

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.05.010

冲绳海槽海底热液区附近浮岩气孔充填沉积物中热液活动的地球化学记录

张玉祥^{1,2}, 曾志刚^{1,2,3}, 殷学博¹, 李禾⁴, 齐海燕¹, 王晓媛^{1,3}, 陈帅¹

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

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海底矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要:以冲绳海槽伊平屋北热液区附近两个站位(HOBAB2-T3和HOBAB2-T6)的浮岩为研究对象,分别对充填沉积物的浮岩(T3-D、T6-D)和去除沉积物的浮岩(T3-C、T6-C)进行扫描电镜观察、矿物组成和微量元素组成的对比分析。结果表明,浮岩气孔充填的沉积物主要来源于冲绳海槽内碎屑沉积物的混入,其中气孔较小的T3浮岩中充填的沉积物组成主要为伊利石和石英,而气孔较大的T6浮岩中充填的沉积物组成主要为石英和长石,代表了海槽内沉积物的一般矿物组成。邻近热液区的T3浮岩气孔中的沉积物含有异常高含量的Pb($>101\mu\text{g/g}$)、Zn($>196\mu\text{g/g}$)、Cu($>47\mu\text{g/g}$)等金属元素,代表强烈的热液活动信号;距热液区稍远的T6浮岩气孔中沉积物也表现出Pb、Cu等元素含量的异常特征,可能代表较弱的热液活动信号。这说明海底热液区附近的浮岩气孔中充填的沉积物可以记录热液活动的信息,这对寻找浮岩分布区新的热液活动具有重要的指示意义。

关键词:浮岩;气孔充填沉积物;热液活动;矿物组成;微量元素

中图分类号:P736 **文献标识码:**A

Geochemical records of hydrothermal activities in the sediment fillings within pumice's vesicles in the vicinity of a seafloor hydrothermal field in the Okinawa Trough

ZHANG Yuxiang^{1,2}, ZENG Zhigang^{1,2,3}, YIN Xuebo¹, LI He⁴, QI Haiyan¹, WANG Xiaoyuan^{1,3}, CHEN Shuai¹

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: The pumices samples from HOBAB2-T3 and HOBAB2-T6 near the Iheya North hydrothermal field, Okinawa Trough (OT) are divided into two groups. One group (T3-C and T6-C) was carefully cleaned to remove any sediment filled in vesicles, while the second group (T3-D and T6-D) remained unchanged. To qualitatively understand the mineral and chemical compositions of the sediment fillings in pumice's vesicles, each group of pumices was examined by scanning electron microscope (SEM) and their mineralogy and trace elemental compositions were analyzed and compared. Results show that the sediments in pumices are mainly from OT clastic deposits. Vesicles in T3 pumice are smaller and they are mainly filled by illite and quartz in terms of mineral compositions. However, sediments in larger vesicles of T6 pumice are dominated by quartz and feldspar, same as the minerals in OT in general. The sediments in T3 pumice, adjacent to the hydrothermal field, however, contain extremely high concentrations of Pb ($>101\mu\text{g/g}$), Zn ($>196\mu\text{g/g}$), and Cu ($>47\mu\text{g/g}$), indicating

资助项目:国家重点基础研究发展计划“典型弧后盆地热液活动及其成矿机理”(2013CB429700);国家自然科学基金项目“海底热液活动研究”(41325021),“台湾东北部龟山岛安山岩的成因研究”(41306053),“龟山岛热液流体扩散及其对元素分布的影响”(41476044),“俯冲作用对岩浆活动的影响机制研究:以东马努斯海盆为例”(41706052);中国科学院战略性先导科技专项“热液系统的物质能量输运及其动力学解析”(XDA11030302);全球变化与海气相互作用专项“西太平洋俯冲带及弧后盆地体系”(GASI-GEOGE-02);泰山学者工程专项(ts201511061);青岛海洋科学与技术国家实验室“鳌山人才”计划项目(2015ASTP-0S17)

作者简介:张玉祥(1990—),男,博士研究生,主要研究方向为海底岩石学,E-mail: yongng0511@126.com

通讯作者:曾志刚(1968—),男,研究员,主要研究方向为海底热液活动,E-mail: zgzeng@qdio.ac.cn

收稿日期:2017-01-18;**改回日期:**2017-02-16. 文凤英编辑

strong hydrothermal activities. For T6 pumice that is slightly farther away from the hydrothermal field, the sediment fillings also exhibit anomalies in Pb and Cu, which might stand for relatively weaker hydrothermal signal. The above indicates that sediments in pumice's vesicle near the hydrothermal field may record information of hydrothermal activity, which has great significance in exploring new hydrothermal field in the region with pumiceous volcanic rocks.

Key words: pumice; sediment fillings in vesicles; hydrothermal activity; mineral composition; trace elements

现代海底热液活动自 20 世纪 70 年代发现以来一直是海洋地质学界研究的热点,到目前为止,大量的海底热液活动区已被发现,遍布洋中脊、弧后盆地、岛弧等构造环境中^[1]。热液活动除了在热液喷口附近直接产生硫化物及硫酸盐堆积体等热液产物外,热液流体或热液柱的扩散也会对周围的环境产生影响,从而形成一系列对热液活动具有指示意义的异常现象^[2-4]。寻找热液异常也是目前探索新海底热液区的重要手段,常用的探测标志包括水体异常(如温度异常、浊度异常、甲烷异常等)、岩石蚀变、热液生物、含金属沉积物等^[5]。其中,含金属沉积物因其广泛的分布范围对确定海底热液区(尤其是被埋藏或非活动的热液区)的位置具有更为重要的意义^[5]。此外,含金属沉积物的沉积序列还记录了海底热液活动的历史^[6,7]。尽管如此,利用含金属沉积物示踪热液活动也存在一些不足,一是受到海底地形的制约,因为沉积物需要一定的低地形作为沉积空间,对于发育在海山或海脊上的热液区,其周围的沉积物缺失或者沉积层较薄,从而难以采用沉积物捕获器获取,有的沉积层可能由于距离热液区太远而没有记录热液活动的信息,这也是海上采样过程中常常遇到的问题;二是海底沉积物可能会受到底层洋流或构造作用的扰动,可能造成正常沉积物的混入,掩盖或干扰其记录的热液活动信息。

