

doi:10.3799/dqkx.2016.524

冲绳海槽火山岩岩石系列的厘定及构造环境意义

国坤^{1,2}, 翟世奎^{1*}, 于增慧¹, 蔡宗伟¹, 张侠¹

1. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100

2. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071

摘要: 冲绳海槽是一个处于弧后扩张作用早期的年轻的弧后盆地, 是研究弧后扩张作用早期盆地演化和壳幔过程的天然实验室。随着调查研究工作的逐步展开和深入, 也发现了一些新的、重要的、亟待解决的科学问题, 而火山岩岩石系列归属的厘定又是其他研究工作的基础。在系统收集和整理迄今已有冲绳海槽火山岩资料的基础上, 结合近期分析测试数据, 对冲绳海槽火山岩的岩石系列归属进行了重新厘定, 探讨了火山岩的构造环境指示意义和浮岩与玄武岩之间的成因联系。研究结果表明: 冲绳海槽火山岩分布具有以基性玄武岩和酸性(流纹)英安岩为主的双峰式特征, 中性火山岩稀少, 基性的玄武岩属于亚碱性系列的橄榄拉斑玄武岩, 酸性浮岩可归属为亚碱性岩系的流纹英安岩或流纹岩; 在构造环境判别上, 冲绳海槽玄武岩表现出大洋中脊和岛弧构造环境的特点, 既有别于大洋中脊扩张中心, 也有别于成熟型弧后盆地, 呈现出弧后早期扩张阶段盆地独特的构造环境特征; 广泛分布于冲绳海槽的酸性浮岩表现出一定的岛弧环境的特点; 酸性浮岩与玄武岩具有同源性, 酸性岩是基性的玄武岩岩浆经不同程度结晶分异和同化混染作用的产物。

关键词: 岩石系列; 岩浆作用; 构造环境; 冲绳海槽; 海洋地质。

中图分类号: P588.14

文章编号: 1000-2383(2016)10-1655-10

收稿日期: 2016-04-23

Determination and Tectonic Significance of Volcanic Rock Series in the Okinawa Trough

Guo Kun^{1,2}, Zhai Shikui¹, Yu Zenghui¹, Cai Zongwei¹, Zhang Xia¹

1. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospection of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Institute of Oceanology of the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: The Okinawa Trough is a young back-arc basin at its early back-arc spreading stage, and is a natural laboratory for understanding the formation and evolution of back-arc basins and crust-mantle interaction processes under this tectonic setting. However, with the gradually deepening of research work, the rock series of volcanic rocks from the Okinawa Trough are becoming an important and urgent need to solve problem. Based on the geochemical compositions of some pumices determined recently by authors and the petrologic and geochemical data of volcanic lavas from the Okinawa Trough in literatures, the rock series of volcanic rocks from the Okinawa Trough have been determined in detail. The tectonic significance of volcanic rocks and the genesis relationship between pumices and basalts have also been discussed. The magmatism in the Okinawa Trough is bimodal, being comprised dominantly of basic basalts and acidic rhyolites, accompanied by minor intermediate rocks. The basalts are mainly olivine tholeiitic basalts, which belong to subalkalic series, and the pumices are mostly rhyodacite or rhyolite, which belong to subalkalic series too. According to the geochemical compositions, basalts are not only similar to those from the mid-ocean ridge but also from the island arc tectonic environment. They are different from those occurring at mid-ocean ridge spreading center or mature back-arc basins, but with distinct geochemical features associated with distinct tectonic environment their occurred, a back-arc basin at early spreading stage. The acid pumice, a widely distributed rock type in Okinawa Trough, is characterized by the geochemical compositions that are typical for volcanic rocks from island arcs. The magma of intermediate-

基金项目: 国家重大基础研究发展规划“973”项目(No.2013CB29702); 中国大洋矿产资源研究开发协会“十二五”重大项目(Nos.DY125-11-R-01, DY125-12-R-03); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山人才计划项目(No.2015ASTP-0S17)。

作者简介: 国坤(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为岩石地球化学。E-mail: guokun1016@163.com

* **通讯作者:** 翟世奎, E-mail: zhaishk@public.qd.sd.cn

引用格式: 国坤, 翟世奎, 于增慧, 等, 2016. 冲绳海槽火山岩岩石系列的厘定及构造环境意义. 地球科学, 41(10): 1655-1664.

acidic pumices, with same sources as associated basalts, may be formed by fractional crystallization of basalt magma.

Key words: rock series; magmatism; tectonic environment; Okinawa Trough; marine geology.

0 引言

冲绳海槽是西太平洋大陆边缘一个持续活动的、年轻的弧后盆地,位于板块汇聚的活动边缘处(金翔龙和喻普之,1987),一系列特殊的构造特征和强烈的海底火山活动使其成为研究弧后扩张早期阶段盆地演化和壳幔过程的天然实验室,是揭示弧后盆地发生、发展、地幔源区熔融、岩浆起源及洋陆转换等地球内部动力学过程不可多得的“窗口”(赵广涛等,2001)。迄今,对冲绳海槽酸性火山岩——浮岩的研究较多,关于浮岩的矿物和岩石学特征、形成机理、岩浆来源及演化、喷发旋回和岩浆房结构等取得了许多重要的成果(翟世奎,1987;翟世奎等,1994,1997,2001;秦蕴珊和翟世奎,1988;陈丽蓉等,1993;黄朋等,2006;韩宗珠等,2008)。然而,关于冲绳海槽玄武岩的研究报道却相对较少,Ishizuka *et al.* (1990)、翟世奎和干晓群(1995)、李巍然等(1997)和 Hoang and Uto(2006)先后对冲绳海槽玄武岩的岩石学、矿物学和地球化学特征等进行了研究。上述研究工作奠定了冲绳海槽岩浆岩研究的基础,同时也揭示出一系列重要的科学问题,例如:冲绳海槽火山

岩的岩石系列归属问题、酸性浮岩与基性玄武岩之间的关系或成因联系问题、板块俯冲作用对岩浆作用的贡献(能量与物质问题、地壳物质的混染及程度等)。岩石的分类命名和岩石系列的判别厘定是深入系统性研究工作的基础或前提。本文在系统收集和整理了迄今已有的冲绳海槽火山岩的岩石学资料(站位见图 1)的基础上,结合作者近期分析测试数据(利用 LA-ICP-MS 测试的玄武岩玻璃的主量、微量元素组成(站位见图 1),数据见国坤(2016)。玄武岩样品的全岩地球化学组成已由翟世奎和干晓群(1995)及李巍然等(1997)进行了研究),对冲绳海槽火山岩的岩石命名和岩石系列归属进行了重新厘定,探讨了火山岩的构造环境指示意义和浮岩与玄武岩之间的成因联系等。

