

冲绳海槽中部岩心沉积物中浮岩的物理性质和地球化学特征差异及其对岩浆活动的指示

方雪^{1,2,3}, 曾志刚^{1,2,3,4}, 胡思谊^{1,2,3}, 朱博文^{1,2,3}, 齐海燕^{1,2}, 万世明^{1,2,5}, 徐兆凯^{1,2,5}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 5. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 为进一步了解冲绳海槽浮岩的物理性质和地球化学特征差异, 对冲绳海槽中部岩心沉积物 S9 中的浮岩进行了微观结构和地球化学组成分析。结果显示, 冲绳海槽中部存在白色、灰白色及棕色 3 种浮岩, 其中灰白色浮岩又可以根据构造特征分为气孔构造和流动构造浮岩两个亚类。浮岩的地球化学组成表明白色、灰白色及棕色浮岩都是由玄武质岩浆经过充分的分离结晶作用形成的流纹质或流纹英安质火山岩。玄武质岩浆在演化的过程中发生了斜长石、角闪石、辉石、Fe-Ti 氧化物、磷灰石等矿物的结晶分离。结合有孔虫 ¹⁴C 年龄, 认为浮岩是冲绳海槽中部距今 13.1 ka 左右的长英质火山活动的产物。演化程度相对较低的棕色浮岩具有比白色浮岩高的 TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO 含量, 且棕色浮岩具有相对低的稀土总量和轻稀土总量。根据浮岩的物理性质及地球化学组成差异推测, 岩浆的黏度和压力是影响浮岩构造特征的主要因素。黏度大、连续减压的岩浆易于形成具有流动构造和密集气孔的浮岩, 黏度小、阶段性减压的岩浆易于形成气孔大而疏松的浮岩。

关键词: 浮岩; 微观结构; 地球化学; 岩浆演化; 冲绳海槽

中图分类号: P736 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)05-0001-11
DOI: 10.11759/hyqx20190626001

冲绳海槽是位于欧亚大陆东缘的新生弧后盆地, 海槽中火山活动频繁, 广泛发育火山岩, 可以作为研究弧后盆地早期岩浆作用的理想场所^[1-2]。海槽中岩石类型多样, 从基性到酸性均有出露, 其中酸性岩多以浮岩形式产出, 主要分布在海槽的北段和中段^[3]。作为海槽内分布最广的火山岩, 浮岩被许多国内外学者用来研究冲绳海槽岩浆的物质组成及演化规律^[1-6]。

冲绳海槽浮岩作为海底火山喷发的产物, 气孔十分发育, 质地疏松且易蚀变。根据浮岩的颜色特征, 可将冲绳海槽的浮岩分为白色浮岩和黑色浮岩^[3-4], Shinjo 和 Kato^[2] 对海槽中的浮岩进行了详细的元素和 Sr-Nd 同位素组成研究, 又将灰白色浮岩分成了三类。前人对黑色及白色浮岩的斑晶矿物组成和地球化学特征进行了诸多探讨, 并对其成因进行了分析^[3, 7-9]。廖仁强等^[8]认为, 黑色及白色浮岩具有不同的斑晶矿物组成, 但两种浮岩具有相同的玄武质岩

浆源区; 秦蕴珊等^[7]通过黑色及白色浮岩的微量元

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41325021); 全球变化与海气相互作用专项(GASI-GEOGE-02); 国家重点基础研究发展计划(2013CB429700); 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(133137KYSB20170003); 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(2015ASTP-0S17); 创新人才推进计划(2012RA2191); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2015ASKJ03, 2016ASKJ13) [Foundation: National Science Foundation of China, No. 41325021; the National Programme on Global Change and Air-Sea interaction, No. GASI-GEOGE-02; National Basic Research Program of China, No. 2013CB429700; International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences, No. 133137KYSB20170003; Special Fund for the Taishan Scholar Program of Shandong Province, No. ts201511061; Aoshan Talents Program Supported by Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, No. 2015ASTP-0S17; Innovative Talent Promotion Program, No. 2012RA2191; The Scientific and Technological Innovation Project Financially Supported by Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, No. 2015ASKJ03, No. 2016ASKJ13]

作者简介: 方雪(1992-), 女, 山东东营人, 博士研究生, 主要从事海洋地球化学研究, E-mail: fxue13@163.com; 曾志刚, 通信作者, E-mail: zgzeng@ms.qdio.ac.cn

素特征,推断两种浮岩来自于不同的岩浆源,且经历了不同的演化过程。此外,作为海底岩浆作用信息的重要载体,许多学者还利用浮岩对海槽的岩浆源及组成进行了探讨^[2, 4-6, 9-13]。黄朋等^[13]认为冲绳海槽岩浆物质来源于 PREMA 地幔; Zhang 等^[12]认为冲绳海槽中部酸性浮岩的 Pb 同位素组成代表了 DUPAL 地幔的存在; Guo 等^[9]根据黑色及白色浮岩地球化学特征,推断其同位素组成产生差异的原因可能是由于受地壳混染的程度不同。由此可见,前人对浮岩的成因及海槽的岩浆源的研究仍存在分歧^[7-13]。除了分析手段及方法上的差异,样品本身的差异可能是产生分歧的主要因素。火山岩的产出形态及元素组成特征是对岩浆活动的物理、化学信息的传达。浮岩的出露位置相近,产出形态及地球化学组成却存在较大差异,不仅说明冲绳海槽岩浆活动的复杂,更提醒我们在对浮岩进行成因分析时要注意浮岩类型划分,才能有针对性地诠释其蕴含的岩浆活动信息。

白色浮岩在冲绳海槽北段、中段、南段均有分布(以吐噶喇断裂带和宫古断裂构造带为界^[2-3, 5-7, 9-12]),而黑色浮岩只在海槽个别站位出现^[3, 8-9, 13]。由于获取的黑色浮岩样品较少,许多学者在对海槽浮岩进行研究时,难以充分考虑两种浮岩之间的差异或联系。目前有关黑色、白色浮岩的对比性研究相对比较缺乏^[3, 8-10],这限制了我们对冲绳海槽浮岩多样性的认识。此外,除了颜色上的差异,驱动岩浆上升和喷发的物理条件也会导致浮岩的产出形态不同^[14]。海槽中不同期次喷发的岩浆其性质和组成也可能存在较大差异^[15]。由于难以获得火山岩样品的年龄,多数学者在研究海槽岩石成因及岩浆演化时没有很好的年龄框架来进行约束^[5-6, 8-9, 12],而不同时期喷发的岩浆,其组成及源区构造条件可能发生变化^[13, 15],这使得研究结果存在差异。

