



## 马里亚纳弧前Conical蛇纹岩泥火山顶自生沉积物特征及其对渗漏流体的指示

佟宏鹏, 胡海明, 陈琳莹, 陈多福

### Constrains of seepage fluids based on the characteristics of authigenic deposition from Conical serpentinite mud volcano in the Mariana forearc

TONG Hongpeng, HU Haiming, CHEN Linying, and CHEN Duofu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022051101>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 马里亚纳弧前Quaker蛇纹岩泥火山自生烟囱生长模式

Formation model of authigenic chimneys on the Quaker serpentinite mud volcano in the Mariana forearc

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 15

#### 南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

#### 新西兰Hikurangi俯冲带沉积物成岩作用示踪研究：来自孔隙流体Sr同位素证据

A tracing study of sediment diagenesis in the Hikurangi subduction zone, New Zealand: Evidence from Sr isotope of pore fluid

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 115

#### 特提斯构造域海底流体逃逸活动特征及其控制因素

Characteristics and controlling factors of submarine fluid escape in Tethys tectonic domain

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 27

#### 冲绳海槽西部陆坡泥底辟和泥火山特征及其形成动力机制

Characteristics and genetic dynamics of mud diapirs and mud volcanoes on the western slope of Okinawa Trough schematic geographic map of studied area mud diapirs with different morphology in multi-channel seismic section

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 91

#### 西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 12



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

佟宏鹏, 胡海明, 陈琳莹, 等. 马里亚纳弧前 Conical 蛇纹岩泥火山顶自生沉积物特征及其对渗漏流体的指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(6): 1-10.

TONG Hongpeng, HU Haiming, CHEN Linying, et al. Constrains of seepage fluids based on the characteristics of authigenic deposition from Conical serpentinite mud volcano in the Mariana forearc[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(6): 1-10.

# 马里亚纳弧前 Conical 蛇纹岩泥火山顶自生沉积物特征及其对渗漏流体的指示

佟宏鹏, 胡海明, 陈琳莹, 陈多福

上海海洋大学海洋科学学院, 上海深渊科学技术研究中心, 上海 201306

**摘要:** 马里亚纳弧前蛇纹岩泥火山顶部海底发育由低温碱性流体渗漏形成的自生沉积物, 记录了渗漏流体特征, 对俯冲带的物质循环研究有重要意义。但目前对复杂矿物组成的自生沉积物及其所指示的渗漏流体信息仍不清楚。对采自马里亚纳弧前 Conical 蛇纹岩泥火山的自生沉积物进行了岩石学、矿物学及主量和微量元素分析。结果表明, Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物呈疏松多孔状, 极易碎, 碎块主要呈薄片状和球粒状。薄片状碎块呈白色, 主要由针状文石和棱柱状方解石组成, CaO 含量较高 (49.3%~53.3%), MgO 含量较低 (2.3%~4.5%)。球粒状碎块呈黄色或白色, 为无定形镁硅酸盐, MgO 含量较高 (25.5%~29.1%), CaO 含量较低 (0.5%~2.9%)。碳酸盐岩碎块的总稀土含量 ( $\Sigma$ REE) 为 227.2~4 136.6 ng/g; 无定形镁硅酸盐碎块的  $\Sigma$ REE 为 115.4~364.9 ng/g, 均显示轻微重稀土富集的平坦型配分模式。自生沉积物的稀土配分模式显示, 除两个稀土含量相对较高的碳酸盐岩样品外, 渗漏流体的贡献高于 90%, 说明两类样品均形成于较强的渗漏环境, 并且碳酸盐及镁硅酸盐可能分别形成于“低硅型”和“高硅型”不同的流体活跃期。

**关键词:** 自生沉积物; 稀土元素; 主量元素; 渗漏流体; 蛇纹岩泥火山; 马里亚纳弧前

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022051101

## Constrains of seepage fluids based on the characteristics of authigenic deposition from Conical serpentinite mud volcano in the Mariana forearc

TONG Hongpeng, HU Haiming, CHEN Linying, CHEN Duofu

Shanghai Engineering Research Center of Hadal Science and Technology, College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

**Abstract:** Authigenic depositions induced by low-temperature alkaline seepage fluids occur on the top of the Mariana forearc serpentinite mud volcanoes, which are archives of the seepage fluids and are significant for studying the material circulation of the subduction zone. However, little is known about the features of the authigenic depositions composed of multiple minerals and their recording of seepage fluids. In this paper, we investigated the petrology, mineralogy and major and trace element compositions of authigenic depositions collected from Conical serpentinite mud volcano in Mariana forearc. The authigenic depositions from Conical serpentinite mud volcano are loose and extremely friable into lamellar and spherical fragments. The lamellar fragments are white, mainly composed of needle-like aragonite and prismatic calcite, with high CaO contents (49.3%~53.3%) and low MgO contents (2.3%~4.5%). The spherical fragments are yellow or white, made of amorphous magnesium silicate, with high MgO contents (25.5%~29.1%) and low CaO contents (0.5%~2.9%).  $\Sigma$ REE of the carbonate fragments range from 227.2 ng/g to 4136.6 ng/g, while the  $\Sigma$ REE of the amorphous magnesium silicate fragments are from 115.4 ng/g to 364.9 ng/g. All samples show flat distribution patterns with slight enrichment of heavy rare earth elements. The rare earth element distribution patterns of authigenic depositions indicate that the contribution of seepage fluids is higher than 90% except for two carbonate samples with relatively high rare earth element contents. This suggests that all samples should form in the intense seepage environments, but the carbonates and magnesium silicates may be induced by varied types of seepage fluid, namely, "low-silica type" and "high-silica type".

**Key words:** authigenic deposition; rare earth elements; major elements; seepage fluid; serpentinite mud volcano; Mariana forearc

**资助项目:** 国家自然科学基金“马里亚纳弧前蛇纹岩泥火山烟状自生沉积的成因及深源蛇纹石化流体渗漏活动记录”(41776080), 马里亚纳弧前海底蛇纹岩泥火山无机成因甲烷形成水合物的条件及潜力分析(41776050)

**作者简介:** 佟宏鹏(1985—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事海底流体活动沉积记录研究, E-mail: hptong@shou.edu.cn

**收稿日期:** 2022-05-11; **改回日期:** 2022-05-31. 张现荣编辑

马利亚纳弧前发育目前全球已知的、唯一仍在活跃的蛇纹岩泥火山群,马利亚纳俯冲带属于非增生型板块汇聚边缘,蛇纹岩泥火山作用喷发的物质未经历弧前增生楔的强烈改造作用,是示踪俯冲带深部过程的绝佳载体<sup>[1-4]</sup>,因此,蛇纹岩泥火山自被发现以来受到科学界的持续关注<sup>[1-2,5-10]</sup>。大型蛇纹岩泥火山喷发活动停止或者间歇期,泥火山顶部可发育低温、强碱性流体渗漏;渗漏流体性质受泥火山与海沟距离控制,与泥火山之下不同俯冲深度所发生的地球化学过程有关<sup>[11-14]</sup>。渗漏流体上升到海底附近,在泥火山顶部发育烟囱状、手指状以及结壳状等自生沉积物,其矿物成分也受泥火山与海沟距离控制<sup>[1,14-15]</sup>,说明蛇纹岩泥火山顶的自生沉积物记录了渗漏流体活动,甚至记录了泥火山之下与俯冲作用有关的地球化学过程的信息。

