

冲绳海槽黑色与白色浮岩特征及其对岩浆演化的指示

廖仁强^{1,2}, 黄朋¹, 胡宁静³, 李安春¹

(1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家海洋局第一研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 为了认识黑色与白色浮岩的岩石特征及成因, 使用人工重砂、元素地球化学等分析技术, 研究冲绳海槽两类浮岩中元素及矿物组成特征。研究显示, 冲绳海槽黑色和白色浮岩具有相似全岩化学组成, 都落入流纹岩区, 稀土配分曲线明显呈右倾, 具负 Eu 异常, 富集不相容元素, 岩石物理性质差别是导致其颜色差异的主要因素。两类浮岩岩石学特征的不同主要体现在: (1)白色浮岩锆石和辉石都具有两种类型, 黑色浮岩仅具有其中一种; (2)黑色浮岩中发育钛铁矿、钛磁铁矿与基质构成的珠状构造, 且基质玻璃中密集分布磁铁矿雏晶, 而白色浮岩不具备上述岩石学特征。综合分析海槽两类浮岩岩石学特征所蕴含的岩浆演化信息, 推测两类浮岩具有相同的玄武质岩浆源区, 富挥发组分的玄武质母岩浆上升进入地壳, 形成初级岩浆房, 房内结晶分异后残留的酸性岩浆, 沿海槽构造薄弱带向上运移, 岩浆运移过程中有少部分进入分支断裂系统形成次级岩浆房, 期间初级岩浆房接受多次基性岩浆注入; 初级和次级岩浆房中的酸性岩浆分别独立喷出海底, 前者形成白色浮岩, 后者形成黑色浮岩。此外, 演化过程中岩浆性质逐渐由氧化性向还原性转变。

关键词: 冲绳海槽; 浮岩; 人工重砂; 元素地球化学; 岩浆演化

中图分类号: P736 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)05-0121-10

doi: 10.11759/hyqx20150513001

冲绳海槽作为一个年轻的弧后盆地, 盆内岩浆作用强烈, 火山岩分布广泛, 是了解洋壳俯冲过程的重要“窗口”。浮岩作为海槽中分布最广的火山岩, 代表了海槽岩浆演化的一个端元。从外观上, 海槽浮岩可划分为两类, 一类呈白色, 即白色浮岩, 质地疏松、比重较小, 绝大部分浮岩都属于此类; 另一类呈黑色, 即黑色浮岩, 质地相对坚硬, 比重也远大于白色浮岩, 产出量少。

岩浆岩矿物组成取决于岩浆的化学成分和结晶环境, 矿物成分、结构和矿物组合的变化直接反映了岩浆环境变化及物质组成特征^[1]。对于浮岩中斑晶矿物组成, 前人已做了大量研究, 并以此讨论了冲绳海槽岩浆演化的特点, 但是前人多集中于白色浮岩, 缺乏对黑色浮岩的系统研究。秦蕴珊等^[2]对黑白浮岩做了对比研究, 发现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, 但由于受限于当时的测试技术条件, 并未对斑晶矿物作进一步分析。之后, 陆续有学者^[3-7]针对海槽浮岩中斑晶矿物组合及组成特征开展了一系列的工作, 但受制于浮岩极低的斑晶矿物含量, 所得成果多限于含量相对丰富的斑晶矿物, 如长石、石英、辉石等。

海槽中出露位置相近的浮岩, 外貌特征差异却

如此巨大, 其成因过程引起了海洋地质工作者的广泛兴趣。本文希望通过大体积样品的人工重砂分析, 对冲绳海槽黑白浮岩中斑晶矿物进行较为系统的对比研究, 加深对黑白浮岩成因差异的理解, 并以此推演冲绳海槽岩浆演化、岩浆房结构特征, 为将来进一步研究积累资料。

1 地质背景

冲绳海槽位于我国东海陆架以东、琉球岛弧以西、日本九州岛和我国台湾岛之间, 是菲律宾板块相对欧亚陆块俯冲所形成的一个年轻的新月形弧后盆地^[8-9]。海槽内岩浆作用非常发育, 并明显受到构造作用的影响。

收稿日期: 2015-05-13; 修回日期: 2015-07-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB429702); 中国科学院战略性科技先导专项(XDA11030302); 国家自然科学基金(40606021)

[Foundation: National Key Basic Research Programme of China, 2013CB429702; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA11030302; National Natural Science Foundation of China, No.40606021]

作者简介: 廖仁强(1990-), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 研究方向为海洋地质学, E-mail: liao_renqiang@163.com; 黄朋, 通信作者, E-mail: huangpeng@qdio.ac.cn

断裂构造是冲绳海槽最重要、最为发育的地质构造类型, 主要由一系列北东、北西向断裂组成。前者与海槽延伸方向一致; 后者与海槽延伸方向垂直或斜交。北西向延伸的吐喀喇断裂和宫古断裂将冲绳海槽划分为北、中、南三段(图 1), 受区内断裂格架控制, 沿海槽中、南段轴部发育数个雁行式排列的活动地堑。海槽不同区段地壳厚度也有所差异, 地球物理研究显示, 海槽地壳厚度向北变厚, 从南部厚约 12 km 增至北部厚约 30 km^[10-11]。