冲绳海槽火山活动频繁^[16-19],岩浆活动具有多期次的特点^[15]。晚第四纪以来,冲绳海槽被巨厚的沉积物所覆盖^[20-21],沉积物中可能携带大量的火山活动信息,因此火山活动的产物(例如:浮岩碎屑)很有可能保存在沉积物中。尽管前人在冲绳海槽浮岩方面的研究取得了许多成就,然而,前人研究的浮岩,多数是通过电视抓斗、拖网等方式获取的海底表面及表层沉积物中的岩石样品^[5-6, 8, 11-13],对岩心沉积物夹层中浮岩的报道相对较少^[3]。我们在冲绳海槽中部沉积物岩心中发现有明显颜色差异的浮岩碎屑。因此,本文希望在前人研究的基础上,通过对浮岩

的微观特征及地球化学组成进行分析,并采用间接手段对浮岩的年龄进行约束,以加深对冲绳海槽不同类型浮岩间差异或联系的认识,为将来对研究区岩浆演化的研究积累资料。

1 材料与方法

1.1 样品特征

采用的浮岩样品取自冲绳海槽中部沉积物岩心 S9 底部浮岩层,沉积物岩心 S9 于 2013 年“科学 1”号“HOBAB1”航次在冲绳海槽中部利用重力活塞柱获取(水深 1 062 m, 29°23.498 9'N, 128°15.823 0'E),柱样全长 251 cm,浮岩层位于 237~226 cm,厚度约 11 cm。浮岩碎屑新鲜,碎屑颗粒大小为 0.5~15 mm。其中,位于 237~236 cm 层位的浮岩碎屑,根据其颜色可分为白色、灰白色、棕色浮岩,依次编号 F1, F2, F3。灰白色浮岩还可根据气孔构造和流动构造分为两个亚类,编号为 F2a, F2b(图 1)。选取的浮岩样品较新鲜,没有发生明显蚀变。其中白色浮岩颜色雪白,具有小而密集的气孔,表面可见辉石、角闪石等斑晶矿物,基质为玻璃质; F2a 浮岩气孔较大,主要呈不规则状,玻璃质,斑晶矿物极少(小于 1%); F2b 浮岩具有定向拉长的气孔,流动构造明显,基质为纤维状玻璃;棕色浮岩颜色为棕褐色,与前人研究的黑色浮岩相似,气孔较白色浮岩大,斑晶矿物极少,基质为泡沫状玻璃。

1.2 分析方法

1.2.1 样品前处理

由于此次研究的样品是沉积物岩心中的浮岩碎屑,浮岩碎屑气孔中可能被沉积物充填,因此需要先将沉积岩心中的浮岩挑选出来再进行处理。首先将浮岩层样品置于烧杯中,加入体积分数为 5%的 H₂O₂ 室温放置 12 h,以去除沉积物中的有机质。然后将样品置于 63 μm 孔径的筛子中,用去离子水反复冲洗松散的沉积物后,置于烘箱中烘干,以备挑选。利用体式镜进行浮岩碎屑的挑选,挑选出的浮岩碎屑处理方法参考张玉祥等^[22]。首先将挑选出来的浮岩置于超声波清洗机内清洗,每隔 20 min 换一次去离子水,直到清洗样品后的水清澈无浑浊,有效去除浮岩气孔内松散的沉积物。然后,将浮岩碎屑置于 0.5 mol/L 的稀盐酸中,60℃水浴加热 2 h 以去除次生碳酸盐和铁-锰氧化物。最后将浮岩碎屑浸泡在热的超纯水中 7 天并每天换水,以去除 Cl 离子,直至

取上清液加入 AgNO_3 无沉淀后将浮岩碎屑烘干，进行下一步工作。

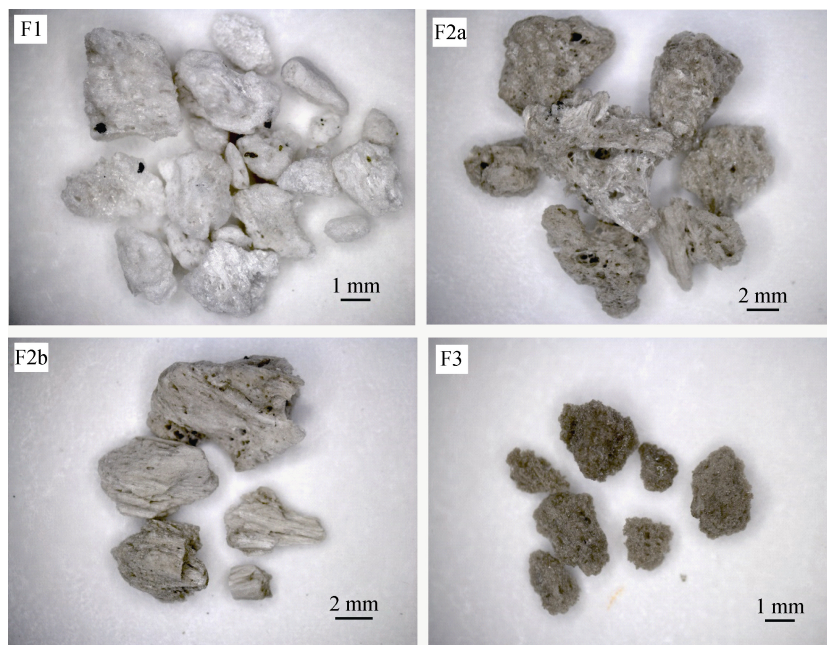


图 1 岩心 S9 中浮岩碎屑手标本照片

Fig. 1 Hand specimen photographs of pumice clasts recovered from Core S9

1.2.2 样品分析方法

随机选取处理好的浮岩样品，制靶镀碳后用扫描电镜(SEM)观察浮岩的微观结构。扫描电镜分析在中国科学院海洋研究所完成，仪器型号为 VEGA3，生产厂家为捷克 TESCAN 公司。仪器配备能谱分析仪，采用工作电压 15~20 kV，工作电流 18~22 mA。

将前处理好的浮岩样品用玛瑙研钵研磨到小于 200 目，用于主、微量元素分析。主、微量元素分析在澳实分析检测(广州)有限公司，澳实矿物实验室完成。主量元素分析所使用仪器是电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)，生产厂家为美国 Agilent 公司，仪器型号为 VISTA。微量元素分析所使用的仪器是电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)，生产厂家为美国 Perkin Elmer 公司，仪器型号为 Elan 9000。主量及微量元素的分析精度好于 5%。

2 结果与讨论

2.1 F1、F2、F3 浮岩物理性质的差异

浮岩是火山爆发的常见产物，一般产自含水较多的硅酸盐岩浆，具有密度低、气孔率高的特点^[23]。浮岩的产出形态不同，可能与岩浆上升和喷发的物理过程有关^[14]。浮岩的物理性质主要包括：质量、颜色、密度、气孔孔径和构造特征等。本文研究的