浮岩是一种气孔极其发育的火山喷出岩^[8],不仅在陆地上广泛分布^[9,10],也出露于海底^[11]。有的热液区就发育在以浮岩为主的海山上,如冲绳海槽中部的伊平屋北热液区^[12]。实验研究表明,浮岩的气孔连通性良好^[9],因此,细粒沉积物非常容易进入海底浮岩的气孔内部。这些气孔中的沉积物可以免受洋流和构造运动的影响而能有效得到保存。那么对于海底热液区附近的浮岩而言,其气孔中充填的沉积物是否具有类似含金属沉积物的特征?是否能记录海底热液活动的信息?目前还缺少相关的研究。如果答案是肯定的,这就为寻找有浮岩分布的海底热液区增加了一个潜在的探测指标。本文选取了冲绳海槽伊平屋北热液区附近两个站位的浮岩作为研究对象,定性分析了浮岩气孔充填沉积物的形态学、矿物学及微量元素地球化学特征,探讨了沉积

物的来源及其地球化学组成与热液活动的关系。

1 地质背景与样品

冲绳海槽位于东海陆架与琉球岛弧之间(图 1),是一个中新世以来才开始扩张的新生弧后盆地^[13]。冲绳海槽在构造特征上具有南北分段的特点,以吐噶喇断裂带和宫古断裂带为界分为北中南三段^[14-16]。海槽内岩浆作用活跃^[17],根据岩石采样结果,从北向南各区段火山岩类型存在差异^[18]:北段主要出露英安岩和流纹岩;中段以玄武岩和流纹岩为主,伴有少量安山岩,呈现双峰式的特征;南段主要出露玄武岩或玄武岩安山岩;最南端则主要分布中酸性火山岩。值得注意的是,冲绳海槽的流纹岩和英安岩多以浮岩形式产出。目前在冲绳海槽的中部和北部已有大量浮岩的报导^[19-32]。此外,冲绳海槽热液活动也比较活跃,已发现多个热液活动区^[18],如中部的夏岛 84-1 热液区、伊平屋北热液区、Jade 热液区等,南部的 Dai-Yon Yonaguni 热液区、唐印热液区等。

伊平屋北海丘(27.8°N、126.9°E)位于冲绳海槽中部伊平屋地堑的西北部,冲绳岛西北约 180km 处(图 1)。该海丘高出海底约 500m,由几个小山丘和一个中央峡谷组成。国际大洋钻探计划(IODP)331 航次的钻探取样结果显示,该海丘上部地层主要为浮岩层、半远洋沉积层及热液蚀变火山角砾层相间分布^[12]。在海丘的西部发育几条南北走向的断层^[33]。伊平屋北热液区位于伊平屋北海丘中央峡谷的西部山坳,目前已在该热液区发现 9 个热液喷口,呈南北向沿断裂分布,其中北部大烟囱(NBC)具有最高的温度和喷口流体流速^[33]。此外,在一些小山包有热液溢流从裂隙中流出^[12,34]。该热液区的硫化物中富集 Cu、Zn、Pb 等元素^[35],热液流体中具有高含量的 K、I、B 及 NH₄ 等成分^[33]。

本研究中的浮岩样品于 2014 年 4 月由“科学”号“HOBAB2”航次在伊平屋北海丘通过电视抓斗采得,包括两个站位的样品(图 1; HOBAB2-T3 和 HOBAB2-T6),其中 T3 靠近伊平屋北热液区(距离 NBC 约 0.7km),水深 1039m,而 T6 距离热液区较

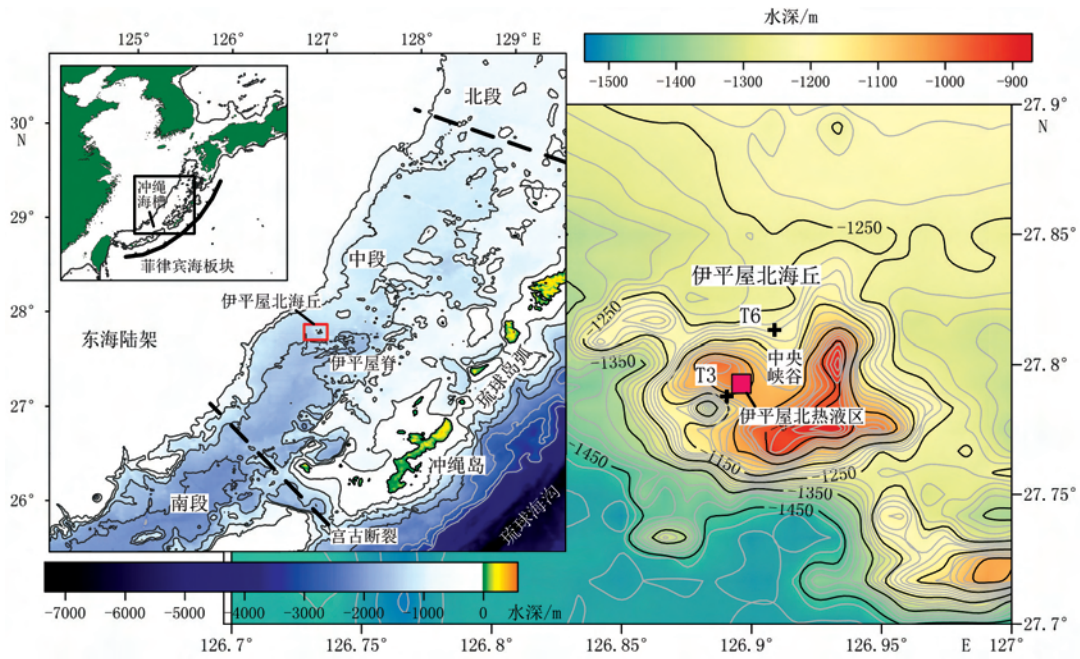


图1 冲绳海槽伊平屋北海丘的地理位置及水深图(图中标记了样品的采样位置和伊平屋北热液区的位置)
 Fig.1 Geographic and bathymetric map of the Iheya North Knoll, Okinawa Trough
 (Locations of sampling and Iheya North hydrothermal field are marked in the map)

