

doi:10.3799/dqkx.2016.085

冲绳海槽岩浆作用的区域性差异

宗统^{1,2,3}, 翟世奎^{1,2*}, 于增慧^{1,2}

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. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100
3. 国家海洋局第二海洋研究所海底科学重点实验室, 浙江杭州 310012

摘要: 冲绳海槽位于西太平洋活动大陆边缘, 是一个目前正处于弧后扩张作用早期的、年轻的弧后盆地, 张性断裂发育, 火山活动强烈. 岩石类型分布和岩石地球化学特征表明冲绳海槽中部和南部的岩浆作用存在明显差异, 但迄今为止人们对于导致该差异的原因尚不清楚. 对已有的冲绳海槽玄武岩的资料进行了综合对比分析, 并依据冲绳海槽岩浆岩的 Pb 同位素组成特征, 指出冲绳海槽及其所在的沟弧盆体系之下的地幔属于印度洋型地幔, 相对于海槽中部的玄武岩岩浆, 海槽南部的玄武岩岩浆来自地幔更高层次的熔融; 冲绳海槽玄武岩岩浆受到了俯冲板块物质加入的影响, 且南部玄武岩岩浆受影响的程度要高于中部, 这可能受控于俯冲板块的深度(南部: 100~150 km; 中部: 约 200 km); 冲绳海槽玄武岩部分属于 MORB 型, 这应是冲绳海槽早期扩张的重要特征和证据之一. 在上述分析工作的基础上, 提出了今后对冲绳海槽岩浆作用的研究应主要集中在以下几个方面: 冲绳海槽基底岩石类型的甄别与分布; 岩浆源区地幔的类型及特征; 板块俯冲对冲绳海槽岩浆作用的贡献及制约机制; 冲绳海槽岩浆作用与海底热液活动的内在联系等.

关键词: 冲绳海槽; 玄武岩; 岩浆作用; 板块俯冲; 熔融程度; 构造地质.

中图分类号: P58

文章编号: 1000-2383(2016)06-1031-10

收稿日期: 2015-11-18

Regional Differences of Magmatism in the Okinawa Trough

Zong Tong^{1,2,3}, Zhai Shikui^{1,2*}, Yu Zenghui^{1,2}

1. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques of the Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
3. Key Laboratory of Submarine Geoscience, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

Abstract: Okinawa Trough is a young and active back-arc basin located at active continental margin in the western Pacific, which is in the initial stage of spreading and characterized by widespread extensional faults and intense volcanic activities. Distribution and geochemistry of rocks show distinct differences of magmatism in the central and southern Okinawa Trough, but the reason is unclear so far. To explore this issue, we study comprehensively published petrologic and geochemical data, combined with Pb isotopic composition of basalts in Okinawa Trough in this paper. It is found that mantle source beneath Okinawa Trough and the trench-arc-basin system in which the Okinawa Trough is located belongs to Indian Ocean-type mantle, and basalts derived from southern Okinawa Trough are products of higher degree of mantle melting relative to basalts from middle Okinawa Trough. Basalts derived from Okinawa Trough are affected by the subduction component and extent of the effect of subduction component on magma source in the southern Okinawa Trough is higher than that in the middle Okinawa Trough, and the cause may be subducted depth of plate (southern: 100–150 km; middle: about 200 km); only a few basalts are similar to MORB-type, which is considered to be an important characteristic and evidence of spreading in the Okinawa Trough. On the basis of the above analysis, we suggest that the studies of magmatism in the Okinawa Trough shall be focused on the following aspects in the future: identification and distribution of basement rocks, the types and characteristics of magmatic mantle

基金项目: 国家重大基础研究发展计划(973 计划)项目(No. 2013CB29702).

作者简介: 宗统(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩浆作用研究. E-mail: zongtong4756@163.com

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

引用格式: 宗统, 翟世奎, 于增慧, 2016. 冲绳海槽岩浆作用的区域性差异. 地球科学, 41(6): 1031–1040.

source, the restriction mechanism and contribution of subduction to magmatism, and the internal relation between magmatism and hydrothermal activities.

Key words: Okinawa Trough; basalts; magmatism; subduction; degree of mantle melting; tectonics.

