: 海底岩石学及地球化学. Email: luoxinyu@qdio.ac.cn

通信作者简介: 曾志刚(1968-), 教授, 研究方向: 海底硫化物. Email: zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

西北太平洋采薇海山铁锰结壳中稀土元素富集机制研究

王琳璋¹, 曾志刚^{1,2*}, 齐海燕¹

1. 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;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

铁锰结壳由富含稀土元素 (REY) 的铁锰 (氢) 氧化物微层组成, 揭示 REY 的富集机制对未来深海沉积矿产资源的勘探开发具有重要意义。本研究对采薇海山铁锰结壳中各个类型的铁锰微层进行了原位微区分析。结果表明铁锰微层由柱状构造和斑杂构造组成, 主要为水成型、成岩型和水成-成岩混合型, 且具有高 Nd 含量。REY 在 $Mn/Fe < 2.5$ 的氧化环境中富集, 在 $2.5 < Mn/Fe < 5$ 的还原环境中急剧亏损, 在 $Mn/Fe > 5$ 的还原环境中几乎不发生变化, 表明氧化作用和早期成岩作用对稀土元素的富集起主导作用, 而后成岩作用对 REY 的富集影响较小。有机物降解和碎屑矿物的形成是铁锰结壳内部环境氧化还原电位变化的主要原因。我们提出了 REY 在铁锰结壳中

富集的三个过程。第一过程: 早期成岩作用促进了 REY, 特别是轻稀土元素 (LREE) 向孔隙水和磷酸盐的释放。铁锰微层表现出高 Mn/Fe 比和低 REY 含量的特征; 第二过程: 铁锰微层主要为水成-成岩混合型, 受孔隙水和海水共同控制。铁锰微层的 Mn/Fe 比降低, REY 开始富集; 第三过程: 在海水氧化作用下, 形成了以低 Mn/Fe 比和高 REY 含量为特征的铁锰微层。我们认为铁锰结壳在 REY 海洋地球化学循环中起到双重作用, 在氧化环境中是 REY 的汇, 在还原环境中是 REY 的源。

关键词: 铁锰结壳; 稀土元素; 氧化作用; 早期成岩作用

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42330409、42221005、91958213)、中国科学院战略先导研究计划 (B) (编号: XDB42020402)、国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (编号: 2013CB429700)、泰山学者工程、青岛市博士后应用研究项目 (QDBSH20240102121) 和中国科学院留学基金。

第一作者简介: 王琳璋 (1995-), 博士后, 研究方向: 海洋矿产资源研究.Email:wanglinzhang@qdio.ac.cn

通信作者简介: 曾志刚 (1968-), 研究员, 研究方向: 海洋热液地质学研究.Email:zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

西太平洋冲绳海槽热液活动对表层沉积环境的影响

曾志刚^{3,1,2*}, 胡思谊¹, 齐海燕¹, 王琳璋¹

1. 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;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 天津大学 海洋科学与技术学院, 天津 300072

研究表层沉积物的化学组成有助于了解海底含金属沉积物 (metalliferous sediment) 的元素富集特征, 可揭示热液柱与海水相互作用的程度, 并理解从热液柱到沉积物的元素变化状况。为此, 对西太平洋冲绳海槽 (OT) 不同热液区的表层沉积物样品进行了矿物学、元素含量、烧失量 (Loss on ignition, LOI)、水含量、干密度分析。结果表明, 样品由石英、微斜长石、钠长石、粘土 (伊利石、蒙脱石)、斜绿泥石、滑石、角闪石、方解石、白云石、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、硫、重晶石、石膏和钠铁矾组成。大多数表层含金属沉积物的 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 P_2O_5 含量低于正常表层沉积物, 且其 SiO_2 、 TiO_2 与 Al_2O_3 、 K_2O 与 SiO_2 之间存在正相关关系, 而 LOI 与 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 与 SiO_2 、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 FeO 之间存在负相关关系, 反映了海底热液作用增强将减少表层含金属沉积物中的 SiO_2 、 TiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 、 Cr 、 Ni 含量, 而热液柱扩散将增加表层含金属沉积物中的 TFe_2O_3 、 Cu 、 Zn 含量及 Fe/Ti 、LOI 值。越靠近热液喷口的

表层沉积物, 其 TiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 含量、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值、水含量和干密度值的变化范围越大, 且其 Al_2O_3 、 MnO 、 CaO 含量以及 $\text{MnO}/\text{TFe}_2\text{O}_3$ 比值越小, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值和干密度则越大。与热液喷口的水深相比, 大多数表层含金属沉积物的水深较浅, 喷口深度与表层含金属沉积物深度之间的高度差较小。此外, 随着表层含金属沉积物的平均粒径增加, 其 SiO_2 、 MnO 、 MgO 含量减少, 而 ZnO 、 TFe_2O_3 含量增加; 同时, 当沉积物中 $<4\ \mu\text{m}$ 颗粒大小的组份增加时, 表层含金属沉积物中的 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 含量增加; 而当沉积物中 $>63\ \mu\text{m}$ 颗粒大小的组份增加时, 表层含金属沉积物中的 SiO_2 、 TiO_2 含量减少, 反映了流体对西太平洋冲绳海槽表层沉积环境的强烈影响, 且导致含金属沉积物的 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 含量以及 $\text{MnO}/\text{TFe}_2\text{O}_3$ 比值降低, TFe_2O_3 和 LOI 含量增加。

关键词: 主要元素组成; 热液柱扩散; 颗粒大小; 热液喷口; 表层含金属沉积物

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

北极冰下加克洋中脊热液沉积物地球化学特征研究

薛文圣¹, 王叶剑^{1*}, 邱中炎¹, 杨驰¹, 杨春国¹, 马新雨¹

1. 自然资源部第二海洋研究所 海底科学与划界全国重点实验室, 杭州 310012

迄今为止, 全球已发现超过 721 处海底热液活动区, 但对北极洋中脊系统的热液活动规律仍知之甚少。本研究基于 2021 年 JASMIN 计划借助“雪龙 2”号破冰船在加克洋中脊 96° E 中央裂谷获取的长 369 cm 沉积物岩芯 (N12-GR-GC02)。岩芯组分包括远洋粘土、冰筏碎屑、Fe (氢) 氧化物、火山碎屑、Mn 氧化物等。该岩芯 85 cmbsf 以上部分识别出三个热液羽流事件层 (H1-H3), 以相对富集 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、U、P、V、Mg、Ca 和 Na 元素为特征。其中 Fe (氢) 氧化物主导 Fe-Mn-Cu-Pb-U-P-V 组合, 火山碎屑贡献 Mg-Ca-Na 组分。H2 层 (13~16 cmbsf) 受热液影响最强, 具体表现为: Fe (12.06~15.22 wt%)、Mn (2687~5465 μg/g)、

