

# PACMANUS 热液区 Si-Fe-Mn 氧化物的 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其对热液活动的指示

杨宝菊<sup>1,2)</sup>, 曾志刚<sup>2)</sup>, 刘季花<sup>1)</sup>

1) 国家海洋局第一海洋研究所, 山东青岛, 266061;

2) 中国科学院海洋研究所, 山东青岛, 266071

无定形 Fe 和 Mn 氧化物以及硅的沉积体广泛分布于洋中脊、弧后盆地和海山等不同地质背景的海底热液区(Binns et al., 1993; Hein et al., 2008; Dekov et al., 2010)。Fe-Mn 氧化物按照成因不同主要分为三种类型(Hein et al., 2008): ①从海水中通过加积作用沉淀在坚硬基岩上的水成成因 Fe-Mn 氧化物; ②从沉积物孔隙水中沉淀形成的具有成岩成因和水成成因 Fe-Mn 氧化物; ③从热液流体中直接沉淀形成的具有相对纯净的 Fe-Mn 氧化物。

从海水中缓慢沉淀形成的铁锰结核/结壳是研究大洋演化的理想材料, 利用水成成因的铁锰结核/结壳的 Sr、Nd、Pb 同位素可以有效了解古海洋演化历史(Reynolds et al., 1999; Goldstein et al., 2003)。热液产物的 Sr、Nd、Pb 同位素是示踪成矿物质来源, 了解海底热液演化过程的灵敏工具(Kim et al., 2004; van de Flierdt et al., 2004)。Sr 同位素能够指示热液活动中海水的演化路径(Chiba et al., 1998)。由于 Pb 在化学性质上与其他亲铜元素具有相似性, 因此 Pb 同位素可以有效的示踪成矿金属的来源(Fouquet et al., 1995)。而 Nd 同位素可以有效的识别热液产物中陆源物质的输入(Winter et al., 1997)。具有热液成因的 Si-Fe-Mn 氧化物能够为热液活动的发展、演化提供指示, 加深对整个成矿过程的理解, 同时也可以作为示踪古代热液系统的有效工具(Hrischeva et al., 2007)。

## 1 地质背景及样品特征

样品为 2008 年“KX08-973”航次中, “科学一号”考察船在东马努斯海盆的 PACMANUS 热液区用拖

网所获。马努斯海盆是一个年轻的(约 3.5Ma)快速扩张的(高达 137 mm/a) (Tregoning, 2002) 弧后盆地。在东马努斯海盆, 早期火山作用形成了一系列雁列式火山脊。PACMANUS 热液区位于东马努斯海盆中长 15km, 宽 1.5km, 水深 1600~1700m 的 Pual Ridge 火山脊上。基底岩石为英安岩, 两翼由安山岩构成(Binns et al., 1993)。

样品非常疏松易碎, 孔隙度高。颜色多样, 主要由黄色、红褐色、黑色、灰绿色及少量白色物质组成, 各种颜色物质多交互生长。土状集合体, 具有环带和放射纤维状等构造。矿物结晶程度差, 多为隐晶质物质, XRD 分析显示样品含有少量针铁矿、水钠锰矿、钡镁锰矿、蛋白石-A 和绿脱石。

## 2 微量元素特征及其成因指示意义

强烈亏损微量元素、稀土元素, 是热液成因 Si-Fe-Mn 氧化物的重要特征(Hein et al., 1997)。Co/Zn 比值是指示热液成因的灵敏指示剂, 如果该比值小于 0.4, 说明具有热液成因(TOTH, 1980)。Si-Fe-Mn 氧化物样品的 Co/Zn 平均值为 0.021, 暗示样品具有热液成因。Fe-Mn-(Co+Ni+Cu) × 10 三角图解可以很好的区分热液成因、水成成因和成岩成因(Hein et al., 1994)。在该三角图解中, 样品大部分位于热液成因区, 少量位于热液与成岩成因的交汇处。样品的稀土元素具有明显的正 Eu 异常(Eu/Eu\* = 2.046~6.548), 与热液流体的稀土配分模式一致。TiO<sub>2</sub> 的含量(0.04%~0.11%)明显低于火山碎屑物质的 TiO<sub>2</sub> 含量(0.4%~0.9%, Hein et al., 1993), 说明火山碎屑对样品的贡献较小。Al/(Al+Fe