浮岩，质轻、比重较小。扫描电镜观察结果如图 2 所示，浮岩均由气孔和气孔壁组成，气孔壁为玻璃质，气孔由气孔壁相连。背散射图像可以看出不同类型的浮岩其构造特征存在差异。其中，F2a 气孔大小介于 1~160 μm ，似蜂窝状，大气孔中有小气孔，不具有流动构造(图 2)。相反，F2b 具有明显的流动构造，气孔及气孔壁呈定向拉长，气孔之间具有连通性(图 2)。这种流动构造主要是由于喷出的熔岩在流动过程中凝固结导致的^[24-25]。而流动构造的产生，又与岩浆的黏度密切相关，在黏度较大的酸性岩浆中，流动构造十分发育^[24]。因此，浮岩的微观结构特征可能表明 F2b 浮岩的岩浆黏度较 F2a 浮岩大。F1 浮岩气孔小而密集，气孔大小介于 1~50 μm ，且排列杂乱，具有气孔构造及不太明显的流动构造(图 2)，说明其岩浆黏度可能较 F2b 小，较 F2a 大。F3 样品的气孔比其他类型浮岩大，气孔大小介于 5~250 μm ，气孔度最高，约占浮岩总体积 70%。F3 气孔呈气泡破裂状(图 2)，这主要是岩浆快速上升至地表时，温度、压力骤降，使得挥发分膨胀出溶而形成的^[25]。这一特征表明 F3 浮岩的岩浆黏度相对较白色浮岩低，且岩浆流动性较好。此外，气孔特征也可以反映压力变化，在初始岩浆成分一样的情况下，多阶段减压过程，会导致浮岩气孔数量少、孔径大^[25]。我们观察到的

白色浮岩气孔小且密集,棕色浮岩气孔大而疏松,这种现象可能说明棕色浮岩岩浆经历过多阶段减压过程,而白色浮岩岩浆经历了连续减压过程,这一

现象也与廖仁强等^[8]观察到的一致。通过观察浮岩的微观结构,我们认为岩浆的黏度和压力不仅会影响岩浆上升的速度,还会对浮岩的结构产生影响。

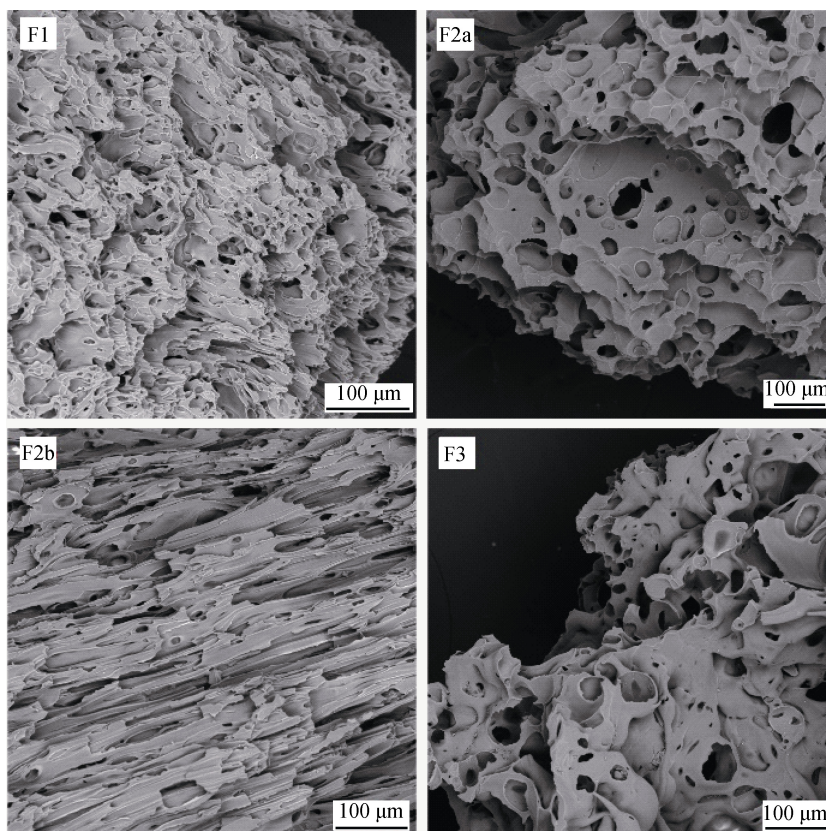


图 2 岩心 S9 中浮岩碎屑的微观结构 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of microstructures of pumice clasts in Core S9

2.2 F1、F2、F3 浮岩元素组成的差异

作为海槽中分布最广的火山岩,浮岩的地球化学特征反映了其原始岩浆的物质组成及经历的演化过程^[5-6]。尽管前人对黑色及白色浮岩的地球化学特征做了相关的报道,但由于冲绳海槽构造条件复杂,样品具有多样性,不同学者报道的黑色和白色浮岩的元素组成仍存在着较大差异^[2, 7-9, 12]。为了更好地认识冲绳海槽不同产出形态浮岩之间的元素组成差异,我们对岩心 S9 中的这几种浮岩的地球化学组成进行了对比分析。浮岩的主量元素和微量元素组成见表 1。

为了更好地比较岩心 S9 中不同浮岩碎屑的主量元素差异,对 F1、F2、F3 浮岩的主量元素进行上地壳标准化(图 3)。从浮岩的主量元素组成及上地壳标准化图解可以看出,岩心 S9 中棕色浮岩 F3 的 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 含量明显高于白色浮岩 F1

(表 1, 图 3),且这些主量元素含量在浮岩碎屑中的高低为 $\text{F3} > \text{F2b} > \text{F2a} > \text{F1}$ 。F3 浮岩的 Na_2O 含量略低于 F2 浮岩,略高于 F1 浮岩。此外,棕色浮岩的 K_2O 含量明显低于白色浮岩,且 4 种浮岩的 K_2O 含量具有 $\text{F1} > \text{F2a} > \text{F2b} > \text{F3}$ 的特征(图 3)。未蚀变的浮岩颜色产生差异的原因,可能与浮岩的主量元素组成及玻璃基质中的微晶有关^[14, 26]。基质中富 Fe^{3+} 氧化物微晶(如:赤铁矿,磁铁矿等)的分布会影响浮岩碎屑的颜色^[23]。廖仁强等^[8]曾指出,黑色浮岩中发育钛铁矿、钛磁铁矿,基质玻璃中密集分布着矿物微晶,而白色浮岩不具备这些特征。S9 浮岩的主量元素也显示,棕色浮岩的全铁含量 [$w(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}) = 6.43\%$] 明显高于白色浮岩的全铁含量 [$w(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}) = 3.02\%$], 这一特征也与 Guo 等^[9]报道的黑色及白色浮岩一致。这些特征表明,本文中浮岩的颜色差异可能与全铁含量及斑晶矿物组成有关。颜色较深的棕色及黑色浮岩