远(距离 NBC 约 2.7km),位于中央峡谷的北端,水深 1190m。两个站位的浮岩都是灰白色浮岩,以火山玻璃为主,T3 浮岩几乎不含斑晶矿物,T6 浮岩含

少量的斜长石等斑晶。T3 浮岩气孔细密,且拉长定向,呈现明显的流动构造,而 T6 浮岩气孔相对较大,无流动构造(图 2)。

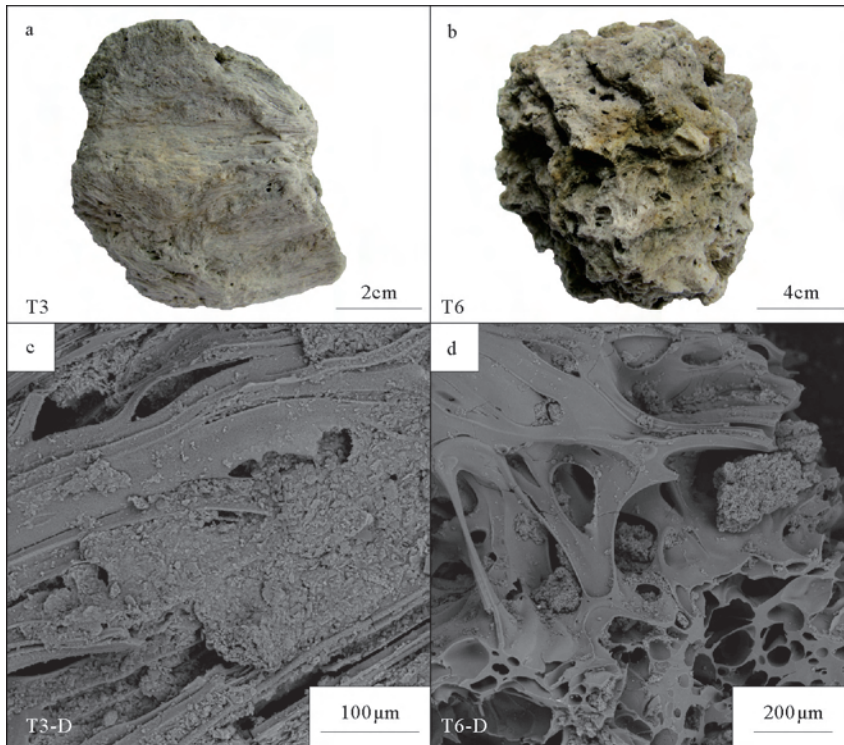


图2 样品照片(a和b:浮岩手标本照片;c和d:浮岩孔隙及其充填沉积物的扫描电镜图像)

Fig.2 Photographs of samples (a and b: photographs of pumice rock samples; c and d: SEM images of pumices' vesicles and their fillings)

由于浮岩具有较低的密度,因此,海底浮岩除了海底原地喷发成因之外,也有可能是受海流作用从其他地区搬运而来。然而,本文研究的样品是采用电视抓斗获得的大块浮岩样品,磨圆不明显,不具备受海流搬运的特征。另外,样品采集位置处在冲绳海槽内的高地形之上,从海槽内其他位置或琉球岛弧搬运来的浮岩不容易到达该区域。IODP 钻探结果显示,伊平屋北海丘上部的火山岩组成正是浮岩^[12]。因此,本文的样品应是原地形成的。

2 测试方法

由于难以将浮岩气孔中充填的沉积物进行分离提取,我们采取一种间接的方法来研究这些气孔充填物的组成。首先将新鲜的 T3 和 T6 浮岩分成两部分,一部分进行彻底的清洗,将气孔中的沉积物去除干净,编号为 T3-C 和 T6-C,另一部分浮岩不作处理以保留孔隙中的沉积物,编号为 T3-D 和 T6-D,然后分别测试和比较两部分浮岩的矿物学和地球化学组成。此方法虽然无法给出准确定量的数据,但可以使我们对浮岩气孔充填沉积物的组成有一个初步定性的认识。

将 T3-C 和 T6-C 样品碎成小于 5mm 的颗粒,置于超声波清洗机内清洗,使用蒸馏水,每隔 15min 换一次水,直到清洗样品后的水足够清澈,以去除浮岩气孔内充填的沉积物。之后将样品浸入无水乙醇中大约 1h 以去除有机质,完后将样品取出、烘干,再放入 0.5mol/L 的稀盐酸溶液中,60℃ 水浴加热,浸泡 1~2h 去除次生碳酸盐和铁氧化物。然后将浮岩样品置于超纯水中,40℃ 水浴加热,浸泡 7 天左右,并每天换一次水,直至取上层清液加入 AgNO₃ 溶液无白色沉淀出现从而保证 Cl 离子完全除净,在此过程中浮岩孔隙中的充填物可以进一步得到清洗。

随机选取处理好的浮岩样品,碎成 1mm 左右大小的颗粒,制靶并表面镀金,用扫描电镜(SEM)观察浮岩气孔的微观结构以及气孔是否有沉积物残留,观察样本数不少于 10 个,以确保浮岩孔隙中的充填物清洗干净。同样,将 T3-D 和 T6-D 样品碎成 1mm 左右大小的颗粒,用 SEM 观察浮岩气孔充填沉积物的形态学特征。SEM 分析在中国科学院海洋研究所完成,扫描电镜的仪器型号为 VEGA3,生产厂家为捷克 TESCAN 公司。

将未处理及处理后的浮岩样品的一部分用玛瑙研钵研磨到 300 目,进行 X 射线衍射光谱(XRD)分析。XRD 分析在中国科学院地质与地球物理研究

所完成,采用的 X 射线衍射仪的型号为 D/max-2400,使用铜靶,工作电压为 40kV,工作电流为 60mA,步长为 0.02°,扫描速度为 8°/min。另一部分浮岩样品研磨到 200 目,进行微量元素测试分析,在中国科学院海洋研究所采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)完成,仪器型号为 ELANDRC II。将浮岩样品粉末置于烘箱中,105℃ 烘干 2h,之后准确称量 40mg 样品放入 Teflon 烧杯中,设置好平行样和空白样,依次加入 1.5mL 浓 HF、0.5mL 浓 HNO₃,将烧杯封好盖后置于加热板上,150℃ 加热 24h。完后将烧杯盖打开,在 150℃ 加热板上将烧杯内液体蒸干,大约 2h,然后继续加入 1mL 浓 HNO₃,于 150℃ 加热板上再次蒸干,再加入 1mL 浓 HNO₃ 及 1mL 超纯水,封盖,150℃ 加热 24h。待样品完全溶解后用超纯水定容到 40g,进行上机测试。用 Re 作为内标,标准样品为 GBW07315、GBW07316、BHVO-2、BCR-2,测试精度 <5%。

3 结果

3.1 SEM 观察结果

T3-D 与 T6-D 的气孔结构及其充填沉积物形态见图 2。T3 浮岩的气孔拉长定向,密集排列,呈现似纤维状的形态,气孔空间相对狭小,充填的沉积物形态以片状为主,说明其组成可能主要为黏土矿物。T6 浮岩的气孔无定向性,形状不规则,但互相连通,气孔壁较薄,气孔空间相对较大,充填的沉积物有一定程度的固结,呈现团块状,形态上以粒状矿物为主,与 T3 浮岩气孔中充填的沉积物有较大的差异。