马利亚纳弧前蛇纹岩泥火山顶发育的流体渗漏成因的自生沉积物几乎不含碎屑物质<sup>[4,15-16]</sup>。在矿物组成上,与海沟较近的泥火山顶部发育的自生沉积物主要由水镁石组成;与海沟较远的泥火山顶部发育的自生沉积物主要由碳酸盐矿物组成,偶尔也发育硅酸盐矿物<sup>[4,15,17]</sup>。目前研究主要集中于南Chamorro、Conical及Quaker蛇纹岩泥火山发育的自生碳酸盐岩<sup>[4,12,15-16]</sup>。蛇纹岩泥火山顶的自生碳酸盐岩一般以较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值及较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为特征,指示渗漏流体具有较重的氧及较轻碳同位素组成,有学者认为这种较轻的碳同位素组成可能与无机成因甲烷的缺氧氧化作用有关<sup>[4,13,15,18-19]</sup>,较重的氧同位素组成与俯冲带的板片源流体的演化有关<sup>[4,15]</sup>。自生碳酸盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值一般低于海水值,指示渗漏流体具有贫放射成因铯的特征<sup>[4,15,20]</sup>。未见关于这些自生碳酸盐岩稀土元素等微量元素特征的研究。Conical蛇纹岩泥火山是目前唯一报道发育硅酸盐质烟囱状自生沉积物的蛇纹岩泥火山,其成分主要为一种罕见的含水无定形富镁硅酸盐<sup>[17]</sup>,但只有岩石学和微观形貌的报道<sup>[4,15]</sup>,未见关于该硅酸盐矿物地球化学特征的研究。这些自生沉积物元素地球化学研究的缺失可能与早期研究未对自生沉积物的研究意义给予足够重视,以及样品匮乏有关,但地球化学研究的缺失直接影响对渗漏流体的示踪。

因此,本文对马利亚纳弧前Conical蛇纹岩泥火山顶发育的自生沉积物开展研究,在岩石学、矿物学及主量元素分析基础上,结合稀土元素分析,对比不同类型自生沉积物及通过渗漏流体与海水两端元混合模型模拟的稀土元素特征间的差异,揭示

Conical蛇纹岩泥火山自生沉积物所记录的渗漏流体信息。

## 1 地质背景

马利亚纳弧前是指马利亚纳海沟和岛弧之间的狭长地带(图1a),由向西北俯冲的太平洋板块和上覆的菲律宾板块形成。马利亚纳弧前蛇纹岩泥火山主要由未固结的粉砂质、泥质蛇纹石化胶结块状及砾状蛇纹岩或蛇纹石化超基性岩和变质岩等组成<sup>[1,5,7,21]</sup>。在马利亚纳俯冲带,太平洋洋壳自海沟处向下俯冲,随着俯冲深度的增加,温度和压力逐渐增加,俯冲板片逐渐发生压实、脱水等过程,产生的流体与上盘地幔楔橄榄岩发生蛇纹石化<sup>[22-26]</sup>,在拉伸构造背景下,蛇纹岩化的地幔楔沿弧前深断裂上升,喷发至海底形成蛇纹岩泥火山<sup>[1,8-9,27-29]</sup>。此类蛇纹岩泥火山主要呈串珠状分布于马利亚纳弧前 $12^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 区间,距离海沟轴线 $30\sim 100\text{ km}$ 宽的狭长弧前范围内,其直径约 $10\sim 30\text{ km}$ 、高度约 $0.5\sim 2\text{ km}$ <sup>[1,8,13-14,30]</sup>。

Conical蛇纹岩泥火山位于马利亚纳弧前北部, $19^{\circ}32'\text{N}$ 、 $146^{\circ}40'\text{E}$ 范围内(图1b),大致呈现圆锥形,底部直径约为 $20\text{ km}$ ,高出正常海底 $1500\text{ m}$ ,山顶水深约 $3100\text{ m}$ <sup>[4,7,15,31]</sup>。距离海沟轴线约 $86\text{ km}$ ,位于俯冲界面上方 $19\text{ km}$ ,是距离海沟最远、对应俯冲深度最深的一座蛇纹岩泥火山,山顶或裂缝处发育活跃的流体渗漏活动<sup>[1,13-15,17]</sup>。

## 2 样品与方法

研究样品由2003年夏威夷大学组织的马利亚纳弧前航次(RI/OCE0002584)利用无人深潜器(ROV)Jason II,在第32次下潜期间从Conical蛇纹岩泥火山顶部采集,水深约 $3100\text{ m}$ 。样品在海底呈厚结壳状,覆盖并突出于蛇纹岩泥质沉积物之上。采集的Conical蛇纹岩泥火山自生沉积物用去离子水清洗后自然风干。样品呈疏松多孔状,中间发育不规则型的残余流体通道,通道周围发育黄色球粒状沉积物,远离通道白色沉积物含量增加(图2a)。样品极易碎,碎后样品呈黄或白色的不规则球粒状及小块状(图2b—c),以及含有针状矿物的薄片状(图2d)。使用牙钻或镊子分别对不同产状样品进行分类取样,并用玛瑙研钵研磨至200目用于元素地球化学分析。挑选典型样品制作光学薄片并进行扫描电镜观察。

岩石学和矿物学观察在上海海洋大学海洋沉

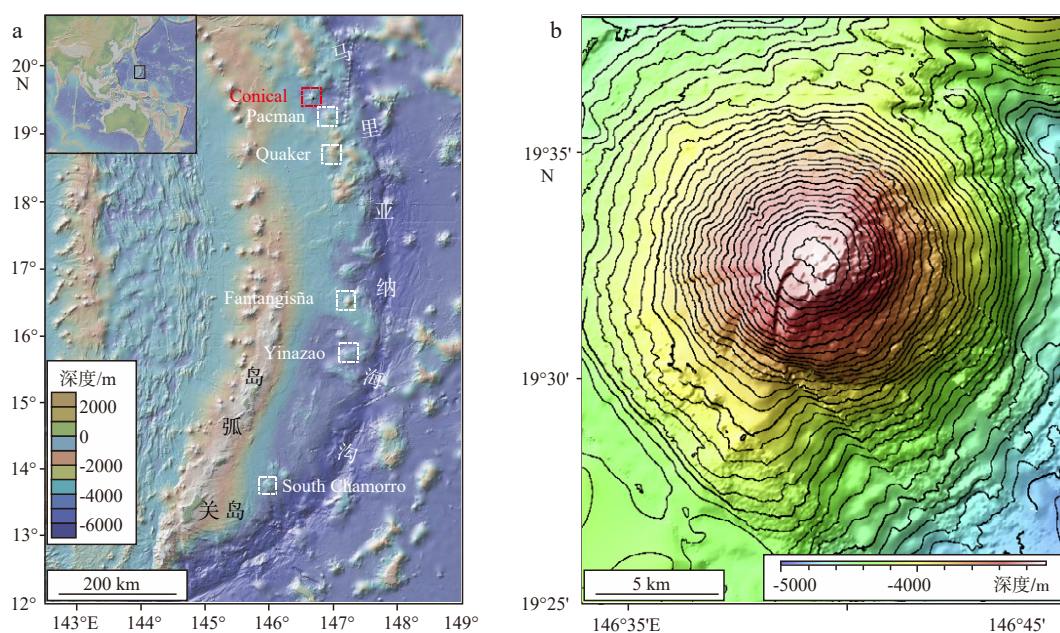


图 1 马里亚纳弧前 Conical 蛇纹岩泥火山位置图

b 图引自文献 [7]。

Fig.1 Location of the Conical serpentine mud volcano in Mariana forearc

Illustration figure b cited after reference [7].