相比白色及灰白色浮岩, 具有更高的全铁含量, 且斑晶矿物中存在磁铁矿和钛铁矿。

微量元素组成可以很好地反映岩浆源区的特征, 及其形成条件和演化过程^[28]。因此, 微量元素可以作为岩浆作用的指示剂。

表 1 冲绳海槽中部岩心 S9 中浮岩的主量及微量元素组成
Tab. 1 Major and trace element compositions of pumice clasts in Core S9 from the middle Okinawa Trough

样品	F1	F2a	F2b	F3
w(Al ₂ O ₃)/%	12.37	13.24	13.64	14.34
w(Fe ₂ O ₃ ^T)/%	3.02	3.71	4.06	6.4
w(CaO)/%	1.9	2.35	2.66	3.85
w(Na ₂ O)/%	4.1	4.38	4.49	4.21
w(K ₂ O)/%	5.28	4.92	4.84	3.93
w(MgO)/%	0.5	0.62	0.68	1.43
w(TiO ₂)/%	0.52	0.63	0.69	0.8
w(P)/(μg/g)	280	410	500	870
w(Sc)/(μg/g)	10.9	11.8	12.7	16.7
w(Co)/(μg/g)	2.5	2.6	3.2	8.8
w(V)/(μg/g)	32	25	34	101
w(Rb)/(μg/g)	81.7	74.5	70.7	57.6
w(Ba)/(μg/g)	416	400	378	321
w(Th)/(μg/g)	7.65	7.01	6.78	5.5
w(U)/(μg/g)	2.14	2	2.05	1.88
w(Nb)/(μg/g)	6.3	6	6.1	5.1
w(Ta)/(μg/g)	0.49	0.43	0.43	0.4
w(Y)/(μg/g)	32.3	34.2	32.3	30.6
w(Pb)/(μg/g)	19.4	17.9	17.2	16.6
w(Sr)/(μg/g)	130	157	171.5	206
w(Zr)/(μg/g)	198	205	192	162
w(Hf)/(μg/g)	5.4	5.8	5.6	4.7
w(La)/(μg/g)	18.8	18.8	18.1	15.9
w(Ce)/(μg/g)	40.1	41.6	40	34.9
w(Pr)/(μg/g)	4.93	5.24	5.02	4.58
w(Nd)/(μg/g)	20.3	21.4	20.4	19.5
w(Sm)/(μg/g)	4.66	4.94	4.98	4.57
w(Eu)/(μg/g)	0.96	1.15	1.13	1.17
w(Gd)/(μg/g)	4.92	5.6	5.25	5.04
w(Tb)/(μg/g)	0.81	0.9	0.86	0.78
w(Dy)/(μg/g)	5.24	5.67	5.52	5.09
w(Ho)/(μg/g)	1.18	1.3	1.24	1.13
w(Er)/(μg/g)	3.72	3.74	3.57	3.48
w(Tm)/(μg/g)	0.54	0.57	0.58	0.52
w(Yb)/(μg/g)	3.83	3.79	3.75	3.38
w(Lu)/(μg/g)	0.58	0.63	0.62	0.52

注: Fe₂O₃^T 为样品全铁含量

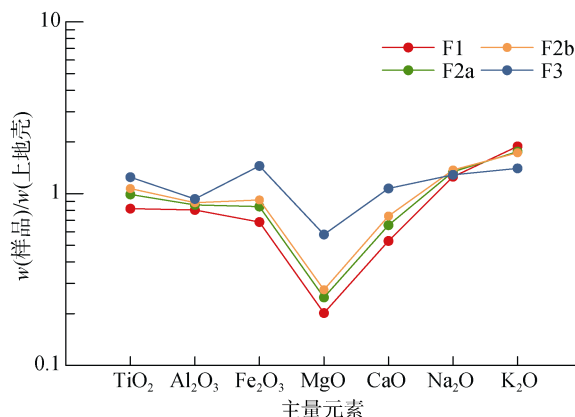


图 3 岩心 S9 中浮岩碎屑主量元素上地壳标准化图解(上地壳主量元素数值引自 Rudnick 和 Gao^[27])

Fig. 3 Upper continent crust (UCC)-normalized major element patterns of pumice clasts in Core S9 (major element compositions of UCC are from Rudnick and Gao^[27])

为了进一步比较岩心 S9 中浮岩碎屑的微量元素组成差异, 分别对 F1、F2、F3 浮岩的微量元素进行洋中脊玄武岩(N-MORB)标准化, 对稀土元素(REE)进行球粒陨石标准化, 结果如图 4、5 所示。F1、F2、F3 浮岩的微量元素蛛网图模式相似, 均表现出大离子亲石元素(如: Rb、Ba、K、Th、U)的富集及高场强元素(如: Nb、Ta)的亏损。这一特征表明浮岩岩浆在演化的过程中可能受到了俯冲组分的影响^[29], 与岛弧火山岩的特征相似。通过比较分析, 发现白色浮岩 F1 具有最高的 w(Rb)、w(Ba)、w(Th)、w(U)、w(Nb)、w(Ta), 而棕色浮岩 F3 具有最低的 w(Rb)、w(Ba)、w(Th)、w(U)、w(Nb)、w(Ta), 灰白色浮岩 F2a、F2b 的这些微量元素含量介于 F1 和 F3 之间。此外, 从微量元素蛛网图可以看出, S9 浮岩均表现明显的 Pb 元素富集, 以及 P、Ti 元素的亏损, 且亏损程度表现出 F1>F2a>F2b>F3 的特征。与海槽中部玄武岩^[6, 30]相比, F1、F2、F3 浮岩的微量元素分布模式与其相似, 暗示了岩浆的分异作用。在稀土元素球粒陨石标准化图中, F1、F2、F3 浮岩都表现出轻稀土富集, 重稀土分馏不明显的趋势(图 5)。其中, F2a 具有最高的稀土元素含量[w(ΣREE)=115.3 μg/g]和轻稀土元素含量[w(ΣLREE)=93.1 μg/g], F3 浮岩的 ΣREE 和 ΣLREE 最低[w(ΣREE)=100.6 μg/g, w(ΣLREE)=80.6 μg/g]。F3 浮岩具有最低的 w(La/Sm)_N 和最低的 w(La/Yb)_N。F1 浮岩具有最明显的 Eu 负异常[δEu=0.6; δEu=2w(Eu)/w(Sm+Gd)]和最高的 w(La/Sm)_N。