冲绳海槽北、中和南段的岩浆活动情况不尽相同, 岩浆活动受构造作用的影响较为明显^[12-13]。整体上冲绳海槽岩浆岩具明显的双峰式特征, 主要由基性的玄武岩和酸性的流纹岩构成^[14-18]。玄武岩主要产于海槽中、南段的中央地堑区^[14-15]; 流纹岩在海槽北、中、南段都有分布^[14-16], 多以浮岩形式产出, 其比重小、易于搬运, 在海底沉积物中广泛分布, 常在海底形成特殊火山碎屑沉积层, 极大地改变了海底沉积物物理学、力学性质。

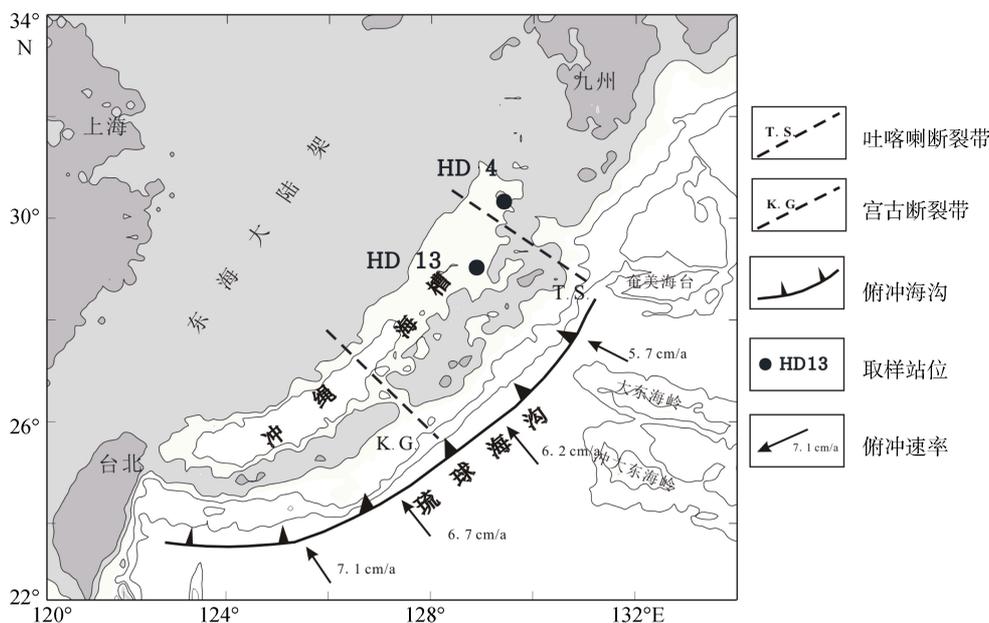


图 1 冲绳海槽概貌与取样站位图

Fig. 1 Geographic frame of the Okinawa Trough and sampling positions

2 样品与测试方法

2.1 样品特征

研究涉及的浮岩来自 1994 年拖网采样(HD4, HD13), 都产出黑色和白色浮岩, 共 4 个样品, 即 HD4-W、HD4-B、HD13-W 和 HD13-B。样品站位位于吐喀喇断裂两侧, 分属海槽北段和中段(图 1)。黑色浮岩和白色浮岩外观特征差异很大(图 2), 黑色浮岩质地较硬、气孔少、密度大(1.51 g/cm³); 白色浮岩气孔发育、疏松易碎、密度小(0.53 g/cm³)。气孔的分布和形态是两类浮岩除颜色外另一个重要的差异, 体现在: 白色浮岩气孔极为发育, 且气孔直径变化大(<2 cm), 浮岩破碎成<0.5 mm 的颗粒后, 仍有完整气孔存在, 使浮岩呈现泡沫状(图 4a); 黑色浮岩气孔少, 且大小相对均匀。

2.2 测试方法

冲绳海槽浮岩绝大部分由非晶态的基质构成, 斑晶矿物含量极低, 镜下鉴定或 X 射线衍射的方法都难以全面确定浮岩斑晶矿物组成。本次研究选择人工重砂的方法, 以全面了解海槽浮岩结晶矿物组成。样品重砂分析在河北省地质矿产局廊坊实验室完成, 分析流程如下: 样品称重后破碎, 过 40 目筛; 对过筛的样品进行初步淘洗, 将样品分为轻、重两个子样; 双目镜下鉴定较轻子样的矿物组成, 对重子样进行磁选, 分为弱磁部分和强磁部分; 强磁部分进行镜下鉴定, 弱磁部分进行电磁选, 分为无磁部分和电磁部分; 无磁部分进行精淘后再分为轻、重两部分, 并分别进行镜下鉴定; 电磁部分按磁化率进一步划分为强电、电、弱电 3 组, 分别进行镜下鉴定; 统计所有镜下鉴定结果, 并对单矿物拍照、称重。



图2 冲绳海槽 HD4 站位的黑色(HD4-B)与白色浮岩(HD4-W)

Fig. 2 Black (HD4-B) and white (HD4-W) pumice at site HD4 from the Okinawa Trough

本次样品分析包括全岩常量、微量和稀土元素组成以及单矿物常量元素组成两部分。全岩常量元素的 X 射线荧光分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成, 仪器型号: XRF1500, 标样为中国国家一级岩石标准 GBW07101-07114; 常量元素的 ICP-OES 分析在中国科学院海洋研究所完成, 标样为中国国家一级岩石标准 GBW07315, GBW07316; 全岩微量元素(包括稀土元素)使用 ICP-MS 分析, 分别在中国科学院地质与地球物理研究所和海洋研究所, 前者使用的标准物质为中国国家标准参考物质: GSR-2 和 GSR-3; 后者使用中国国家一级岩石标准: GBW07315, GBW07316。由于样品气孔发育, 易受海水和沉积物影响, 在进行化学测试前, 需作预处理, 以去除这些外来影响, 具体处理步骤见^[18]。单矿物常量元素组成在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室完成, 使用 JEOLJXA-8100 型电子探针分析仪, 测试条件: 加速电压 15 kV, 加速电流 20 nA, 束斑直径 2 μm 。