注: 本文为国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号 2013CB429700)资助的成果。

收稿日期: 2015-08-28; 改回日期: 2015-09-28; 责任编辑: 周健。

作者简介: 杨宝菊, 女, 1986 年生。博士, 海洋地质专业。Email: haichenxiang@163.com。

+ Mn)可以用来区分热液流体或碎屑对产物的贡献,如果该比值大于 0.4,说明深海远洋沉积物的贡献较大;如果该比值小于 0.4,表明产物主要富集金属元素。样品的  $Al/(Al+Fe+Mn)$  比值在 0.003 到 0.012 之间,远远低于 0.4,也说明碎屑物质的贡献非常小,相反可能有热液物质加入。而样品中其他过渡族元素 Co、Ni 及稀土元素含量较低,主要是由于这些微量元素大部分进入了早期形成的硫化物,而后期形成的 Si-Fe-Mn 氧化物快速沉淀,没有足够的时间从海水中吸附这些微量元素 (Bonatti et al., 1972)。

### 3 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其对热液活动的指示

Si-Fe-Mn 氧化物 Sr、Nd、Pb 同位素变化范围为:  $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.708079 \sim 0.708581$ ;  $\epsilon_{Nd} = 5.149833 \sim 6.534826$ ;  $^{208}Pb/^{204}Pb = 38.245 \sim 38.440$ ;  $^{207}Pb/^{204}Pb = 15.503 \sim 15.560$ ;  $^{206}Pb/^{204}Pb = 18.682 \sim 18.783$ 。 $^{87}Sr/^{86}Sr$  比值变化范围相对均一,接近周围海水的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  比值 (0.70916)。 $\epsilon_{Nd}$  值与 Nd,  $^{87}Sr/^{86}Sr$  与 Sr 含量倒数具有明显的负相关性,说明样品中的 Nd、Sr 具有两个端元的物质来源 (热液流体和海水)。相反, Pb 同位素与 Pb 含量之间没有明显的线性关系,说明样品中 Pb 的物质来源比较复杂。利用两端元混合模型计算得到海水对样品贡献的 Sr 含量占总量的 76.7%~83.1%。通过质量平衡方程,获得热液流体与海水的混合温度在 53.2~72.2°C 之间,温度变化范围较大暗示热液活动不稳定。所有样品的  $\epsilon_{Nd}$  值均为正值,与水成成因的铁锰结核/结壳明显不同。样品中的 Nd 主要来自热液活动对基底岩石的淋滤,并保留了热液活动的信息。Pb 同位素变化范围较小。大部分样品的 Pb 同位素组成变化范围较小,并且与东马努斯海盆岩石、岩浆, PACMANUS 硫化物的值类似,表明样品的 Pb 同样来自东马努斯海盆基底岩石。另外,样品的  $^{208}Pb/^{204}Pb$  和  $^{207}Pb/^{204}Pb$  比值稍微偏低,暗示热液流体在基底岩石中的循环过程并不充分, Si-Fe-Mn 氧化物保存了基底岩石不均一的特征。

与其他弧后盆地热液区的 Si-Fe-Mn 氧化物进行对比分析,显示本研究样品具有明显不同的 Sr、Nd、Pb 同位素特征。由于火山碎屑物质的加入,来自劳海盆的热液 Si-Fe-Mn 氧化物 Sr 和 Pb 同位素比值 (Sun et al., 2012) 明显低于本研究样品。根据样

品中较低的  $TiO_2$  (0.04%~0.11%) 和  $Al/(Al+Fe+Mn)$  比值 (0.003~0.012) 可以证明本研究样品中几乎未受到火山碎屑物质的混染。在小安的列斯洋岛火山弧中形成的具有热液成因和水成成因的铁锰结壳中,内层显示较低的 Sr 同位素比值和正的  $\epsilon_{Nd}$  值,说明该区结壳内层形成过程中受到热液活动影响 (Frank et al., 2006)。但是,由于热液流体温度较低无法将大量的 Pb 从基底岩石或沉积物中淋滤出来,所以该样品的 Pb 同位素与本研究的 Pb 同位素组成明显不同。

研究显示,利用 Sr、Nd、Pb 同位素特征可以有效追踪 Si-Fe-Mn 氧化物的物质来源,了解海底热液活动的演化过程。进一步结合主微量元素特征,也可以为不同成因铁锰氧化物的形成过程及成矿机制提供启示。