Cu (245~373 μg/g) 和 Pb (248~342 μg/g) 的显著富集, 总稀土元素 (REE) 含量降低, 页岩标准化 REE 配分模式呈现负 Ce、正 Eu 异常及 Y_N/Ho_N 比值升高。值得注意的是, 热液沉积层中火山碎屑含量同步增加, 结合 Al-Fe-Mg 三角图解分析 ($Fe+Al>90\%$, $Mg<10\%$), 指示该区记录热液活动可能受控于岩浆作用, 与玄武岩型热液系统具有成因关联。本研究揭示了深海沉积物中热液活动的证据, 深化了我们对冰封大洋环境下超慢速扩张洋脊热液活动规律及其驱动力的理解。

关键词: 冰下深海; 热液活动; 沉积物岩心; 主量元素与微量元素; 加克洋中脊

第一作者简介: 薛文圣 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 海洋沉积物地球化学. Email: xuews@sio.org.cn

*通信作者简介: 王叶剑 (1984-), 研究员, 研究方向: 海底资源与成矿系统. Email: yjwang@sio.org.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

Quaternary gas hydrate dissociation promotes the formation of Shenhu Canyon Group in the South China Sea

Hui Pan^{1, 2}, Hui Xie^{1, 2, 3*}, Zhongxian Zhao⁴, Jinlong Liu⁴, Guozhong Jiang^{1, 3}, Ruilong Li⁵, Yuanping Li⁶, Eun Young Lee⁷, Wen Yan⁴

1. Guangdong Ocean University College of Chemistry and Environment, Zhanjiang, Guangdong 524088;

2. Guangdong Ocean University Laboratory for Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction, College of Ocean and Meteorology, Zhanjiang, Guangdong 524088;

3. Guangdong Ocean University Key Laboratory of Climate, Resources, and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Sea of Department of Education of Guangdong Province, Zhanjiang, Guangdong 524088;

4. Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 511458;

5. University of Chinese Academy of Sciences South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 511458;

6. Research Institute of China National Offshore Oil Corporation Shenzhen Branch, Shenzhen, Guangdong 518000;

7. University of Vienna, Vienna Department of Geology, Austria 518000

The Baiyun deepwater region (Shenhu area) of the Pearl River Mouth Basin (PRMB), northern South China Sea (SCS), is characterized by the presence of abundant gas hydrate deposits and dense submarine canyons. However, the relationships between gas hydrate decomposition and formation of submarine canyons remain unclear. Based on the seismic and well data, the variations of the gas hydrate stability zone (GHSZ) thickness were quantitatively calculated. The results indicate that the thickness of the GHSZ, which ranges from 0 to 350 m, is distributed in areas where the water depth exceeds 600 m. Since 2.5 Ma, there have been three combinations of sea level and bottom water temperature (BWT) changes that can significantly reduce the thickness of the GHSZ. These combinations have exerted control over the GHSZ thickness in this region: (1) a slight increase in sea level accompanied by a rapid increase in BWT; (2) a rapid decrease in sea level but a slight decrease in BWT; (3) a rapid increase in both sea level and BWT. It has been found that water depth exerts an influence on the variation of the thickness of GHSZ. The impact in shallow water areas (<1000 m) is more significant than that in deep water areas (>1000 m). Consequently, in the Shenhu area, where the water depth ranges from 500 to 1000 m, the reduction in the thickness of GHSZ is consistently much greater than that in deep water

areas. It is hypothesized that during seawater warming or sea level dropping, the substantial decrease in the thickness of GHSZ in the Shenhu area leads to the dissociation of gas hydrates. This dissociation may have triggered methane seepage, resulting in the formation of pockmarks. The pockmarks likely weaken the slope sediments, and the subsequent rapid sea level fall promotes synchronous gravity erosion processes, thereby forming a chain of pockmarks (channel). Continuous gas seepage may further trigger slope failures, which can widen the channel. It is proposed that this iterative process contributes to the formation of the current Shenhu Canyon Group. Our study presents a plausible mechanism elucidating how the reduction in the thickness of GHSZ, the release of methane, and the formation of submarine pockmarks interact to influence and reshape the slope morphology, as well as drive the evolution of submarine canyons. This integrative analysis not only uncovers the complex geological processes at play in the study area but also offers valuable insights into the long-term geomorphological development in submarine environments.

关键词: Gas hydrate stability zone; Submarine canyons; Gas hydrate decomposition; Baiyun deepwater area; Pearl River Mouth Basin

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金 (No.2023A151500124)

第一作者简介: 潘荟 (1989-), 硕士研究生在读, 研究方向: 天然气水合物资源潜力与构造研究 Email: Panhuine@163.com

*通信作者简介: 谢辉 (1987-), 副教授, 研究方向: 大陆边缘构造沉积演化与地球动力学模拟研究 Email: xiehuihaoba@163.com

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

帕里西-维拉海盆风尘石英对中更新世气候转型的响应

颜钰¹, 蒋富清^{1,2,3*}, 曾志刚^{1,2,3}, 郑昊^{1,3}, 任传亮^{1,3}

1. 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;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋地质过程与功能实验室, 山东青岛 266237;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

中更新世气候转型是第四纪最重要的气候变化之一, 而对中更新世气候转型的形成机制仍存在不同的观点。帕里西-维拉海盆中的风尘记录了中更新世气候转型, 其中石英作为风尘的主要组分, 是否响应于中更新世气候转型尚待研究。本文对帕里西-维拉海盆 PV090102 孔 2.1 Ma 以来沉积物中的石英进行了定量分离, 并对石英的粒度组成、形貌特征、氧同位素组成和结晶度指数等进行了分析, 结果表明, 石英由众数粒径为 3.2 μm 的细粒端元 (EM1) 和众数粒径为 9.5 μm 的粗粒端元 (EM2) 组成, 其中 EM1 端元的石英主要来源于蒙古戈壁和塔克拉玛干沙漠, EM2 端元的石英主要来源于周围火山岛弧和海脊。通过对石英的粒度组成用 Weibull

分布函数进行拟合, 定量分离了两个端元的石英, 获得了 2.1 Ma 以来风尘石英的含量和通量。结果表明, 中更新世 (约 1.2 Ma) 以来, 风尘石英的通量比早更新世增加了 3 倍, 这与帕里西-维拉海盆总的风尘通量、亚洲内陆风尘堆积速率, 以及全球范围内风尘通量的增加是一致的, 表明帕里西-维拉海盆的风尘石英敏感地响应了中更新世亚洲内陆的干旱变化, 可以作为亚洲内陆气候变化的示踪指标, 用于西北太平洋深海长时间尺度风尘记录和亚洲内陆的古气候研究。

关键词: 中更新世气候转型; 源区; 石英; 帕里西-维拉海盆

基金项目: 国家自然科学基金“西太平洋暖池 8.5 Ma 以来风尘输入变化及其古气候效应” (42076049), “第四纪以来亚洲风尘和火山物质输入西北太平洋的制约机制” (41776065), “西太平洋俯冲体系中岩浆活动及其对热液物质供给的制约” (91958213); 中国科学院战略性先导科技专项“印太交汇区海洋物质能量中心形成演化过程与机制” (XDB42000000), “热液/冷泉区岩浆物质贡献与流体化学过程” (XDB42020402); 中科院海洋地质与环境重点实验室开放基金“晚中新世以来西太平洋暖池碎屑沉积物的来源” (MGE2020KG15); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目“典型弧后盆地热液活动及其成矿机理” (2013CB429700); 泰山学者工程专项 (ts201511061)