0 引言

冲绳海槽位于西太平洋活动大陆边缘,是一个目前正处于弧后扩张作用早期的、年轻的弧后盆地,其张性断裂发育,火山活动强烈,具有异常高的热流值(翟世奎等,2001),是全球热流值最高的地区(金性春,1995;赵金海等,2003). 冲绳海槽通常以吐咯喇断裂($\sim 130^{\circ}\text{E}$)和宫古断裂($\sim 127^{\circ}\text{E}$)为界分为北、中、南 3 段(Shinjo *et al.*, 1999). 大量的调查研究表明,在冲绳海槽同时分布有中酸性火山岩和基性玄武岩,岩浆活动呈明显的双峰式特征(Kimura *et al.*, 1986, Honma *et al.*, 1991). 尽管中酸性火山岩(主要是浮岩)见于整个海槽中,但其主要分布在海槽的中、北部(翟世奎, 1986). 基性玄武岩主要出露在海槽的中部,在海槽南部较少(图 1),迄今还没有冲绳海槽北部玄武岩的相关报道. 另外,在冲绳海槽中部,岩浆活动有随时间从酸性向基性演化的趋势(翟世奎等, 1994). 上述事实一方面说明冲绳海槽的岩浆岩类型及分布不同于成熟型弧后盆地,同时

也说明在冲绳海槽的北、中、南 3 段之间岩浆活动可能存在着重要的差异.

1 冲绳海槽岩浆作用研究中的主要科学问题

冲绳海槽玄武岩具有典型弧后盆地玄武岩的地球化学特征,例如富集大离子亲石元素、亏损高场强元素(翟世奎和干晓群, 1995; Shinjo *et al.*, 1999)等. Honma *et al.* (1991)和李巍然等(1997a, 1997b)通过对冲绳海槽玄武岩的地球化学特征分析,认为其化学成分介于 MORB 和 IAB 之间. 上述特征说明冲绳海槽的岩浆作用可能受控于菲律宾海板块在琉球海沟的俯冲作用,但学者们对于岩浆源区的性质目前仍持不同的观点. Honma *et al.* (1991)认为冲绳海槽玄武岩岩浆源于 N-MORB 型地幔,并受到了俯冲组分的影响. 翟世奎和干晓群(1995)认为海槽中部热液区玄武岩的初始岩浆源于冲绳海槽内隆起的异常地幔. Shinjo *et al.* (1999)则认为冲绳海槽中部的玄武岩岩浆主要有两个来源: E-MORB 型地幔和板块俯冲组分. 于增慧和翟世奎(2004)认为冲绳海槽中部岩浆源区较南部更倾向于富集型地幔,冲绳海槽中部地幔源区在俯冲组分加入地幔楔之前就具有富集地幔的特征,并首次指出了冲绳海槽中部和南部玄武岩岩浆在源区性质上可能存在差异. 黄朋等(2006)根据冲绳海槽岩浆岩的 Sr-Nd 同位素组成特征,认为冲绳海槽岩浆物质来源于 PREMA 地幔.

冲绳海槽中部和南部的构造环境存在诸多差异,具体表现为:菲律宾海板块的俯冲速度在冲绳海槽南部约为 7 cm/a ,而在其中部则为 5 cm/a 左右(Seno *et al.*, 1993);冲绳海槽南部的地壳厚度为 $13\sim 16\text{ km}$,向北地壳厚度逐渐增加,至中部地壳厚度为 $16\sim 22\text{ km}$ (韩波, 2008);南部可能已经出现洋壳(Sibuet *et al.*, 1987; 梁瑞才等, 2001),而中部还没有明显的证据;板块俯冲角度在冲绳海槽南部比在其中部要大(Shinjo *et al.*, 1999);冲绳海槽玄武岩出露点(采样站位见图 1)对应的俯冲板块深度(海底表面到俯冲板片顶面的距离)不同,南部为 $100\sim 150\text{ km}$,中部约 200 km (图 1; 据 Letouzey and