积地球化学分析实验室完成,所用仪器为 Olympus 偏光显微镜和库塞姆 EM-30 台式扫描电镜。主量及微量元素分析在中国科学院地球化学研究所完成,主量元素的分析使用 700 Series ICP-OES,微量元素的分析使用 Plasma Quant MS。由于 Conical 蛇纹岩泥火山的自生沉积物几乎不含碎屑物质,主量及微量元素分析采用全溶消解法。称量 50 mg 样品放入 15 mL 特氟龙杯,加入二次蒸馏的优纯级 HF 和 HNO<sub>3</sub> 各 1 mL, 185℃ 烘箱加热 36 小时;冷却后蒸干,加入 4 mL 去离子水、2 mL HNO<sub>3</sub> 及 1 mL 内标(微量元素加入 Rh 内标,主量元素加入 Cd 内标)后上机测试。主量元素及稀土元素平均相对标准偏差优于 5%。

### 3 结果

#### 3.1 岩石学及矿物学

Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物主要由黄色或白色球粒状组分及白色薄片状组分构成,黄色球粒状组分主要集中在残余流体通道附近,几乎不含有碎屑沉积物(图 3a)。样品极易碎,碎裂后的碎块宏观产状呈白色薄片状和黄色或白色球粒状(图 2b—d)。薄片状碎块的显微结构观察显示由针状文石和短柱状方解石组成(图 3a—c),局部发育镁硅

酸盐,碳酸盐矿物与镁硅酸盐矿物间孔隙明显(图 3c),说明二者间可能存在沉积间断。黄色或白色球粒状样品由不同大小的不规则球状物质组成(图 3d—f),单个球体直径约几微米到几百微米,表面光滑(图 3e—f),能谱分析显示由 Si、O 和 Mg 组成(图 3f)。Conical 蛇纹岩泥火山以往的研究均显示自生碳酸盐岩烟囱及镁硅酸盐烟囱均含有无定形镁硅酸盐<sup>[4, 13, 15, 17]</sup>,因此,球状集合体组成的黄色或白色球粒状沉积物主要成分为无定形的镁硅酸盐。

#### 3.2 主量元素

Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物主量元素分析结果(表 1)显示,薄片状碎块 CaO 含量为 49.3%~53.3%, MgO 含量为 2.3%~4.5%。球粒状碎块 CaO 含量为 0.5%~2.9%, MgO 含量为 25.5%~29.1%。薄片状和球粒状碎块的混合样品 CaO 含量为 11.2%~41.2%, MgO 含量为 7.8%~22.5%。样品的 MgO 含量与 CaO 含量显示了强烈负相关性,与 Na<sub>2</sub>O 和 K<sub>2</sub>O 含量显示了较好的正相关性(图 4b、c)。TiO<sub>2</sub> 和 MnO 含量均低于 0.01%。

#### 3.3 稀土元素

Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物均显示了较低的稀土元素(REE)含量(表 2),且类薄片状碎块的总稀土含量(ΣREE 为 227.2~4 136.6 ng/g, 平均

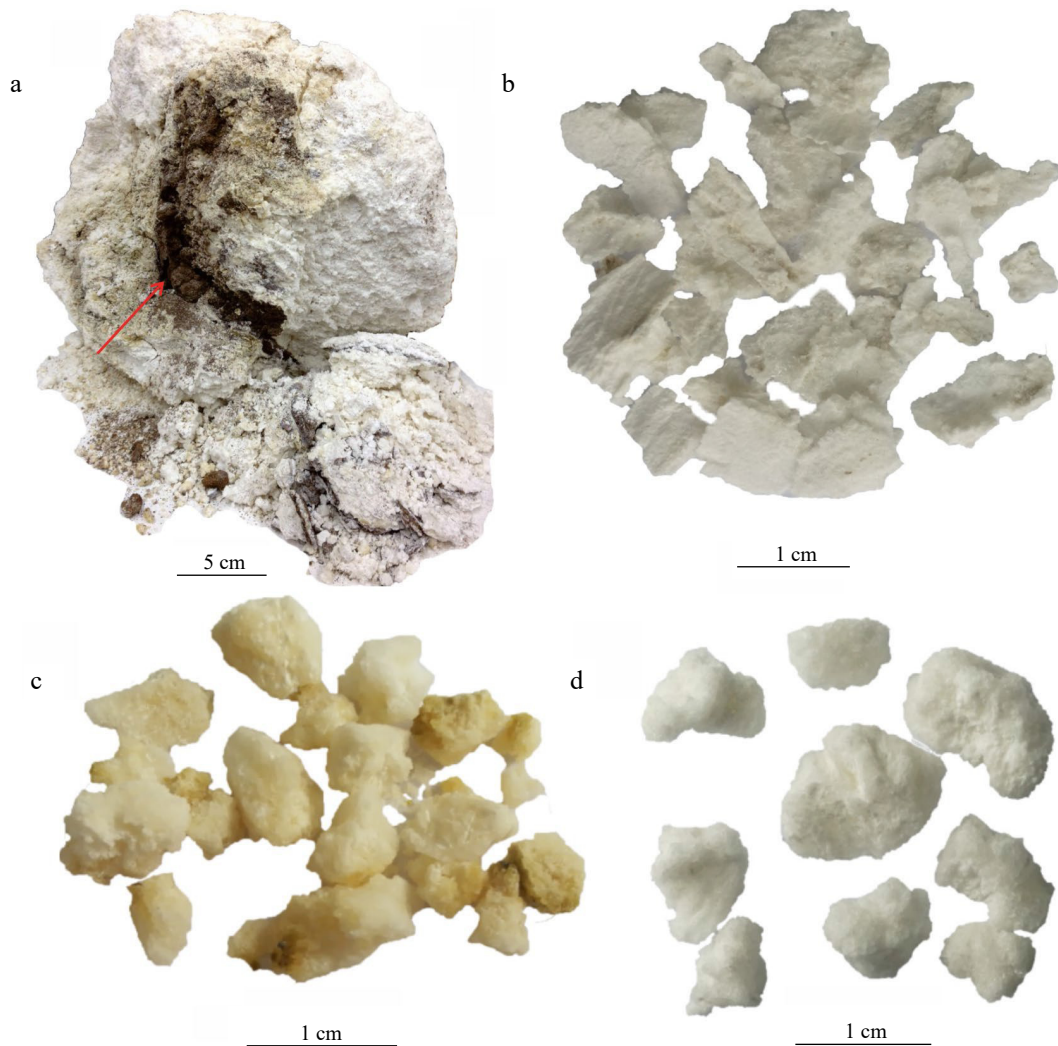


图2 Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物手标本

a. 具有不规则残余流体通道的疏松多孔自生沉积物, 箭头指示残余流体通道; b. 薄片状碎块; c. 黄色球粒状碎块; d. 白色球粒状碎块。

Fig.2 Authigenic deposition from Conical serpentine mud volcano

a. Loose porous authigenic deposition with irregular residual fluid path marker by the arrow; b. lamellar fragment; c. yellow spherical fragment; d. white spherical fragment.