1 岩石名称厘定

冲绳海槽火山岩分布具有以基性玄武岩和酸性浮岩为主的双峰式特征(Kimura *et al.*, 1986; Honma *et al.*, 1991; Shinjo and Kato, 2000),分布最为广泛的是酸性浮岩,而玄武岩主要出露在海槽的中部和南部,目前未见有关北部玄武岩的报道。按照国际地科联 1989 年推荐的 TAS 图解命名方案(Rickwood, 1989),冲绳海槽火山岩包括玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩和流纹岩 5 个类型,囊括了亚碱性系列 SiO_2 含量自 47%~77% 的所有岩石类型(图 2)。玄武岩的玻璃质包裹体主要投在玄武岩区域,浮岩包裹体主要投在流纹岩范围内。火山岩分布的另一特征是,大多数岩石投在玄武岩和流纹岩两个端元范围内,中间的过渡类型较少,且都位于亚碱性系列范围内(图 2 中 *Ir* 线以下)。上述特征一方面说明多种火山岩属于相同的亚碱性系列,另一方面说明岩浆作用经历了充分的结晶分异作用(主要是 SiO_2 含量上的差异,图 2),并且分异作用主要发生在相当长一段时间内保持稳定的岩浆房环境中(李巍然等,1997;翟世奎等,1997)。在基于全岩组分阳离子数的 R1-R2 火山岩分类图解(图 3)中,可以得到类同于 TAS 分类图解中的结果,即:玄武岩、玄武岩玻璃及矿物包裹体主要投在拉斑玄武岩和橄辉玄武岩区域,而酸性岩及其包裹体主要位于流纹英安岩和流纹岩区域,中间同样存在有少量的过渡类型。在以微量元素及其比值为主的判别

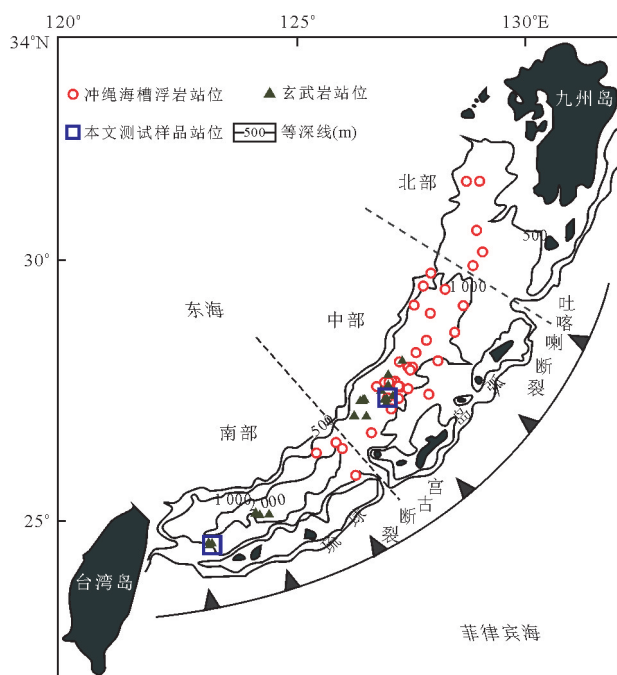


图 1 冲绳海槽火山岩样品站位

Fig.1 Location diagram of the volcanic rocks in Okinawa Trough

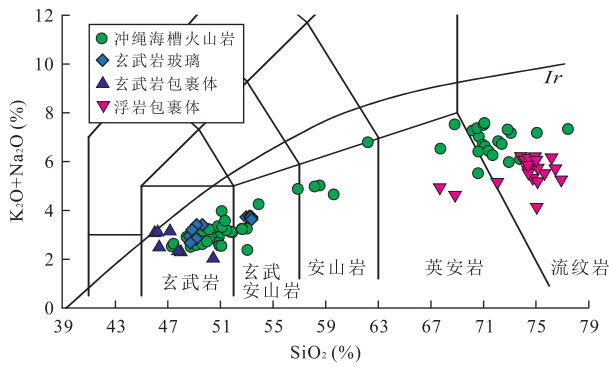


图 2 冲绳海槽火山岩 TAS 图解

Fig.2 TAS diagram of the volcanic rocks in Okinawa Trough 据 Rickwood(1989);冲绳海槽火山岩数据引自翟世奎和干晓群 (1995),李巍然等 (1997), Shinjo and Kato(2000), 马维林等 (2004),韩宗珠等(2005), Hoang and Uto(2006), 黄朋等(2006); 包裹体数据引自于增慧(2000);玄武岩玻璃数据见国坤(2016)

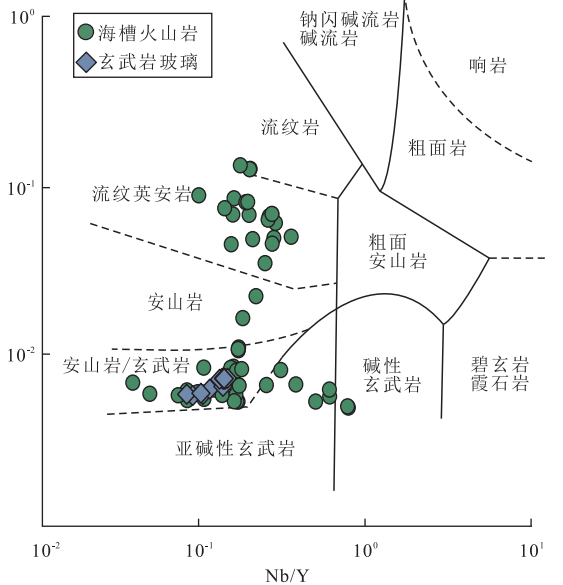
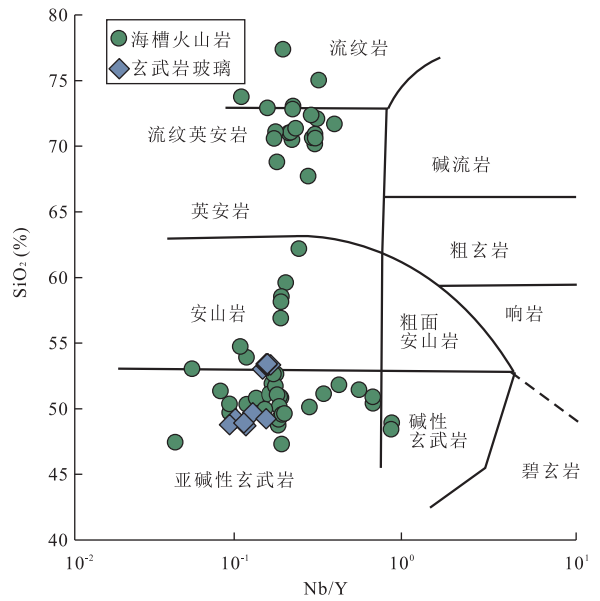


