

西沙群岛浮岩的岩石地球化学特征及成因

韩宗珠^{1,2}, 吕迎秋², 许红³, 刘明^{1,2}, 来志庆^{1,2}

(1 中国海洋大学海底科学与探测教育部重点实验室, 青岛 266100;

2 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要:对采自西沙群岛东岛的 2 件浮岩样品进行了岩石学和地球化学初步研究, 结果表明, 研究区样品全岩化学组成落入粗面岩区域, 稀土配分曲线明显呈右倾, 具 Eu 负异常, 富集不相容元素, 微量元素标准化曲线特征与中下地壳相似。斜长石及辉石斑晶矿物具有中心熔蚀结构, 橄榄石呈熔蚀状。认为研究区浮岩是由西沙地块中地壳减压熔融产生粗面质岩浆后经历短暂的岩浆房冷凝时期, 由于板块继续拉张形成东岛西侧的狭窄海槽, 而引起岩浆通道突发性张裂, 导致压力的突然释放, 岩浆沿拉张裂谷急速上升, 在浅水中猛烈喷出而形成。

关键词:东岛; 浮岩; 岩石地球化学; 岩浆活动

中图分类号: P591; P581

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2017.06001

作为西太平洋最大的边缘海之一, 南海的形成与演化日益成为地质学研究的热点, 而西沙海域作为南海陆缘地槽系的组成部分, 其形成与演化受到南海海盆的多期扩张、印支地块地幔物质的东南向流动以及深部热活动的影响, 包含了许多该地区构造运动和板块运动作用的重要信息^[1]。西沙—中沙地块与南海北部陆缘曾发生缝合碰撞, 发育为西沙海槽断裂, 并密切影响西沙群岛地壳应力场。前人积累的多条深地震探测剖面显示西沙隆起区空间重力异常复杂多变, 正负异常相间^[2,3]。

目前, 西沙群岛东岛的主要地学研究集中于该区沉积物的地球化学特征与古生态学恢复, 由于其广泛的礁群和覆盖的厚层沉积物, 一直以来

被认为是上升礁和珊瑚贝壳沙体复合组成的岛屿^[4], 并未研究过该区域的岩浆活动; 因而, 本文选择位于东岛东侧的浮岩进行了矿物组成、全岩主微量元素含量测定, 以通过研究西沙东岛新生代浮岩的岩石地球化学特征分析其成因, 并从岩石学角度揭示西沙地块岩浆活动的深部过程, 为深入理解西沙群岛火山岩岛的岩浆活动提供详实的岩石学证据。

1 区域地质背景

西沙群岛位于西沙中沙地块, 西侧为印支地块, 东侧为南海海盆地块, 北接华南地块(南海北部隆起区), 南接西南海盆块体, 是南海北部台阶式陆坡的重要组成部分。西沙地块与南沙地块以西南次海盆扩张脊为轴的共轭关系, 地壳结构特征相似, 表现为在南海北部拉张背景作用下不同程度地减薄的陆壳特征^[1,6], 上下地壳厚度比为 1:2, 平均厚度约为 23 km^[7]。

收稿日期: 2017-03-30

基金项目: 南北极环境综合考察与评估专项 (CHIN-ARE2016-01-02)