3 结果

3.1 浮岩地球化学组成

为获得海槽浮岩可靠的元素地球化学组成, 岩石样品先后在中科院地质与地球物理研究所和海洋研究所实验室中, 使用不同仪器进行测试, 结果见表 1。同一样品经不同仪器分析获得的元素组成数据差异较小, 体现了数据的可靠性。表 1 数据显示, 黑色与白色浮岩全岩常量元素组成非常相似, 在全碱-硅图中都落入流纹岩区(图略)。相对于我国流纹岩平均组成^[19], 海槽浮岩富集 Si、Ca、Na, 亏损 Al、Ti、K、P 和 Fe。4 个浮岩稀土元素组成间的差异也非常

微弱(表 1), 经球粒陨石标准化后稀土分布呈现出显著的右倾模式^[20], 并有明显负 Eu 异常。浮岩微量元素数据用球粒陨石标准化^[21], 蛛网图解显示, 4 个浮岩微量元素分布模式总体非常相似, 都表现为相容元素 Cr、Co、Ni 的含量相对亏损, 不相容元素富集, 表明海槽岩浆演化过程中存在强烈的分异作用^[18]。

3.2 浮岩矿物学特征

3.2.1 矿物组合

来自 2 个站位的 4 个浮岩样品进行人工重砂分析, 其中 3 个样品(HD4-W, HD4-B, HD13-B)完成分析, 而 HD13-W 由于单块样品重量不足, 人工重砂分析未能完成。重砂分析结果显示, 冲绳海槽浮岩斑晶矿物含量极低, 且黑色浮岩的斑晶矿物含量要低于白色浮岩, 具体矿物组成及含量见表 2。浮岩中气孔极为发育, 沾染的海底沉积物难以彻底去除, 但镜下观察显示, 锆石、黄铁矿、辉石、角闪石、钛铁矿、钛磁铁矿都存在被石英或火山玻璃包裹、连生的现象, 且具备良好的晶形, 基本可以确定上述六种重矿物是海槽浮岩本身所含矿物。

浮岩斑晶矿物可分成轻矿物(如石英、火山玻璃)和重矿物(如锆石、黄铁矿、辉石、角闪石、绿帘石、赤褐铁矿、钛铁矿、钛磁铁矿), 表 2 显示冲绳海槽黑色和白色浮岩具有相似的轻、重矿物组成。其中, 轻矿物组成相对简单, 主要为石英, 还有少量长石和蚀变矿物; 重矿物组成复杂, 除绿帘石在 HD13-B 样品中未出现外, 锆石、辉石、角闪石、黄铁矿、钛铁矿、钛磁铁矿、赤褐铁矿在 3 个浮岩样品中均有出现, 仅是含量上有差异。

海槽两类浮岩矿物组成总体相似, 但锆石和辉石类型组成存在差异。锆石差异表现为: 黑色浮岩中

表 1 冲绳海槽浮岩全岩地球化学组成

Tab. 1 Whole-rock compositions of pumice from the Okinawa Trough

样品号	HD4-W	HD4-W'	HD4-B	HD4-B'	HD13-W	HD13-W'	HD13-B	HD13-B'
SiO ₂	74.68	74.56	74.87	74.68	74.98	74.82	73.59	73.43
TiO ₂	0.178	0.17	0.176	0.17	0.168	0.17	0.173	0.17
Al ₂ O ₃	12.7	12.40	12.76	12.50	12.75	12.66	12.97	12.38
TFe*	1.68	1.61	1.69	1.63	1.52	1.65	1.49	1.57
MnO	0.059	0.06	0.06	0.06	0.059	0.06	0.057	0.06
MgO	0.18	0.19	0.19	0.20	0.26	0.20	0.24	0.18
CaO	1.39	1.34	1.4	1.36	1.4	1.41	1.4	1.37
Na ₂ O	4.1	4.37	4.27	4.43	3.86	4.41	3.98	4.38
K ₂ O	2.76	2.58	2.63	2.51	2.6	2.58	2.54	2.47
P ₂ O ₅	0.027	0.02	0.23	0.02	0.023	0.02	0.021	0.02
La	16.6	19.4	17.6	19.2	20.4	19.0	20.3	18.9
Ce	33.64	38.6	36.38	38.0	36.63	37.8	36.84	37.4
Pr	3.86	4.34	4.27	4.33	4.00	4.26	4.12	4.20
Nd	14.07	15.9	15.05	15.9	16.38	15.9	16.41	15.8
Sm	2.95	3.36	3.28	3.28	2.97	3.33	2.95	3.30
Eu	0.63	0.57	0.66	0.61	0.64	0.60	0.66	0.58
Gd	3.21	3.36	3.34	3.39	2.96	3.31	3.23	3.37
Tb	0.50	0.58	0.58	0.62	0.52	0.60	0.50	0.58
Dy	3.45	3.52	3.78	3.55	3.64	3.61	3.62	3.49
Ho	0.77	0.83	0.83	0.84	0.78	0.84	0.75	0.83
Er	2.40	2.50	2.51	2.49	2.32	2.50	2.37	2.51
Tm	0.40	0.44	0.44	0.45	0.46	0.44	0.44	0.45
Yb	3.02	3.02	2.99	3.04	2.93	3.05	2.98	3.06
Lu	0.49	0.50	0.52	0.49	0.44	0.49	0.45	0.50
Cr	1.77	2.30	2.21	2.09	22.82	12.2	15.19	18.6
Co	0.81	0.85	0.88	0.90	1.34	0.82	1.30	0.81
Ni	0.68	1.17	1.22	1.19	2.84	1.52	3.03	0.57
Rb	52.90	58.90	58.34	58.50	70.46	57.90	71.28	57.20
Sr	69.49	77.0	77.74	77.1	99.26	80.5	98.50	77.9
Y	20.02	23.5	21.58	23.2	25.58	23.0	25.39	22.8
Zr	122.3	164.0	132.2	162	171.3	160.0	171.2	158.0
Nb	7.45	6.20	7.76	6.16	9.20	6.06	8.89	6.12
Ba	348.8	408.0	379.7	399	438.3	401.0	444.3	397.0
Hf	3.92	4.52	4.46	4.57	3.89	4.62	3.83	4.56
Ta	1.22	0.46	1.01	0.48	0.51	0.48	0.46	0.48
Th	6.23	6.54	7.01	6.58	4.85	6.55	5.05	6.48
Mo	1.27	1.14	1.29	1.20	1.80	1.16	1.60	1.10
Cs	1.81	2.08	2.09	2.08	2.21	2.05	2.27	2.02
Pb	7.39	8.79	7.82	8.93	6.19	8.65	6.51	8.54
U	1.53	4.65	1.67	1.68	1.08	1.71	1.09	1.71