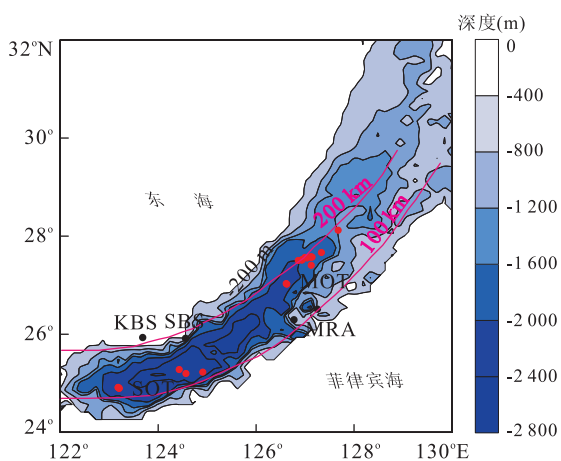


图 1 冲绳海槽玄武岩的分布

Fig. 1 The distribution of basalts in the Okinawa Trough MRA. 琉球岛弧中部; MOT. 冲绳海槽中部; SOT. 冲绳海槽南部; KBS. Kobisyo; SBS. Sekibisyo; 下文同. 红线为俯冲板块顶面深度等深线(km),据 Shinjo *et al.* (1999);黑点和红点为玄武岩取样点,位置据 Herman *et al.* (1979),张明书(1982),Kimura *et al.* (1986),Sibuet *et al.* (1987),Ishizuka *et al.* (1990),Ishikawa *et al.* (1991),Honma *et al.* (1991)、翟世奎和干晓群(1995)、李巍然等(1997a, 1997b)、Shinjo *et al.* (1999)以及马维林等(2004);KBS 和 SBS 位置据 Shinjo(1998);MRA 位置据 Shinjo *et al.* (1999)

Kimura, 1985; Shinjo *et al.*, 1999). 另外,高金耀等(2008)认为冲绳海槽南部的岩浆活动可能与加瓜海脊俯冲和台湾北部火山带后碰撞构造有关,中部岩浆活动可能与大东脊的俯冲作用相关。

在玄武岩的岩石地球化学性质上,冲绳海槽中部和南部也存在有明显的差异。在 SiO₂ 含量一定时,冲绳海槽南部玄武岩较中部玄武岩表现为更加富集 Al₂O₃、FeO、K₂O 等常量组分,海槽南部玄武岩中微量元素和稀土元素的变化范围较中部更大,Nb 的亏损程度也更高(Shinjo *et al.*, 1999; 马维林等, 2004)。Shinjo *et al.* (1999) 将两者的差异归因为俯冲板块深度、俯冲速度、俯冲角度、是否受台湾碰撞带影响等的差异,马维林等(2004)则认为其是源区地幔不均一和岩浆演化程度不同所致。

2 地幔源区特征

来自地幔的岩浆在上行穿过地壳的过程中同时经历同化混染和结晶分异作用(Pearce and Stern, 2006)。冲绳海槽是在陆壳的基础上拉张而形成的弧后盆地,虽然海槽区的陆壳已经发生了明显的减薄,但来自地幔的岩浆仍要穿过十几千米甚至更厚的地壳,不可避免地要受到壳源物质的混染。地壳物质的混染作用使得岩浆岩的地球化学特征,尤其是同位素组成发生明显地变化。在不考虑俯冲组分影响的情况下,由亏损型地幔产生的 MORB 型玄武岩若受到陆壳的混染会导致 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值增大,相应的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值将会降低,而且由于混染的不均一性,往往使得两个比值具有较大的变化范围。冲绳海槽玄武岩的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.703 686 ~ 0.704 795, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值的 变化范围为 0.512 709~0.512 908, 两者的变化范围均很小,与没有穿越陆壳的大洋中脊玄武岩的比值基本一致。在图 2 上,冲绳海槽玄武岩并不存在有与地壳混染相一致的演化趋势。因此,根据 Sr 和 Nd 同位素组成,笔者判断在冲绳海槽玄武质岩浆从岩浆源区上涌直到喷出海底的过程中并没有或极少经受过地壳物质混染作用的影响,这与 Shinjo *et al.* (1999) 分析的结果一致。

在西太平洋地区存在印度洋型和太平洋型全球两大地幔区域(Klein *et al.*, 1988; Pearce and Stern, 2006)。在西太平洋的 Mariana 海槽、Lau 海盆、North Fiji 海盆等弧后盆地之下的地幔均为印度洋型地幔,而 Havre 海槽和 Valu Fa 脊之下的地