作者简介: 韩宗珠 (1964—), 男, 教授, 主要从事岩石学和地球化学方面的研究工作。E-mail: hanzongzhu@ouc.edu.cn

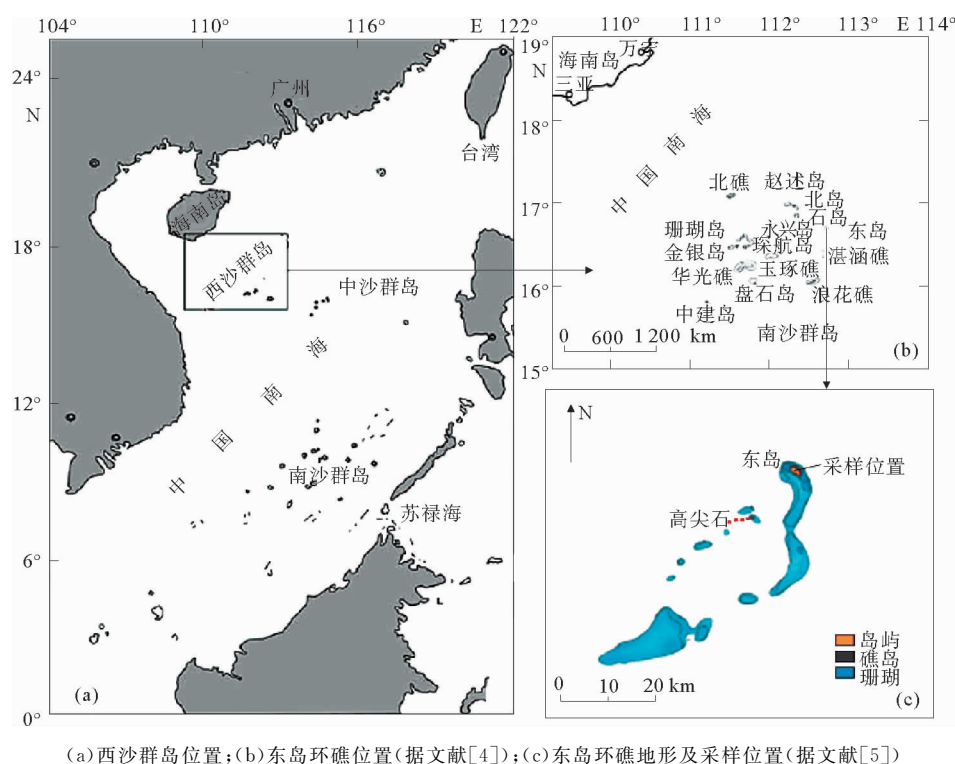


图 1 研究区域图及采样点位置

Fig. 1 Geographic map of Dongdao island and sampling positions

研究区东岛 ($16^{\circ}39' - 16^{\circ}41'N, 112^{\circ}43' - 112^{\circ}45'E$) 是椭圆形的热带珊瑚礁岛, 位于西沙群岛东群 (图 1), 距离西沙群岛最大的岛屿永兴岛约 18 海里^[5]。东岛高程 6.7 m, 长度 2 300 m, 宽度 800~1 100 m, 面积 1.74 km², 属于建设型岛屿, 与高尖石岛合而东岛环礁^[8], 西侧临近一狭窄海槽。距东岛 14 km 的高尖石岛是第四纪更新世后期火山喷发作用产物。根据岩层倾向分析, 当时的喷发中心在高尖石的东北方, 岛上分布的火山碎屑岩具玻璃基质、碎屑成分一致, 玻基辉橄岩块与玻基胶结物之间界限并不清晰^[8]。

2 样品采集与分析方法

本次研究的浮岩样品取自西沙群岛东岛出露点 ($112^{\circ}43'84''N, 16^{\circ}40'2.11''E$), 位于东岛西侧。对研究区 2 个地球化学样品进行全岩分析, 测试数据及相关参数列于表 1 中。

首先对样品进行岩石切片, 进行偏光显微镜下的岩相学观察, 初步鉴定斑晶矿物的种类, 并研究其共生关系。然后切制岩石光薄片, 在中国海

洋大学电子探针分析实验室, 采用电子探针 X 射线微区分析仪针对研究区 2 个样品的斑晶矿物和基质的化学成分进行分析。将采集的样品, 选取新鲜部分, 粉碎至 200 目用于主微量及稀土元素的测试。主量元素在中国海洋大学海洋地球科学学院 XRF 分析实验室完成, 分析精度优于 0.5%, 微量元素和稀土元素的分析在中国地质调查局青岛海洋地质研究所实验中心用 ICP MS/AES 完成, 分析精度优于 5%。主微量及稀土元素的测试过程中均使用国内玄武岩标样 GB-WO7105 (GSR-3) 作为标准样品。

3 岩相学及岩石地球化学特征

3.1 岩相学特征

研究区浮岩手标本呈棕褐色, 块状构造, 气孔状构造十分发育; 气孔为圆形、不规则状, 几乎没有充填物, 颗粒大小不等。岩石薄片镜下观察 (图 2) 样品均为斑状结构, 斑晶矿物主要为斜长石、辉石、橄榄石和钛铁矿, 基质为褐色玻璃质。斑晶成

表 1 研究区浮岩主量元素(w)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析测试结果及相关参数

Table 1 Contents of major oxides (w) and trace elements($\times 10^{-6}$) of Dongdao pumice and related parameters