注：表中带'的样品数据来自中国科学院海洋研究所；TFe*总铁含量；氧化物单位为%，其他元素为×10⁻⁶

锆石仅有 1 种，即黄粉色，自形、半自形柱状，弱金刚石光泽，裂纹发育、易碎；白色浮岩中锆石有 2 种，除黑

色浮岩中所含锆石类型外，还有一种玫瑰色锆石，次圆、粒状，弱金刚-玻璃光泽，裂纹不发育。前者占锆

表 2 冲绳海槽浮岩矿物组成

Tab. 2 Mineral assemblages of pumice from the Okinawa Trough

矿物种类	矿物相对质量分数/%		
	HD4-W	HD4-B	HD13-B
锆石	0.10	0.06	0.06
黄铁矿	0.12	0.31	0.12
辉石	63.29	50.77	75.06
角闪石	0.10	0.06	0.06
绿帘石	0.10	0.12	-
赤褐铁矿	0.24	0.15	0.12
钛铁矿	12.12	3.08	12.65
钛磁铁矿	22.94	39.08	10.00
其他重矿物	0.99	6.37	1.93
火山玻璃	97.61	99.23	98.80
石英	1.90	0.57	0.85
其他轻矿物	0.49	0.20	0.35

石总量的 80%，颗粒较大；后者占 20%，颗粒较小。而辉石在 3 个岩石样品中都有出现，并常被石英包裹或连生，但不同在于黑色浮岩中仅存在褐色辉石，白

色浮岩样品中包含两种辉石，即褐色辉石和绿色辉石。两种浮岩中的角闪石晶体都存在被石英包裹的现象。此外，黑色浮岩矿物中还存在着一种特殊的构造，即钛磁铁矿外包裹一层硅酸盐，形成近于浑圆状的珠状构造(图 3)，钛铁矿中也存在着这种构造，但珠状形态不如钛磁铁矿明显；钛铁矿和钛磁铁矿还以包体形式存在于辉石中。综合上述矿物的结构、构造特征，可初步确定浮岩中部分矿物出现顺序，即从早到晚依次为：钛铁矿-钛磁铁矿>辉石>角闪石>石英。

除斑晶矿物外，黑、白浮岩中火山玻璃也具有不同的特征。黑色浮岩的玻璃基质中气泡含量远小于白色浮岩，且个体大，显微镜下基质呈透明玻璃状；在偏光显微镜下放大 500 倍，发现黑色浮岩火山玻璃中存在大量针状雏晶，且具有较强的电磁性；而白色浮岩玻璃中遍布大小不一的气孔使火山玻璃呈泡沫状，未见雏晶分布(图 4)。

3.2.2 矿物常量元素组成

为更深入的了解冲绳海槽浮岩间的差异，本次研究运用电子探针分析斑晶矿物及其基质(火山玻璃)的化学组成。由于篇幅所限，无法对斑晶矿物和基质

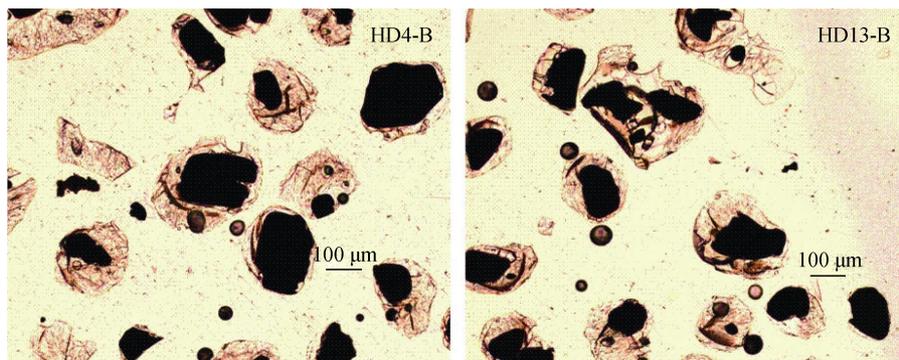


图 3 冲绳海槽黑色浮岩钛磁铁矿珠状构造(偏光显微镜下)