第一作者简介: 颜钰 (1996-), 女, 博士研究生, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: yanyu@qdio.ac.cn

*通信作者简介: 蒋富清 (1972-), 男, 研究员, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: fqjiang@qdio.ac.cn

曾志刚 (1968-), 男, 研究员, 主要从事海底热液活动研究, E-mail: zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

东海大陆边缘沉积物地球化学特征对热液活动的响应

王汶卓¹, 黄鑫^{1*}

1. 广东海洋大学, 广东湛江 524088

冲绳海槽位于东海东南部, 接收了大量的陆源物质, 由于其连续的沉积作用和该地区晚第四纪以来一系列快速的古环境变化的影响, 成为了古海洋学和海陆相互作用的理想研究区域。近几十年来, 对冲绳海槽的研究主要集中在沉积物来源及其演化、古气候变化 (东亚季风、典型气候事件、ENSO 等)、水文环境 (温盐条件、表层生产力、海平面升降、洋流演变、氧化还原环境、水柱分层等)、构造演化、热液活动等方面, 其中识别沉积物物源成为这些研究问题的关键。到目前为止, 许多研究者从古生物学、生物地球

化学、元素/同位素地球化学、矿物学、环境磁学等角度对冲绳海槽的沉积物源进行了大量的研究。冲绳海槽的沉积物主要由黄河、长江、台湾岛河流、火山物等组成, 但不同时空的物源信息仍然存在较大的争议。综合上述研究, 本文总结了末次冰期晚期以来冲绳海槽沉积物的物源历史, 提出造成这些研究差异的可能原因, 并对未来物源的判别工作进行了展望。

关键词: 冲绳海槽; 沉积物物源; 末次冰期晚期

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42006065)

第一作者简介: 王汶卓 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 沉积物地球化学. Email: wwz15225524353@163.com

*通讯作者简介: 黄鑫 (1987-), 教授, 研究方向: 沉积物地球化学/有机地球化学. Email: shaoshanx@126.com

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

东太平洋海隆南部 7°24'S 与 18°25'S 海底黑烟囱蠕虫管硫同位素研究

林丽^{1*}

1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059

本研究对来自于东太平洋海隆南部 7°24' S 与 18°25' S 海底黑烟囱蠕虫管管壁样品进行了形态学、矿物学和化学成分研究。SO62-402G 通常由 Fe、Zn、Cu、S 和 O 组成, 表明它可能由黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿组成。SO40-199G 通常由 Fe、Zn、S 和 O 组成, 这表明它可能由黄铁矿、闪锌矿组成。硫化物的整体化学成分富含 S 和 Fe, 并含有少量 Zn。在扫描电镜下, 从碎块样分辨出包括黄铁矿、白铁矿、黄铜矿和闪锌矿。此外, 我们发现可能存在微生物残留物, 但都被二氧化硅交代。我们推测原始生物被二氧化硅交代。块状硫化物矿物学显示出黄铁矿和闪锌矿的明显丰度, 其中黄铁矿是绝对主要的成分。分离硫化物

的形态表明黄铁矿为胶体, 闪锌矿为半自形到自形。TIMA 分析表明, 蠕虫管显示为由黄铁矿、闪锌矿、SiO₂ 等矿物组成的同心层结构。激光原位分析黄铁矿颗粒的硫同位素组成显示, 管壁黄铁矿和填充管的填充黄铁矿之间的 $\delta^{34}\text{S}$ 在统计学上存在显著差异。填充黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值平均值为 1.05‰ (SD: 0.71, 中位数: 1.0‰)。管壁黄铁矿报告的 $\delta^{34}\text{S}$ 范围更大, 从 1.5‰到 6.3‰。两者与大多数其他现代喷口硫化物样品的报告基本一致, 与喷口流体 H₂S 值大致匹配。

关键词: 东太平洋海隆; 热液系统; 蠕虫管; 硫同位素

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41173058)

第一作者简介: 林丽 (1965-), 教授, 研究方向: 生物成矿. Email: linli@cdut.edu.cn

*通信作者简介: 林丽 (1965-), 教授, 研究方向: 生物成矿. Email: linli@cdut.edu.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

冲绳海槽 Noho 热液区烟卤体中金的分布特征和赋存状态

崔梦迟¹, 曾志刚^{2*}

1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东青岛 266590;

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

海底热液活动广泛分布于洋中脊、弧后盆地及岛弧等构造环境, 其产物包括硫化物、含金属沉积物及蚀变岩石等, 并显著影响海洋地质与生态环境。其形成与岩浆去气、流体-岩石/沉积物相互作用及海水混合密切相关。热液流体具有高温、低氧、极端 pH 值特征, 富含 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Au、Ag 等金属元素。近年来, 针对不同海域热液系统的研究揭示了构造背景、岩浆作用及流体过程对热液成矿的协同控制机制, 尤其聚焦于金、银等贵金属的赋存形式与富集机理。海底热液系统贵金属富集受多因素耦合控制, 构造背景、流体演化及矿物结晶过程等是成矿机理研究的核心。尽管已经取得逐步进展, 但关于热液系统的成矿动力学机制仍需深入, 有关银的沉淀路径及其与金的耦合关系仍尚未完全明确。冲绳海槽作为典型弧后盆地, 其过渡性地壳、高热流值及多期岩浆活动为热液成矿提供了独特条件。此处热液活动受俯冲组分、地壳混染及岩浆分异共同影响, 喷口流体以

富 Zn、Pb、Cu 为特征。已有研究表明 Noho 热液区 (NHF) 的海底热液硫化物矿石主要由磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和无定形二氧化硅组成, 其构造背景、岩浆作用、矿化作用、流体-岩石相互作用以及沉积作用与生物响应、适应、记录和活动之间存在耦合关系。尽管如此, 目前对冲绳海槽 Noho 热液区 (NHF) 硫化物矿物中元素富集机制的研究仍相对较少。研究将聚焦于冲绳海槽 Noho 热液区块状硫化物(研究样品于 2016 年 6 月 12 日在冲绳海槽 Noho 热液区用电视抓斗采获, 取样位 126°58'58.640" E, 27°31'04.476" N; 水深 1581 m), 通过对硫化物矿物组成、结构、微量元素特征, 分析金的空间分布和赋存状态。研究成果对于金属矿产资源的勘探开发、深入了解金在热液活动中的行为、金的成矿作用机制以及地球深部物质循环和演化过程具有重要意义。

关键词: 海底热液硫化物; 金; 元素富集机制

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42330409, 42221005, 91958213), 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2013CB429700), 泰山学者工程资助

