

冲绳海槽浮岩微量元素的特征 及其地质意义*

秦藎珊 翟世奎

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

毛雪瑛 柴之芳 马淑兰

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘要 对冲绳海槽9个浮岩样品做了仪器中子活化分析。根据浮岩微量元素的特征讨论了岩浆的物质来源、结晶演化过程以及岩浆活动与冲绳海槽地质构造的联系。提出冲绳海槽黑色浮岩和灰白色浮岩不仅来自不同的岩浆源, 而且经历了不同的形成过程。灰白色浮岩反映了冲绳海槽的地质构造性质, 在成因上与海槽区的构造活动有关。

冲绳海槽是一典型的弧后盆地, 东西两侧以陡峭的正断层为特征, 海槽底部分布着第四纪海底火山。高的布格异常和热流值(平均值为 $4.06\text{HFU}^{[5,10]}$)、介于大陆型地壳和大洋型地壳之间的地壳厚度(15—28km, 平均 $20\text{km}^{[2]}$)以及海槽轴部存在的张性断裂带^[7]等, 都说明冲绳海槽是一个目前正在活动的弧后裂陷盆地。

冲绳海槽分布着黑色和灰白色两种不同性质的浮岩。前者是碱性系列的粗面岩, 主要分布在海槽北部的个别站位; 后者属钙碱性系列的流纹英安岩, 在海槽中广泛分布。根据两种浮岩的分布和磨圆程度, 作者推断黑色浮岩可能是来自冲绳海槽周围的陆架或岛弧, 而灰白色浮岩则是原地火山喷发的产物^[4]。在灰白色浮岩中, 存在两种斑晶矿物组合, 分别代表了岩浆结晶作用的两个世代。橄榄石、磁铁矿、钛铁矿、富镁的单斜辉石和斜方辉石、基性斜长石 ($A_n = 50-89\%$), 代表了岩浆早期结晶的矿物组合; 中、酸性斜长石、石英、黑云母则可能是岩浆作用晚期的产物。

一、方法与结果

将大块浮岩破碎, 取中间新鲜样品1—2g, 于玛瑙研钵中磨细、磨匀(>100目), 在80℃烘箱中烘4个小时。冷却后, 称取20—30mg, 用高纯铝箔包好待用。

将配好的一定浓度的混合标准溶液, 用Eppendorf移液管定量移取滴在滤纸上, 待干燥后用高纯铝箔包好待用。

把制好的样品和标准一起放入重水反应堆中照射20小时, 中子通量为 8.0×10^{13} 中子· $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。冷却三天后, 再将样品和标准分别装在测量小瓶中。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第1431号。
收稿日期: 1986年5月19日。

用 SCORPIO-300 程控 γ 谱仪分别于冷却的第四天和第十天两次测量样品和标准的 γ 能谱,然后用自编的程序计算出样品中各元素的含量。所用 Ge(Li) 探测器的分辨率为 1.87keV (对 ^{60}Co , 1332.5 keV), 相对探测效率达 28%, 峰康比好于 50:1。

9 个浮岩样品的仪器中子活化分析结果列于表 1。为了便于对比,将洋隆低钾拉斑玄武岩的某些微量元素含量亦列于表 1 中。

表 1 浮岩中微量元素的含量 (ppm)