图 3 R1-R2 火山岩分类

Fig.3 R1-R2 diagram of the volcanic rocks

据 De la Roche *et al.*(1980);R1 和 R2 按公式从千阳离子数获得 此参数:R1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti);R2=6Ca+2Mg+Al

图上,所得结果亦相近(图 4)。

根据 CIPW 标准矿物计算和镜下观察结果,冲绳海槽玄武岩中的主要矿物为斜长石(拉长石和培长石;翟世奎和干晓群,1995)和辉石,二者之和占到矿物的 75.62%~94.62%,次要矿物为橄榄石和磁铁矿等,没有出现碱性长石和霞石类等碱性矿物;酸性浮岩中的主要斑晶矿物为斜长石、紫苏辉石和磁铁矿,偶尔可见到橄榄石、石英和黑云母等(翟世奎,1986),CIPW 标准矿物组成和 QAPF 分类亦说明酸性浮岩属于流纹英安岩(翟世奎等,2001)。综上多种判别图和矿物组成可知,冲绳海槽火山岩囊括了

图 4 SiO₂-Nb/Y 和 Zr/TiO₂-Nb/Y 火山岩分类

Fig.4 SiO₂-Nb/Y and Zr/TiO₂-Nb/Y diagram of the volcanic rocks

据 Winchester and Floyd(1977)

亚碱性玄武岩到流纹岩几乎所有的岩石类型,但分布以玄武岩(中部和南部)和流纹(英安)岩(斑块状分布于整个海槽区)两个端元岩类为主。可将冲绳海槽的玄武岩定名为橄榄拉斑玄武岩,将浮岩定名为流纹英安岩和流纹岩。

2 岩石系列判别

冲绳海槽火山岩中 SiO₂ 含量变化于46.02%~

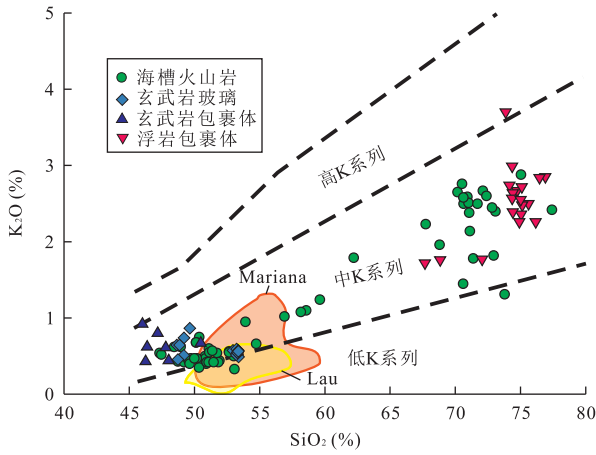


图 5 SiO₂-K₂O 岩石系列判别

Fig.5 SiO₂-K₂O diagram of rock series

据 Peccerillo and Taylor (1976); Lau 海盆玄武岩数据来自 Fretzdorff *et al.* (2006), Escrig *et al.* (2009), Peate *et al.* (2001), Hergt and Woodhead (2007); 马里亚纳海槽玄武岩数据来自 Volpe *et al.* (1990), Stern *et al.* (1990)

77.4%。在常用的 SiO₂-K₂O 图解 (图 5) 上, 冲绳海槽绝大部分火山岩、火山玻璃和包裹体都位于中-K 系列内, 少部分玄武岩及其玻璃位于中-K 与低-K 岩系分界线附近, 与马里亚纳海槽玄武岩 (Mariana Trough Basalt, MTB) 相似, 而有别于 Lau 海盆玄武岩 (大部分都属于低-K 系列; Lau Basin Basalt, LBB)。在图 6a 上, 冲绳海槽玄武岩包裹体位于拉斑玄武岩系列内, 玄武岩和玄武岩玻璃位于拉斑玄武岩系列与钙碱性系列分界线附近, 与 MTB 相似; 酸性浮岩及其包裹体位于钙碱性系列内。在图 6b 上, 冲绳海槽玄武岩及其包裹体和玻璃绝大部分都位于拉斑玄武岩系列内, 与 MTB 和 LBB 表现出

相似的特征。在图 7a 上, 冲绳海槽玄武岩和玻璃均位于钙碱性系列区内, 但靠近拉斑玄武岩系列一侧, 酸性浮岩同样投在钙碱性系列中。在图 7b 上, 绝大部分样品位于钙碱性系列内。在图 7c 中, 所有的火山岩样品都位于钙碱性系列内。在 3 个微量元素岩石系列判别图中, 冲绳海槽玄武岩都表现出不同于 MTB 和 LBB 的特征。

综合以上各种岩系判别图 (图 6、图 7) 可以看出, 在有 Fe (或全 Fe) 或主量元素的判别图 (图 6) 上, 冲绳海槽玄武岩和玄武岩玻璃都位于靠近拉斑玄武岩系的一侧, 而在微量元素 (图 7) 判别图中, 大部分都位于钙碱性系列的范围内。图 6a 和 6b 都是以 Fe 的富集和高 TFeO/MgO 数值为基础建立起来的判别图 (Kuno *et al.*, 1968; Miyashiro, 1974), 而 Fe 的富集和高 TFeO/MgO 数值更多地是受岩浆中氧逸度和 H₂O 含量的控制 (Arculus, 2003)。相对于其他地区 (如大洋中脊), 岛弧和弧后盆地构造环境下的玄武岩最大的特点就是 H₂O 的富集 (Pearce *et al.*, 2005)。在图 6a 中, 冲绳海槽玄武岩及其包裹体和玻璃都表现出因橄榄石的结晶分异作用而向富集 Fe 的方向演化的拉斑玄武岩系列的特征, 同时也说明 H₂O 对冲绳海槽岩浆作用的影响相对较小 (至少比琉球岛弧岩浆小), 因为 H₂O 的存在会使钛铁矿、磁铁矿等在岩浆作用早期阶段结晶析出, 从而造成残余岩浆 (火山玻璃) 中 Fe 的亏损 (钙碱性岩系演化趋势) (Pearce *et al.*, 2005)。中酸性岩表现出因为钛铁矿、磁铁矿的结晶分异 (分离), 朝向 Na₂O+K₂O 端元富集的钙碱性系列的特点。在图 6b 上, 冲绳海槽玄武岩也表现出 TFeO/