第一作者简介: 崔梦迟 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 海洋地质. Email: cuimc@qdio.ac.cn

*通信作者简介: 曾志刚 (1968-), 研究员, 研究方向: 主要从事海底热液活动研究. Email: zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

中中新世适宜期长偏心率驱动西北菲律宾海的黏土矿物沉积

任传亮^{1,3}, 蒋富清^{1,2,3*}, 曾志刚^{1,2,3}

1. 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;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋地质过程与功能实验室, 山东青岛 266237;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

中中新世气候适宜期 (MMCO, 17~14 Ma) 是新生代总体变冷趋势中的一个显著变暖阶段。然而, 西北太平洋对这一明显气候变化的响应, 仍不清楚。在本研究中, 我们分析了国际海洋发现计划 (IODP) 351 航次在奄美三角盆地的 U1438 站位采集的 17.5~12.2 Ma 沉积物样品中的黏土矿物。研究结果表明, 在 MMCO 期间, 蒙皂石是主要的黏土矿物, 约占 88%, 其次是伊利石, 约占 10%, 绿泥石和高岭石含量较少。MMCO 之后, 蒙皂石的比例下降到约 67%, 而伊利石 (~24%)、绿泥石 (~5%) 和高岭石 (~4%) 的比例增加。物源分析表明 17.5~12.2 Ma 蒙皂石主要来源于西北菲律宾海的火山岛弧, 伊利石和绿泥石则来源于亚洲大陆。MMCO 期间蒙皂石/ (伊利石+绿泥石) (S/IC) 比值显著增加, 这与亚洲大陆磁化率的上升以及南海蒙皂石/伊利石比值和绿泥石/ (绿泥石+赤铁矿+针铁矿) 比值的增加相一致。这些相关性意味着 S/IC 比值敏感地响应了 MMCO 暖湿气

候。光谱和小波分析进一步揭示了 MMCO 期间 S/IC 比值具有显著的长偏心率 (405 kyr) 周期。S/IC 比值的 405 kyr 周期的峰值与长偏心率和日照量极小值、亚洲内陆磁化率极大值以及深海碳、氧同位素的正偏差相对应。在长偏心率极小值期间, 一方面寒冷的气候导致北半球西风急流南移。西风环流随即向亚洲大陆携带更多的水分, 减少了伊利石和绿泥石的输入。另一方面, 较冷的气候促进了极地深水向北流动。这为北太平洋深处带来了更多的热量和溶解物质, 并增强了太平洋深水和表层水之间溶解物质 (如氧气和二氧化碳) 的交换。这些过程加强了西北太平洋的深水通风, 加剧了海底风化并增加了蒙皂石的含量。这项研究证明了 MMCO 期间长偏心率对中纬度亚洲大陆到西太平洋的气候和沉积物供应的调节作用。

关键词: 中中新世适宜期; 西北菲律宾海; 黏土矿物; 长偏心率

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

现代海底热液沉积物微生物硫同位素分馏机制与 太古代海洋硫循环约束

贺治伟¹, 宿蕾¹, 沈延安², 陈中强³, 刘喜停⁴, 杨守业¹, 李江涛^{1*}

1. 同济大学, 上海 200092;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026;

3. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074;

4. 中国海洋大学, 青岛 266100

沉积黄铁矿的硫同位素组成 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{pyr}}$) 被广泛应用于示踪地球演化史中的硫循环过程, 但其解释常存在多解性。太古代海洋硫循环的阐释尤其面临挑战, 因该时期岩石中保存的微小分馏信号具有多成因特征。本研究通过 Nano-SIMS 对加利福尼亚湾瓜伊马斯盆地热液沉积物中的草莓状黄铁矿进行了微区原位硫同位素分析(该高温环境可作为太古代海洋的现代类比体), 发现 $\delta^{34}\text{S}_{\text{pyr}}$ 值的范围超过了 160‰。我们解析了影响 $\delta^{34}\text{S}_{\text{pyr}}$ 的微生物和环境因素, 发现微生物硫同位素分馏作用普遍较大

(接近 60‰), 且与硫酸盐还原微生物的群落结构及其温度适应性无关。在现代硫酸盐充足的热液环境中获得的这些证据表明, 太古代硫化物中低分馏特征的形成机制, 既非源于热液增强的硫酸盐还原速率, 也非硫酸盐还原酶系或代谢途径的根本性改变, 而最合理的解释是当时海水硫酸盐浓度处于极低水平。

关键词: 热液沉积物; 微生物硫酸盐还原; 黄铁矿; 二次离子质谱; 硫同位素

基金项目: 国家重点研发项目(2021YFF0501301); 国家自然科学基金项目(42072333, 42402309)

第一作者简介: 贺治伟(1989-), 副研究员, 研究方向: 海洋同位素地球化学. Email: hezw@tongji.edu.cn

*通信作者简介: 李江涛(1981-), 教授, 研究方向: 地质微生物学. Email: jtli@tongji.edu.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

冲绳海槽 Noho 热液区热液成矿作用：矿物学、地球化学与同位素示踪的启示

刘鹏刚¹, 曾志刚^{2*}

1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 青岛 266590;

2. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

冲绳海槽中部伊平屋海脊附近的 Noho 热液区是近年来在年轻弧后盆地中发现的活动热液系统。本研究通过硫化物烟囱样品的矿物学、地球化学及同位素综合分析, 揭示了这一俯冲相关环境中成矿机制、元素富集过程与物质来源特征。硫化物烟囱主要由磁黄铁矿 (30%)、闪锌矿 (60%) 和方铅矿 (10%) 组成, 含少量等轴黄铜矿及非晶质二氧化硅。成矿过程可划分为三阶段: (1) 早期高温阶段 ($>300\text{ }^{\circ}\text{C}$) 形成自形板状磁黄铁矿; (2) 中期中高温阶段 ($250\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) 沉淀富铁闪锌矿 (Fe 含量 $14.36\%\sim 24.79\%$), 其内发育黄铜矿显微包裹体 (“闪锌矿黄铜矿病毒”); (3) 晚期低温阶段 ($<200\text{ }^{\circ}\text{C}$) 方铅矿与非晶质二氧化硅共生, 与海水混合及硫逸度降低相关。LA-ICP-MS 分析表明, 闪锌矿显著富集 Cd ($499\times 10^{-6}\sim 2557\times 10^{-6}$)、Sn ($12\times 10^{-6}\sim 1406\times 10^{-6}$)、Ag ($42\times 10^{-6}\sim 1940\times 10^{-6}$) 和 Sb ($0.1\times 10^{-6}\sim 2084\times 10^{-6}$), 元素间耦合置换 (如 $2\text{Cu}^{+}+\text{Sn}^{4+}\rightarrow 3\text{Zn}^{2+}$) 主导其晶格赋存。基于闪锌矿 Ga/Ge 比值的 $\log[w(\text{Ga})/w(\text{Ge})]-t$ 模型显示成矿温度为 $180\sim 240\text{ }^{\circ}\text{C}$