样品号	S1	S2	样品号	S1	S2	样品号	S1	S2
SiO ₂	60.85	60.87	Y	36.2	36.2	La	62.7	63.1
TiO ₂	0.96	0.99	Nb	8.74	8.59	Ce	123.8	123.7
Al ₂ O ₃	14.79	15.63	Ta	0.44	0.43	Pr	15.27	15.4
TFe ₂ O ₃	2.86	2.94	Ba	1 170	1 170	Nd	58.8	59.7
MnO	0.39	0.38	Cu	17.5	14.6	Sm	10.2	10.3
MgO	1.66	1.64	Sr	493	515	Eu	2.54	2.62
CaO	4.1	3.94	V	83.8	91.8	Gd	8.24	8.31
Na ₂ O	5.14	5.13	Zn	138.2	130.5	Tb	1.16	1.17
K ₂ O	4.15	4.08	Li	22.3	21	Dy	6.19	6.29
P ₂ O ₅	1.57	1.4	Be	2.22	2.08	Ho	1.32	1.32
LOI	3.41	2.87	Sc	9	9.4	Er	3.75	3.78
Total	99.88	99.89	Cr	17.9	10.8	Tm	0.58	0.59
DI	80.02	78.83	Co	8.7	9.3	Yb	3.86	3.88
SI	12.15	12.02	Ni	9.79	5.32	Lu	0.6	0.61
AR	2.94	2.78	Ga	20.5	20.3	δEu	0.82	0.84
σ43	4.61	4.56	Rb	72	72.4	δCe	0.95	0.94
Q	9.46	9.16	Mo	3.47	3.48	LREE	273.31	274.82
A	62.89	58.97	Cd	1.17	0.34	HREE	25.7	25.95
P	12.88	18.51	W	0.52	0.47	ΣREE	299.01	300.77
液相密度	2.45	2.45	Pb	13.5	14.9	LREE/HREE	10.63	10.59
干黏度	5.64	5.61	Th	11.1	11.1	(La/Yb)N	11.65	11.67
湿黏度	4.72	4.74	U	3.48	3.4			
液相线温	974	980	K	32 294.5	30 837.8			

分多为斜长石,常见熔蚀现象和熔蚀麻点结构。有较多斑晶聚集的地方,基质也较致密,气泡拉长呈肠状排列。S1 中部分辉石和长石聚晶可见柱状长石和粒状辉石形成交织结构,有钛铁矿小颗粒填充其中。不排除是由下地壳携带的安山质包裹体的可能性(图 2)。

S1 斑晶含量 2%~3%,部分辉石和长石聚晶可见柱状长石和粒状辉石形成联斑结构。其中,斜长石,粒径 0.40 mm×0.16 mm,无色板条状,可见聚片双晶,有熔蚀现象,可见聚斑结构,占斑晶含量的 20%。辉石,粒径 0.40 mm×0.16 mm,柱状,横截面呈板状八边形,有中心熔蚀现象,可见聚斑结构;节理完全,裂纹发育,光性特征表明其为单斜辉石,占斑晶含量 25%。橄榄石,

粒径 0.15 mm×0.10 mm,无色尖锐角六边一四边形,裂纹发育,有熔蚀现象;占斑晶含量 25%,钛铁矿占 30%。

S2 斑晶自形,且斑晶含量<2%。其中,斜长石,可见聚片双晶,有熔蚀现象,内嵌长石和辉石小颗粒,可见聚斑结构,粒径 1.15 mm×0.74 mm~0.80 mm×0.20 mm,占斑晶含量的 50%。辉石,柱状,横截面呈板状八边形,局部有蚀变为钛铁矿,有熔蚀现象边部呈港湾状,平行消光;节理完全,裂纹发育,粒径 1.00 mm×0.55 mm~0.37 mm×0.18 mm,光性特征表明其为单斜辉石,占斑晶含量 25%。橄榄石,无色,四边形较破碎,呈橄榄石斑晶假象,裂纹发育,有熔蚀现象,粒径 0.16 mm×0.16 mm,占斑晶含量 25%。