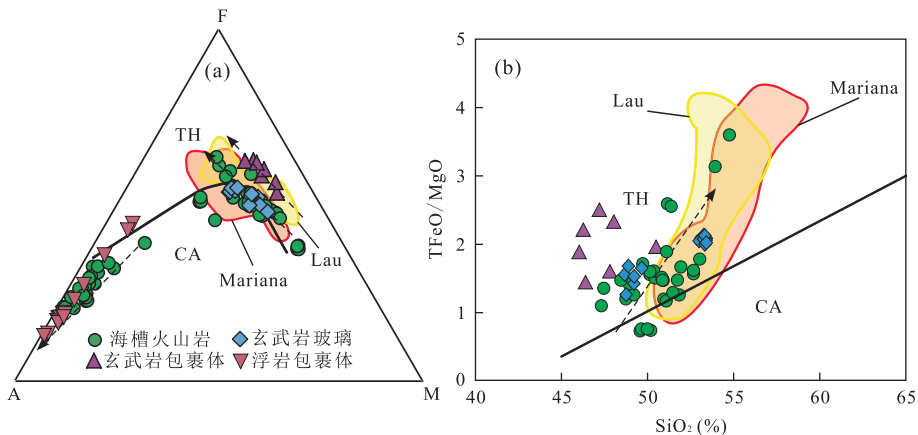


图 6 AFM(a)和 SiO₂-TFeO/MgO(b)岩石系列判别

Fig.6 AFM (a) and SiO₂-TFeO/MgO (b) diagram of rock series

据 Kuno *et al.* (1968) 和 Miyashiro (1974); TH 拉斑玄武岩系列; CA 钙碱性玄武岩系列

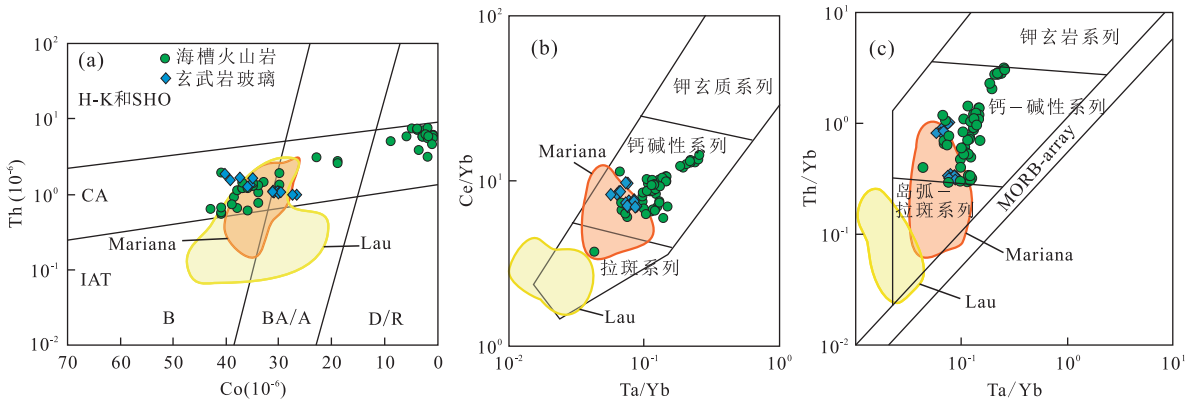


图 7 微量元素岩石系列判别

Fig.7 Trace element diagram of rock series

H-K 和 SHO 高 K 钙碱性系列和橄榄玄粗岩系列; IAT. 岛弧拉斑玄武岩系列; B. 玄武岩; BA/A. 玄武安山岩/安山岩; D/R. 英安岩/流纹岩; 据 Hastie *et al.* (2007)

MgO 数值较大的拉斑玄武质岩系的特点。

冲绳海槽玄武岩及其包裹体和玻璃在图 5 上位于中-K 系列范围内。Arculus (2003) 和 Elburg (2010) 曾指出, 中-K 和高-K 系列的玄武岩不一定是钙碱性系列, 也有可能是拉斑玄武质系列。Hastie *et al.* (2007) 认为 K 在俯冲过程中是一种活动元素, 容易随俯冲流体迁移, 而 Th 只有在深部才会被超临界流体搬运, 因此, 可以用 Th 代替 K, 用 Co 代替 SiO₂ (Co 在基性岩到酸性岩的演变中的变化与 SiO₂ 最为相似, 且为不活跃元素) 进行岩石系列判别, 因为不活动微量元素更能代表岩浆源区的性质。在图 7 中, 冲绳海槽玄武岩和中酸性岩都位于钙碱性系列。然而, 冲绳海槽玄武岩的 Th/Nb 数值 (Th/Nb 可以指示深俯冲熔体组分对岩浆源区的影响; Pearce *et al.*, 2005) 平均为 0.42, 明显高于其他弧后盆地 (MTB 为 0.25, LBB 为 0.24, 斯科舍海盆玄武岩为 0.12) 和 MORB (0.05), 说明冲绳海槽岩浆源区受到了更多的深俯冲过程的影响。Th 和轻稀土元素 (LREE) 是深俯冲过程中容易迁移的元素, 来自俯冲组分中的 Th 和 Ce 容易掩盖拉斑玄武岩系列中的 Th 和 Ce, 使其表现出钙碱性系列的特征。因此, 微量元素岩石系列判别图适用于 MORB、岛弧、成熟弧后盆地等地区, 但不适用处于早期扩张阶段的弧后盆地 (例如冲绳海槽)。在这种情况下, FeO 和 MgO 等主量元素岩石系列判别会更可靠。

冲绳海槽玄武岩在岩石系列方面与其他弧后盆地 (如马里亚纳海槽、劳海盆等) 玄武岩相似, 既有与大洋中脊玄武岩相似的拉斑玄武质岩系的特征, 又有与岛弧玄武岩相似的钙碱性系列的特点, 玄武岩

中微量元素比值 (如 Ba/Nb、Th/Nb 等) 表现出俯冲组分加入的影响。上述特点说明冲绳海槽深部的原始岩浆应是大洋拉斑玄武质岩浆, 但由于受到俯冲板块组分加入的影响, 在一定程度上同时也表现出钙碱性岩系的特征, 这也许正是冲绳海槽目前处于弧后盆地海底扩张早期阶段的体现。