Fig. 3 Pearlitic structure in titanium magnetite of black pumice from the Okinawa Trough (under POM)

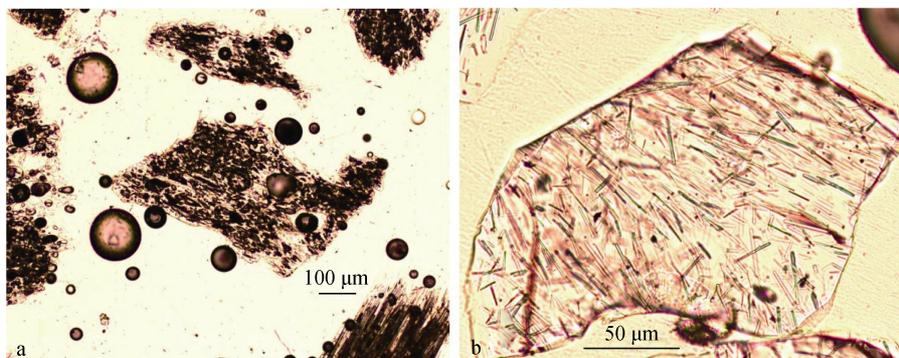


图 4 冲绳海槽 HD4 站浮岩基质(火山玻璃)镜下照片

Fig. 4 Images of the matrix (volcanic glass) of pumice at site HD4 from the Okinawa Trough

a. 白色浮岩火山玻璃; b. 黑色浮岩火山玻璃
a. white pumice; b. black pumice

逐一讨论, 仅对性质差异显著的矿物进行对比, 例如, 两种浮岩所含辉石、钛磁铁矿。获得它们的化学组成, 将有助于了解不同类型浮岩的成因及其岩浆演化过程。

对浮岩中辉石、钛磁铁矿电子探针分析数目如下: HD4-W、HD4-B 和 HD13-B 站浮岩完成斜方辉石探针测试点数分别为 9、10 和 6 点, 单斜辉石完成 7 点; HD4-B 和 HD13-B 浮岩中钛磁铁矿分析点数为 4 和 3 点, 单矿物分析结果见表 3。黑色、白色浮岩中辉石、钛磁铁矿电子探针分析所得氧化物总量分布在 94.092%~100.747%, 平均值分布在 95.142%~100.22%, 数据质量基本合乎要求。从探针分析数据来看, 白色浮岩(HD4-W)不同于黑色浮岩(HD4-B, HD13-B), 不仅有褐色斜方辉石, 还有绿色单斜辉石的存在。根据 Morimoto^[22]判定浮岩中斜方辉石属紫苏辉石和铁紫苏辉石, 单斜辉石为普通辉石(图 5)。

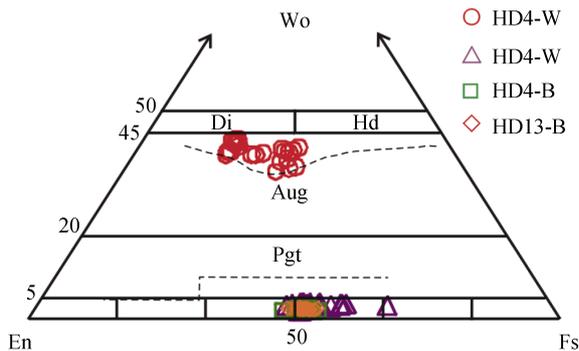


图 5 辉石分类图解^[22]

Fig. 5 Diagram of pyroxene classification^[22]

Wo-硅灰石; En-顽火辉石; Fs-铁辉石; Di-透辉石; Hd-钙铁辉石; Aug-普通辉石; Pgt-易变辉石

Wo: wollastonite; En: enstatite; Fs: ferrosite; Di: diopside; Hd: hedenbergite; Aug: augite; Pgt: pigeonite

4 讨论

4.1 浮岩岩石学特征的地质意义

冲绳海槽两类浮岩的全岩地球化学分析表明, 它们的常量元素组成非常相似, 岩石类型都属于流纹岩(表 2)。4 个浮岩样品 SiO₂ 质量分数在 74.68%~75.39%变化, 明显高于海槽上地壳的 SiO₂ 质量分数(70.9%^[23]; 69.4%^[24]), 表明形成海槽浮岩的岩浆主要是结晶分异作用的产物, 同化混染作用在海槽岩浆演化过程中应居于次要地位。浮岩稀土和微量元素组成差异也非常微弱(表 2), 暗示两类浮岩可能拥有相

同的岩浆源区, 结合浮岩结晶矿物中辉石、角闪石相对丰富的特征, 推断形成浮岩的酸性岩浆应来自基性玄武质岩浆结晶分异作用, 上述观点受到浮岩 Sr-Nd 同位素数据的支持^[17, 24-25]。

来源相同的岩浆却形成了特征明显不同的最终产物, 且两类浮岩的气孔发育特征表明, 形成两类浮岩的岩浆挥发组分含量存在显著差异, 推断同源的玄武质母岩浆经历了不同的演化过程。