(平均 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$), 对应流体温度约 $150\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。硫同位素 ($\delta^{34}\text{S}=3.58\%\sim 5.69\%$) 和铅同位素 ($^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.1246\pm 0.0010$) 表明硫主要源自火山岩淋滤 ($81\%\sim 83\%$), 少量来自海水硫酸盐还原 ($17\%\sim 19\%$); 铅源则受俯冲带流体-岩石作用及沉积物有机质分解控制。稀土元素配分模式显示高温硫化物轻稀土富集 ($\text{LREE}/\text{HREE}=8.09\sim 32.0$) 及正 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^{*}=1.44\sim 4.13$), 而方铅矿的负 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^{*}=0.47\sim 0.83$) 反映晚期氧化流体叠加。Noho 热液区多阶段成矿过程受岩浆热源驱动, 并受海水-沉积物相互作用调控, 其硫化物以 Rh-Ag-Sb 富集为特征。黄铁矿的缺失表明硫供给受限, 残余铁优先进入闪锌矿晶格。本研究深化了对弧后热液系统的认识, 揭示了俯冲带动力学、多期流体演化与金属捕获机制的协同作用, 为俯冲相关环境海底块状硫化物勘探提供关键依据。

关键词: 冲绳海槽; 硫化物成矿; 热液地球化学; 同位素示踪

基金项目: 本研究得到了国家自然科学基金项目 (编号: 42330409, 42221005, 91958213), 中国科学院战略性先导科技专项 (编号: XDB42020402), 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (编号: 2013CB429700) 和泰山学者工程资助。

第一作者简介: 刘鹏刚 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学.Email: liupg@qdio.ac.cn

通讯作者简介: 曾志刚 (1968-), 研究员, 研究方向: 海底热液地质学, 地球化学, 岩石学.Email: zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

南海西北部新近纪线性火山活动特征及构造成因

望畅¹, 孙启良^{1,2*}

1. 中国地质大学(武汉)海洋地质资源湖北省重点实验室, 武汉 430074;

2. 青岛海洋科学与技术国家重点实验室, 青岛 266061

火山通常呈现圆形或椭圆形, 其火山锥在大陆边缘的沉积盆地中呈不规则排列。然而, 在南海西北陆缘, 围绕刚性西沙地块分布着罕见的线性火山脊。这些火山脊被解释为岩浆沿潜在 WNW-ESE 走向断层系统裂隙式喷发的结果。这些断层可能与晚渐新世-早中新世期间, 西沙地块与东南方向逃逸的印支地块之间的相互作用有关。逃逸的印支地块使得西沙地块具备逆时针旋转的趋势, 因此西沙地块周缘的薄弱带内中形成了北西\北西西走向的断层, 这些断层随后作为岩浆上涌的通道, 形成了现今所观察到的线性火山脊。本研究首次关注到南海

西北陆缘的北西/北西西向线性火山脊, 并探讨其构造成因, 同时也揭示了印支地块的逃逸对南海演化具有深远且长期的影响(甚至在逃逸相关运动停止后仍然持续)。更重要的是, 本研究提供了一个沉积盆地中呈雁列式排列的线性火山构造的实例, 增强了线性火山脊对板内剪切伸展和微地块相互作用的构造指示意义, 其结果可适用于其他具有类似地质背景的地区。

关键词: 线性火山脊; 火山活动; 印支逃逸构造; 微地块; 南海西北部

国家自然科学基金项目(42222607、42130408、42176085)

第一作者简介: 望畅(1997-), 博士研究生, 研究方向: 海洋地质. Email: wangchang1997@cug.edu.cn

*通信作者简介: 孙启良(1984-), 教授, 研究方向: 海洋地质灾害与地质资源. Email: sunqiliang@cug.edu.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

软流圈地幔上涌引起弧岩浆成分改变

李晓辉^{1*}

1. 中国海洋大学, 山东青岛 266100

岛弧是板块俯冲的重要产物。岛弧岩浆成分的变化通常归因于俯冲板片物质的脱水及循环。地球物理研究发现深部软流圈物质可以通过板片撕裂及边缘上涌, 并对岛弧岩浆产生贡献。然而, 这一过程的地球化学证据并不明确。琉球俯冲带受菲律宾海板块向欧亚板块的俯冲作用而形成, 地震层析成像表明琉球俯冲带南端存在与板片撕裂相关的岩浆活动。我们对琉球俯冲带不同区域(冲绳海槽、龟山岛、台湾北部火山带)火山岩进行了元素及 Sr-Nd-Mg 同位素分析, 为明确深部软流圈物质对岛弧岩浆的贡献提供直接地球化学证据。

冲绳海槽火山岩具有轻微高于地幔的 Mg 同位素组成, 表明其地幔源区主要受到了板片来源流体的影响。龟山岛安山岩来源于大陆地壳熔融, 具有较高的放射性 Sr-Nd 同位素及与地幔相似的 Mg 同位素组成特征。台湾北部火山带安山质火山岩 Mg 同位素高于地幔, 表明其演化过程中受到了板片来源流体的影响。值得注意的是, 台湾北部火山带的玄武岩具有显著低的 Mg 同位素组成, 这种低的 Mg 同位素组成与

矿物分离结晶、晚期蚀变等过程无关, 而与富 Mg 碳酸岩(白云岩)熔体在地幔源区的加入有关。

然而, 台湾北部火山带所对应的板片俯冲深度 <80 km, 远低于俯冲板片上白云岩的熔融深度(>300 km)。因此, 在台湾北部区域正常板片俯冲无法提供碳酸岩的熔融条件。然而, 地球物理资料显示区域内具有板片撕裂及板片边缘的存在, 板片以下深部软流圈沿板片撕裂及边缘上涌, 提供热量及物质使得俯冲板片上的碳酸岩熔融, 释放低 Mg 同位素熔体进入上覆地幔, 进而产生低 Mg 同位素组成的岛弧岩浆。

我们的研究结果与地球物理资料具有很好的一致性, 提供了俯冲带深部软流圈物质对岛弧岩浆不均一性贡献的地球化学证据。目前, 岛弧区域低 Mg 同位素岩浆的报道很少, 如果俯冲带存在板片撕裂, 可能会导致低 Mg 同位素组成的岛弧熔岩产生, 这需要更多岛弧火山岩 Mg 同位素的研究证明这一现象。

关键词: 海底岩石; 岛弧; 板片撕裂; 碳酸岩; 冲绳海槽

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

冲绳地质奇观：海底冷泉与热液近距双生

李季伟^{1*}, 孙治雷², 王大伟¹

1. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南三亚 572000;