值 1 306.3 ng/g)略高于球粒状碎块的总稀土含量 ( $\Sigma$ REE 为 115.4~3 64.9 ng/g, 平均值 192.5 ng/g)。薄片状和球粒状碎块的混合样品的稀土元素特征与薄片状碎块相似, 具有相对高的总稀土含量 ( $\Sigma$ REE 含量为 156.7~514.8 ng/g, 平均值 285.5 ng/g)。所有样品均显示了 Eu 正异常特征(薄片状碎块的 Eu/Eu\* 为 1.17~8.00, 粒状碎块的 Eu/Eu\* 为 2.46~37.14, 混合碎块的 Eu/Eu\* 为 1.88~5.96)。

## 4 讨论

### 4.1 渗漏流体与海水的贡献比例

马利亚纳弧前蛇纹岩泥火山渗漏流体的稀土

含量较低, 配分模式以轻稀土略微富集为特征<sup>[14]</sup>, 而 Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物显示了轻微的重稀土富集特征(图 5), 说明其形成过程中同时受到了渗漏流体和海水稀土元素组成的影响。Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物中方解石和文石的形成被认为与碳酸盐矿物沉淀过程中海水与渗漏流体贡献比例差异有关<sup>[15]</sup>。但是, 除碳酸盐矿物外, 本文研究的 Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物中还发育较多黄色或白色球粒状无定形镁硅酸盐(图 2), 主要由镁和硅组成(图 3f、表 1), 自生沉积物样品镁含量与钠和钾含量具有非常好的正相关性(图 4b、c), 说明无定形镁硅酸盐中还含有少量钠和钾。

Fleet 等<sup>[32]</sup>曾利用稀土元素混合模型对铁锰结

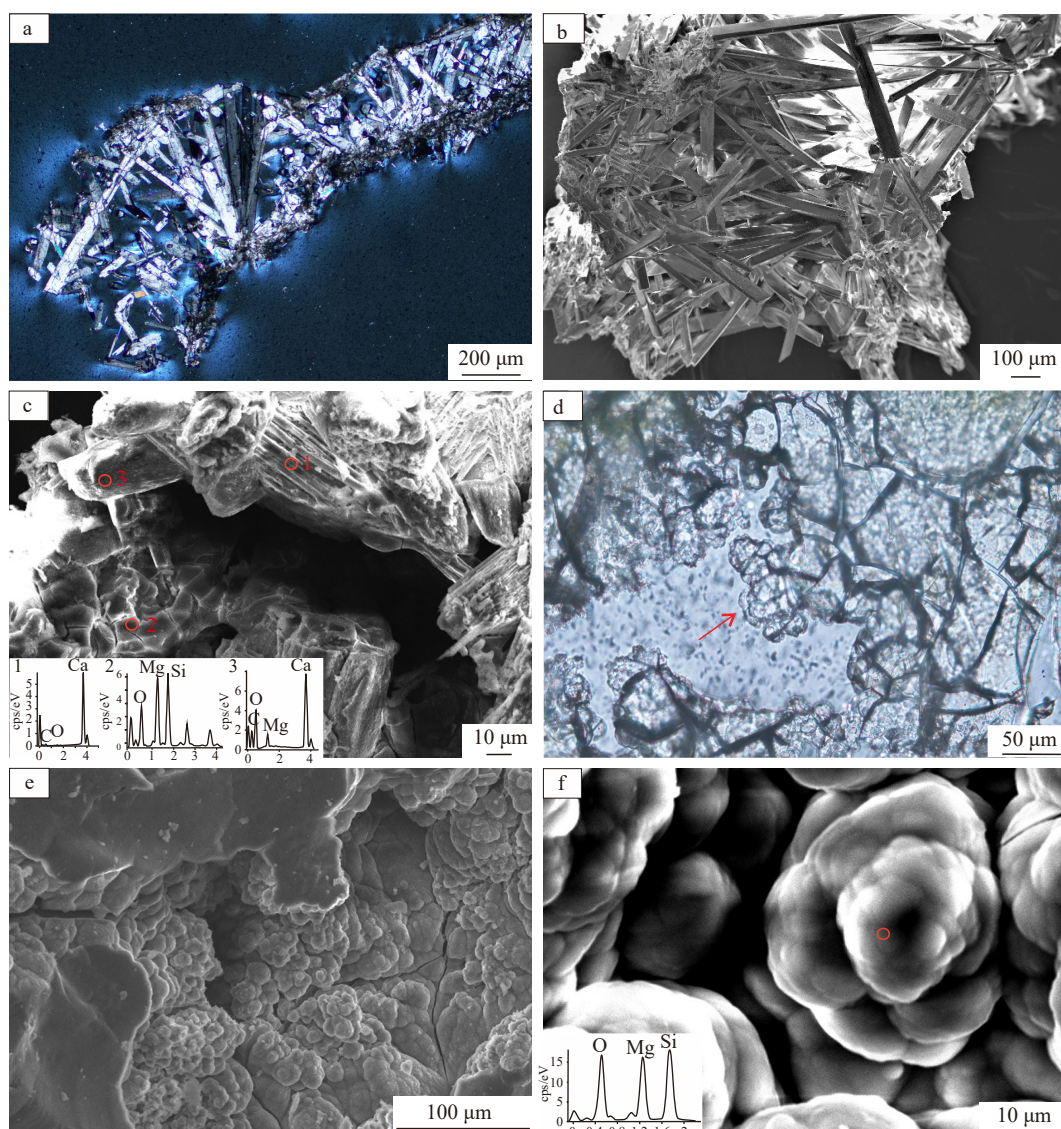


图 3 Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物显微结构特征

a. 薄片状碎块发育针状文石的显微薄片照片(正交偏光)及 b 扫描电镜照片; c. 薄片状碎块中棱柱状方解石与针状文石伴生发育, 碳酸盐矿物与镁硅酸盐矿物间孔隙明显, 能谱分析显示 1、2 和 3 分别为文石, 镁硅酸盐和方解石; d. 球粒状碎块由块状及边缘的球状(箭头)无定形镁硅酸盐组成(单偏光); e—f. 为球状无定形镁硅酸盐扫描电镜照片, 能谱分析结果显示主要元素组成为 Si、O、Mg。红色小圈为能谱测试点。

Fig.3 The microstructure features of authigenic deposition from Conical serpentinite mud volcano

a. Thin section photo of lamellar fragments showing acicular aragonite (polarized light); b. Photo showing acicular aragonite under scanning electron microscope (SEM); c. SEM photo showing prismatic calcite associated with acicular aragonite, but separated with irregular magnesium silicate by obvious porosity; the energy dispersive spectrometer (EDS) results indicate that 1, 2 and 3 are aragonite, magnesium silicate and calcite, respectively; d. Thin section photo showing spherical fragments are composed of massive parts and spherular parts at edges (single polarized light); e-f. SEM photos of amorphous magnesium silicates showing spherular structure; EDS results show that spherular fractures are composed of Si, O, Mg elements.