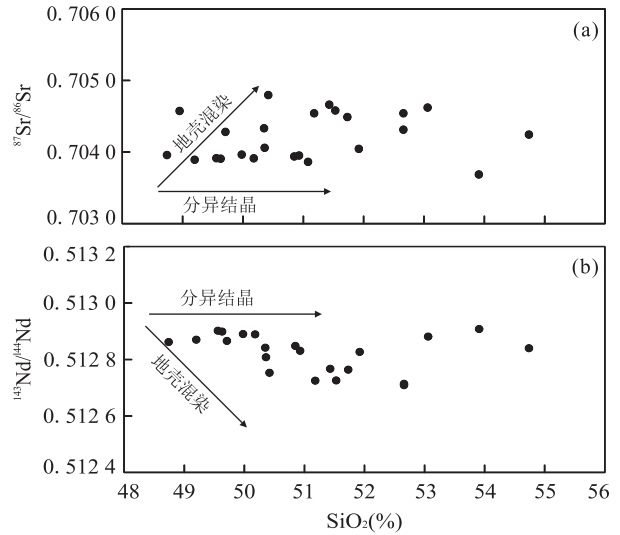


图 2 冲绳海槽玄武岩的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-SiO₂ (a) 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd-SiO₂ (b) 关系

Fig. 2 Relationships of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-SiO₂ (a) and ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd-SiO₂ (b) for basalts in the Okinawa Trough

幔则为太平洋型地幔(Pearce and Stern, 2006)。Tatsumoto and Nakamura (1991) 认为印度洋型的上地幔物质已经影响到西太平洋区域。Hickey-Vargas *et al.* (1995) 则认为在西太平洋弧后盆地扩张之前,印度与中国西藏的碰撞导致西太平洋之下印度洋型地幔的挤出。在 Pb 同位素特征图上二者可以被区分开来,相对于印度洋型地幔,太平洋型地幔具有更低的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 和 ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 比值(Pearce and Stern, 2006)。如图 3 所示,冲绳海槽—琉球岛弧体系火山岩 Pb 同位素组成特征,数据大多落在印度洋型地幔区域,表明冲绳海槽的岩浆源区地幔应该是印度洋型地幔(Yan and Shi, 2014)。

在俯冲带环境中,进入弧后区岩浆中的俯冲组分主要是俯冲迁移元素(例如 Rb、Ba、Sr、K、Th、U、LREE、Pb 等),不包括俯冲非迁移(或保守)元素(例如 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等),因此在探讨地幔的性质时,学者们通常选用俯冲非迁移元素(Pearce and Peate, 1995; Pearce *et al.*, 2005; Pearce and Stern, 2006)。元素的含量不仅与产生岩浆的地幔性质有关,而且会受到部分熔融、分离结晶、晶体堆积等作用的影响。因此,根据元素含量判断地幔性质有一定的局限性。在实际应用中,选定特定微量元素的比值来指示岩浆源区地幔的性质更为有效,在一定程度上其可以消除由部分熔融、分离结晶、晶体堆积等作用带来的影响。