2. 自然资源部青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266237

2024 年 10 月 3 日至 11 月 9 日, 探索二号船携“深海勇士”号载人潜水器和全体 75 名科考队员, 在冲绳海槽我方主张区海域内, 开展了中国东海首次载人深潜科考航次。航次由中国科学院深海科学与工程研究所和自然资源部青岛海洋地质研究所共同发起, 联合中国地质大学(北京)、同济大学、自然资源部第二海洋研究所等多家单位共同实施, 旨在考察该区海底冷泉、热液系统的地质、环境与生命现象, 获得了多项重要的海底流体系统科考成果。1) 发现大规模活动冷泉在弧后扩张中心轴部发育。通过深潜, 在扩张中心轴部发现了大面积的冷泉活动, 局部区域浅表层水合物裸露, 这一发现突破了对天然气水合物资源聚集和冷泉形成环境的已有认知。2) 突破了冷泉、

热液两种极端环境在深海共生最短距离。调查结果显示, 冲绳海槽西侧新发现冷泉与东侧已知的“南奄西热液场”, 以中央裂谷区的次级峡谷为界, 相距仅为 10 km。3) 发现大规模的超临界二氧化碳流体释放活动。在冲绳海槽中北段, 新发现多个超临界二氧化碳高温喷口(高达 304 °C), 形成独特的“二氧化碳水团”现象。如此高通量的深部碳释放, 将为弧后扩张中心深部碳释放、局部深层海水酸化及极端环境生命适应策略、地球生命起源等重大问题的观测研究, 提供了绝佳的天然实验室。

关键词: 冷泉; 热液; 二氧化碳水团; 极端环境; 冲绳海槽

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

新西兰大南盆地热液通道系统

曹鎏¹, 孙启良^{2*}

1. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁阜新 123000;

2. 中国地质大学 海洋学院, 武汉 430074

岩浆通道系统是岩浆活动重要研究内容之一, 主要关注岩浆上升与侵位的过程及产物等, 对其进行研究有助于了解岩浆侵入与火山喷发机制, 对地球动力学、资源勘探、气候变化和地质灾害等方面的研究均有重要意义。然而, 目前针对岩浆通道系统发育特征及可持续活动时间的研究仍存在不足。因此, 本研究选取新西兰大南盆地为研究区, 基于高精度三维地震资料, 从时空分布、几何形态及侵入机制等方面对新西兰大南盆地的热液活动进行分析, 揭示大南盆地裂后期热液通道系统以及热液通道的可重复利用性。通过对研究区内断层发育情况及断层与岩浆体空间关系的分析发现, 研究区内大部分岩床与火山发育在裂谷期形成的断层之上, 并且断层与岩床之间通过岩墙进行连接, 断层、岩墙、岩床与火山共同组成了研

究区的岩浆输运系统, 根据其空间关系总结出三种岩浆输运模式: (1) 断层-岩床; (2) 断层-岩墙-岩床; (3) 断层-岩墙-岩床-火山。此外, 研究区内还识别出一处热液输运系统, 该系统由 3 座垂向连续发育的热液喷口、古麻坑及浅部沉积层中的流体共同组成, 该热液输运系统中的流体输运通道被多次重复利用, 持续/周期性活动超过 54 Ma, 为目前有记录的活动时间最长的流体输运通道。本研究强调热液通道在沉积盆地内的关键作用, 其能够帮助岩浆突破相对刚性的基底, 也能长期、持续的为盆地内的各类流体资源(如烃类等)提供向上输运的通道。

关键词: 热液通道系统; 流体运移; 热液喷口; 气烟囱; 新西兰大南盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目(42222607、42176085)

第一作者简介: 曹鎏(1994-), 副教授, 研究方向: 海洋地质学与矿床学. Email: caoliu@lntu.edu.cn

*通信作者简介: 孙启良(1984-), 教授, 研究方向: 海洋地质学与海洋地质灾害. Email: sunqiliang@cug.edu.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

热液和上升流活动对中扬子地块下寒武统黑色页岩 有机质富集的影响

陈秋平¹, 曹瀚升^{1*}, 陈法锦¹

1. 广东海洋大学 海洋与气象学院, 广东湛江 524088

扬子地块是中国南方重要的地质单元,其下寒武统沉积序列完整,发育有丰富的化石和有机质含量高的黑色页岩。这些黑色页岩不仅是页岩气的重要潜在来源,同时也为揭示下寒武统海相黑色页岩中有机质富集机制提供了理想的研究对象。本研究聚焦于宜昌地区,通过元素地球化学和矿物学分析,重建了沉积环境的演化过程,探讨了古气候、古氧化还原条件和海底热液活动对有机质富集的影响。其主要研究结果如下:(1)水井沱一段的 TOC 含量显著增加,最高达 16.5%,表明生物生产力显著增强。同时,Cu/Al 比值异常升高(平均 $17.4 \times 10^{-6}/\%$),进一步证实了该时期生物生产力的提升。(2)化学蚀变指数(CIA)在剖面上部增加(大多大于 65),表明从冷干气候向暖湿气候转变。Sr/Cu 和石英/长石比值的变化也显示出气候变暖和适度化学风化的趋势。(3)水井沱一段 Mo/U 比值较大且相对集中,接近 $1 \times SW$,表现为弱至中等限制的水体条件,处于缺氧/硫化环境。MoEF、

UEF、U/Th 和 Corg/P 等指标表明,从水井沱一段的缺氧/硫化环境转变为晚期的亚氧化条件。(4)水井沱一段的正锶异常和 Ba/Al 比值的峰值为海底热液活动提供了有力证据,表明热液输入可能对有机质富集有重要影响。在 Zn-Ni-Co 三元图中水井沱组一段的大多数样品落在热液沉积区域,进一步支持了热液活动的存在。综上,研究认为早寒武世扬子地块水井沱组黑色页岩中有机质的富集是由多种因素共同作用的结果,其中海底热液活动是一个关键因素。浅水台地沉积条件的开放导致上升流和海底热液活动增强,破坏了原有的营养循环,促进了有机质的积累。这一过程不仅与古气候和古海洋条件密切相关,还受到海底热液活动的显著影响。此研究为理解早寒武世有机质富集机制提供了新的视角,也为扬子地块页岩气资源的开发提供了重要的地质背景和地球化学依据。

关键词: 下寒武统;有机质富集;海底热液活动

第一作者简介:陈秋平(1999-),硕士研究生,研究方向:边缘海地质 .Email: 1632677061@qq.com

*通信作者简介:曹瀚升(1988-),副教授,研究方向:古海洋碳氮循环 .Email: chsheng72@163.com

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

富金属岩浆流体对冲绳海槽南奄西热液成矿系统的贡献研究

孙治雷¹, 张侠^{2*}, 黄威¹

1. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266237;

2. 崂山实验室, 山东青岛 266237

岩浆—热液系统是主要发育于岛弧及弧后盆地发育的一类独特热液成矿体系, 其成矿物质主要来源于岩浆流体及挥发分对上覆热液系统的贡献, 但迄今, 对富金属岩浆流体在此类热液系统中扮演的角色尚不明确。本研究以冲绳海槽南奄西热液区重晶石为研究对象, 系统开展流体包裹体测温、氧同位素分析以及 LIBS 测试, 以揭示富金属岩浆流体对该区热液成矿系统的贡献。研究表明, 该区富金属岩浆流体以 Fe 的显著富集为主要特征, 同时该区富金属岩浆流体的脉冲式注入导致了热液流体盐度 (6.1 wt.% to 9.7 wt.% NaClequiv) 及氧同位