核中不同成因组分进行了定量研究, 我们把类似方法应用于马利亚纳弧前蛇纹岩泥火山自生沉积物, 利用渗漏流体和海水的稀土元素组成建立两端元混合模型, 获得不同比例混合后流体的稀土元素含量, 并将其稀土配分模式与自生沉积物的稀土配分模式进行比较(图 6a)。由于尚未有 Conical 蛇纹岩泥火山渗漏流体稀土元素含量的报道, 本文选取与 Conical 蛇纹岩泥火山地质背景类似的南 Chamorro

蛇纹岩泥火山的渗漏流体的稀土元素组成作为参考端元值<sup>[14,33]</sup>, 海水端元的稀土元素含量根据蛇纹岩泥火山底层海水值<sup>[14]</sup>。与海水典型的重稀土元素富集特征不同, 南 Chamorro 蛇纹岩泥火山的渗漏流体显示轻微轻稀土富集的平坦型稀土配分模式, 以及显著 Eu 正异常的特征<sup>[14]</sup>。两端元混合模型显示, 如果混合流体中海水比例超过了约 10%(渗漏流体比例低于 90%), 混合流体的稀土配分模式就

表 1 Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物主量元素特征  
Table 1 Characteristics of major elements in authigenic deposition from Conical serpentine mud volcano %

样品编号	碎块类型	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -T
h1	薄片状	2.3	53.3	1.1	0.02	0.02	0.01	0.010 9
h2	薄片状	3.8	50.1	1.2	0.11	0.03	0.02	0.073 6
h3	薄片状	4.5	49.3	1.3	0.00	0.03	0.02	0.003 0
h4	薄片状	3.4	49.7	1.1	0.01	0.02	0.01	0.006 3
h5	薄片状	2.5	52.8	1.2	0.22	0.03	0.02	0.053 0
h6	薄片状	2.3	50.9	1.1	0.27	0.06	0.02	0.130 2
h7	混合碎块	8.6	39.3	1.3	0.02	0.03	0.05	0.011 8
h8	混合碎块	18.9	18.2	1.8	0.06	0.03	0.10	0.025 5
h9	混合碎块	11.6	33.9	1.4	0.01	0.02	0.06	0.003 0
h10	混合碎块	7.8	41.1	1.4	0.01	0.03	0.04	0.006 8
h11	混合碎块	22.5	11.2	2.1	0.02	0.03	0.11	0.008 0
h12	混合碎块	8.0	40.6	1.4	0.01	0.03	0.04	0.003 3
h13	球粒状	28.1	0.7	2.0	0.01	0.02	0.14	0.013 0
h14	球粒状	27.2	2.1	2.1	0.00	0.03	0.13	0.006 7
h15	球粒状	28.6	0.7	2.2	0.00	0.02	0.13	0.001 1
h16	球粒状	28.1	0.7	2.2	0.00	0.02	0.13	0.001 5
h17	球粒状	27.9	0.5	2.3	0.01	0.02	0.13	0.002 2
h18	球粒状	27.7	0.9	2.6	0.00	0.03	0.14	0.000 2
h19	球粒状	27.0	0.8	2.5	0.00	0.02	0.13	0.002 7
h20	球粒状	25.5	2.9	2.2	0.00	0.03	0.13	0.002 3
h21	球粒状	29.1	0.5	2.5	0.01	0.02	0.14	0.002 3
h22	球粒状	27.0	2.2	2.4	0.00	0.03	0.13	0.003 4

注：主量元素分析结果未包含碳和硅元素含量，以及部分氧元素含量。

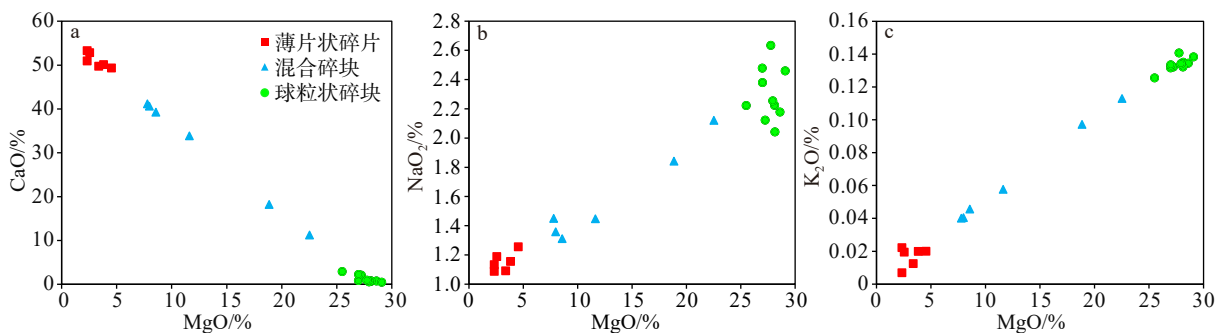


图 4 Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物部分主量元素含量图

Fig.4 Part of the major element contents in authigenic deposition from Conical serpentine mud volcano

显示了类似海水配分模式的形态特征,即显著的重稀土富集,La 正异常以及显著 Ce 负异常特征(图 6a)。这是由于海水端元稀土含量( $\Sigma\text{REE}$  为  $1.86 \times 10^{-2}$  ng/g)显著高于渗漏流体端元( $\Sigma\text{REE}$  为  $1.85 \times 10^{-3}$  ng/g)<sup>[14]</sup>。

但是,Conical 蛇纹岩泥火山发育的大部分自生沉积物的稀土配分模式显示了与海水显著不同的特征(图 5),说明这些自生沉积物沉淀于与海水稀土特征显著不同的流体环境中,且这种流体中的海水比

表 2 Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物稀土元素含量及特征  
Table 2 Contents and characteristics of REE in authigenic deposition of Conical serpentinite mud volcano

样品编号	ng/g															Ce/Ce*	Eu/Eu*	
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			ΣREE
h1	40.5	155.8	7.3	89.7	8.8	10.0	5.8	3.1	9.3	125.0	3.0	9.3	0.4	6.2	1.4	350.6	2.07	5.40
h2	89.1	168.9	29.4	121.6	14.0	16.7	37.4	6.3	28.6	371.7	10.3	26.4	2.3	29.8	3.0	583.7	0.75	2.36
h3	51.9	97.7	6.5	36.2	9.2	5.5	2.0	1.4	7.2	99.0	2.9	3.7	0.3	2.8	0.3	227.2	1.17	8.00
h4	51.0	147.4	15.6	66.6	4.6	13.9	12.3	1.9	11.8	118.4	3.2	7.0	—	8.5	1.1	344.9	1.19	5.33
h5	848.4	161.5	121.1	516.9	84.9	22.6	89.4	12.9	107.9	1 201.3	24.0	67.3	14.0	105.3	18.4	2 194.8	0.11	1.17
h6	1 620.9	547.2	245.7	1 020.1	174.9	45.2	127.2	16.7	125.7	1 079.9	26.7	70.5	16.2	85.2	14.6	4 136.6	0.20	1.48
h7	47.7	91.5	9.2	37.4	9.0	7.3	12.0	2.0	22.3	160.1	3.2	7.8	1.4	9.8	2.1	262.7	1.00	3.22
h8	55.8	127.5	20.0	82.3	30.3	12.9	38.6	6.5	56.0	461.0	13.5	27.1	5.9	33.3	5.2	514.8	0.86	1.88
h9	16.9	69.1	3.6	20.6	8.0	10.1	11.9	1.0	5.6	89.0	2.2	4.5	0.4	0.9	1.9	156.7	2.06	4.88
h10	35.0	67.8	8.6	31.0	2.0	7.1	5.6	2.8	11.0	114.3	3.1	7.5	0.4	10.8	1.5	194.3	0.90	5.96
h11	54.8	124.6	8.0	48.3	19.4	11.9	13.6	4.2	14.1	120.7	5.3	7.8	—	12.4	1.4	325.7	1.34	4.56
h12	49.2	86.0	5.5	42.1	15.1	8.4	24.7	1.8	11.1	104.6	4.1	6.0	—	4.1	0.8	258.8	1.13	1.96
h13	55.7	142.5	6.1	54.4	11.6	12.4	17.8	4.4	16.0	319.6	6.3	16.0	1.8	18.4	1.3	364.9	1.67	3.71
h14	32.6	77.2	5.3	23.1	6.4	4.1	6.0	1.1	9.9	80.0	4.3	7.4	0.5	2.7	2.5	183.2	1.33	3.47
h15	21.9	50.9	2.5	25.1	4.8	3.6	2.5	1.6	11.4	139.5	3.6	8.0	—	6.1	1.3	143.3	1.49	5.50
h16	9.8	70.8	1.0	17.0	—	6.6	—	0.3	0.7	58.8	2.1	3.9	0.5	1.6	1.2	115.4	4.78	37.14
h17	57.0	81.8	9.0	42.0	2.9	9.1	8.2	2.1	8.6	158.3	3.4	6.3	0.4	12.1	1.8	244.7	0.82	5.29
h18	8.5	105.6	3.2	8.1	3.1	9.5	8.2	1.7	8.0	109.1	1.6	3.7	0.1	5.0	0.7	167.0	4.57	7.01
h19	8.3	97.9	—	—	—	4.3	8.3	0.3	14.0	61.8	2.9	5.2	—	2.6	0.6	144.5	11.32	3.36
h20	16.8	58.1	4.1	4.0	1.0	4.6	8.0	1.0	5.1	121.1	2.9	7.3	2.2	8.9	3.8	127.9	1.61	3.61
h21	48.8	135.2	6.4	67.3	9.5	5.5	9.9	0.6	5.3	126.1	2.6	7.6	0.1	2.5	1.2	302.6	1.69	2.46
h22	10.0	77.6	1.7	6.0	0.9	7.3	4.0	0.6	9.8	74.2	2.5	5.5	0.8	4.4	0.3	131.5	4.30	10.67