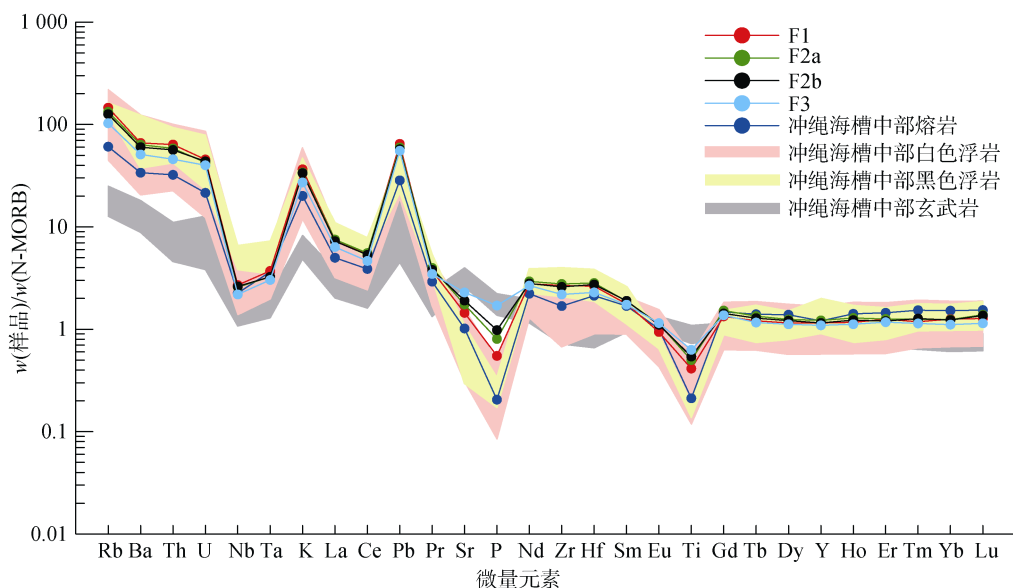


图 4 岩心 S9 中浮岩的微量元素 N-MORB 标准化图解^[6, 9, 12-13, 30-31]

Fig. 4 N-MORB normalized trace element patterns of pumice clasts in Core S9^[6, 9, 12-13, 30-31]

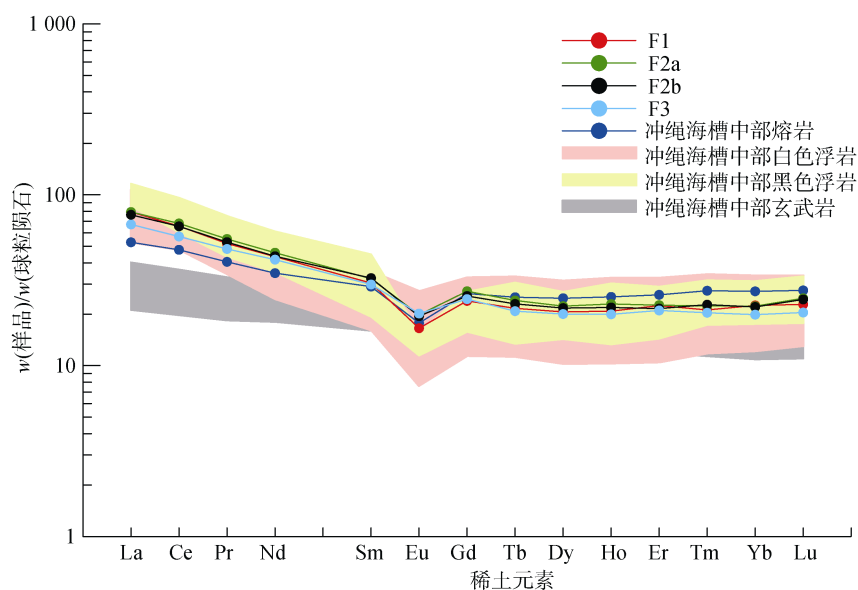


图 5 岩心 S9 中浮岩的稀土元素球粒陨石标准化图解^[6, 9, 12-13, 30-31]

Fig. 5 Chondrite normalized REE patterns of pumice clasts in Core S9^[6, 9, 12-13, 30-31]

2.3 F1、F2、F3 浮岩对岩浆演化的指示意义

在岩浆固结成岩过程中及以后,受地球化学风化作用的影响,海底岩石会发生不同程度的蚀变,而蚀变交代作用会使得部分微量元素发生迁移,进而导致岩石元素组成的变化^[24]。因此,我们应该选择保守的元素(受风化作用影响较小的元素)(例如:Zr、Y、Nb、REE等)研究岩浆的物质组成及演化过程^[28, 32]。在岩浆演化的过程中,Zr、Ti为典型的不相容元素,

$w(\text{Zr})$ 和 $w(\text{Zr})/w(\text{Ti})$ 可以用来替代 $w(\text{Si})$ 作为岩浆演化的指标^[32]。V与Ti具有相似的地球化学特征,都倾向于进入Fe-Ti氧化物,而Co为高度相容元素,主要富存于橄榄石中^[28]。在微量元素哈克图解中(图6),随着不相容元素Zr含量的增加,同区玄武岩、安山岩及流纹岩表现出较好的线性相关关系。其中,相容元素V、Co随着Zr含量的升高而降低,说明它们在岩浆演化过程中进入到矿物相中,随矿物结晶发生了分离(图6)。而不相容元素(如:Rb、La、Ba等)的含

量随着 Zr 含量升高而增加, 表明不相容元素在残留岩浆中的含量越来越高。从 $w(V)-w(Zr)$, $w(Rb)-w(Zr)$, $w(La)-w(Zr)$ 图中可以看出, F1、F2、F3 浮岩的微量元素组成与冲绳海槽玄武岩的微量元素组成表现出有规律的线性变化关系, 说明 S9 浮岩成因与同区玄武岩存在一定的联系。前人研究发现, 冲绳海槽中部大多

数浮岩在地球化学组成上主要属于流纹岩或流纹质英安岩^[2-3, 7-13]。在微量元素哈克图解中(图 6), F1、F2 浮岩与同区流纹岩落于同一区域, 具有相似的地球化学组成, 说明这两种浮岩在地球化学组成上也属于流纹岩或流纹质英安岩。而 F3 浮岩的微量元素组成介于安山岩与流纹岩之间, 说明其演化程度较 F1、F2 低。