斑晶矿物形成于岩浆演化的不同阶段, 解译矿物携带的地质信息, 有助于揭示海槽酸性岩浆演化过程。海槽黑色、白色浮岩斑晶矿物组成大致相似, 但在辉石、锆石组成方面存在一定的差异。岩浆成因的锆石多出于中、酸性岩浆体系中, 基性、超基性岩石中虽可能产出(如金伯利岩), 但数量相对较少^[26]; 相对于火山岩或浅成岩体, 深成岩体中锆石个体大、晶形更为完整^[27], 推测白色浮岩中黄粉色锆石应是岩浆房捕获的围岩锆石, 玫瑰色锆石则为浮岩岩浆体系自生的锆石。两类浮岩中锆石组成的差异, 暗示形成白色和黑色浮岩的岩浆来源虽然相似, 但前者岩浆房深度要大于后者。辉石是浮岩中最重要的斑晶矿物之一, 随岩浆系统演化, 晶出的斜方辉石 Mg、Ca 含量逐渐降低^[28]。海槽白色浮岩斜方辉石中 CaO 含量要大于黑色浮岩(表 3), 表明白色浮岩中斜方辉石晶出时间要早于黑色浮岩; 此外, 上地幔部分熔融形成的玄武质岩浆, 通常会携带单斜辉石^[28-29]。上述辉石组合的差异支持白色浮岩岩浆所处的演化阶段要早于黑色浮岩, 为两类浮岩的岩浆房深度不同的论点提供了新的证据。

钛磁铁矿、钛铁矿与基质间构成珠状构造是黑色浮岩中存在的一种特殊矿物构造(图 3), 表明岩浆演化过程中岩浆房接受多次源区岩浆的注入, 且注入岩浆的温度要高于岩浆房内岩浆温度, 使高温岩浆在温度较低的钛磁铁矿表面冷却, 形成珠状构造; 白色浮岩, 应是气孔过于发育, 珠状构造难以保存。此外, 浮岩矿物组成显示, 磁铁矿和黄铁矿在海槽两类浮岩中共存, 表明浮岩岩浆在演化过程中存在由氧化向还原性质转变。

火山玻璃是黑、白浮岩最主要的组成部分。黑色浮岩的火山玻璃具明显电磁性, 而白色浮岩不具电磁性是它们的重要差异之一。对本次研究发现黑色浮岩火山玻璃中存在大量针状雏晶进行电子探针分析, 显示雏晶 FeO*质量分数为 66.8%, SiO₂ 为 24.2%, 推测雏晶为磁铁矿; 而雏晶粒度极小, 电子

表 3 冲绳海槽浮岩斑晶矿物常量元素组成
 Tab. 3 Major element concentrations of phenocryst minerals of pumice from the Okinawa Trough

常量元素	常量元素质量分数(%)																	
	HD4-W				HD4-B				HD13-B									
	斜方辉石		单斜辉石		斜方辉石		钛磁铁矿		斜方辉石		钛磁铁矿							
最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均				
K ₂ O	0.019	0	0.005	0.009	0	0.002	0.017	0	0.005	0.027	0	0.011	0.007	0	0.002	0.011	0	0.006
Na ₂ O	0.04	0	0.019	0.307	0.227	0.275	0.058	0	0.03	0.011	0	0.006	0.051	0.001	0.026	0	0	0
MnO	1.755	1.171	1.382	0.747	0.41	0.537	1.82	1.583	1.711	0.63	0.589	0.605	1.613	1.356	1.471	0.062	0.603	0.612
CaO	1.737	0.893	1.344	19.596	17.037	18.875	1.142	0.88	0.983	0	0	1.268	1.002	1.113	0.068	0	0.03	
MgO	16.69	10.192	14.865	15.017	10.588	13.655	16.475	14.967	15.578	0.766	0.684	0.719	17.918	15.618	16.606	0.798	0.718	0.753
TiO ₂	0.222	0.022	0.118	0.864	0.343	0.639	0.186	0.056	0.098	11.009	10.585	10.812	0.147	0.091	0.115	10.83	9.972	10.472
Al ₂ O ₃	0.836	0.2	0.513	2.022	1.027	1.604	0.768	0.362	0.518	1.924	1.798	1.867	0.588	0.353	0.477	1.874	1.78	1.832
FeO*	36.949	29.003	31.125	18.547	10.309	12.405	30.502	28.904	29.816	82.233	81.301	81.625	30.432	27.105	29.02	81.871	80.493	81.257
SiO ₂	51.526	49.352	50.847	52.791	50.829	51.9	51.804	49.883	50.998	0.094	0.053	0.076	52.076	50.355	51.257	0.188	0.078	0.133
sum	100.57	99.826	100.22	100.747	99.41	100.004	100.403	99.011	99.748	96.649	95.155	95.751	100.736	99.504	100.09	95.861	94.092	95.142

注: FeO*为样品总铁含量

束可能无法完全照射在晶体上,造成了相对数量的SiO₂的出现。黑色浮岩玻璃中大量存在磁铁矿雏晶从矿物学的角度解释了其具有电磁性的原因。除岩浆快速上升外,岩浆由氧化向还原演化也是磁铁矿雏晶停止发育的一个重要因素。两类浮岩火山玻璃中另一差异就是气孔特征。根据 Adrian 等的实验结果,在相同初始岩浆的条件下,多阶段减压过程较连续减压过程形成的气泡数量多^[30]。结合黑白浮岩气孔特征,我们认为多次岩浆的补充可合理的解释两类浮岩气孔发育程度与形态特征的差异,浮岩气孔特征差异为浮岩岩浆房接受多次岩浆注入的推断提供了间接的证据。

在上述黑色和白色浮岩岩石学特征分析的基础上,可以确定两类浮岩颜色上的差异主要是浮岩物理性质差异所造成的。白色浮岩气孔极为发育且尺寸差异较大,对外部光线产生漫反射,使岩石呈白色;黑色浮岩气孔含量少,且相对大而均匀,基质玻璃内含丰富的深色雏晶,对外部光线有较高的吸收率,使岩石整体呈黑色(图2)。