3.2 XRD 分析结果

T3 和 T6 浮岩的全岩 XRD 分析结果见图 3。T3-C 样品只在 $2\theta = 21.7^\circ$ ($d = 4.08\text{\AA}$) 附近有一个衍射峰(图 3a),代表 A 型蛋白石,是一种自生的热液沉淀物^[36],不属于本文研究的范畴,故将其作为背景考虑。T3-D 样品具有多个衍射峰(图 3b),其中在 $2\theta = 20.0^\circ$ 和 35.0° 附近有两个明显的峰,属于 1M 型伊利石(PDF # 29-1496)的特征峰。在 $2\theta = 26.6^\circ$ 附近有一个很强的衍射峰,与石英的特征峰一致。此外,在 $2\theta = 23.7^\circ$ 、 27.9° 、 28.0° 等位置存在多个较弱的峰,属于斜长石的特征峰。综上,T3 浮岩气孔充填沉积物的矿物组成以石英和伊利石为主,另有少量的斜长石,与充填物的片状形态比较一致

(图 2c)。

T6-C 样品在 $2\theta=27.9^\circ$ 和 28.0° 附近存在较强的衍射峰,并在 $2\theta=22.0^\circ$ 、 23.7° 、 24.4° 及 30.3° 等处存在较弱的峰(图 3c),这些衍射峰的 2θ 值均与斜长石的特征峰一致,说明斜长石是 T6 浮岩的主要矿物组成,与岩相学的观察结果一致。T6-D 样品在 $2\theta=22.0^\circ$ 、 23.7° 、 24.4° 、 29.6° 及 30.3° 等处的衍射峰强度明显强于 T6-C 样品在相应位置的衍射峰强度(图 3d),说明 T6 浮岩孔隙充填沉积物中也含有较多斜长石。T6-D 样品在 $2\theta=26.6^\circ$ 附近也存在较强的石英衍射峰,说明石英是 T6 浮岩气孔充填物的另一主要的矿物组成。此外,T6-D 在 $2\theta=20.0^\circ$ 、 20.4° 附近等处存在微弱的峰,可能代表少量的伊利石等黏土矿物。因此,T6 浮岩气孔充填沉积物的矿物组成以石英和长石为主。

3.3 微量元素测试结果

T3 和 T6 浮岩的全岩微量元素测试结果见表 1 和图 4。T3-D 大部分微量元素的含量均高于 T3-C 的微量元素含量(图 4),说明 T3 浮岩气孔充填沉积

物中比 T3 浮岩更富集微量元素。需要特别指出的是,T3-D 的 Pb($101\mu\text{g/g}$)、Zn($196\mu\text{g/g}$)、Cu($47\mu\text{g/g}$)、Cd($0.944\mu\text{g/g}$)、Sr($108\mu\text{g/g}$) 等元素的含量高出 T3-C 相应元素含量 (Pb = $8.36\mu\text{g/g}$, Zn = $52.5\mu\text{g/g}$, Cu = $5.14\mu\text{g/g}$, Cd = $0.237\mu\text{g/g}$, Sr = $30.6\mu\text{g/g}$) 3 倍以上(表 1),说明这些元素在 T3 浮岩气孔充填物沉积物中异常富集。不仅如此,T3-D 中 Pb、Zn、Cu 的含量显著高于非热液区表层沉积物的平均元素含量 (Pb = $18\mu\text{g/g}$, Zn = $91\mu\text{g/g}$, Cu = $23\mu\text{g/g}$)^[37],甚至比冲绳海槽中部热液区附近受热液活动影响的沉积层中 Pb ($79.13\mu\text{g/g}$)、Zn ($99.13\mu\text{g/g}$)、Cu ($43.33\mu\text{g/g}$) 的平均含量^[38] 还要高(表 1,图 4)。

T6-D 大部分微量元素的含量接近或略高于 T6-C 的微量元素含量,因此,两者呈现出相似的微量元素配分模式(图 4)。与 T3 浮岩相似的是,T6-D 样品的 Pb($13.2\mu\text{g/g}$)、Zn($54.8\mu\text{g/g}$)、Cu($15.1\mu\text{g/g}$) 等元素的含量相对 T6-C (Pb = $8.21\mu\text{g/g}$, Zn = $44.5\mu\text{g/g}$, Cu = $4.3\mu\text{g/g}$) 比其他元素有较大程度的增加,但是增加量要小于 T3-D 与 T3-C 之间的含量差异。