3 岩石学的构造环境意义

火山岩的化学成分及其变化规律取决于原始岩浆的性质和分异演化的过程, 而原始岩浆的形成与当时所处的大地构造环境密切相关, 后者制约着原始岩浆形成时的化学组成与热动力条件 (Pearce *et al.*, 1984)。在图 8a 上, 冲绳海槽玄武岩及其玻璃大部分投在岛弧玄武岩区域, 与 MTB 相似, 而不同于 LBB; 在图 8b 上, 玄武岩及其玻璃均投在岛弧玄武岩和钙碱性玄武岩区域中, 与部分 MTB 和 LBB 相近; 在图 8c 上, 玄武岩及其玻璃投在岛弧和造山带玄武岩区域中; 在图 8d 和图 8e 上, 玄武岩及其玻璃都投在钙碱性玄武岩区域, 与部分 MTB 重叠, 但不同于 LBB; 在图 8f 上, 玄武岩及其玻璃投在岛弧、大洋中脊、钙碱性和大陆边缘钙碱性玄武岩交汇区, 与 MTB 相似, 不同于 LBB; 在图 8g~8i 上, 玄武岩及其玻璃大部分位于岛弧和大洋中脊玄武岩区域, 与部分 MTB 和 LBB 相似。对于冲绳海槽酸性浮岩, 图 8j 上, 浮岩投在岛弧靠近大洋中脊的环境区; 在图 8k 和图 8l 上, 浮岩投在岛弧靠近板内的构造环境区。

综合以上各种构造环境判别图 (图 8) 可以看出, 冲绳海槽玄武岩大部分位于岛弧或/和大洋中脊区域

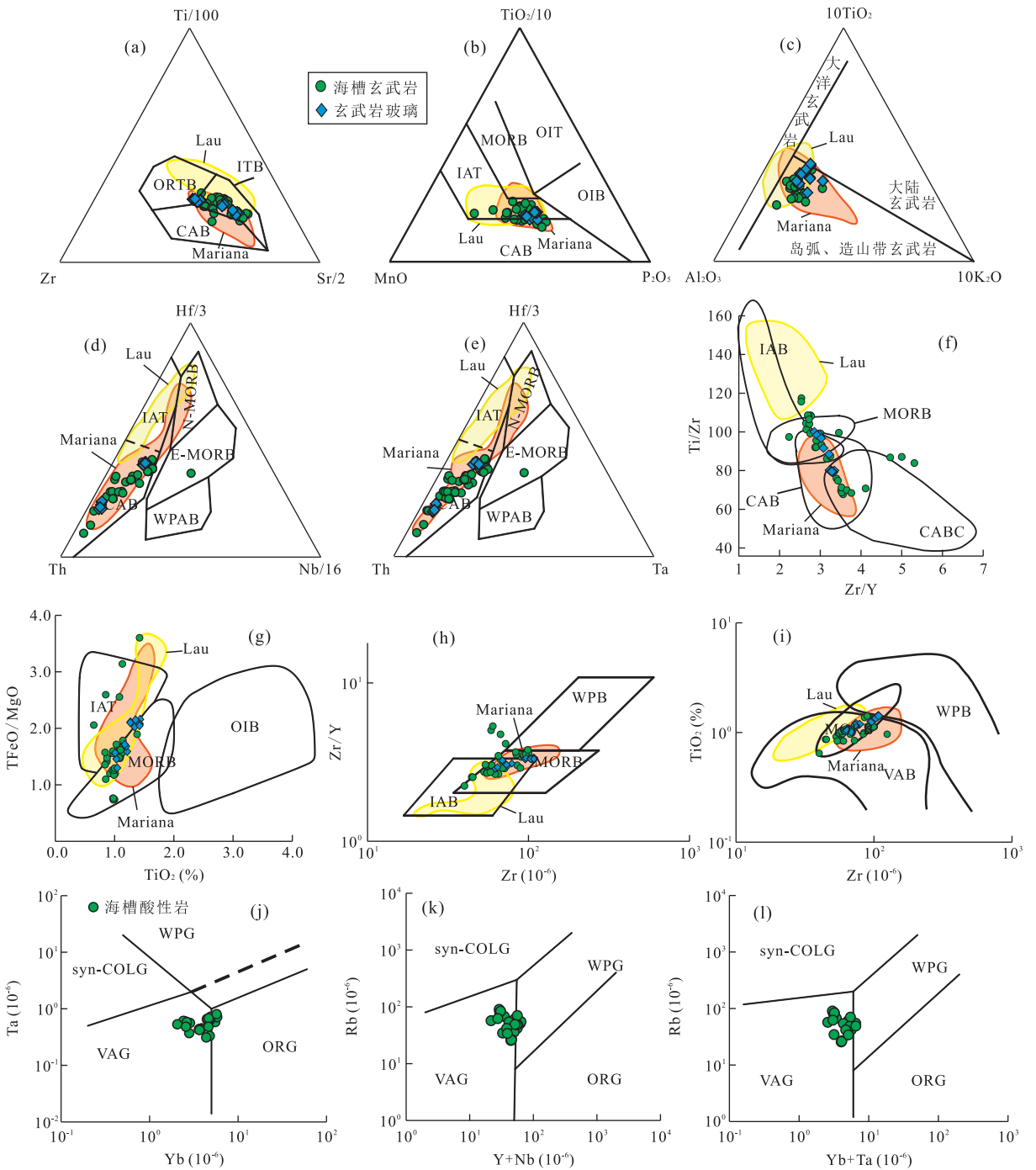


图 8 冲绳海槽火山岩构造环境判别

Fig.8 Tectonic diagram of volcanic rock in Okinawa Trough

CAB, 钙碱性玄武岩; CABC, 大陆边缘钙碱性玄武岩; ORTB, 大洋中脊拉斑玄武岩; ITB, 岛弧拉斑玄武岩; MORB, 大洋中脊玄武岩; IAT, 岛弧拉斑玄武岩; OIT, 洋岛拉斑玄武岩; OIB, 洋岛碱性玄武岩; WPAB/WPB, 板内玄武岩; N-MORB, 正常型大洋中脊玄武岩; E-MORB, 富集型大洋中脊玄武岩; VAB, 火山玄武岩; syn-COLG, 同碰撞; VAG, 岛弧; WPG, 板内; ORG, 大洋中脊. a~i 为玄武岩构造环境判别; j~l 为酸性岩构造环境判别

内,说明冲绳海槽的岩浆作用既体现了岛弧环境的特征,又具有类似大洋中脊的(弧后)扩张环境的性质,这与岩石系列判别中冲绳海槽火山岩兼具拉斑玄武质岩系和钙碱性岩系的结果是一致的.MTB 和 LBB

几乎在每个构造环境判别图中都表现出 MORB 构造环境的特点,而冲绳海槽玄武岩只是在部分判别图中表现出 MORB 构造环境相一致的特点,而更多的是体现岛弧环境火山岩的特征.与马里亚纳海槽和

Lau 海盆等弧后盆地相比,冲绳海槽是一个尚处于扩张早期阶段的弧后盆地(翟世奎等,2001).处于弧后扩张早期的弧后盆地距俯冲带(海沟)较近,地壳厚度较大,这不仅使得俯冲组分对岩浆源区的影响更加明显,而且将导致在岩浆上升至海底的过程中会受到地壳物质相对较强的混染(Meng *et al.*,2000;黄朋等,2006),从而导致玄武岩在岩石化学性质上具有更多岛弧环境火山岩的特征.