Ce/Ce\*=2Ce<sub>N</sub>/(La<sub>N</sub>+Pr<sub>N</sub>), Pr/Pr\*=2Pr<sub>N</sub>/(Ce<sub>N</sub>+Nd<sub>N</sub>), Eu/Eu\*=Eu<sub>N</sub>/(0.33Nd<sub>N</sub>+0.67Gd<sub>N</sub>), ΣREE不包括Y。“—”表示未检出。

例应低于 10%, 渗漏流体贡献应超过 90%。因此, Conical 蛇纹岩泥火山的大部分自生沉积物形成于较强的流体渗漏环境。

Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物中绝大部分样品(除两个稀土含量相对较高样品外)均具有非常显著的 Eu 正异常特征(图 5)。Eu 正异常是南 Chamorro 蛇纹岩泥火山渗漏流体的典型特征<sup>[4]</sup>。尽管超过 10% 海水的混合流体就显示了重稀土富集的海水型特征, 但是就 Eu 元素特征来说, 在混合模型中, 即使海水比例达 20%, 混合流体的稀土配分模式仍显示轻微的 Eu 正异常特征(图 6a)。因此, Eu/Eu\*值似乎更加适合于进一步半定量估算形成 Conical 蛇纹岩泥火山形成自生沉积物样品海水与渗漏流体所占的比例。拟合结果显示, 稀土含量最高的两个碳酸盐型样品具有最低的 Eu/Eu\*值

(1.17 与 1.48), 其形成流体中的海水所占比例最高(0.2 与 0.34, 图 6b), 说明这两个样品形成过程中受海水影响更加显著。部分样品的 Eu/Eu\*值高于渗漏流体端元值取值范围(图 6b), 说明尽管南 Chamorro 蛇纹岩泥火山渗漏流体与 Conical 蛇纹岩泥火山渗漏流体均具有显著 Eu 正异常特征, 但后者可能具有更高的 Eu/Eu\*值, 这可能导致流体混合比例反演结果对海水比例的低估。尽管海水比例最高的样品出现在薄片状碳酸盐岩碎块样品中, 但总体而言薄片状碳酸盐岩碎块、球粒状镁硅酸盐碎块和混合碎块样品的 Eu/Eu\*值及其拟合的海水比例并不存在类型间的系统性差异(图 6b), 说明薄片状碎块和球粒状碎块均形成于较强的渗漏环境, 海水参与程度及渗漏强度并非是自生沉积物中碳酸盐和无定形镁硅酸盐矿物同时发育的原因。



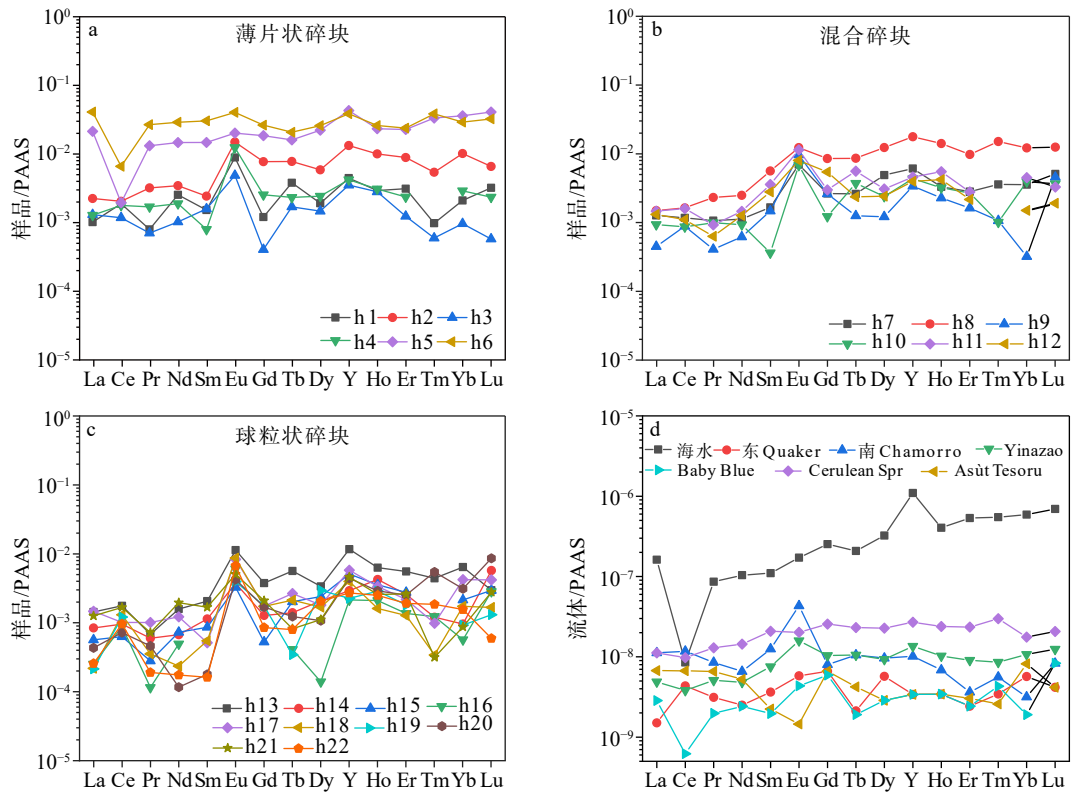


图 5 Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物及马里亚纳弧前蛇纹岩泥火山渗流流体澳大利亚后太古代页岩标准化稀土配分模式图  
海水与渗流流体数据来自文献 [14]。

Fig.5 Rare earth element patterns of authigenic deposition from Conical serpentinite mud volcano and of seepage fluids from Marianas forearc serpentinite mud volcanoes standardized by Post-Archean Australian Shale  
Data of seepage fluids and seawater after reference [14].