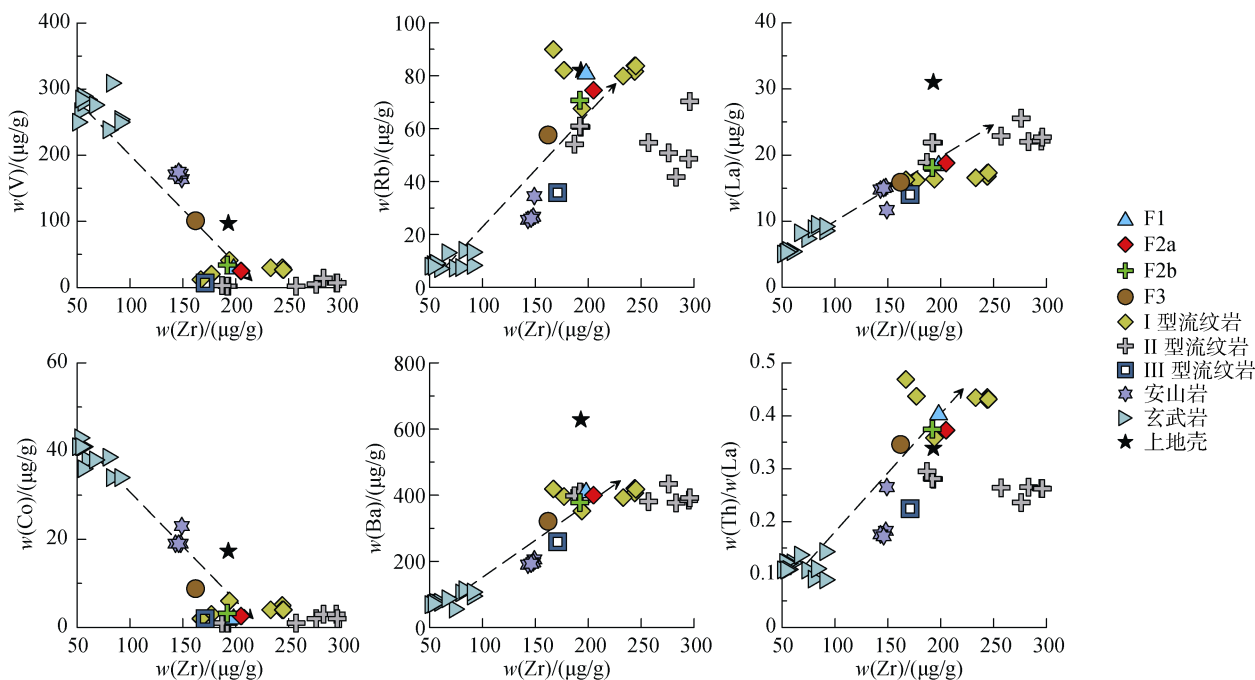


图 6 冲绳海槽中部火山岩微量元素及比值哈克图解^[2, 6, 27, 30]

Fig. 6 Harker diagrams of trace elements and their ratios for volcanic rocks from the middle Okinawa Trough^[2, 6, 27, 30]

在中-酸性岩浆中 Ti 为弱不相容元素, P 为中等不相容元素, 初始岩浆形成时这些元素较易进入熔体, 在岩浆结晶作用的早期阶段, Ti、P 可以形成钛铁矿、钛磁铁矿、磷灰石等而发生分异, 从而导致在岩浆演化后期出现相应元素的亏损^[2, 33]。从 N-MORB 标准化的微量元素蛛网图(图 4)可以看出, 与同区基性玄武岩相比, F1、F2、F3 浮岩均表现出明显的 P、Ti 负异常, 说明发生了矿物的分离结晶。从微量元素蛛网图可以看出, S9 浮岩中的 P、Ti 的亏损程度具有 $F1 > F2a > F2b > F3$ 的特征, 再一次说明四种浮岩岩浆的演化程度不同, F1 浮岩演化程度明显高于 F3 浮岩, 这与微量元素哈克图中取得的认识一致(图 6)。在角闪石和熔体的平衡体系中, K 的分配系数为 0.96, Rb 的分配系数为 0.29^[34], 随着岩浆的演化, 角闪石的结晶分离会导致残余岩浆中 $w(K)/w(Rb)$ 的减小。在 $w(Zr)/w(Ti)-w(K)/w(Rb)$ 图解中(图 7), F1、F2、F3 浮岩与同区玄武岩随着 $w(Zr)/w(Ti)$ 的增大, $w(K)/w(Rb)$ 减小,

说明岩浆演化的过程发生了角闪石的结晶。这与我们观察到的浮岩含角闪石斑晶一致, 进一步说明本文中的浮岩可能是由基性玄武质岩浆通过结晶分异作用演化而来的。稀土元素中 Eu^{3+} 可还原为 Eu^{2+} 而取代斜长石及磷灰石中的 Ca^{2+} , 在岩浆分离结晶过程中, 斜长石的大量晶出将导致残余熔体出现明显的 Eu 负异常^[35]。F1、F2、F3 浮岩均表现出中等程度的 Eu 负异常(图 5), 说明岩浆演化的过程中有斜长石的晶出, 且相比棕色浮岩 F3, 白色浮岩 F1 演化程度更高, 具有更显著的 Eu 负异常。

冲绳海槽火山活动频繁, 岩浆活动具有多期次的特征, 即使是来源于同一岩浆房的岩浆, 其喷发期次不同, 物理化学条件的差异, 通常形成具有不同物理性质和地球化学特征的火山岩^[15, 38]。由于样品获取难度较大以及研究方法的不完善, 冲绳海槽火山岩的年龄数据十分缺乏。现有资料显示, 海槽内最老的火山岩年龄小于 4 Ma, 大多数火山活动发生

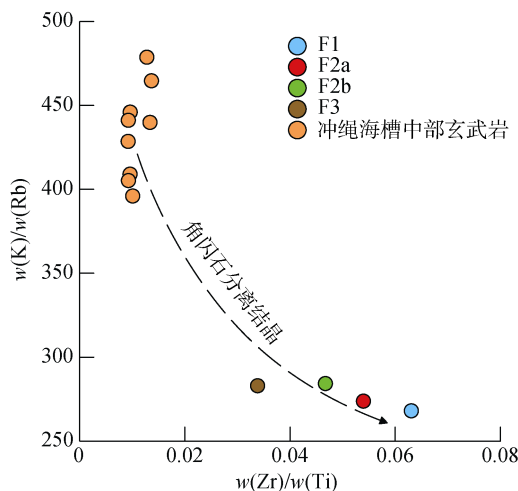


图7 岩心 S9 中浮岩的 $w(K)/w(Rb)-w(Zr)/w(Ti)$ 图解^[6, 30]
 Fig. 7 $w(K)/w(Rb)-w(Zr)/w(Ti)$ diagram of pumice clasts in Core S9^[6, 30]