### 参 考 文 献 / References

- Binns R A, Scott S D. 1993. Actively forming polymetallic sulfide deposits associated with felsic volcanic rocks in the eastern Manus back-arc basin, Papua New Guinea. *Economic Geology*, 88(8): 2226~223.
- Bonatti E, Beyth M, Rydell H S, Fisher D E, Joensuu O. 1972. Iron-Manganese-Barium Deposit from Northern Afar Rift (Ethiopia). *Economic Geology*, 67(8): 717~730.
- Chiba H, Uchiyama N, Teagle D A H. 1998. Stable isotope study of anhydrite and sulfide minerals at the TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge, 26°N, NATIONAL SCIENCE FOUNDATION, 85~90.
- Dekov V M, Petersen S, Garbe-Schonberg C D, Kamenov G D, Perner M, Kuzmann E, Schmidt M. 2010. Fe-Si-oxyhydroxide deposits at a slow-spreading centre with thickened oceanic crust: The Lilliput hydrothermal field (9°33' S, Mid-Atlantic Ridge). *Chemical Geology*, 278(3-4): 186~200.
- Fouquet Y, Marcoux E. 1995. Lead isotope systematics in Pacific hydrothermal sulfide deposits. *Journal of Geophysical Research*, 100: 6025~6040.
- Frank M, Marbler H, Koschinsky A, van de Flieddt T, Klemm V, Gutjahr M, Halliday A N, Kubik P W, Halbach P. 2006. Submarine hydrothermal venting related to volcanism in the Lesser Antilles: Evidence from ferromanganese precipitates. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(4): Q04010.
- Goldstein S L, Hemming S R. 2003. Long-lived isotopic tracers in oceanography, paleoceanography, and ice-sheet dynamics. *Treatise on*

- geochemistry, 6: 453~489.
- Hein J R, Hsueh-Wen Y, Gunn S H, Gibbs A E, Wang Chungho. 1994. Composition and origin of hydrothermal ironstones from central Pacific seamounts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(1): 179~189.
- Hein J R, Koschinsky A, Halbach P, Manheim F T, Bau M, Kang J K, Lubick N. 1997. Iron and manganese oxide mineralization in the Pacific. *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*, 119(1): 123~138.
- Hein J R, Schulz M S, Dunham R E, Stern R J, Bloomer S H. 2008. Diffuse flow hydrothermal manganese mineralization along the active Mariana and southern Izu-Bonin arc system, western Pacific. *Journal of Geophysical Research* 113: B08S14.
- Hrischeva E, Scott S D. 2007. Geochemistry and morphology of metalliferous sediments and oxyhydroxides from the Endeavour segment, Juan de Fuca Ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(14): 3476~3497.
- Kim J, Lee I, Lee K Y. 2004. S, Sr, and Pb isotopic systematics of hydrothermal chimney precipitates from the Eastern Manus Basin, western Pacific: Evaluation of magmatic contribution to hydrothermal system. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 109(B12210): 1~13.
- Reynolds B C, Frank M, O'Nions R K. 1999. Nd- and Pb-isotope time series from Atlantic ferromanganese crusts: implications for changes in provenance and paleocirculation over the last 8 Myr. *Earth and Planetary Science Letters*, 173(4): 381~396.
- Sun Zhilei, Zhou Huaiyang, Glasby G P, et al. 2012. Formation of Fe-Mn-Si oxide and nontronite deposits in hydrothermal fields on the Valu Fa Ridge, Lau Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 43(1): 64~76.
- Toth J R. 1980. Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron. *Geological Society of America Bulletin*, 91(1): 44~54.
- Tregoning P. 2002. Plate kinematics in the western Pacific derived from geodetic observations. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 107(B1): ECV 7-1~ECV 7-8.
- van de Flierdt T, Frank M, Halliday A N, Hein J R, Hattendorf B, Gunther D, Kubik P W. 2004. Tracing the history of submarine hydrothermal inputs and the significance of hydrothermal hafnium for the seawater budget-a combined Pb-Hf-Nd isotope approach. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(1): 259~273.
- Winter B L, Johnson C M, Clark D L. 1997. Strontium, neodymium, and lead isotope variations of authigenic and silicate sediment components from the Late Cenozoic Arctic Ocean: Implications for sediment provenance and the source of trace metals in seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4181~4200.