4 酸性浮岩和基性玄武岩的成因联系

酸性浮岩是冲绳海槽分布最为广泛的火山岩,迄今所测到的最近的喷发年代距今约 10 ka 年(翟世奎,1986;陈丽蓉等,1993).众多学者对酸性浮岩的岩浆来源进行了大量的研究(翟世奎,1987;翟世奎等,1997;Ishizuka *et al.*,1990;Meng *et al.*,2000;Shinjo and Kato,2000;黄朋等,2006).Ishizuka *et al.*(1990)根据浮岩的微量元素地球化学特征认为冲绳海槽中部的流纹岩源于岛弧型的岩浆源,与玄武岩的来源不同.Honma *et al.*(1991)、陈丽蓉等(1993)和翟世奎等(1994)基于矿物学、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素等特征指出海槽中部的流纹质浮岩是玄武质岩浆结晶分异作用的产物.酸性浮岩中发现的 An 值高达 89 的基性斜长石和橄榄石说明其不可能是中酸性岩浆中的结晶产物(翟世奎等,2001).在岩石系列归属上,冲绳海槽玄武岩和酸性浮岩同属中-K 系列,并且随着 SiO₂ 含量的增加,玄武岩和浮岩呈现良好的演化关系(图 2 和图 5),基本反映了岩浆由基性到酸性的演化过程,说明二者之间源于相同的物源,只是分别代表了岩浆演化不同阶段的产物.在图 6a 上,冲绳海槽火山岩的分布呈现沿结晶演化线变化的良好趋势,进一步证明酸性浮岩是早期玄武质岩浆经过较充分的结晶分异作用后的产物.

在微量元素特征上,冲绳海槽火山岩(玄武岩和酸性浮岩)的 N-MORB (Sun and McDonough,1989)标准化微量元素分布模式(图 9)与琉球岛弧玄武岩大体相似,只是海槽玄武岩含有相对较低的微量元素,而酸性浮岩与琉球岛弧玄武岩的微量元素分布模式更为相近.事实上,岛弧玄武岩和海槽玄武岩都源自俯冲板块之上的地幔楔(只是部位或地理位置上的差异),在初始岩浆上升乃至喷出地表的过程中都将受到地壳物质的混染(Allègre *et al.*,1987).冲绳海槽酸性浮岩与岛弧玄武岩微量元素地

球化学特征的相似性正好说明海槽酸性浮岩受到了地壳物质的混染,因为通常认为岛弧玄武岩是地幔岩浆与地壳物质混合的结果.图 10 表现出冲绳海槽玄武岩与酸性浮岩大体平行的特征,只是酸性浮岩具有相对较高的 REE 总量和明显的 Eu 负异常,这正是岩浆结晶分异(特别是斜长石的结晶析出)作用和二者之间具有继承关系的有力证据.海槽酸性浮岩与琉球岛弧玄武岩的 REE 分布模式却有着本质的差别,突出表现在轻稀土含量相近,而重稀土含量差别明显,而且浮岩的 HREE 含量远高于琉球岛弧玄武岩中的 HREE 含量,二者之间不可能存在继承关系.也就是说,如果海槽酸性浮岩与岛弧玄武岩存在成因的话,两者的 REE 分布模式应该表现出平行的特征,而不是含量上的相近(LREE),因为酸性浮岩经历的结晶分异作用必然会造成 REE 含量的增加,而实际酸性浮岩的 LREE 与岛弧玄武岩却表现为含量相近,可表明它们之间不存在成因联系.P、Sr、Ti 和 Eu 等元素在岩浆结晶分异作用的早期阶段进入磷灰石、辉石、(钛)磁铁矿和斜长石中而发生分异,导致演化后期的岩浆中亏损这些元素.冲绳海槽玄武岩中 P、Sr、Ti 和 Eu 没有表现出亏损,而酸性浮岩则表现出明显的亏损(图 9 和图 10),进一步说明酸性浮岩是早期玄武质岩浆经过较充分结晶分异演化晚期的产物.

同位素不同于微量元素,它们在岩浆的分异过程中保持恒定,不会受控于晶体-液体的平衡过程,部分熔融作用形成的岩浆具有源区的同位素组成特

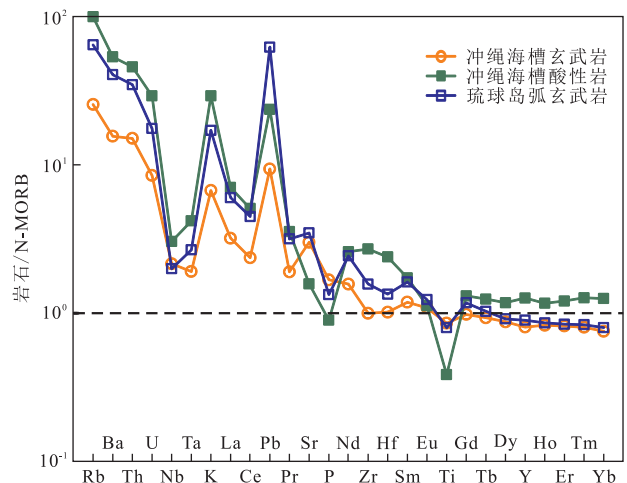


图 9 冲绳海槽火山岩微量元素平均值蛛网图

Fig.9 Trace element distribution pattern of volcanic rocks in Okinawa Trough

标准化值据 Sun and McDonough(1989)

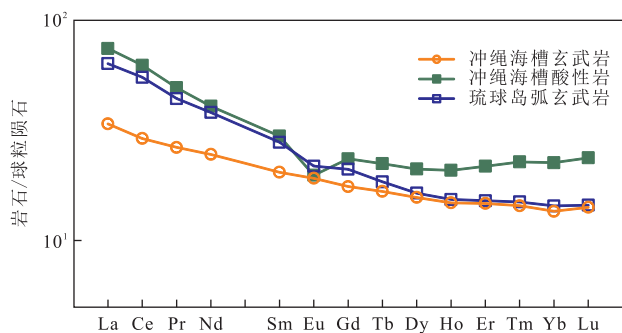


图 10 冲绳海槽火山岩稀土元素平均值

Fig.10 REE distribution pattern of volcanic rocks in Okinawa Trough

标准化值据 Sun and McDonough(1989)

征(Pearce *et al.*, 2005).浮岩的轻矿物组分(主要为斜长石) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.704 540(Guo *et al.*, 2016),与同区 8 个玄武岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值平均值 0.704 211(Meng *et al.*, 2000; Hoang and Uto, 2006)非常接近,可作为冲绳海槽酸性浮岩与玄武岩同源而只是代表岩浆不同演化阶段产物的又一有力证据.浮岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化于 0.704 018 ~ 0.707 830,平均值为 0.704 765,接近于玄武岩的比值,同样证明二者的同源性,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化范围较大,正是说明了岩浆在岩浆房的结晶分异过程中遭到了地壳物质的混染.