于 1 Ma 以内^[33, 36-37]。陈丽蓉等^[15]通过铀系不平衡法测定了海槽中部浮岩的年龄,表明冲绳海槽最近的一次火山喷发发生在距今 13.1 ka 左右。黄朋等^[38]也通过铀系不平衡法测定了冲绳海槽浮岩的年龄,认为冲绳海槽晚更新世以来发生了一次广泛的酸性火山活动。喷发自海底的浮岩,即使密度比海水小,仍会很快浸满水而沉入海底^[39-40]。S9 浮岩的地球化学组成与冲绳海槽中部的熔岩^[13]及前人报道的浮岩^[9, 12-13]具有相似性(图 4 和图 5),说明 S9 浮岩是冲绳海槽中部岩浆作用的产物。此外, F1、F2、F3 浮岩表面新鲜,未见明显蚀变, F2 及 F3 浮岩磨圆较差, F1 浮岩部分颗粒磨圆中等,表明 S9 浮岩没有经历长距离的搬运(图 1)。因此,可以利用浮游有孔虫的放射性碳年龄代表浮岩的喷发年龄。根据浮游有孔虫放射性 ^{14}C 同位素测年得到的 229~230 cm 的沉积年龄为 12.1 ka BP^[41]。前人对该柱状样 243~244 cm 测定的沉积年龄(13.9 ka BP^[42])。本文运用线性内插法得到的 236~237 cm 的沉积年龄为 13.1 ka BP,因此 S9 中浮岩的喷发年龄可能为 13.1 ka BP。这一结果与前人报道的 12.7 ka BP 左右的酸性火山活动具有较好的一致性^[15, 38],说明岩心 S9 中的浮岩很有可能是该地质时期产生的。由此可见,即使是同一时期喷发的岩浆,物理化学性质也存在着差异,这也更加说明了冲绳海槽岩浆活动的复杂性。

3 结论

本文对从冲绳海槽中部沉积物柱状样 S9 中挑选

出来的浮岩进行了微观特征和地球化学组成的研究,根据浮岩的微观结构、元素组成及年代学特征,得到了以下认识:冲绳海槽中部距今 13.1 ka 左右的酸性火山活动产生的浮岩至少有三种颜色两种构造特征。白色、灰白色及棕色浮岩具有同源性,但经历了不同的演化过程。这三种颜色的浮岩来源于玄武质岩浆经过充分的结晶分异作用形成的流纹质及流纹英安质岩浆。玄武质岩浆在演化的过程中发生了斜长石、角闪石、辉石、Fe-Ti 氧化物、磷灰石等矿物的分离结晶。演化程度相对较低的棕色浮岩具有比白色浮岩高的 TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO 含量,且棕色浮岩具有相对最低的 $w(\sum REE)$ 和 $w(\sum LREE)$ 。浮岩的颜色差异可能与富铁斑晶矿物组成差异有关。颜色较深的棕色及黑色浮岩相比白色及灰白色浮岩,具有较高的全铁含量,且斑晶矿物中存在磁铁矿、钛铁矿。此外,我们认为浮岩物理性质的差异性对分析冲绳海槽酸性火山岩岩浆源性质具有重要意义。具有流动构造且发育小而密集气孔的浮岩岩浆可能具有黏度相对较大,压力连续降低的特点,而不具有流动构造且发育大而疏松气孔的浮岩岩浆可能具有黏度相对较小,压力阶段性降低的特点。

同一地质时期,岩浆源相同,驱动岩浆上升和喷发的物理、化学条件的差异会形成具有不同物理性质的浮岩。未来工作应该充分结合岩石的物理性质和地球化学特征进行综合全面的分析,才能对冲绳海槽地区浮岩的成因、岩浆演化过程及演化规律取得更深的认识。

参考文献:

- [1] 翟世奎, 陈丽蓉, 王镇, 等. 冲绳海槽浮岩岩浆活动模式浅析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(1): 60-67.
Zhai Shikui, Chen Lirong, Wang Zhen, et al. Primary analysis on pumice magmatism model of the Okinawa Trough[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1997, 17(1): 60-67.
- [2] 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.
- [3] 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 in the Okinawa Trough[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1986, 17(6): 504-

- 512.
- [4] 翟世奎. 冲绳海槽浮岩中斑晶矿物结晶的 P-T 条件[J]. 海洋科学, 1987, 11(1): 26-30.
Zhai Shikui. The crystalline temperature and pressure of phenocrysts of the pumice in the Okinawa Trough[J]. Marine Sciences, 1987, 11(1): 26-30.
- [5] Zeng Zhigang, Yu Shaoxiong, Wang Xiaoyuan, 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.
- [6] Shinjo R, Chung S L, Kato Y, et al. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the evolution of a young, intracontinental back arc basin[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B5): 10591-10608.
- [7] 秦蕴珊, 翟世奎, 毛雪瑛, 等. 冲绳海槽浮岩微量元素特征及其地质意义[J]. 海洋与湖沼, 1987, 18(4): 313-319.
Qin Yunshan, Zhai Shikui, Mao Xueying, et al. Trace element characteristics of pumices and its implications from the Okinawa Trough[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1987, 18(4): 313-319.
- [8] 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.
- [9] Guo Kun, Shu Yunchao, Wang Xiaoyuan, et al. Different magma sources and evolutions of white and black pumice from the middle Okinawa Trough: Evidence from major, trace elements and Sr-Nd-Pb isotopes[J]. Geological Journal, 2019, 54(1): 1-15.
- [10] 秦蕴珊, 翟世奎. 冲绳海槽浮岩的岩石化学特征及含氟性的讨论[J]. 地球化学, 1988, 17(2): 183-189.
Qin Yunshan, Zhai Shikui. Petrochemical characteristics of common elements and chlorine in pumice from the Okinawa Trough[J]. Geochimica, 1988, 17(2): 183-189.
- [11] 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.
- [12] Zhang Yuxiang, Zeng Zhigang, Yin Xuebo, et al. Petrology and mineralogy of pumice from the Iheya North Knoll, Okinawa Trough: Implications for the differentiation of crystal - poor and volatile - rich melts in the magma chamber[J]. Geological Journal, 2018, 53(6): 1-14.
- [13] 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.
- [14] Klug C, Cashman K V. Vesiculation of May 18, 1980, Mount St. Helens Magma[J]. Geology, 1994, 22: 468-472.
- [15] 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 Shunxi. The isotopic features and dating of pumice from Okinawa Trough[J]. Science in China (Series B), 1993, 23(3): 324-329.
- [16] Zeng Zhigang, Chen Shuai, Ma Yao, et al. Chemical compositions of mussels and clams from the Tangyin and Yonaguni Knoll IV hydrothermal fields in the southwestern Okinawa Trough[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 87: 172-191.
- [17] Zeng Zhigang, Ma Yao, Wang Xiaoyuan, et al. Elemental compositions of crab and snail shells from the Kueishantao hydrothermal field in the southwestern Okinawa Trough[J]. Journal of Marine Systems, 2018, 180: 90-101.
- [18] Zeng Zhigang, Yu Shaoxiong, Yin Xuebo, et al. Element enrichment and U-series isotopic characteristics of the hydrothermal sulfides at Jade site in the Okinawa Trough[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2009, 52(7): 913-924.
- [19] 黄朋, 李安春, 肖尚斌, 等. 冲绳海槽及邻区火山作用与形成演化[C]//中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊 (47). 北京: 科学出版社, 2006: 61-72.
Huang Peng, Li Anchun, Xiao Shangbin, et al. Magmatism and evolution of Okinawa Trough and adjacent areas[C]// Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Studia Marine Sinica (47). Beijing: Science Press, 2006: 61-72.
- [20] 胡思谊, 曾志刚, 殷学博, 等. 冲绳海槽岩心沉积物稀土元素特征及物源指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(1): 69-82.
Hu Siyi, Zeng Zhigang, Yin Xuebo, et al. Characteristics of rare earth elements in the sediment cores from the Okinawa Trough and their implications for sediment provenance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(1): 69-82.
- [21] Hu Siyi, Zeng Zhigang, Fang Xue, et al. Geochemical