元素	灰白色浮岩										洋隆低钾 拉斑玄武 岩 ^[6]
	31°15'N 128°37'E	30°30'N 129°01'E	29°48'N 128°30'E	28°06'N 127°22'E	27°50'N 127°36'E	26°42'N 126°56'E	26°26'N 125°54'E	27°48'N 127°36'E	30°30'N 129°01'E	黑色浮岩	
La	20.8	13.0	13.2	9.2	14.4	13.6	12.4	12.7	8.8	56.0	3.9
Ce	46.5	34.5	34.6	16.4	28.9	35.3	29.3	30.9	26.9	119.0	12
Nd	21.6	30.6	20.0	10.0	11.5	21.1	20.4	31.8	19.2	66.3	
Sm	3.6	5.0	5.1	2.7	3.1	5.0	4.2	5.0	3.9	9.8	3.9
Eu	0.7	1.5	1.5	0.7	0.8	1.6	1.3	1.6	1.2	2.8	1.4
Tb	0.6	1.3	1.3	0.6	0.6	1.3	1.2	1.4	1.0	1.4	1.2
Yb	2.3	5.3	5.4	2.7	2.5	5.3	4.8	5.4	4.1	3.7	4.0
Lu	0.38	0.84	0.87	0.42	0.44	0.85	0.73	0.85	0.66	0.60	
Fe(%)	1.1	2.4	2.3	1.7	1.8	2.4	1.9	2.4	2.7	5.1	
Co	1.0	2.1	2.0	2.5	3.2	2.0	1.4	2.0	6.1	10.6	32
Ni	—	—	—	—	—	—	32.7	—	40.7	—	100
Sb	0.63	0.25	0.42	0.32	0.70	0.35	0.32	0.73	0.94	0.35	
Th	10.6	4.5	4.4	3.4	7.1	4.5	3.9	4.5	3.7	10.6	0.18
Rb	117.0	51.5	49.7	31.6	63.9	51.0	44.7	50.4	45.9	76.8	1
Sr	102.0	80.0	45.6	151.0	117.0	70.9	67.1	118.0	122.0	488.0	135
Sc	6.7	13.9	13.0	8.5	6.9	13.9	11.5	14.3	13.1	10.3	
Ba	499	241	208	259	373	242	183	216	255	1100	11
Hf	3.7	5.7	5.8	2.9	4.3	5.9	5.2	5.8	4.7	5.7	
Cr	2.4	2.2	—	—	5.4	—	1.2	—	16.0	5.9	300
Ca(%)	1.2	1.7	1.9	2.3	1.7	1.5	1.6	1.7	1.5	3.1	
Ta	0.55	0.42	0.40	0.19	0.39	0.48	0.41	0.49	0.34	0.40	
U	1.90	0.57	0.51	—	2.21	0.68	1.33	1.71	0.78	2.2	0.1
Cs	7.9	3.3	3.0	2.5	3.2	3.2	2.8	3.2	3.3	1.8	0.02
Rb/Sr	1.15	0.64	1.09	0.21	0.55	0.72	0.67	0.43	0.38	0.16	0.007
La/Yb	9.04	2.43	2.44	3.40	5.78	2.55	2.61	2.34	2.11	14.78	1.0
Eu/Sm	0.20	0.31	0.29	0.27	0.24	0.31	0.30	0.31	0.30	0.29	

由表 1 可以看出,相对洋隆玄武岩来说,灰白色浮岩富含 Th, Rb, Ba, U, Cs, La, Ce, Sm 等大离子亲石元素,即所谓的更亲湿岩浆元素 (more-hygromagmatophile^[8]); 而贫 Fe, Co, Ni, Cr 等铁族元素,显示出岩浆经过分异作用的特征。黑色浮岩与灰白色浮岩在微量元素组成上的明显不同,突出表现在黑色浮岩的 La, Ce, Nd, Sm, Eu 等轻稀土元素及 Ca, Sr, Ba 等元素的含量较灰白色浮岩为高,特别是 Sr 和 Ba 的含量,黑色浮岩高出灰白色浮岩几倍乃至十倍以上。

两种浮岩的球粒陨石标准化的稀土元素分布模式也有着本质的差别(图1)。9个灰白色浮岩的稀土元素分布模式相似:(1)都呈轻度的轻稀土富集型($La/Yb = 2.11-9.04$);(2)都有明显的负Eu异常。黑色浮岩的稀土元素分布模式属于轻稀土高度富集型($La/Yb = 14.78$),并且没有明显的负Eu异常。