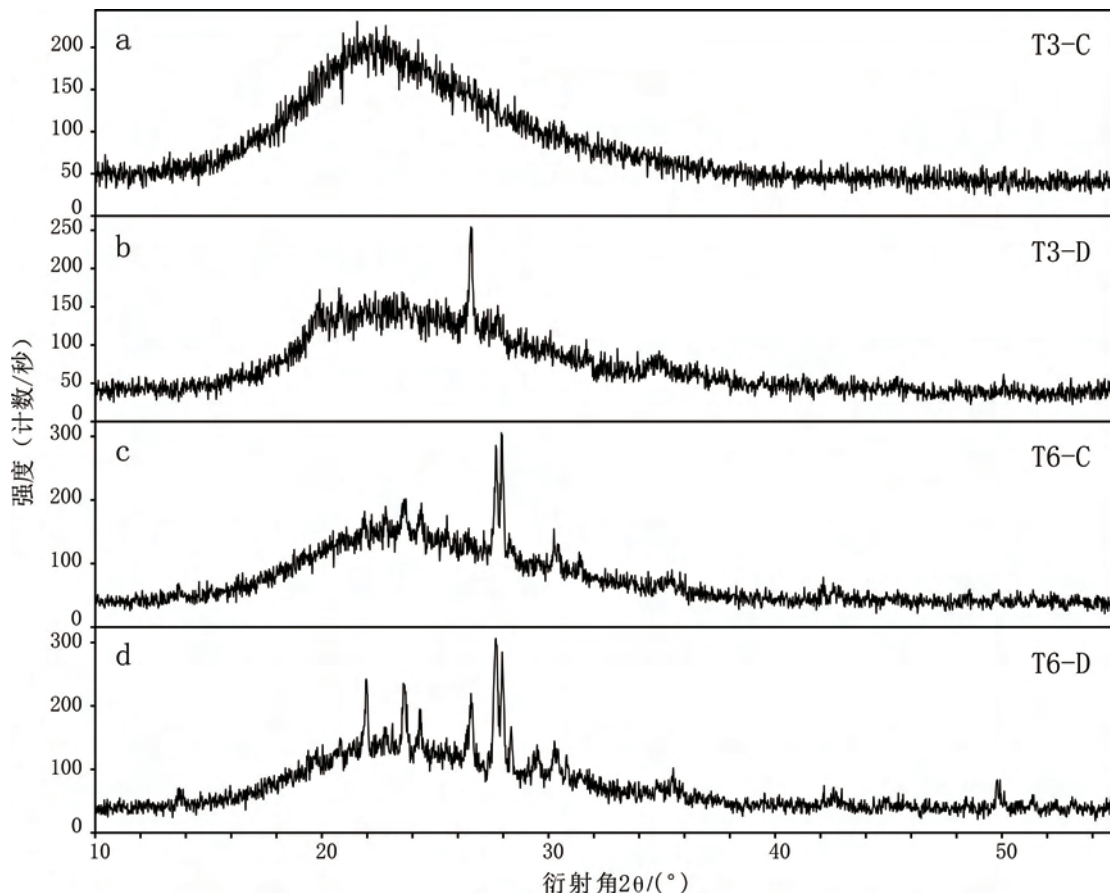


图 3 T3 和 T6 浮岩的 XRD 分析结果

Fig.3 XRD analysis results of T3 and T6 pumices

表 1 T3 和 T6 浮岩的微量元素组成
Table 1 Trace element compositions of T3 and T6 pumices

元素($\mu\text{g/g}$)	T3-D	T3-C	T6-D	T6-C	正常表层沉积物*	热液影响沉积物**
Cs	6.13	2.01	3.91	3.75		
Rb	80.3	53.1	97.1	101	93	97
Pb	101	8.36	13.2	8.21	18	79.13
Ba	383	203	325	329	354	495.53
Th	11.6	7.10	11.3	10.7		
U	7.67	7.23	2.44	2.58	8	
La	29.8	20.6	23.4	19.4		
Ce	60.7	41.7	48.4	44.5	53	
Pr	7.11	4.98	5.58	4.86		
Nd	27.9	20.0	21.3	18.2	29	
Ta	1.13	0.746	0.784	0.822		
Nb	15.5	11.9	11.3	11.7	8	
Zr	346	206	150	178	125	125.4
Hf	7.32	5.20	4.57	4.48		3.43
Sr	108	30.6	67.5	49.2	440	399.07
Sm	6.21	4.59	4.71	4.03		
Li	29.6	6.27	23.3	21.8		39.8
Gd	6.31	4.67	4.82	4.08		
Tb	1.22	0.919	0.875	0.864		
Eu	0.818	0.540	0.792	0.614		
Dy	7.53	5.73	5.43	5.13		
Ho	1.78	1.35	1.27	1.22		
Er	5.21	3.92	3.64	3.77		
Lu	0.868	0.662	0.671	0.662		
Tm	0.911	0.690	0.645	0.660		
Yb	5.68	4.44	4.18	4.21		
Ga	22.0	14.3	16.8	18.1		
Y	49.2	37.9	35.2	34.8		
Cd	0.944	0.237	0.269	0.202	0.17	
Zn	196	52.5	54.8	44.5	91	99.13
Cu	47.0	5.14	15.1	4.30	23	43.33

* 引自文献[37], ** 引自文献[38]

4 讨论

4.1 浮岩气孔充填沉积物的来源

冲绳海槽沉积物的主要矿物组成是石英和长石^[40],与 T6 浮岩气孔中沉积物的主要矿物组成一致,证明该浮岩气孔中的沉积物来自海槽内沉积物的机械性混入。海洋沉积物中的黏土矿物主要来源

陆源物质的输入和海底火山物质的蚀变^[41],其中热液自生黏土矿物是一个不可忽视的重要来源^[42]。然而,尽管 T3 浮岩位于热液区附近(图 1),其气孔中充填的黏土矿物非热液成因,原因是热液自生黏土矿物以蒙脱石族为主^[42],而 T3 浮岩气孔中充填的黏土矿物主要为伊利石。热液成因蒙脱石是热液低温蚀变($<70^{\circ}\text{C}$)的主要产物,而热液伊利石需要高温蚀变($>150^{\circ}\text{C}$)才可以产生^[43,44],T3 站位的浮岩并没有呈现高温蚀变的特征。另外,前人研究

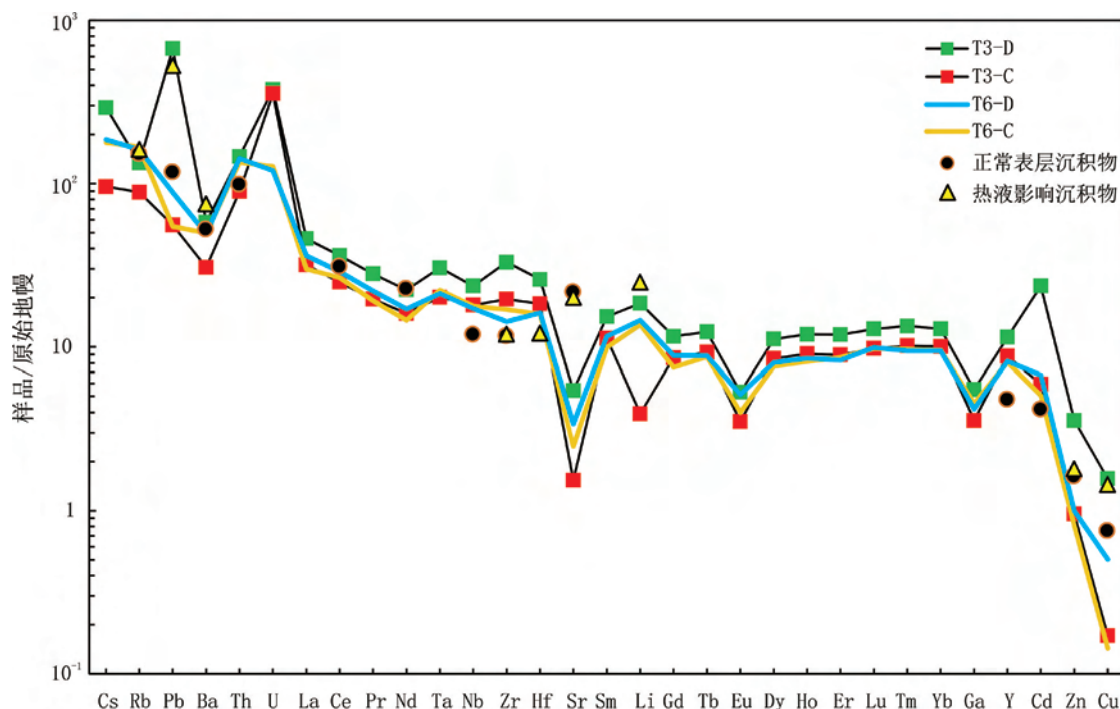


图4 T3和T6浮岩的微量元素蛛网图(正常表层沉积物数据引自文献[37],热液影响沉积物数据引自文献[38],原始地幔数据引自文献[39])

Fig.4 Spider diagram of trace elements of T3 and T6 pumices (data of normal surface sediments are from reference [37], data of hydrothermal influenced sediments are from reference [38], data of primitive mantle are from reference [39])