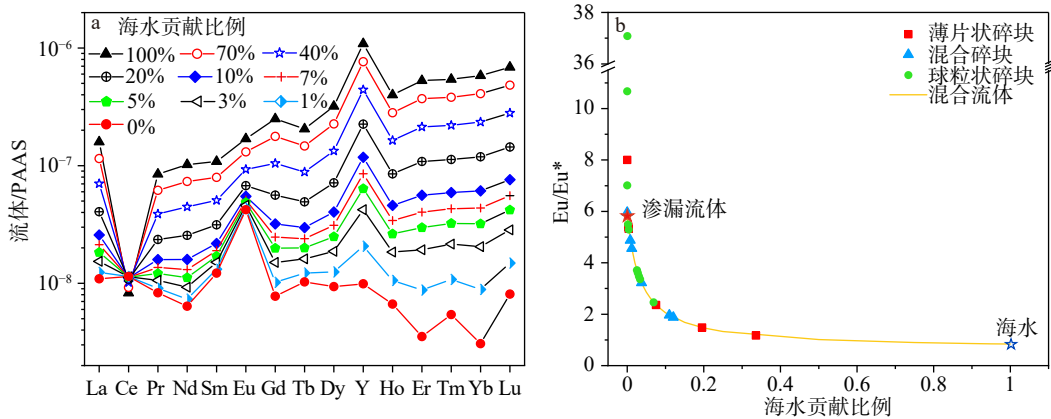


图 6 渗流流体与海水混合流体的澳大利亚后太古代页岩标准化稀土配分模式 (a) 及 Eu/Eu\* 值与拟合海水贡献比例 (b)  
a 中 0% 代表南 Chamorro 渗流流体, b 中曲线根据海水与南 Chamorro 渗流流体定量混合后与其对应的 Eu/Eu\* 值拟合; 样品中海水贡献比例根据混合流体曲线对应拟合函数计算, 不在曲线上的点默认海水贡献为 0。

Fig.6 The rare earth partitioning patterns of mixed fluids of seepage fluids and seawater standardized by Post-Archean Australian Shale (a) and Eu/Eu\* values V.S. modeled seawater contribution ratios (b)

a. 0% represents the REE pattern of the seepage fluid from South Chamorro serpentinite mud volcano; b. The curve is deduced according to the Eu/Eu\* values of mixed fluids of seawater and the seepage fluid from South Chamorro serpentinite mud volcano; The proportion of seawater contribution in the sample is calculated according to the corresponding fitting function of the mixed fluid curve, The seawater ratios of the points with Eu/Eu\* values beyond the curve were taken as 0.

## 4.2 渗漏流体类型

马里亚纳弧前 Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物主要由碳酸盐矿物和无定形镁硅酸盐组成, 自生沉积物中的碳酸盐矿物常结合成薄片状, 而无定形镁硅酸盐呈小球状, 在宏观上基本可区分(图 2), 混合碎块样品可能是样品破碎时的物理混合。扫描电镜下观察也显示镁硅酸盐与碳酸盐矿物之间有明显的沉积间隔(图 3c), 说明碳酸盐矿物和无定型镁硅酸盐可能并非共沉淀。前人也曾报道在 Conical 蛇纹岩泥火山顶的碳酸盐烟囱晶洞中发育少量凝胶状镁硅酸盐, 说明镁硅酸盐沉淀晚于碳酸盐, 为不同期次流体作用的结果<sup>[9,17]</sup>。热力学上, 碳酸盐矿物在碱性条件下稳定, 而镁硅酸盐矿物在碱性条件下稳定性差, 二者形成于不同的酸碱条件。这些特征说明, Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物中碳酸盐矿物碎块和无定形镁硅酸盐碎块可能分别是两种不同性质流体的渗漏活动的产物。

在 Conical 蛇纹岩泥火山顶碳酸盐烟囱状自生沉积物发育的邻近区域报道有烟囱状硅酸盐自生沉积物发育, 且硅酸盐烟囱一般比碳酸盐岩烟囱更加粗大, 成分与碳酸盐烟囱晶洞中的硅酸盐成分一致<sup>[17]</sup>。形成碳酸盐岩质烟囱的渗漏流体的碳酸盐碱度极高, 可达海水值的 20 倍以上(52~69 meq/Kg)<sup>[13-14]</sup>, 其硅含量低于或者略高于底层海水值<sup>[13-14]</sup>。沉淀硅酸盐质烟囱的渗漏流体的 pH 值(9.28)也高于海水, 但碱度(约 6 meq/Kg)仅略高于海水值, 其硅含量却高于底层海水数倍<sup>[4,17]</sup>, 这说明 Conical 蛇纹岩泥火山顶发育“低硅型”和“高硅型”两种性质明显不同的渗漏流体。因此, 基于本研究自生沉积物中薄片状碳酸盐碎块和球粒状硅酸盐碎块样品间显著的岩石学和矿物学差异, 以及二者并非形成于同种渗漏流体、不同渗漏强度产物的特性, 推测本研究中 Conical 蛇纹岩泥火山的薄片状碳酸盐样品应形成于“低硅型”渗漏流体活跃阶段, 球粒状无定形镁硅酸盐样品应形成于“高硅型”渗漏流体活跃阶段, Conical 蛇纹岩泥火山在同一渗漏点发育“低硅型”和“高硅型”两种渗漏流体的动态演化。

在 Conical 蛇纹岩泥火山顶海底的不同位置已报道发育“低硅型”和“高硅型”两种流体的渗漏<sup>[13-14,17]</sup>, 但是关于同一个渗漏点发育“低硅型”和“高硅型”两种类型流体动态演化的机制目前尚不清楚。地震被认为是除蛇纹岩浮力与俯冲带深部超压以外, 引起蛇纹岩泥火山间歇性喷发的重要原因<sup>[1]</sup>, 地震等脉冲事件是否可能为引起多种性质渗漏流体

转换及动态演化的原因需要进一步深入研究。

## 5 结论

马里亚纳弧前 Conical 蛇纹岩泥火山自生沉积物由两种矿物组成, 分别是白色薄片状碳酸盐矿物以及黄色或白色球粒状无定型镁硅酸盐。前者 CaO 含量较高, MgO 含量较低, 主要由针状文石和棱柱状方解石组成, 后者 MgO 含量较高, CaO 含量较低, 微观下呈球状集合体。二者均形成于较强的渗漏环境, 渗漏流体与海水稀土元素混合模型显示形成大部分自生沉积物的流体中的渗漏流体比例应高于 90%, 碳酸盐及无定形镁硅酸盐可能分别由“低硅型”和“高硅型”两种性质流体渗漏所引起。自生沉积物的这些特征说明, Conical 蛇纹岩泥火山同一渗漏点可能发育“低硅型”和“高硅型”两种性质渗漏流体的动态演化, 但诱发二种流体转换的机制有待进一步研究。