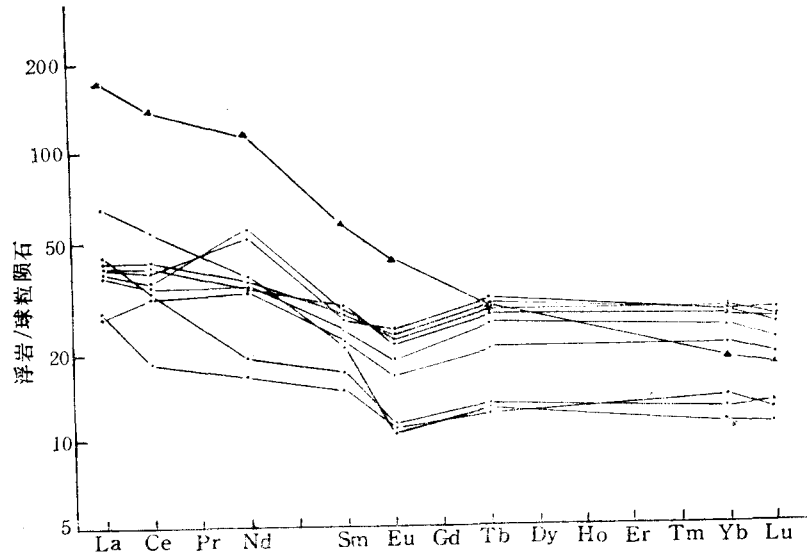


图1 浮岩的球粒陨石标准化的稀土元素分布模式

▲ 黑色浮岩; ● 灰白色浮岩。

二、讨 论

1. 岩浆的结晶演化过程

火成岩中, Sr 含量的高低取决于岩浆的性质、形成岩浆的构造环境以及岩浆所经历的演化过程。图2表明: Sr 在碱性岩中高度富集, 并且相对于洋隆玄武岩来说, 大陆玄武岩 Sr 的含量较高。这说明火成岩中 Sr 含量的高低可能与岩浆源的深度或岩浆经受地壳物质的混染程度有关。黑色浮岩中 Sr 的高含量可能是由于岩浆来自地下较深的岩浆源或者在上升到地表的的过程中曾受到地壳物质的强烈混染造成的。灰白色浮岩中 Sr 含量异常低(低于洋隆低钾玄武岩), 除了与岩浆源的深度有关外, 其主要原因可能是岩浆的结晶分异作用造成的。Sr 可以置换 Ca 进入斜长石晶格中, 它在斑晶斜长石与液态玄武质岩浆之间的分配系数为 $K_D = 1.83^{[3]}$, 在斑晶斜长石与液态英安质岩浆之间的分配系数则达 $K_D = 2.84^{[3]}$, 所以, 大量的斜长石晶体自岩浆中结晶析出会造成残余岩浆中 Sr 和 Ca 的同时亏损。灰白色浮岩中 Sr 和 Ca 的含量明显较低, 说明在灰白色浮岩岩浆作用的早期有斜长石的结晶析出。浮岩中见到的基性斜长石斑晶正是在火山喷发过程中, 岩浆裹挟了部分早先结晶的斜长石造成的。岩浆作用早期的结晶分异作用亦可以由明显的负 Eu 异常所证明。在所有稀土元素中, 只有 Eu 可以在岩浆作用中以二价离子存在, 并且 Eu^{2+} 可以和斜长石中的 Ca^{2+} 形成广泛的类质同像替换(在斜长石与液态英安质岩浆之

间, Eu 的分配系数 $K_D = 2.11^{[3]}$, 所以, 斜长石的结晶析出同样造成了 Eu 的相对亏损。黑色浮岩中, Sr 和 Ca 的含量较高以及没有明显的负 Eu 异常与其中没有早期结晶的斜长石斑晶是一致的。说明在黑色浮岩岩浆作用期间没有发生明显的斜长石结晶分异作用。