于表明冲绳海槽沉积物中的黏土矿物以伊利石占主导^[45],因此,T3浮岩气孔充填的黏土矿物也主要来源于海槽内的沉积物。

T3和T6浮岩气孔中充填的沉积物具有不同的矿物组成,可能有两方面的原因。一是两种浮岩所处位置的沉积物组成可能有差异:T3站位处在一个山丘上,沉积动力条件可能较弱,以细粒沉积为主;而T6站位位于中央峡谷的北端,沉积物供应充足,沉积动力条件较强,可以沉积较粗的碎屑颗粒(图1)。二是可能与浮岩的气孔大小有关:T3浮岩气孔较小,黏土矿物等细粒沉积物更容易进入;T6浮岩气孔相对较大,允许较粗颗粒的沉积物进入。从T3浮岩气孔充填沉积物以黏土矿物和石英为主,到T6浮岩气孔充填的沉积物代表了海槽内正常沉积物的一般组成,这似乎意味着浮岩气孔越大,对进入气孔的沉积物选择性越小。

4.2 热液活动的地球化学记录

T3浮岩气孔中的沉积物含有异常高含量的Pb、Zn、Cu等金属元素(表1;图4),而这些元素又不足以由正常的沉积物所提供(详见章节3.3),因此需要有额外的金属元素来源。考虑到T3浮岩靠近伊平屋北热液区(图1),而且该热液区的热液产

物中又恰恰富集Pb、Zn、Cu等元素^[35],因此不难想到,T3浮岩气孔中沉积物的金属元素有来自附近热液活动的贡献。热液活动对周围沉积物的影响主要通过两种方式^[5]。第一种方式是热液柱颗粒物的影响,热液柱与周围海水混合过程中,所携带的铁锰氧化物、羟基氧化物和氢氧化物等颗粒会吸附热液柱中的微量元素并沉淀下来。由于浮岩气孔中的沉积物主要为海槽内沉积物的混入,这些热液柱颗粒物在T3浮岩气孔充填物中可能含量太低而难以在XRD分析中识别。另一方面,黏土矿物具有很强的吸附性^[46],它在沉降过程中可以吸附热液柱中的金属元素并将其保存在沉积物中。第二种方式是热液流体与沉积物相互作用,在此过程中热液流体中的金属元素可能进入沉积物中。目前尚不明确热液活动以何种方式对浮岩气孔充填的沉积物产生影响,但可以确定的是T3浮岩气孔充填沉积物中高含量的Pb、Zn、Cu等元素是对附近热液活动的重要响应。

从矿物组成和微量元素组成来看,与T3浮岩相比,T6浮岩气孔充填的沉积物更接近冲绳海槽正常沉积物的特征。T6-D与T6-C之间大部分微量元素含量相差不大,可能有两方面的解释:一是T6浮岩气孔充填沉积物与T6浮岩本身的大部分微量

元素含量相似;二是 T6 浮岩气孔充填的沉积物量比较少。然而,不管是冲绳海槽内正常的表层沉积物还是受热液活动影响的沉积物,都含有高含量的 Sr(分别为 $440\mu\text{g/g}^{[37]}$ 和 $399.07\mu\text{g/g}^{[38]}$;表 1,图 4),但 T6-D 中的 Sr 含量并没有显著增加,说明以上第一种解释并不可行。因此,更有可能的是 T6 浮岩气孔充填的沉积物含量较少,至少少于 T3 浮岩气孔中的沉积物,因为 T3-D 的 Sr 含量显著高于 T3-C 的 Sr 含量(图 4)。在气孔中沉积物充填较少的情况下,虽然 T6-D 的 Pb、Cu 含量低于正常表层沉积物的值,但相比 T6-C 的 Pb、Cu 含量有较大程度地增加,而且与其他元素含量的变化没有表现出同步性(图 4),说明 T6 浮岩气孔充填的沉积物中有 Cu、Pb 含量的异常,这可能也是对热液活动的响应,尽管程度相对较弱。虽然 T6 站位距离伊平屋北热液区相对较远(约 2.7km),但热液柱的空间展布范围可以很大,水平延伸可以达到 $20\text{km}^{[5]}$,例如,大西洋中脊 Rainbow 热液区的热液柱沿洋脊轴部移动达 10km 以上^[47]。因此,伊平屋北热液区的热液活动完全有可能对 T6 站位附近的沉积物产生影响,只是影响程度比 T3 站位要小得多。另外,T6 站位靠近中央峡谷,沉积速率较高,大量陆源碎屑物质的输入可能掩盖沉积物中的热液活动信息,这可能是造成 T6 浮岩气孔充填沉积物中热液活动信号较弱的另一重要原因。

5 结论

(1) 浮岩气孔充填的沉积物主要来源于冲绳海槽内沉积物的混入,其中气孔较小的 T3 浮岩中充填的沉积物组成主要为伊利石和石英,而气孔较大的 T6 浮岩中充填的沉积物组成主要为石英和长石,代表了海槽内沉积物的一般矿物组成。以上不同的矿物组成一方面可能由于两个浮岩站位附近的沉积物具有不同的矿物组成,另一方面也暗示浮岩气孔大小对混入的沉积物有选择性,气孔越大对沉积物的选择性越小;

(2) 邻近热液区的 T3 浮岩气孔中的沉积物含有异常高含量的 Pb、Zn、Cu 等金属元素,代表强烈的热液活动信号;距热液区稍远的 T6 浮岩气孔中沉积物也表现出 Pb、Cu 等元素含量的异常特征,可能代表较弱的热液活动信号。这说明海底热液区附近的浮岩气孔中充填的沉积物可以记录热液活动的信息,这对寻找有浮岩分布的新热液活动区具有重要的指示意义。

本文的工作只是对海底浮岩气孔充填沉积物的一个初步研究,要获得其定量的矿物和地球化学组成,首先需要建立一套浮岩气孔充填沉积物分离和提取的有效方法。另外,在以后的研究中要加强对其痕量金属元素的测试分析,尤其是对热液活动敏感的金属元素(如 Au、Ag、Hg、Sb 等),确定热液活动影响的定量判别指标,使海底浮岩气孔充填沉积物真正成为记录热液活动信息的有效载体。

参考文献 (References)