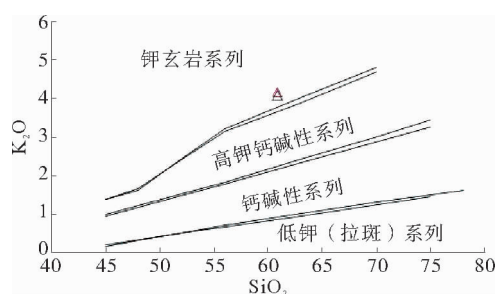


图 4 研究区浮岩 K_2O-SiO_2 图解(据文献[10])

Fig. 4 The K_2O-SiO_2 diagram of pumices in study area(from reference[10])

K 正异常, Ta、Nb、Sr、Hf、Ti 负异常。Nb/Ta (19.86、19.87) 显著高于地幔值(17.5), 符合沿裂谷碱性岩的特征。Nb * 负异常, 为 0.125, 认为是混染了大陆物质, 岩浆上升时通过花岗质壳。(La/Yb)_N 较高, 分别为 11.65、11.67, 表明其分异程度较强。对比样品中 Ni 和 Cr 的丰度值, S2 明显要低于 S1, 且随 MgO 含量的下降而下降。

对比地壳和冲绳海槽浮岩 HD4-W、HD-4B、HD13-W、HD13-B 的微量元素原始地幔标准化值, 研究区样品曲线与上、中地壳曲线十分贴合, 并更为亏损高场强元素 Ta、Nb^[11,12]。

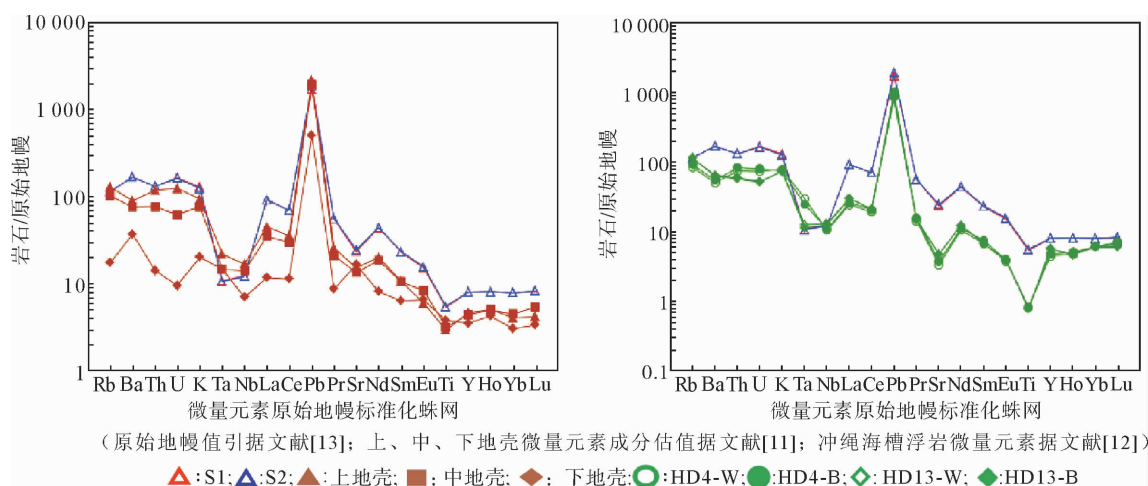


图 5 研究区浮岩微量元素原始地幔标准化蛛网

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram for pumices from the study area

3.2.3 稀土元素地球化学

稀土元素测试数据及相关参数列入表 1 中。

研究区浮岩的稀土元素富集, ΣREE 分别为 299.01、300.77, 稀土元素配分模式与中地壳相似, 为右倾的轻稀土富集型曲线(图 6), LREE/HREE 比值(10.63)以及 (La/Yb)_N 比值(10.95), 轻重稀土分馏明显。可能反映岩浆源区部分熔融程度相对较低。 δEu 值为 0.84, 表现为轻微负异常, 表明岩浆经历一定的斜长石的分异。 δCe 值为 0.95, 轻微的负异常可能是岩石同海水发生了一定程度的相互作用。相比于冲绳海槽浮岩更为富集轻稀土。

4 岩石成因

粗面质岩浆的成因类型多样, 主要观点包括:

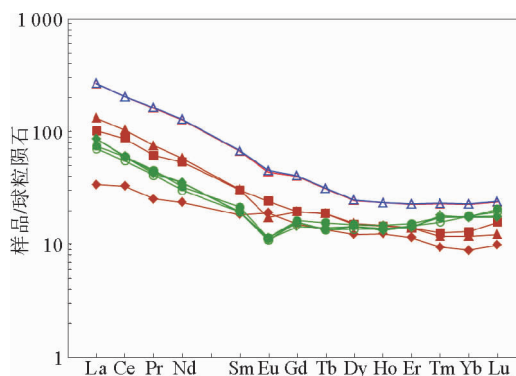


图 6 研究区浮岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式(图例同图 5)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns of pumices in study area

①认为粗面质岩浆是派生岩浆, 并且主要与岩浆同化作用有联系^[14]; ②年轻下地壳受深俯冲上地

壳析出流体交代后部分熔融产生^[15];③认为是碱性玄武岩浆分异作用的产物^[16]。

从岩石主要元素成分来看,研究区浮岩样品相对于大洋中脊玄武岩 Mg、Al 含量低而 K、Na 含量高, SiO₂ 含量均高于 60%。根据 K₂O—SiO₂ 图解确定本区浮岩属于钾质火成岩,且从微量元素蛛网图看,研究区浮岩具有钾质火成岩的显著特点, Al₂O₃ 含量高而 TiO₂ 低,亏损高场强元素,呈 TNT 负异常。富集高场强元素和大离子亲石元素及不明显的铕异常,这些特征与已报道的橄榄玄粗质系列火山岩特征相似^[17]。但相比于在低压环境下,由碱性或过碱性玄武岩浆直接分离结晶产生的粗面质岩浆,研究区样品 Eu 负异常较弱。并且研究区浮岩微量元素原始地幔标准化蛛网图及稀土元素球粒陨石标准化配分模式图与上、中地壳十分贴合^[18],微量元素特征符合大陆地壳化学成分的总体特点并更为亏损高场强元

素(Ta、Nb)。

研究区浮岩 A. R. 值分别为 2.94、2.78, $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) > 9\%$,富集 Rb、Ba、K、Pb、U、Th;符合大陆裂谷早期岩浆富碱,富不相容元素,随着裂谷发展碱度及富集程度逐渐降低的特征^[19]。

根据对研究区浮岩样品微量元素比值进行投点,在 La/Yb—Th/Yb 图解(图 7a)中可以看出,研究区样品均落入安山弧范围内,具有活动大陆边缘安山岩特征;在 Sc/Ni—La/Yb 构造图解(图 7b)中, S2 落在安山弧外侧,可能是由于岩浆房内橄榄石结晶分异作用导致残余熔体中 Ni 含量较低所导致。由于安山岩类在造山隆起区会向流纹质岩演化;在凹陷区,随构造活动的减弱,常向粗面岩方向演化。根据 La—Nb 图解(图 8)中研究区样品落在非造山安山岩范围,推测研究区粗面质岩浆可能是由安山质岩在构造凹陷区演化形成。

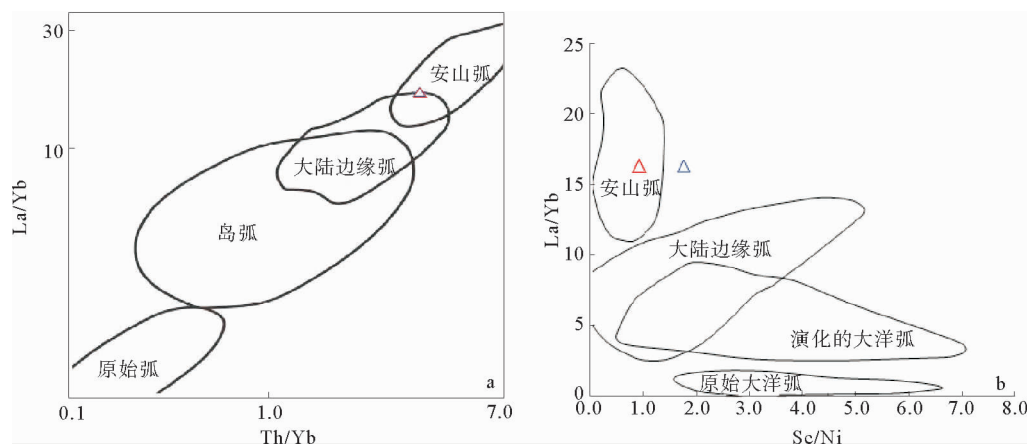


图 7 研究区样品 La/Yb—Th/Yb、Sc/Ni—La/Yb 划分图解(据文献[20])