- study of detrital apatite in sediment from the southern Okinawa Trough: new insights into sediment provenance[J]. *Minerals*, 2019, 9(10): 619.
- [22] 张玉祥, 曾志刚, 殷学博, 等. 海底浮岩前处理方法的实验研究[J]. *海洋科学*, 2017, 41(7): 64-70.
Zhang Yuxiang, Zeng Zhigang, Yin Xuebo, et al. Experimental study of a pretreatment method for submarine pumice[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(7): 64-70.
- [23] Paulick H, Franz G. The color of pumice: case study on a trachytic fall deposit, Meidob volcanic field, Sudan[J]. *Bulletin of Volcanology*, 1997, 59(3): 171-185.
- [24] 路凤香, 桑隆康. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 11-17.
Lu Fengxiang, Sang Longkang. *Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 11-17.
- [25] Fiege A, Holtz F, Cichy S B. Bubble formation during decompression of andesitic melts[J]. *American Mineralogist*, 2014, 99(5-6): 1052-1062.
- [26] Fisher R V, Schmincke H U. *Pyroclastic rocks*[M]. Berlin Heidelberg, New York: Springer, 1987: 1-472.
- [27] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 3: 1-64.
- [28] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325-343.
- [29] Pearce J A, Stern R J. Origin of back-arc basin magmas: trace element and isotope perspectives[J]. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 2006, 166: 63.
- [30] Guo Kun, Zhai Shikui, Zeng Zhigang, et al. Geochemical characteristics of major and trace elements in Okinawa Trough basaltic glass[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 37(2): 14-24.
- [31] Sun W D, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and source processes[J]. *Geological Society of London Special Publication*, 1989, 42(1): 313-345.
- [32] Pearce J A. A user's guide to basaltic discrimination diagrams[J]. *Geological Association of Canada*, 1996, 12: 79-113.
- [33] 李巍然, 杨作升, 王永吉, 等. 冲绳海槽火山岩岩石化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 1997, 13(4): 538-550.
Li Weiran, Yang Zuosheng, Wang Yongji, et al. The Petrochemical Features of the Volcanic Rocks in Okinawa Trough and Their Geological Significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1997, 13(4): 538-550.
- [34] Rollinson H R. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*[M]. New York: Longman Scientific and Technical, 1993: 352.
- [35] Winter J D. *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [36] Letouzey J, Kimura M. The Okinawa Trough: genesis of a back-arc basin developing along a continental margin[J]. *Tectonophysics*, 1986, 125(1-3): 209-230.
- [37] 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.
- [38] 黄朋, 李安春, 胡宁静, 等. 冲绳海槽火山岩 Sr-Nd 同位素特征及 U 系年龄[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2006, 36(4): 351-358.
Huang Peng, Li Anchun, Hu Ningjing, et al. Sr-Nd isotopic characteristics and U-series ages of volcanics from the Okinawa Trough[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2006, 36(4): 351-358.
- [39] Whitham A G, Sparks R S J. Pumice[J]. *Bulletin of Volcanology*, 1986, 48(4): 209-223.
- [40] Allen S R, Fiske R S, Cashman K V. Quenching of steam-charged pumice: Implications for submarine pyroclastic volcanism[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 274(1-2): 40-49.
- [41] Fang Xue, Zeng Zhigang, Hu Siyi, et al. Origin of pumice in sediments from the middle Okinawa Trough: constraints from whole-rock geochemical compositions and Sr-Nd-Pb isotopes[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(12): 462.
- [42] 姜韬, 曾志刚, 南青云, 等. 全新世以来冲绳海槽北部 S9 孔粒度变化特征及其古气候响应[J]. *第四纪研究*, 2015, 35(2): 307-318.
Jiang Tao, Zeng Zhigang, Nan Qingyun, et al. The grain size characteristics of the core S9 sediments in the northern Okinawa Trough and their paleoclimate response since Holocene[J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(2): 307-318.

Physical properties and geochemical characteristics of pumice rocks in core sediments from the middle Okinawa Trough and their indications of magmatism

FANG Xue^{1, 2, 3}, ZENG Zhi-gang^{1, 2, 3, 4}, HU Si-yi^{1, 2, 3}, ZHU Bo-wen^{1, 2, 3},
 QI Hai-yan^{1, 2}, WAN Shi-ming^{1, 2, 5}, XU Zhao-kai^{1, 2, 5}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China; 5. Laboratory for Marine Geology and Environment, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China)

Received: Jun. 26, 2019

Key words: pumice; microstructure; geochemistry; magmatic evolution; the Okinawa Trough

Abstract: To further understand the physical properties and geochemical characteristics of pumice rocks in the Okinawa Trough, we studied the microstructure and geochemical compositions of pumice clasts recovered from the sediment core S9 from the middle Okinawa Trough. The results indicate that white, grayish–white, and brown pumice rocks exist in the middle Okinawa Trough, and the grayish–white pumice rocks can be divided into two subtypes according to their structural characteristics: one with well-developed flow structure and the other with fumarolic structure. The geochemical compositions of pumice clasts suggest that the white, grayish–white, and brown pumice rocks were rhyolite and rhyolitic–dacite that were derived from basaltic magma through extensive fractional crystallization. Plagioclase, amphibole, pyroxene, Fe–Ti oxide, and apatite were crystallized during the evolution of the basaltic magma. Based on radiocarbon dating data and the geochemical compositions of the pumice clasts, we conclude that the white, grayish–white, and brown pumice rocks are the products of a felsic volcanic activity that erupted approximately 13.1 cal. ka BP. The brown pumice rocks feature relatively higher contents of TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, and CaO, and relatively lower values of REEs and LREEs than those of the white pumice rocks. According to the physical properties and geochemical compositions, we infer that the structures of the pumice rocks were likely associated with the viscosity and pressure of the magma. The magma with high viscosity that undergoes continuous decompression process tends to produce pumice rocks with dense vesicular and well-developed flow structure, whereas the magma with low viscosity that undergoes episodic decompression process is likely to produce pumice rocks with large and loose vesicular structures.

(本文编辑: 刘珊珊)