素组成 (1.1‰ to 8.0‰ SMOW) 的显著升高, 这些信息被重晶石流体包裹体及氧同位素忠实的记录下来。前人研究表明, 富金属岩浆流体金属元素含量比水—岩反应来源的流体高 3~4 个数量级, 其对热液系统的贡献会导致硫化物成矿效率显著提高。因此, 有富金属岩浆流体贡献的岩浆—热液系统应成为未来海底热液硫化物矿床勘探需重点关注的目标。

关键词: 富金属岩浆流体; 流体包裹体; 氧同位素; LIBS; 南奄西热液区

基金项目: 国家自然科学基金项目 (92358301; 42176057)

第一作者简介: 孙治雷 (1975–), 博士, 研究员, 研究方向: 深海极端环境成矿过程. Email: zhileisun@yeah.net

*通信作者简介: 张侠 (1991–), 博士, 副研究员, 研究方向: 现代海底热液成矿机理. Email: xzhang4@qnlm.ac

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

末次冰期以来东南亚岛屿火历史与植被演化

安宁^{1,2}, 于兆杰^{1,2*}, 万世明²

1. 山东科技大学, 山东青岛 266400;

2. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266400

黑碳是由生物质或化石燃料不完全燃烧产生的含碳物质, 由于其物理化学性质极为稳定, 常被用于重建其源区的火灾历史, 同时研究 C_3 和 C_4 植物的组成及其演化过程。本研究基于 MD98-2162、MD98-2178 和 MD01-2385 钻孔的高分辨率黑碳记录, 重建了东南亚岛屿 150 ka 以来的火活动与 C_3/C_4 植被演化历史。结果表明: (1) MD98-2162 在 150~80 ka 黑碳含量变化并不明显, 75~45 ka 黑碳含量整体有明显增加趋势, 在 35 ka 以来黑碳含量变化不大, 125~40 ka 黑碳同位素比值整体偏正, 指示沉积物源区该钻孔附近的 C_4 植被相对丰富度增加, 35~15 ka 黑碳同位素比值未出现明显变化, 10 ka 以来 $\delta^{13}C$ 值偏负, 指示沉积物源区该钻孔附近的 C_4 植被相对丰富度减少; (2) MD98-2178 在 95~60 ka 黑碳含量变化不大, 50~45 ka 黑碳含量有增加趋势, 35 ka 以来

黑碳含量进一步增加, 95~55 ka $\delta^{13}C$ 值变化不大, 50~15 ka $\delta^{13}C$ 值正偏, 10 ka 以来 $\delta^{13}C$ 值有偏正趋势; (3) MD01-2385 黑碳含量整体变化不大, 在 140~40 ka 黑碳同位素比值整体偏正, 25 ka 以来黑碳同位素比值整体偏负。末次冰期以来东南亚岛屿火活动受到气候的影响, 即温度升高有利于火的发生, 反之则不利于火的发生, 同时温度降低成为了限制 C_4 植被生长的因素。同时结合黑碳含量明显变化的时间节点与古人类迁徙的活动轨迹, 初步推测毁坏树木、农耕战争等人类活动的加强可能是导致东南亚岛屿火灾频发的主因, 在东南亚地区 C_3/C_4 植被的长期演化过程中, 发挥重要影响的除了全球性因素, 比如大气 CO_2 浓度, 还包括局部的温度和干旱度等因素。

关键词: C_4 植被演化; 黑碳; 火历史; 末次冰期

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

基于矿物学与年代学的硫化物烟囱体生长过程研究

曾志刚^{1*}, 宋新春¹

1. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266000

现代海底热液硫化物烟囱体的生长模式一直是研究热点。然而, 由于缺乏原位微区分析, 烟囱体的流体演化历史和制约因素尚不清楚, 其生长过程及元素富集问题仍存在争议, 这限制了对烟囱体生长机理和资源潜力的深入理解。截至 2021 年, Inter Ridge 喷口数据库及文献记录显示, 冲绳海槽中至少存在 15 处海底热液区, 包括 Minami-Ensei、Iheya、North-Jade、Hakurei、Irabu Knoll、Hatoma、Yonaguni、Knoll IV、唐印、Noho 和龟山岛热液区等。这些热液区的火山岩、沉积物、活动喷口、热液柱、烟囱体、块状硫化物及热液生物等均有研究报道。以往研究表明, 硫化物烟囱体的形成可分为两个阶段: 硫酸盐主导的初期阶段和硫化物沉淀阶段。初始阶段, 矿物组合主要由硬石膏 (Anhydrite)、少量白铁矿 (Marcasite) 和黄铁矿 (Pyrite) 组成, 硬石膏为烟囱体提供了初始框架。随着生长, 热液流体的温度和化学条件变化, 矿物组合逐渐转变为以黄铁矿、闪锌矿 (Sphalerite)

和黄铜矿 (Chalcopyrite) 为主, 反映了金属硫化物的大量沉淀。此外, 烟囱体内部可能形成斑铜矿 (Bornite) 和蓝辉铜矿 (Digenite) 等次生铜矿物。最终, 矿物组合进一步演化为以铜蓝 (Covellite) 和磁黄铁矿 (Pyrrhotite) 为主。矿物组合的变化是热液流体化学演化、温度变化及与海水相互作用的综合结果, 反映了烟囱体从初始形成到成熟的全过程。此外, 曾志刚等通过测定铀系同位素分析冲绳海槽 Jade 热液区硫化物的形成年代, 结果为 0.2~2 ka。本研究聚焦于冲绳海槽 Noho 热液区, 以 2016 年采集的完整烟囱体样品为研究对象, 通过矿物学和年代学的原位微区分析, 采用铀系不平衡法与 ^{210}Pb 测年方法相结合, 测定烟囱体内外不同区域矿物的形成年代, 计算内外层相对形成时间, 以确定烟囱体的形成时间跨度, 探讨其生长机理。

关键词: 硫化物; 烟囱体; 矿物学; 年代学

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42330409、42221005、91958213)、中国科学院战略先导研究计划 (B) (编号: XDB42020402)、国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (编号: 2013CB429700)

第一作者简介: 宋新春 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 海底热液硫化物.Email: 1643725041@qq.com

通讯作者简介: 曾志刚 (1968-), 研究员, 研究方向: 海底热液硫化物.Email: zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

末次冰消期以来气候变化和黑潮入侵主导南海北部陆坡沉积物源汇过程

黄超¹, 韦刚健^{2*}

1. 广东海洋大学 海洋与气象学院, 广东湛江 524088;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 524088