Fig. 7 Pumices classification with La/Yb—Th/Yb and Sc/Ni—La/Yb (from reference[20])

前人的研究工作中也得出,西沙地块岛礁下方存在横波速度较低的下地壳,表明下地壳物质可能受到深部地幔热活动和区域拉张应力作用的影响,产生水平各项异性排列^[1];其 NW 向受拉张最为强烈,表现出与西沙海槽相似的裂谷特征^[3]。

目前针对冲绳海槽地区浮岩的研究认为,不同于有多次基性岩浆注入的初级岩浆房喷出的白色浮岩,黑色浮岩是属于次级岩浆房独立喷出的产物。相比于原始岩浆来自地幔的拉斑玄武质岩

浆,岩浆在岩浆房内经过充分的分异作用,钛磁铁矿、钛铁矿呈珠状构造的冲绳海槽黑色浮岩^[12];东岛浮岩中的钛磁铁矿物自形程度较好,暗示在岩浆演化过程中未有高温岩浆注入混熔。早期形成的斜长石可由浮力带到较低的压力带,并在上升的过程中与熔体进行反应形成韵律环带,在研究区的浮岩中的斑晶均无环带结构,认为岩浆房未经岩浆多期混入。橄榄石结晶后由于本身密度较大,易受重力作用下沉残留在岩浆房底部,在研究区的样品中均含有橄榄石斑晶,暗示岩浆上升

迅速;橄榄石斑晶矿物的破碎及斜长石斑晶的中心熔蚀结构也可能是压力突然释放和体积膨胀的结果^[22]。

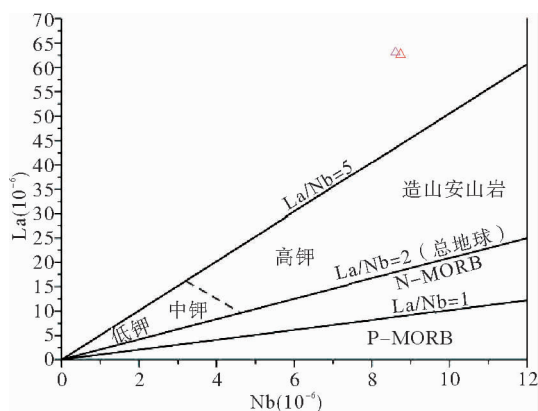


图8 研究区样品La—Nb构造环境判别图(据文献[21])

Fig. 8 The tectonic classification by La-Nb of pumices in study area (from reference[21])

综合上述特征认为,在中下地壳减压熔融产生岩浆后经历短暂的岩浆房冷凝时期,由于板块继续拉张而引起岩浆通道突发性张裂,导致压力的突然释放,进而产生上吸力^[22],使岩浆迅速上升,炽热的岩浆喷发到海水中与汽化了的海水混合后沉积生成浮岩。

5 结论

(1)本研究区浮岩样品属于中性火山岩, SiO_2 含量在60%左右,化学组成相当于粗面岩。具有斑状结构,斑晶主要为斜长石、单斜辉石和少量橄榄石,基质为玻璃质。富集高度不相容元素(Rb、Ba、K、Pb、U、Th),富集轻稀土元素,贫重稀土元素,明显亏损高场强元素(Nb、Ta)。和轻微的 δEu 负异常。

(2)东岛浮岩岩浆并非是由碱性岩浆分异后期产生的,与高尖石岛发现的玻基辉橄岩并不具有连续的演化关系;而是西沙地块受到拉张作用,中地壳物质减压熔融形成粗面质岩浆,并经历短暂的岩浆房冷凝时期,拉张减薄作用形成裂谷后,压力突然释放产生上吸力,粗面质岩浆沿裂谷迅速上升冲出地壳,在浅水猛烈喷发形成浮岩。

(3)东岛西侧海槽很可能并未切穿下地壳,但

其是否属于西沙海槽NE向断裂在该地区的自然延伸,仍需要更进一步的地震探测数据来进行验证。

参考文献:

- [1] 丘学林,曾钢平,胥 颐,等.南海西沙石岛地震台下的地壳结构研究[J]. 地球物理学报,2006,49(6):1720-1729.
- [2] 万 玲,曾维军,吴能友,等.南海北部陆缘西沙海槽—台湾恒春半岛地质断面[J]. 中国地质,2009,36(3):564-572.
- [3] 黄海波,丘学林,徐辉龙,等.南海西沙地块岛屿与地震观测和海陆联测初步结果[J]. 地球物理学报,2011,54(12):3161-3170.
- [4] Liu X D, Zhao S P, Sun L G, et al. Geochemical evidence for the variation of historical seabird population on Dongdao Island of the South China sea[J]. Journal of Paleolimnology, 2006,36(3):259-279.
- [5] 游长江,侯佩旭,邓灿芳,等.西沙群岛旅游资源调查与评价[J]. 资源科学,2015,37(8):1609-1620.
- [6] 阮爱国,李家彪,郝天姚,等.石岛地震台远震记录反演研究[J]. 海洋学报,2006,28(2):85-92.
- [7] 郭晓然,赵明辉,黄海波,等.西沙地块地壳结构及其构造属性[J]. 地球物理学报,2016,59(4):1414-1425.
- [8] 业治铮,何起祥,张明书,等.西沙群岛岛屿类型划分及其特征的研究[J]. 海洋地质与第四纪地质,1985,5(1):3-15.
- [9] Le Maitre R W. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms; Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks[M]. Oxford: Blackwell, 1989.
- [10] 路远发. GeoKit:一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学,2004,33(5):459-464.
- [11] Rudnick R L, Gao S. Composition of Continental Crust[M]//Rudnick R L. The Crust: Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2005, 3: 1-64.
- [12] 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.
- [13] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes[M]//Sauders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. London: Geol. Soc. Spec. Publ., 1989: 313-345.
- [14] Mingram B, Trumbull R B, Littman S, et al. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle-derived components[J]. Lithos, 2000, 54(1/2): 1-22.
- [15] 项媛馨,巫建华.广东北部早白垩世粗面岩的成因: Sr-Nd-Pb 同位素制约[J]. 高校地质学报,2011,17(3):436-446.
- [16] 吴昌志,顾连兴,任作伟,等.辽河盆地沙三期火山-侵入岩

- 地球化学与岩石成因[J]. 岩石学报, 2004, 20(3):545-556.
- [17] 章邦桐,陈培荣,杨东生,等. 赣南中生代橄榄玄粗岩系列厘定的地质证据[J]. 地质学报,2001(2):213-220+291.
- [18] 高山. 大陆地壳组成研究的进展[M]. 北京:化学工业出版社,2005:44-78.
- [19] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [20] Gondie K C. Geochemistry and tectonic setting of early Proterozoic supracrustal rocks in the southwestern United States[J]. Jour. Geol., 1986, 94(6): 845-864.
- [21] Bailey J C. Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites[J]. Chemical Geology, 1981, 32(1): 139-154.
- [22] 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.

PETRO-GEOCHEMISTRY AND GENESIS OF THE PUMICES AT DONGDAO OF XISHA ISLANDS

HAN Zongzhu^{1,2}, LV Yingqiu², XU Hong³, LIU Ming^{1,2}, LAI Zhiqing^{1,2}

(1 The Key Laboratory of Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China;

2 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3 Qingdao Institute of Marine Geology CGS, Qingdao 266071, China)

Abstract: In this paper, two pumices samples collected from the Dongdao Island are studied for petrography and mineral geochemistry. With chemical composition, the samples are defined as trachyte, and their rare earth distribution curves are both dipping rightward, with negative Eu anomalies, enriched incompatible elements, and a trace element normalized curve similar to the lower crust. The porphyritic minerals of plagioclase and pyroxene show a central melting structure, and olivine is molten. It is believed that the pumices are formed by an explosion of a short-term condensed magma chamber after the melting and pressure reduction of the crust at the Xisha block, due to the continuous spreading of the plate and the formation of the narrow trough on the west side of the Dongdao Island. The process caused the sudden release of pressure, and rapid eruption of magma along the stretching rift into the shallow water.

Key words: pumice; petro-geochemistry; magmatic activity; Dongdao