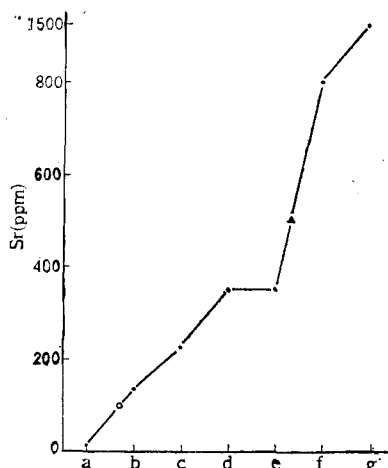


图2 产于不同构造环境的玄武岩 Sr 的含量

(除本文样品外,资料转引自文献[6])
 a. 球粒陨石; b. 洋隆低钾玄武岩; c. 岛弧低钾玄武岩; d. 岛弧拉斑玄武岩;
 e. 大陆裂谷拉斑玄武岩; f. 大洋碱性玄武岩; g. 大陆裂谷碱性玄武岩。
 ▲黑色浮岩; ○灰白色浮岩。

在岩浆作用中, Ba 与 K 的性质相近, 主要赋存在钾长石及云母类矿物中。黑色浮岩中 Ba 的含量异常高是岩浆强碱性的反映 ($K_2O\% = 3.88$, $Na_2O\% = 5.63$); 灰白色浮岩中 Ba 含量相对较低, 说明岩浆来自贫碱性组分的岩浆源。

稀土元素在辉石和与之平衡的液态岩浆之间的分配系数明显地表现出 $K_{La} < K_{Ce} < \dots < K_{Gd} \leq \dots \leq K_{Yb}^{[1,3]}$ 。这说明辉石相的结晶析出, 将使得残余岩浆富集轻稀土元素而贫重稀土元素。两种浮岩的球粒陨石标准化的稀土元素分布模式都表明有辉石相结晶分异作用的可能性。但黑色浮岩中轻稀土的高度富集似乎与其强碱性的关系更为密切, 因为随着原子序数的递增, 稀土元素的碱性递减, 稀土元素的这种特征会导致在碱性岩中更加富集轻稀土元素。

综上所述, 冲绳海槽的灰白色浮岩和黑色浮岩不但来自性质不同的岩浆源, 而且经历了不同的演化过程。斜长石的结晶析出是灰白色浮岩岩

浆结晶分异作用的突出特征, 初始岩浆可能是贫碱性组分的橄榄拉斑玄武质岩浆, 经过基性斜长石、辉石、橄榄石等矿物的结晶析出而演化成酸性岩浆。黑色浮岩以强碱性为特征, 可能来自地下更深的岩浆源或者与地壳物质有一定的关系。在岩浆作用期间没有明显的长石类矿物的结晶分异。

2. 岩浆活动与地质构造

D. A. Wood 等 (1979)^[8] 提出了基性到酸性火山岩的精确的 Th-Hf-Ta 三角形图解, 并且作为判别岩浆构造环境的一种手段。1980年, D. A. Wood 等^[9]再次证明了该图的可用性, 并指出, 在区别破坏性板块边缘熔岩与其它构造环境喷出的熔岩方面, Th-Hf-Ta 图比迄今提出的任何地球化学判别图都更有效。在该图上, 9个浮岩样品全部投影在 D 区, 即属于破坏性板块边缘玄武岩的分异产物 (图 3)。说明两种浮岩在成因上都与太平洋板块的俯冲有关。浮岩的岩性与日本岛弧的钙碱性系列火山岩相近, 但更接近 Th 顶角, 并且表现出贫 Ta 的特征。说明在岩浆作用阶段还有一定数量的 Fe-Ti 氧化物结晶析出。

板块边缘火成岩中 Rb-Sr 组分的含量, 对反映火山区的地壳厚度是灵敏的^[6]。在 Rb-Sr-地壳厚度网格图上 (图 4), 绝大部分灰白色浮岩投影在地壳厚度为 20—23km 的区内, 最大为 27km, 最小值是 19km。这与根据重力资料计算的结果 (15—28km, 平均 20km^[2]) 基本吻合。黑色浮岩所对应的地壳厚度大约为 31km, 与报道的中国东海陆架和琉球岛弧的莫霍面深度 (约 30km) 接近。