**致谢:** 感谢美国夏威夷大学 Fryer P 教授提供样品和采样信息, 感谢审稿人提出的宝贵意见。

## 参考文献 (References)

- [1] Fryer P. Serpentine mud volcanism: observations, processes, and implications [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4(1): 345-373.
- [2] Frery E, Fryer P, Kurz W, et al. Episodicity of structural flow in an active subduction system, new insights from mud volcano's carbonate veins - Scientific Ocean drilling expedition IODP 366 [J]. *Marine Geology*, 2021, 434(3): 106431.
- [3] Mottl M J, Wheat C G, Fryer P, et al. Chemistry of springs across the Mariana forearc shows progressive devolatilization of the subducting plate [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(23): 4915-4933.
- [4] Haggerty J. Evidence from fluid seeps atop serpentine seamounts in the Mariana Forearc: clues for emplacement of the seamounts and their relationship to Forearc Tectonics [J]. *Marine Geology*, 1991, 102(1-4): 293-309.
- [5] Fryer P, Wheat C G, Williams T, et al. Mariana serpentinite mud volcanism exhumes subducted seamount materials: implications for the origin of life [J]. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2020, 378(2165): 20180425.
- [6] Parkinson I J, Pearce J A. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP leg 125): Evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting [J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(9): 1577-1618.

- [7] Savov I P, Ryan J G, D'antonio M, et al. Geochemistry of serpentinitized peridotites from the Mariana Forearc Conical Seamount, ODP Leg 125: Implications for the elemental recycling at subduction zones [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(4): 1-24.
- [8] Fryer P, Ambos E L, Hussong D M. Origin and emplacement of Mariana forearc seamounts [J]. *Geology*, 1985, 13(11): 774-777.
- [9] Haggerty J A. Petrology and Geochemistry of Neocene Sedimentary Rocks from Mariana Forearc Seamounts: Implications for Emplacement of the Seamounts [M]. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 1987, 175-185.
- [10] Savov I P, Ryan J G, D'antonio M, et al. Shallow slab fluid release across and along the Mariana arc-basin system: Insights from geochemistry of serpentinitized peridotites from the Mariana fore arc [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B9).
- [11] Haggerty J, Fisher J. Short-Chain Organic Acids in Interstitial Waters from Mariana and Bonin Forearc Serpentines: Leg 125 [J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1992: 125.
- [12] Fryer P, Wheat C G, Mottl M J. Mariana blueschist mud volcanism: Implications for conditions within the subduction zone [J]. *Geology*, 1999, 27(2): 103-106.
- [13] Mottl M J, Komor S C, Fryer P, et al. Deep-slab fuel extremophilic Archaea on a Mariana forearc serpentinite mud volcano: Ocean Drilling Program Leg 195 [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2003, 4(11): 1-14.
- [14] Hulme S M, Wheat C G, Fryer P, et al. Pore water chemistry of the Mariana serpentinite mud volcanoes: A window to the seismogenic zone [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(1): Q01X09.
- [15] Tran T H, Kato K, Wada H, et al. Processes involved in calcite and aragonite precipitation during carbonate chimney formation on Conical Seamount, Mariana Forearc: Evidence from geochemistry and carbon, oxygen, and strontium isotopes [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 137: 55-64.
- [16] 佟宏鹏, 姚凯, 陈琳莹, 等. 马里亚纳弧前Quaker蛇纹岩泥火山自生烟囱生长模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(06): 15-26. [TONG Hongpeng, YAO Kai, CHEN Linying, et al. Formation model of authigenic chimneys on the Quaker serpentinite mud volcano in the Mariana forearc [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(06): 15-26.]
- [17] Fryer P, Saboda K L, Johnson L E, et al. Conical Seamount: SeaMARC II, Alvin submersible, and seismic reflection studies [M]. //Fryer P, Pearce J A, Stokking L B, et al. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Initial Reports*. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1990: 69-80.
- [18] Yamanaka T, Mizota C, Satake H, et al. Stable isotope evidence for a putative endosymbiont-based lithotrophic bathymodiolus sp. mussel community atop a serpentinite seamount [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2003, 20(3): 185-197.
- [19] Gharib J, J. Clastic metabasites and authigenic minerals within serpentinite protrusions from the Mariana forearc: Implications for subforearc subduction processes [D]. Ph. D. Dissertation. Honolulu: University of Hawaii, 2006.
- [20] Mottl M J. Pore waters from serpentinite seamounts in the Mariana and Izu-Bonin forearcs, Leg 125: evidence for volatiles from the subducting slab. [C]//Fryer P, Pearce J A, Stokking L B, et al. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1992: 373-385.
- [21] Fryer P, Mottl M, Johnson L, et al. Serpentine bodies in the forearcs of western pacific convergent margins: origin and associated fluids [J]. *Active Margins and marginal basins of the Western Pacific*, 1995: 259-279.
- [22] Charlou J L, Donval J P, Fouquet Y, et al. Geochemistry of high H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14'N, MAR) [J]. *Chemical Geology*, 2002, 191(4): 345-359.
- [23] Mccollom T. M. Laboratory Simulations of Abiotic Hydrocarbon Formation in Earth's Deep Subsurface [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2013, 75(1): 467-494.
- [24] Mccollom T M, Seewald J S. A reassessment of the potential for reduction of dissolved CO<sub>2</sub> to hydrocarbons during serpentinization of olivine [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(21): 3769-3778.
- [25] Proskurowski G, Lilley M D, Seewald J S, et al. Abiogenic Hydrocarbon Production at Lost City Hydrothermal Field [J]. *Science*, 2008, 319(5863): 604-607.
- [26] 丁兴, 刘志锋, 黄瑞芳, 等. 大洋俯冲带的水岩作用——蛇纹石化[J]. *工程研究-跨学科视野中的工程*, 2016, 8(3): 268. [DING Xing, LIU Zhifeng, HUANG Ruifang, et al. Water-Rock Interaction in Oceanic Subduction Zone: Serpentinization [J]. *Journal of Engineering Studies*, 2016, 8(3): 268.]
- [27] Bebout G E. The impact of subduction-zone metamorphism on mantle-ocean chemical cycling [J]. *Chemical Geology*, 1995, 126(2): 191-218.
- [28] Wheat C G, Seewald J S, Takai K. Fluid transport and reaction processes within a serpentinite mud volcano: South Chamorro Seamount [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 269: 413-428.
- [29] 冯俊熙, 罗敏, 胡钰, 等. 海底蛇纹岩化伴生的碳酸盐岩研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(4): 789-799. [FENG Junxi, LUO Min, HU Yu, et al. Progress of the Research on Authigenic Carbonates Associated with Oceanic Serpentinization [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(4): 789-799.]
- [30] Albers E, Shervais J, Hansen C, et al. Shallow depth, substantial change: fluid-metasomatism causes major compositional modifications of subducted volcanics (Mariana forearc) [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 10: 826312.
- [31] Alt J C, Shanks W C. Stable isotope compositions of serpentinite seamounts in the Mariana forearc: Serpentinization processes, fluid sources and sulfur metasomatism [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 242(3): 272-285.
- [32] Fleet A J. Hydrothermal and hydrogenous ferro-manganese deposits: Do they form a continuum? The rare earth element evidence [M]. Springer US, 1983, 12: 535-555.
- [33] Wheat C G, Fryer P, Fisher A T, et al. Borehole observations of fluid flow from South Chamorro Seamount, an active serpentinite mud volcano in the Mariana forearc [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267(3-4): 401-409.