- [1] 景春雷, 郑彦鹏, 刘保华, 等. 海底热液多金属硫化物分布及控矿因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(1): 57-64. [JING Chunlei, ZHENG Yanpeng, LIU Baohua, et al. Distribution pattern of submarine hydrothermal sulfide deposits and controlling factors[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(1): 57-64.]
- [2] 曹志敏, 安伟, 于新生, 等. 现代海底热液活动异常条件探测关键技术研究[J]. 高技术通讯, 2006, 16(5): 545-550. [CAO Zhimin, AN Wei, YU Xinsheng, et al. Research on the key technology of exploring anomaly conditions of modern seafloor hydrothermal activity[J]. Chinese High Technology Letters, 2006, 16(5): 545-550.]
- [3] 刘长华, 汪小妹, 殷学博. 浊度计在现代海底热液活动调查中的应用[J]. 海洋科学, 2008, 32(1): 70-73. [LIU Changhua, WANG Xiaomei, YIN Xuebo. Application of nephelometer to investigating modern seafloor hydrothermal activities[J]. Marine Sciences, 32(1): 70-73.]
- [4] 王晓媛. 东太平洋海隆 13°N 和大西洋 Logatchev 热液区附近热液柱的研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2008. [WANG Xiaoyuan. Hydrothermal plumes at EPR 13°N and MAR Logatchev sites[D]. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2008.]
- [5] 曾志刚. 海底热液地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 8-492. [ZENG Zhigang. Submarine Hydrothermal Geology[M]. Beijing: Science Press, 2011: 8-492.]
- [6] 武力. 东太平洋海隆 13°N 含金属沉积物研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2011. [WU Li. Study on the metaliferous sediments near 13°N East Pacific Rise[D]. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2011.]
- [7] 杨耀民, 叶俊, 石学法, 等. 海底含金属沉积物矿物学和地球化学及其对热液活动的指示[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(S2): 65-74. [YANG Yaomin, YE Jun, SHI Xuefa, et al. Mineralogy and geochemistry of submarine metaliferous sediments and significances for hydrothermal activity [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(S2): 65-74.]
- [8] Fisher R V, Schmincke H U. Pyroclastic Rocks[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 1984: 102-103.
- [9] Whitham A G, Sparks R S J. Pumice[J]. Bulletin of Volcanol-

- ogy, 1986, 48(4): 209-223.
- [10] Klug C, Cashman K, Bacon C. Structure and physical characteristics of pumice from the climactic eruption of Mount Mazama (Crater Lake), Oregon[J]. Bulletin of Volcanology, 2002, 64(7): 486-501.
- [11] White J D L, Smellie J L, Clague D A. Explosive Subaqueous Volcanism[M]. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2003; 213-229.
- [12] Expedition 331 Scientists. Expedition 331 summary[R]. In: Takai, K., Mottl, M.J., Nielsen, S.H., and the Expedition 331 Scientists, Proc. IODP, 331: Tokyo (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.), 2011.
- [13] Sibuet J C, Deffontaines B, Hsu S K, et al. Okinawa trough backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B12): 30245-30267.
- [14] 尚鲁宁, 张训华, 吴志强, 等. 广角反射/折射地震探测揭示的冲绳海槽地壳结构[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(3): 75-84. [SHANG Luning, ZHANG Xunhua, WU Zhiqiang, et al. Crustal structure of the Okinawa Trough: Evidence from wide-angle reflection and seismic refraction surveys[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(3): 75-84.]
- [15] Yan Quanshu, Shi Xuefa. Petrologic perspectives on tectonic evolution of a nascent basin (Okinawa Trough) behind Ryukyu Arc: A review[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(4): 1-12.
- [16] 张训华, 尚鲁宁. 冲绳海槽地壳结构与性质研究进展和新认识[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014(6): 72-80. [ZHANG Xunhua, SHANG Luning. Study on crustal structure and nature of the Okinawa Trough[J]. Periodical of Ocean University of China, 2014(6): 72-80.]
- [17] 尚鲁宁, 张训华, 韩波. 重磁资料揭示的冲绳海槽及邻区断裂和岩浆岩分布[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(1): 99-106. [SHANG Luning, ZHANG Xunhua, HAN Bo. Fault belts and igneous rocks of the Okinawa Trough and adjacent areas: Evidence from gravity and magnetic data[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(1): 99-106.]
- [18] 曾志刚, 张玉祥, 陈祖兴, 等. 西太平洋典型弧后盆地的地质构造, 岩浆作用与热液活动[J]. 海洋科学集刊, 2016, 51: 3-36. [ZENG Zhigang, ZHANG Yuxiang, CHEN Zuxing, et al. Geological tectonics, magmatism and seafloor hydrothermal activity in the back-arc basins of the western Pacific[J]. Studia Marina Sinica, 2016, 51: 3-36.]
- [19] 翟世奎. 冲绳海槽浮岩的分布及其斑晶矿物学特征[J]. 海洋与湖沼, 1986, 17(6): 504-512. [ZHAI Shikui. The distribution and mineralogical characteristics of the pumice from the Okinawa Trough[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1986, 17(6): 504-512.]
- [20] 秦蕴珊, 翟世奎, 毛雪瑛, 等. 冲绳海槽浮岩微量元素的特征及其地质意义[J]. 海洋与湖沼, 1987, 18(4): 313-319. [QIN Yunshan, ZHAI Shikui, MAO Xueying, et al. The trace element characteristics of the pumice in the Okinawa Trough and its geological significance[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1987, 18(4): 313-319.]
- [21] 翟世奎. 冲绳海槽浮岩中斑晶矿物结晶的 PT 条件[J]. 海洋科学, 1987, (1): 26-30. [ZHAI Shikui. The crystalline temperature and pressure of phenocrysts of the pumices in the Okinawa Trough[J]. Marine Sciences, 1987, (1): 26-30.]
- [22] Ishikawa M, Sato H, Furukawa M, et al. Report on DELP 1988 cruises in the Okinawa Trough: Part 6. Petrology of volcanic rocks[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1991, 66: 151-177.
- [23] 陈丽蓉, 翟世奎, 申顺喜. 冲绳海槽浮岩的同位素特征及年代测定[J]. 中国科学(B辑), 1993, 23(3): 324-329. [CHEN Lirong, ZHAI Shikui, SHEN Sunxi. Isotopic characteristics of pumice and its age dating in the Okinawa Trough[J]. Science in China (Series B), 1993, 23(3): 324-329.]
- [24] 孟宪伟, 杜德文, 吴金龙. 冲绳海槽中段火山岩系 Sr 和 Nd 同位素地球化学特征及其地质意义[J]. 中国科学: D 辑, 1999, 29(4): 367-371. [MENG Xianwei, DU Dewen, WU Jinlong, et al. Sr-Nd isotopic geochemistry and its geological significances of volcanic rock series from the middle part of Okinawa Trough[J]. Science in China (Series D), 1999, 29(4): 367-371.]
- [25] Shinjo R, Kato Y. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin[J]. Lithos, 2000, 54(3): 117-137.
- [26] 于增慧, 翟世奎, 赵广涛. 冲绳海槽浮岩中岩浆包裹体岩石化学成分特征[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(5): 474-482. [YU Zenghui, ZHAI Shikui, ZHAO Guangtao. The petrochemical feature of melt inclusion in acid pumice in the Okinawa Trough[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(5): 474-482.]
- [27] 翟世奎, 张杰, 张明书, 等. 冲绳海槽浮岩包裹体的测温试验[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 67-73. [ZHAI Shikui, ZHANG Jie, ZHANG Mingshu, et al. Temperature measuring test on inclusion in pumice in the Okinawa Trough[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(1): 67-73.]
- [28] 于增慧, 翟世奎, 赵广涛. 冲绳海槽浮岩中碳, 氢同位素组成特征[J]. 海洋学报(中文版), 2004, 26(6): 58-64. [YU Zenghui, ZHAI Shikui, ZHAO Guangtao. The carbon and hydrogen isotopic compositions of pumices in the Okinawa Trough[J]. Acta Oceanologica Sinica (Chinese Edition), 2004, 26(6): 58-64.]
- [29] 黄朋, 李安春, 蒋恒毅. 冲绳海槽北, 中段火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1703-1712. [HUANG Peng, LI Anchun, JIANG Hengyi. Geochemical features and their geological implications of volcanic rocks from the northern and middle Okinawa Trough[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(6): 1703-1712.]
- [30] 韩宗珠, 李超, 来志庆. 冲绳海槽中南部浮岩的岩石地球化学特征及其成因[J]. 海洋湖沼通报, 2008, (3): 61-66. [HAN Zongzhu, LI Chao, LAI Zhiqing. Geochemical features and origin of the pumice from middle and south Okinawa Trough[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,