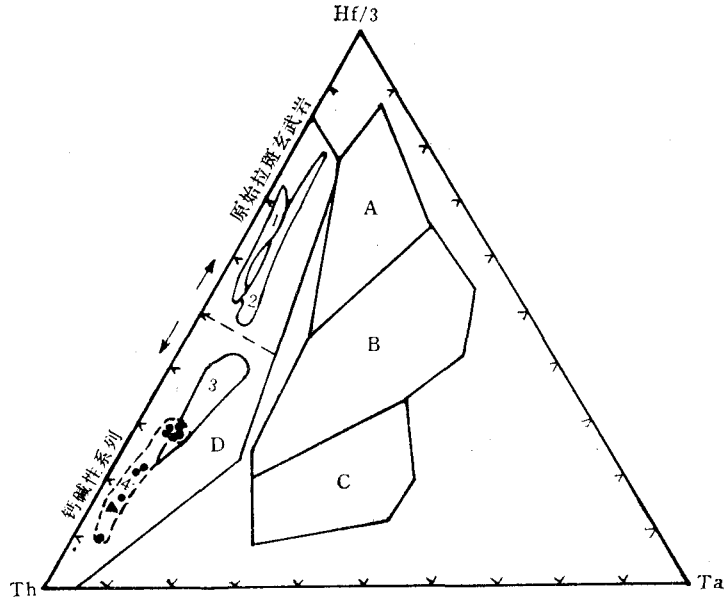


图3 浮岩的 Hf-Th-Ta 图解

(据 D. A. Wood, 1979, 1980)

A. 正常型洋脊玄武岩; B. E 型洋脊玄武岩; C. 板块内碱性玄武岩及其分异产物; D. 破坏性板块边缘玄武岩及其分异产物。

1.九州-帕劳海岭; 2.日本拉斑玄武岩; 3.日本钙碱性系列; 4.冲绳海槽浮岩。

▲ 黑色浮岩; ● 灰白色浮岩。

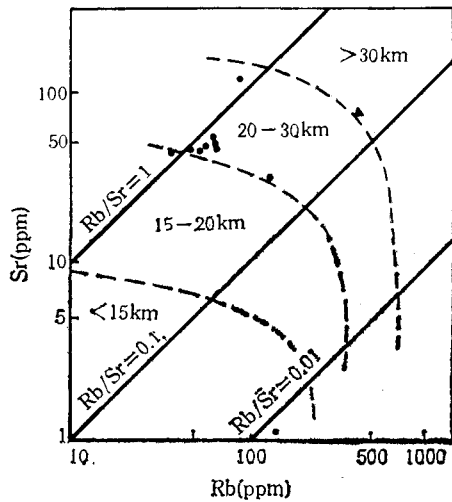


图4 浮岩在 Rb-Sr-地壳厚度关系图上的投影

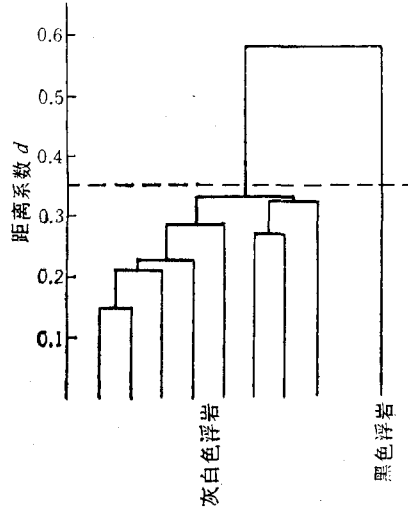


图5 冲绳海槽浮岩微量元素聚类谱系图

3. 分析结果的数学处理

选用距离系数为统计量:

$$d_{ik} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{26} (x_{ij} - x_{kj})^2}{26}} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, 26)$$

对上述不同站位的 9 个样品进行聚类分析,结果如图 5 所示。若以距离系数 $d = 0.35$ 为分群标准,黑色浮岩与灰白色浮岩截然分开,而灰白色浮岩样品之间没有明显的差别,说明广泛分布在冲绳海槽的灰白色浮岩可能是同源岩浆的产物。