5 结论

(1)冲绳海槽火山岩分布具有以玄武岩和酸性岩为主的双峰式特征,基性岩属于亚碱性系列的橄榄拉斑玄武岩,酸性岩为亚碱性(钙碱性)系列的流纹英安岩或流纹岩.

(2)冲绳海槽火山岩源于其下的地幔楔,但受到俯冲板块物质加入的影响,在岩浆上升至地表或在岩浆房中停留发生结晶分异作用的过程中受到了地壳物质的混染,使其不仅具有弧后盆地岩浆作用的特征,同时也具有岛弧岩浆岩的某些特征,这正是冲绳海槽目前处于弧后早期扩张阶段的具体反映.

(3)冲绳海槽广泛分布的酸性浮岩与基性的玄武岩具有同源性,浮岩是玄武质岩浆经结晶分异作用和地壳物质混染后岩浆冷凝后的产物,与岛弧玄武岩不存在成因联系.

References

Allègre, C.J., Hamelin, B., Provost, A., *et al.*, 1987. Topology in

Isotopic Multispace and Origin of Mantle Chemical Heterogeneities. *Earth and Planetary Science Letters*, 81 (4): 319–337. doi:10.1016/0012-821x(87)90120-8

Arculus, R.J., 2003. Use and Abuse of the Terms Calcalkaline and Calcalkalic. *Journal of Petrology*, 44 (5): 929–935. doi:10.1093/petrology/44.5.929

Chen, L.Y., Zhai, S.K., Shen, S.X., 1993. Isotopic Characteristics and Ages of Pumices from the Okinawa Trough. *Science in China (Series B)*, 23(3): 324–329 (in Chinese with English abstract).

De la Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., *et al.*, 1980. A Classification of Volcanic and Plutonic Rocks Using R_1R_2 -Diagram and Major-Element Analyses—Its Relationships with Current Nomenclature. *Chemical Geology*, 29(1–4): 183–210. doi:10.1016/0009-2541(80)90020-0

Elburg, M. A., 2010. Sources and Processes in Arc Magmatism: The Crucial Role of Water. *Geologica Belgica*, 13(3): 119–134.

Escrig, S., Bézou, A., Goldstein, S. L., *et al.*, 2009. Mantle Source Variations beneath the Eastern Lau Spreading Center and the Nature of Subduction Components in the Lau Basin-Tonga Arc System. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10 (4): 115–123. doi: 10.1029/2008gc002281

Fretzdorff, S., Schwarz-Schampera, U., Gibson, H. L., *et al.*, 2006. Hydrothermal Activity and Magma Genesis along a Propagating Back-Arc Basin: Valu Fa Ridge (Southern Lau Basin). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111 (B8): 851–867. doi: 10.1029/2005jb003967

Guo K., 2016. Volcanic Rock Magma Source Composition and Subduction Composition Effects in Okinawa Trough. (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao (in Chinese with English abstract).

Guo, K., Zhai, S.K., Yu, Z.H., *et al.*, 2016. Sr-Nd-Pb Isotopic Geochemistry of Phenocrysts in Pumice from the Central Okinawa Trough. *Geological Journal*, 51: 368–375. doi:10.1002/gj.2823

Han, Z.Z., Li, C., Lai, Z.Q., 2008. Geochemical Features and Origin of the Pumice from Middle and South Okinawa Trough. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (3): 61–66 (in Chinese with English abstract).

Han, Z.Z., Yu, H., Zhao, G.T., *et al.*, 2005. Petrology and Geochemistry of the Basalt from the Middle Part of Okinawa. *Marine Sciences*, 29(6): 17–21 (in Chinese with English abstract).

Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., *et al.*, 2007. Classifica-

- tion of Altered Volcanic Island Arc Rocks Using Immobile Trace Elements: Development of the Th-Co Discrimination Diagram. *Journal of Petrology*, 48(12): 2341—2357. doi:10.1093/petrology/egm062
- Hergt, J. M., Woodhead, J. D., 2007. A Critical Evaluation of Recent Models for Lau-Tonga Arc-Backarc Basin Magmatic Evolution. *Chemical Geology*, 245(1—2): 9—44. doi:10.1016/j.chemgeo.2007.07.022
- Hoang, N., Uto, K., 2006. Upper Mantle Isotopic Components beneath the Ryukyu Arc System: Evidence for 'Back-Arc' Entrapment of Pacific MORB Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 249(3—4): 229—240. doi:10.1016/j.epsl.2006.07.021
- Honma, H., Kusakabe, M., Kagami, H., et al., 1991. 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. *Geochemical Journal*, 25(2): 121—136. doi:10.2343/geochemj.25.121
- Huang, P., Li, A. C., Jiang, H. Y., 2006. Geochemical Features and Their Geological Implications of Volcanic Rocks from the Northern and Middle Okinawa Trough. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1703—1712 (in Chinese with English abstract).
- Ishizuka, H., Kawanobe, Y., Sakai, H., 1990. Petrology and Geochemistry of Volcanic Rocks Dredged from the Okinawa Trough, an Active Back-Arc Basin. *Geochemical Journal*, 24(2): 75—92. doi:10.2343/geochemj.24.75
- Jin, X. L., Yu, P. Z., 1987. The Tectonic Characteristics and Evolution of the Okinawa Trough. *Science in China (Series B)*, (2): 196—203 (in Chinese).
- Kimura, M., Kaneoka, I., Kato, Y., et al., 1986. Report on DELP 1984 Cruises in the Middle Okinawa Trough, Part V: Topography and Geology of the Central Grabens and Their Vicinity. *Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo*, 61: 269—310.
- Kuno, H., 1968. Differentiation of basalt magmas. *Basalts*, 2(3): 623—688.
- Li, W. R., Yang, Z. S., Wang, Y. J., et al., 1997. The Petrochemical Feature of the Volcanic Rocks in Okinawa Trough and Their Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 13(4): 538—550 (in Chinese with English abstract).
- Ma, W. L., Wang, X. L., Jin, X. L., et al., 2004. Areal Difference of Middle and Southern Basalts from the Okinawa Trough and Its Genesis Study. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 758—769 (in Chinese with English abstract).
- Meng, X. W., Chen, Z. H., Du, D. W., et al., 2000. Sr, Nd Isotope Geochemistry of Volcanic Rock Series and Its Geological Significance in the Middle Okinawa Trough. *Science in China (Series D)*, 43(5): 458—463. doi:10.1007/bf02875307
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic Rock Series in Island Arcs and Active Continental Margins. *American Journal of Science*, 274(4): 321—355. doi:10.2475/ajs.274.4.321
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. doi:10.1093/petrology/25.4.956
- Pearce, J. A., Stern, R. J., Bloomer, S. H., et al., 2005. Geochemical Mapping of the Mariana Arc-Basin System; Implications for the Nature and Distribution of Subduction Components. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(7): 542—557. doi:10.1029/2004gc000895
- Peate, D. W., Kokfelt T. F., Hawkesworth C. J., et al., 2001. U-Series Isotope Data on Lau Basin Glasses: The Role of Subduction-Related Fluids during Melt Generation in Back-Arc Basins. *Journal of Petrology*, 42(8): 1449—1470. doi:10.1093/petrology/42.8.1449
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63—81. doi:10.1007/bf00384745
- Qin, Y. S., Zhai, S. K., 1988. Petrochemical Characteristics of Common Elements and Chlorine in Pumice from the Okinawa Trough. *Geochimica*, (2): 183—189 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood, P. C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22(4): 247—263. doi:10.1016/0024—4937(89)90028—5
- Shinjo, R., Kato, Y., 2000. Geochemical Constraints on the Origin of Bimodal Magmatism at the Okinawa Trough, an Incipient Back-Arc Basin. *Lithos*, 54(3—4): 117—137. doi:10.1016/s0024—4937(00)00034—7
- Stern, R. J., Lin, P. N., Morris, J. D., et al., 1990. Enriched Back-Arc Basin Basalts from the Northern Mariana Trough; Implications for the Magmatic Evolution of Back-Arc Basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 100(1—3): 210—225. doi:10.1016/0012—821x(90)90186—2
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. doi:10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19