- 2008, (3): 61-66.]
- [31] Zeng Z, Yu S, Wang X, et al. Geochemical and isotopic characteristics of volcanic rocks from the northern East China Sea shelf margin and the Okinawa Trough[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(4): 48-61.
- [32] 廖仁强, 黄朋, 胡宁静, 等. 冲绳海槽黑色与白色浮岩特征及其对岩浆演化的指示[J]. *海洋科学*, 2016, 40(5): 121-130. [LIAO Renqiang, HUANG Peng, HU Ningjing, et al. Petrological characteristics of black and white pumice from the Okinawa Trough: Implications for magmatic evolution[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(5): 121-130.]
- [33] Kawagucci S, Chiba H, Ishibashi J, et al. Hydrothermal fluid geochemistry at the Iheya North field in the mid-Okinawa Trough: Implication for origin of methane in seafloor fluid circulation systems[J]. *Geochemical Journal*, 2011, 45(2): 109-124.
- [34] 郑翔, 阎军, 张鑫, 等. 冲绳海槽中部热液区及典型喷口区地形地貌特征[J]. *海洋地质前沿*, 2015(3): 14-21. [ZHENG Xiang, YAN Jun, ZHANG Xin, et al. Topographical and geomorphological features of the hydrothermal fields and typical hydrothermal vents in the mid-Okinawa Trough[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015(3): 14-21.]
- [35] Halbach P, Pracejus B, Maerten A. Geology and mineralogy of massive sulfide ores from the central Okinawa Trough, Japan[J]. *Economic Geology*, 1993, 88(8): 2210-2225.
- [36] Sun Z L, Zhou H Y, Yang Q H, et al. Growth model of a hydrothermal low-temperature Si-rich chimney: Example from the CDE hydrothermal field, Lau Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(10): 1716-1730.
- [37] 赵一阳, 翟世奎, 李永植, 等. 冲绳海槽中部热水活动的新记录[J]. *科学通报*, 1996, 41(14): 1307-1310. [ZHAO Yiyang, ZHAI Shikui, LI Yongzhi, et al. New records of hydrothermal activity in the middle Okinawa Trough[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(14): 1307-1310.]
- [38] 翟世奎, 于增慧, 杜同军. 冲绳海槽中部现代海底热液活动在沉积物中的元素地球化学记录[J]. *海洋学报(中文版)*, 2007, 29(1): 58-65. [ZHAI Shikui, YU Zenghui, DU Tongjun. Elemental geochemical records of modern seafloor hydrothermal activities in sediments from the central Okinawa Trough[J]. *Acta Oceanologica Sinica (Chinese Edition)*, 2007, 29(1): 58-65.]
- [39] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3): 223-253.
- [40] 郑铁民, 徐善民, 徐志明. 冲绳海槽表层沉积物沉积特征的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1989, 20(1): 113-121. [ZHENG Tiemin, XU Shanmin, XU Zhiming. Characteristics of the surface sediments in Okinawa Trough[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1989, 20(1): 113-121.]
- [41] 石学法. 海洋粘土矿物的研究进展与发展趋势[J]. *海洋地质动态*, 1995, (1): 1-3. [SHI Xuefa. Research progress and trend of marine clay minerals[J]. *Marine Geology Letters*, 1995, (1): 1-3.]
- [42] 吕华华, 石学法, 杨刚. 粘土矿物对海底热液活动的指示作用[J]. *矿物学报*, 2011, (S1): 695-696. [LV Huahua, SHI Xuefa, YANG gang. Indication significance of clay minerals to the seafloor hydrothermal activity[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, (S1): 695-696.]
- [43] De La Fuente S, Cuadros J, Linares J. Early stages of volcanic tuff alteration in hydrothermal experiments: Formation of mixed-layer illite-smectite [J]. *Clays and Clay Minerals*, 2002, 50(5): 578-590.
- [44] Giorgetti G, Monecke T, Kleeberg R, et al. Low-temperature hydrothermal alteration of silicic glass at the Pacmanus hydrothermal vent field, Manus basin: An XRD, SEM and AEM-TEM study[J]. *Clays and Clay Minerals*, 2006, 54(2): 240-251.
- [45] 王佳泽, 李安春, 黄杰. 17000 年以来冲绳海槽中部沉积物物源演化及其古环境记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(6): 105-114. [WANG Jiaze, LI Anchun, HUANG Jie. Sediment provenance and paleoenvironment records of the central Okinawa Trough for the last 17000 years[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(6): 105-114.]
- [46] 何宏平, 郭九泉. 蒙脱石等粘土矿物对重金属离子吸附选择性的实验研究[J]. *矿物学报*, 1999, 19(2): 231-235. [HE Hongping, GUO Jiuquan. Experimental studies on the selective adsorption of heavy metal ions on montmorillonite, illite and kaolinite and the influence of medium conditions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1999, 19(2): 231-235.]
- [47] Edmonds H N, German C R. Particle geochemistry in the Rainbow hydrothermal plume, Mid-Atlantic Ridge [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(4): 759-772.