4.2 浮岩岩浆演化过程

与成熟沟—弧—盆体系中主要产出钙碱性安山岩不同,冲绳海槽产出的火山岩具双峰式特征,其中浮岩分布最广,类型划分上属于酸性流纹岩,所代表的岩浆演化过程是海槽岩浆活动的重要组成部分。根据上述对海槽黑、白浮岩岩石学特征及其所代表地质意义的解析,可以初步认识其成因和演化过程:

冲绳海槽黑、白色浮岩具有相同的岩浆源区,俯冲板片脱水产生挥发组分进入上覆地幔楔,触发部分熔融形成的富含挥发组分玄武质岩浆。玄武质岩浆经地壳薄弱带上升进入地壳,形成初级岩浆房,并在其中发生结晶分异作用,期间有多次的岩浆注入,分异后残留的酸性岩浆混合了少量地壳物质,同时携带少量早期形成的矿物,如辉石、角闪石等沿海槽断裂系统向上运移,挥发组分逐渐分离。岩浆运移过程中有部分进入分支断裂系统形成次级岩浆房,次级岩浆房规模较小;后期注入的岩浆在初级岩浆房内已进行结晶及挥发份分异,其影响多体现在物理条件(如温度、压力)的改变,在挥发组分和其他化学组分方面影响较小,导致次级岩浆房的岩浆快速上升喷出海底,大量矿物以雏晶形式存在,形成黑色浮岩;另一部分岩浆从初级岩浆房沿断裂系统上升,期间经历时间较长,挥发分和矿物分离程度均

高于次级岩浆房系统,形成气孔极为发育、结晶矿物含量相对较高的白色浮岩。此外,黑、白浮岩岩浆系统在上升过程中,均呈现由氧化向还原性演化的趋势,形成岩石中磁铁矿和黄铁矿共存现象。

5 结论

根据所获得的冲绳海槽黑色和白色浮岩矿物组合以及全岩、矿物地球化学组成数据,本次研究初步对比了两类浮岩的岩石学特征,并进一步分析了其中所蕴含的岩浆演化信息,认为:

研究涉及的黑色和白色浮岩具有相似全岩化学组成和矿物组合,斑晶矿物组合主要包括石英、长石、锆石、辉石、角闪石、黄铁矿、钛铁矿、钛磁铁矿等,浮岩颜色上的差异是岩石物理性质差别所造成的。两类浮岩岩石学差异主要体现在,白色浮岩锆石和辉石都具有两种类型,黑色浮岩仅具有其中一种;黑色浮岩中发育钛铁矿、钛磁铁矿与基质构成的珠状构造,基质玻璃中密集分布矿物雏晶,而白色浮岩不具备上述岩石学特征。

海槽之下地幔楔中形成的富挥发组分玄武质岩浆经地壳薄弱带上升进入地壳,形成初级岩浆房。房内岩浆结晶分异,残留的酸性岩浆携带少量早期形成的矿物,沿海槽断裂系统向上运移,挥发组分逐渐分离,运移过程中有少部分岩浆进入分支断裂形成次级岩浆房,期间初级岩浆房有多次基性岩浆注入,初级和次级岩浆房中的酸性岩浆分别独立喷出海底,前者形成白色浮岩,后者形成黑色浮岩。此外,岩浆系统在上升过程中性质逐渐由氧化性向还原性转变。

参考文献:

- [1] Dobosi G, Fodor R V. Magma fractionation, replenishment, and mixing as inferred from green-core clinopyroxenes in Pliocene basanite, southern Slovakia[J]. *Lithos*, 1992, 28(2): 133-150.
- [2] 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.
- [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. Distributional and phenocryst mineral characteristics of pumice from 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, 1: 26-30.
Zhai Shikui. P-T conditions of phenocryst mineral of pumices from the Okinawa Trough[J]. Marine Sciences, 1987, 1: 26: 30
- [5] 刘崇保. 冲绳海槽浮岩研究[J]. 岩石矿物学杂志, 1989, 8(3): 193-202.
Liu Chongbao. Research of pumices from the Okinawa Trough[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 1989, 8(3): 193: 202.
- [6] Honma H, Kusakabe M, Kagami H, et al. Major and trace element chemistry and D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios of rocks from the spreading center of the Okinawa Trough, a marginal back-arc basin[J]. Geochemical Journal, 1991, 25(2): 121-136.
- [7] Ishizuka H, Kawanobe Y, Sakai H. Petrology and geochemistry of volcanic rocks dredged from the Okinawa Trough, an active back-arc basin[J]. Geochemical Journal, 1990, 24(2): 75-92.
- [8] Karig D E. Origin and development of marginal basins in the western Pacific[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(11): 2542-2561.
- [9] Uyeda S. Some basic problems in the trench-Arc-Back Arc System[J]. Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back-Arc Basins, 1977: 1-14.
- [10] Hirata N. Report on DELP 1988 cruises in the Okinawa Trough: Part 3. Crustal structure of the southern Okinawa Trough[R]. Japan: Earthquake Research Institute, University Tokyo, 1991.
- [11] 江为为, 刘少华, 郝天姚, 等. 冲绳海槽及其邻域地球物理场与地壳结构特征[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(2): 287-292.
Jiang Weiwei, Liu Shaohua, Hao Tianyao, et al. Character of geophysical field and crustal structure of Okinawa Trough and adjacent region[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(2): 287-292.
- [12] 金翔龙, 喻普之. 冲绳海槽的构造特征与演化[J]. 中国科学(B 辑), 1987, 2: 196-203.
Jin Xianglong, Yu Puzhi. The feature and evolution of tectonic in the Okinawa Trough[J]. Scientia Sinica (B), 1987, 2: 196-203.
- [13] Miki M. Two-phase opening model for the Okinawa Trough inferred from paleomagnetic study of the Ryukyu Arc[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 8169-8184.
- [14] 马维林, 王先兰, 金翔龙, 等. 冲绳海槽中部和南部玄武岩的区域性差异及其成因研究[J]. 地质学报, 2004, 78(6): 758-773.
Ma Weilin, Wang Xianlan, Jin Xianglong, et al. Areal difference of middle and southern Basalts from the Okinawa Trough and its genesis study[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(6): 758-773.
- [15] 韩宗珠, 于航, 赵广涛, 等. 冲绳海槽中部玄武岩的岩石学和地球化学研究[J]. 海洋科学, 2005, 29(6): 17-21.
Han Zongzhu, Yu Hang, Zhao Guangtao, et al. Petrology and geochemistry of the basalt from the middle part of Okinawa Trough[J]. Marine Sciences, 2005, 29(6): 17-21.
- [16] Shinijo R, Yuzo K. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin[J]. Lithos, 2000: 54: 117-137.
- [17] 黄朋, 李安春, 付永涛, 等. 冲绳海槽火山岩同位素特征及铀系组分法测年[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(5): 14-18.
Huang Peng, Li Anchun, Fu Yongtao, et al. Isotopic feature and Uranium-series component dating of the volcanic rocks in Okinawa Trough[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2006, 30(5): 14-18.
- [18] 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.
- [19] 邱家骧. 应用岩浆岩岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 401-402.
Qiu Jiexiang. Applications of Magmatic Petrology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 401-402.
- [20] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [21] Wood H. A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings[J]. Earth Planet Science Letter, 1979, 45: 326-336.
- [22] Morimoto N. Nomenclature of Pyroxenes[J]. Mineralogy & Petrology, 1988, 39(1): 55-76.
- [23] Terakado Y, Nakamura N. Nd and Sr isotopic variations in acidic rocks from Japan: significance of upper-mantle heterogeneity[J]. Contributed Mineralogy and Petrology, 1984, 87: 407-417.
- [24] 孟宪伟, 杜德文, 吴金龙, 等. 冲绳海槽中段火山岩 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 Deweng, Wu Jinlong, et al. The petrochemical features of Sr-Nd isotopic compositions for volcanic rocks in Okinawa Trough and their geological significance[J]. Scientia Sinica (D), 1999, 29(4): 367-371.
- [25] 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. The isotopic features and dating of pumice from Okinawa Trough[J].

- Scientia Sinica (B), 1993, 23(3): 324-329.
- [26] Corfu F, Hanchar J M, Paul W O, et al. Atlas of zircon textures[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53: 469-500.
- [27] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53: 27-62.
- [28] Deer W A, Howie R A, Zussman J. An Introduction to the Rock-Forming Minerals[M]. New York: Longman Scientific & Technical, 1992: 143-154.
- [29] 邵济安, 路凤香, 张履桥. 辽西义县组玻基方辉安山岩成因及其构造背景[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1633-1643.
Shao Ji'an, Lu Fengxiang, Zhang Lvqiao. Origin of sanukite from Yixian formation in western Liaoning Province and its tectonic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(6): 1633-1643.
- [30] Adrian F, Francois H, Sarah B. Bubble formation during decompression of andesitic melts[J]. American Mineralogist, 2014, 99: 1052-1062.

Petrological characteristics of black and white pumice from the Okinawa Trough: Implications for magmatic evolution

LIAO Ren-qiang^{1, 2}, HUANG Peng¹, HU Ning-jing³, LI An-chun¹

(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. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: May 13, 2015

Key words: the Okinawa Trough; pumice; artificial panning; geochemical composition; magmatic evolution

Abstract: Pumice is the most widely distributed volcanic rock in the Okinawa Trough and includes black and white pumice. To better understand the black and white rock characteristics and genesis of this pumice, we employed artificial sand and element geochemistry analysis techniques to investigate the two types of pumice elements and mineral composition characteristics. Specifically, we used artificial panning and element geochemical data to determine the characteristics and genesis of the black and white pumice. The element compositions of these two pumice species are nearly uniform and belong to the rhyolite category. On the basis of the chondrite-normalized rare earth element (REE) abundances, we observed light REE enrichment in all samples with negative abnormal Eu. All samples were rich in incompatible elements. The physical features of the pumice led to their color differences. The petrology of the pumices displayed only minor variances, such as (1) white pumice contained two species of zircon and pyroxene and black pumice only zircon and pyroxene; (2) bead-shaped structures were only distributed in the black pumice wherein titanium magnetite and ilmenite surrounded by glass were distributed. Based on the above petrological characteristics of the pumice, we could depict the evolution process of the plumbing system. The magma plumbing systems producing the white and black pumice share the same mantle source that generated parental basaltic magma. Primary and deeper magma chambers that formed the white pumice developed while the parental magma was plumbed into the crust. The shallow magma chamber that produced the black pumice was connected to a branch of the magma conduit of a deeper chamber. During the evolution of these two plumbing systems, magma was repeatedly added to the chambers. In addition, the redox feature of the magma gradually transformed from oxidative to reductive during the evolutionary process.

(本文编辑: 刘珊珊)