- Volpe, A. M., Macdougall, J. D., Lugmair, G. W., et al., 1990. Fine-Scale Isotopic Variation in Mariana Trough Basalts: Evidence for Heterogeneity and a Recycled Component in Backarc Basin Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 100 (1-3): 251-264. doi: 10.1016/0012-821x(90)90188-4
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343. doi: 10.1016/0009-2541(77)90057-2
- Yu, Z. H., 2000. Study of the Inclusions and the Isotopic Compositions of Volatile Components in Volcanic Rocks in the Okinawa Trough (Dissertation). Institute of Oceanology of the Chinese Academy of Sciences, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Zhai, S. K., 1986. The Distribution and Mineralogical Characteristics of the Pumice in the Okinawa Trough. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 17(6): 504-512 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, S. K., 1987. The Crystalline Temperature and Pressure of Phenocrysts of the Pumice in the Okinawa Trough. *Marine Science*, 11(1): 26-30 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, S. K., Chen, L. R., Shen, S. X., et al., 1994. The Magma Activity Evolution of Okinawa Trough in Early Spreading Stage. *Acta Oceanologica Sinica*, 16(3): 61-73 (in Chinese).
- Zhai, S. K., Chen, L. R., Wang, Z., et al., 1997. Primary Analysis on Pumice Magmatism Model of the Okinawa Trough. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 17(1): 59-66 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, S. K., Chen, L. R., Zhang, H. Q., 2001. Magmatism and Seafloor Hydrothermal Activities in the Okinawa Trough. Maritime Press, Beijing.
- Zhai, S. K., Gan, X. Q., 1995. Study of Basalt from the Hydrothermal Field of the Okinawa Trough. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 26(2): 115-123 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. T., Zhai, S. K., Wang, W. Z., et al., 2001. Volcanic Rocks from Okinawa Trough—A Key to the Dynamic Process during the Initial Spreading Stage of the Back-Arc Basin. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 21(3): 119-122 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈丽蓉, 翟世奎, 申顺喜, 1993. 冲绳海槽浮岩的同位素特征及年代测定. *中国科学(B辑)*, 23(3): 324-329.
- 国坤, 2016. 冲绳海槽火山岩岩浆源区组合及俯冲组分影响的研究(博士学位论文). 青岛: 中国海洋大学.
- 韩宗珠, 李超, 来志庆, 2008. 冲绳海槽中南部浮岩的岩石地球化学特征及其成因. *海洋湖沼通报*, (3): 61-66.
- 韩宗珠, 于航, 赵广涛, 等, 2005. 冲绳海槽中部玄武岩的岩石学和地球化学研究. *海洋科学*, 29(6): 17-21.
- 黄朋, 李安春, 蒋恒毅, 2006. 冲绳海槽北、中段火山岩地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 22(6): 1703-1712.
- 金翔龙, 喻普之, 1987. 冲绳海槽的构造特征与演化. *中国科学(B辑)*, (2): 196-203.
- 李巍然, 杨作升, 王永吉, 等, 1997. 冲绳海槽火山岩岩石特征及其地质意义. *岩石学报*, 13(4): 538-550.
- 马维林, 王先兰, 金翔龙, 等, 2004. 冲绳海槽中部和南部玄武岩的区域性差异及其成因研究. *地质学报*, 78(6): 758-769.
- 秦蕴珊, 翟世奎, 1988. 冲绳海槽浮岩的岩石化学特征及含氟性的讨论. *地球化学*, (2): 183-189.
- 于增慧, 2000. 冲绳海槽火山岩中岩浆包裹体及气体同位素组成研究(博士学位论文). 青岛: 中国科学院海洋研究所.
- 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.
- 翟世奎, 1987. 冲绳海槽浮岩中斑晶矿物结晶的 P-T 条件. *海洋科学*, 11(1): 26-30.
- 翟世奎, 陈丽蓉, 申顺喜, 等, 1994. 冲绳海槽早期扩张作用中岩浆活动的演化. *海洋学报*, 16(3): 61-73.
- 翟世奎, 陈丽蓉, 王镇, 等, 1997. 冲绳海槽浮岩岩浆活动模式浅析. *海洋地质与第四纪地质*, 17(1): 59-66.
- 翟世奎, 陈丽蓉, 张海启, 2001. 冲绳海槽的岩浆作用与海底热液活动. 北京: 海洋出版社.
- 翟世奎, 干晓群, 1995. 冲绳海槽海底热液活动区玄武岩的矿物学和岩石化学特征及其地质意义. *海洋与湖沼*, 26(2): 115-123.
- 赵广涛, 翟世奎, 王文正, 等, 2001. 冲绳海槽火山岩——揭示弧后盆地早期扩张动力学过程的钥匙. *海洋地质与第四纪地质*, 21(3): 119-122.