南海是西北太平洋最大的边缘海, 其水文特征受大陆和大洋的共同影响, 海陆相互作用强烈、物质循环活跃、且海洋动力过程复杂, 是研究海陆相互作用和沉积物源—汇过程的重要区域。黑潮是西北太平洋最强的西边界流, 当其北上经过吕宋海峡时, 由于失去岸界的阻挡向西弯曲入侵南海, 向南海输送大量的热量和水汽, 同时对南海北部的沉积动力和物质输运产生重要影响。现代观测和模拟结果表明黑潮入侵南海的强度和路径存在年代际和季节性变化, 然而地质历史时期黑潮入侵南海的演化历史及其控制机制的认识知之甚少, 黑潮入侵对沉积物源汇过程的影响仍然缺乏深入研究。利用南海北部陆坡的 NH07 岩心, 通过高分辨率的地球化学和粒度分析, 重建末次冰消期以来南海北部陆坡沉积物的源—汇过程, 并探讨其对气候变化和黑潮入侵南海的响应机制。稀土元素和 Sr-Nd 同位素分析表明, 台湾西南部河流是 NH07 岩心沉积物的主要

来源。粒度敏感组分分析发现, 敏感粒度组分 2 (24.7~27.9 μm) 可以用于示踪黑潮入侵南海的可靠指标, 从而重建了末次冰消期以来黑潮入侵南海的演化历史。研究结果表明, 黑潮入侵南海北部的强度与开放太平洋黑潮主轴的强度呈现反相关关系, 主要受东亚季风和 ENSO 活动的调控。在末次冰消期 (16000~11700 cal yr BP), 黑潮入侵南海北部的强度较大, 沉积物来源和输运主要受海平面变化与黑潮入侵强度的共同驱动, 而化学风化强度主要受控于低海平面暴露的陆架物质再风化作用影响; 全新世时期 (11700 cal yr BP 至今), 黑潮入侵南海北部的强度整体较弱, 东亚夏季风成为控制陆源物质输运和化学风化强度的主要因素。该研究深化了对边缘海沉积系统响应季风气候演变、海平面变化和海洋环流格局的理解。

关键词: 南海北部; 黑潮; 东亚夏季风; 粒度

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42371162)

第一作者: 黄超 (1988-), 副教授, 研究方向: 海洋沉积地质学. Email: huangc@gdou.edu.cn

通讯作者: 韦刚健 (1968-), 研究员, 研究方向: 同位素地球化学. Email: gjwei@gig.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

微量元素分布特征揭示海底热液硫化物烟囱体的成熟度演化过程

孟兴伟¹, 李小虎^{1,2*}, 陈灵¹, 初凤友¹, 金翔龙^{1,2}

1. 自然资源部第二海洋研究所 海底科学与划界全国重点实验室, 杭州 310012;

2. 上海交通大学 海洋学院, 上海 200030

硫化物烟囱体是现代海底热液系统的重要产物, 是硫化物矿床的重要组成部分。确定其成熟度(生长阶段)是判断海底热液系统持续时间和成矿规模的重要参数指标。然而, 由于坍塌的硫化物烟囱体的原生结构和矿物学特征发生了改变, 使得确定其成熟度具有一定的难度和挑战性。海底热液硫化物的微量元素组成是指示海底热液系统矿化过程的重要手段。然而, 微量元素变化与硫化物烟囱体成熟度演化之间的耦合关系尚未可知。本项目采用原位微量元素分析和元素面扫描的手段, 对位于东太平洋海隆(1°~2°S)鸟巢热液区中三个不同成熟度的烟囱体进行研究, 以阐明微量元素和矿物特征变化与热液流体演化之间的相关关系。

研究发现, 硫化物烟囱体的矿物组合随成熟度变化呈现出明显的阶段性演化特征。初期, 烟囱体主要由闪锌矿和黄铁矿组成; 随着演化进程, 逐渐转变为黄铜矿、黄铁矿和高-Fe 闪锌矿为主的组合; 最终在成熟阶段再度出现黄铁矿和闪锌矿为主的矿物环带。这一变化反映了热液活动在不同阶段的流体成分和温度条件的变化。

通过系统的原位微量元素分析发现, 烟囱体中的 Cu、Zn、Pb、Ag 等元素在不同演化阶段呈现出规律性变化。初期, 这些元素以显微包体的形式赋存于低温形成的它形黄铁矿中; 随着烟囱体成熟, 微量元素逐渐富集, 并在高温条件下进入自形黄铁矿的晶格内。从硫化物烟囱体边部至核部, Co、As、Sb、Mo 等元素浓度显著增加, 同时 Co/Ni 比值上升, 这些特征成为评估烟囱成熟度的重要标志。此外, 在成熟度更高的烟囱体中, 它形黄铁矿中 Sb、Mg 和 Se 含量升高, 自形黄铁矿中 Se、Zn 和 Cd 富集, 以及黄铜矿中 Se 含量显著增加, 进一步揭示了热液系统逐渐演化的历史。

该研究揭示了微量元素分布特征与硫化物烟囱体成熟度之间的耦合联系, 提出了微量元素可作为评估海底热液系统演化和成熟度的新指标。这一发现不仅为深海矿物学研究提供了新的理论基础, 还对未来海底资源的勘探具有重要指导意义。

关键词: 鸟巢热液区; 东太平洋海隆; 硫化物烟囱体; 微量元素分布特征; 成熟度演化

基金项目: 国家自然科学基金项目(42406223), 国家重点研发计划(2023YFC2811305、2023YFC2811205-01)

第一作者简介: 孟兴伟(1993-), 助理研究员, 研究方向: 海底资源与成矿系统, Email: xwmeng@sio.org.cn

*通讯作者: 李小虎(1979-), 研究员, 研究方向: 海底资源与成矿系统, Email: xhli@sio.org.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

热液对海水中痕量金属的净输入

陈雪刚^{1*}

1. 浙江大学 海洋学院, 浙江舟山 316021

痕量金属在海洋中具有重要的生物地球化学功能, 而海底热液活动是海洋中痕量金属的重要来源和运移途径。热液来源的痕量金属一般在热液流体喷出海底时快速沉淀, 且沉淀过程在羽流扩散过程中持续进行。然而, 东太平洋洋隆 (EPR) 来源的痕量金属 (Fe 和 Mn) 在热液羽流中持续存在, 表明痕量金属在热液羽流中的地球化学行为有待进一步研究。本文研究了北大西洋 Rainbow 热液区热液来源溶解态和

颗粒态痕量金属在热液羽流中的含量分布特征, 结合稀有气体同位素重建了不同痕量金属的动力学去除过程; 我们分析了不同痕量金属在羽流扩散过程中的保守性行为 and 迁移转化规律, 并指出沉积物可能是被忽视的羽流中痕量金属的重要来源。

关键词: 热液; 痕量金属; 生物地球化学; 动力学过程; 沉积物

国家自然科学基金项目 (42476050)

作者简介: 陈雪刚 (1983–), 副教授, 研究方向: 海底热液地球化学, 痕量金属生物地球化学。Email: chenxg83@zju.edu.cn