三、结 语

1. 冲绳海槽浮岩微量元素的特征进一步证明,黑色浮岩和灰白色浮岩的母岩浆不仅来自不同的岩浆源,而且经历了不同的结晶演化过程。灰白色浮岩岩浆是由来自地幔的橄榄拉斑玄武质岩浆经过充分的结晶分异作用演化而成的酸性岩浆。在岩浆作用的早期,有橄榄石、辉石、基性斜长石以及 Ti-Fe 氧化物等矿物相的结晶析出。黑色浮岩岩浆可能来自地下较深的岩浆源,或者与地壳物质有较密切的关系。

2. 冲绳海槽的火山活动反映了海槽区的地下结构性质,地壳厚度在 20km 左右。黑色浮岩所反映的地壳厚度与中国东海大陆架以及琉球岛弧的地壳厚度更接近,说明广泛分布于冲绳海槽的灰白色浮岩是原地火山喷发的产物,而黑色浮岩则可能来自邻近地区的火山喷发。

3. 从岩石学的角度,作者认为冲绳海槽的岩浆活动与太平洋板块的俯冲作用有关,是弧后扩张导致冲绳海槽张性裂隙的产物。尽管在冲绳海槽广泛分布着酸性浮岩,但它们是由基性岩浆在地下一定深度的岩浆房内经过充分的结晶分异作用而成的。可以推断,在冲绳海槽有基性熔岩的侵入与喷出活动。

参 考 文 献

- [1] 王凯怡, 1980. 利用稀土元素数据解释岩石成因过程. 国外地质 1: 1—3.
- [2] 金翔龙、喻普之、林美华等, 1983. 冲绳海槽地壳结构性质的初步探讨. 海洋与湖沼 14(2): 105—116.
- [3] 赵振华, 1982. 稀土元素地球化学研究方法. 地质地球化学 1: 26—33.
- [4] 翟世奎, 1986. 冲绳海槽浮岩的分布及其斑晶矿物学特征. 海洋与湖沼 17(6): 504—512.
- [5] Herman, B. M., R. N. Anderson and M. Truchan, 1978. Extensional tectonics in the Okinawa Trough. In: Geological and geophysical Investigations of Continental Margins. Watkin, J. S. et al. Eds., Am. Assoc. Pet. Geol. Mem., 29: 199—208.
- [6] Kent, C. C., 1982. Plate Tectonics & Crustal Evolution. Second Edition. New York, Toronto, Oxford, Sydney, Paris, Frankfurt, p. 129.
- [7] Masaaki, K., 1981. Backarc Volcanism and Rifting in the Okinawa Trough. Abstracts 1981 IAVCEI Symposium, Arc Volcanism. p. 179.
- [8] Wood, D. A., 1979. A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. Earth Planet Sci. Lett. 45(2): 326—334.
- [9] Wood, D. A., 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British tertiary volcanic province. Earth Planet. Sci. Lett. 50(1): 11—28.
- [10] Yasui, M. E., D. K. Nagasaka and T. Kishii, 1970. Terrestrial heat flow in the seas around the Nansei Shoto (Ryukyu Islands). Tectonophysics 10: 225—234.

THE TRACE ELEMENT CHARACTERISTICS OF THE PUMICE IN THE OKINAWA TROUGH AND ITS GEOLOGICAL SIGNIFICANCE*

Qin Yunshan, Zhai Shikui

(Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao)

Mao Xueying, Chai Zhifang and Ma Shulan

(Institute of High-Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT

The Quaternary volcanic rocks of the Okinawa Trough are composed of greyish pumice and black pumice, of which the former is predominant. Trace elements were determined on 9 selected rocks. The material source and process of crystalline differentiation of pumice magma are elaborated in this paper based on the characteristics of trace elements of the pumices. Meanwhile, the correlation between magma activity and tectonism is discussed as well. It has been shown that the greyish pumice and the black pumice are not only from different magma sources but also through different processes of crystalline evolution.

* Contribution No. 1431 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.