Nb、Ta 和 Yb 均是在有流体参与的过程中表现

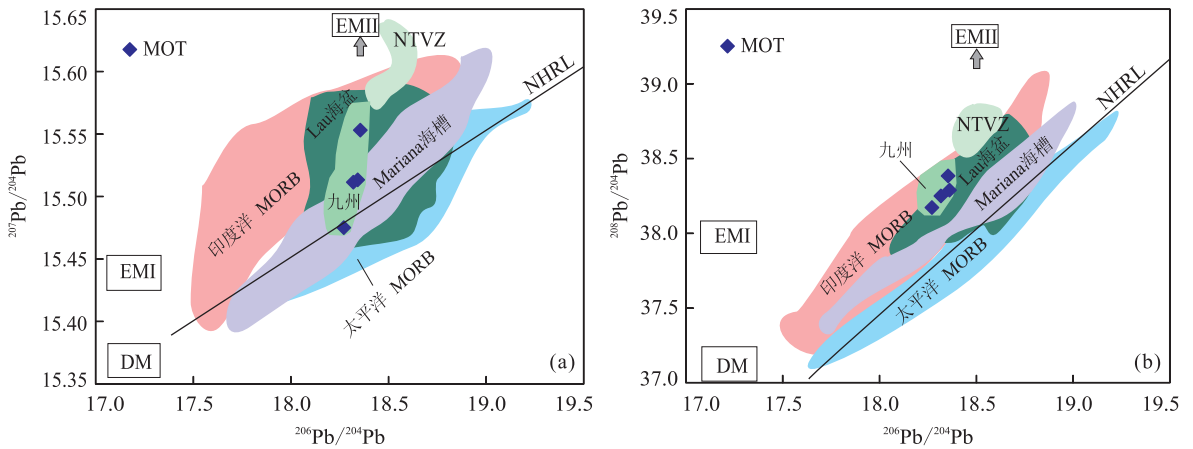


图 3 冲绳海槽玄武岩的²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (a)和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (b)关系

Fig. 3 Relationships of ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (a) and ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (b) for basalts in the Okinawa Trough NTVZ. 中国台湾北部火山带, 数据来自 Wang *et al.* (2004); NHRL. 北半球参考线; EMI. I 型富集地幔; EMIII. II 型富集地幔; DM. 亏损地幔; 九州的数据来自 Hoang and Uto(2006)

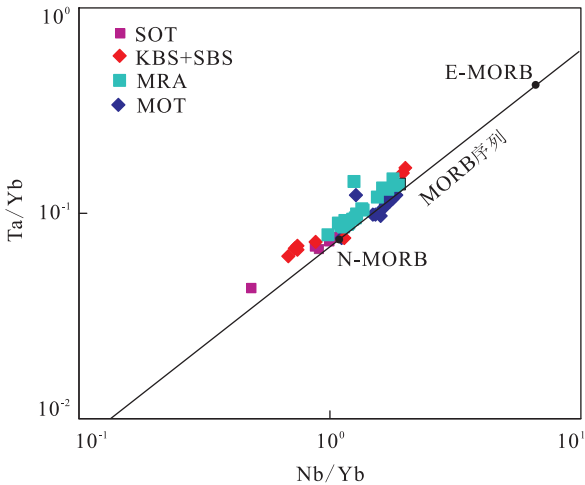


图 4 冲绳海槽及琉球岛弧和 KBS 和 SBS 样品的 Ta/Yb-Nb/Yb 关系

Fig. 4 The relationship of Ta/Yb-Nb/Yb for samples in Okinawa Trough and Ryukyu arc and KBS and SBS

保守的元素, 它们的比值(Nb/Yb 和 Ta/Yb)可以反映岩浆源区地幔的物质组成特征, 指示地幔的富集和亏损性, 比值越高代表地幔富集性越强, 反之代表地幔亏损. 在图 4 上, 冲绳海槽中部(MOT)和南部(SOT)、琉球岛弧(MRA)、KBS 和 SBS 样品的 Nb/Yb 比值和 Ta/Yb 比值均沿 MORB 序列分布, 且主要分布在 N-MORB 附近, 说明这 4 个区域的地幔均属于 N-MORB 亏损型地幔. 另外, 除个别样品外, 冲绳海槽中部样品的 Nb/Yb 比值和 Ta/Yb 比值与琉球岛弧样品相近, 且均高于海槽南部、KBS 和 SBS 样品, 这表明冲绳海槽中部和琉球岛弧岩浆源区的富集程度高于海槽南部、KBS 和 SBS 岩浆源区

的富集程度.

由于 Nb 属于强不相容性元素, 而 Yb 属于中等不相容性元素, 所以 Nb/Yb 比值除了反映岩浆源区的富集程度外, 还可以表征岩浆源区物质的熔融程度. 为了进一步了解海槽中部和南部玄武岩中 Nb/Yb 比值的差异是源于岩浆源区富集程度的差异, 还是源于熔融程度的不同, 笔者通过 Nb/Yb-Nb 判别图加以分析. 由于 Nb 的不相容性比 Yb 高得多, 同源岩浆不同程度熔融产生的熔体在 Nb/Yb-Nb 判别图上将形成一条直线. 如图 5 所示, 海槽中部玄武岩样品形成一条很好的直线, 样品之间的相

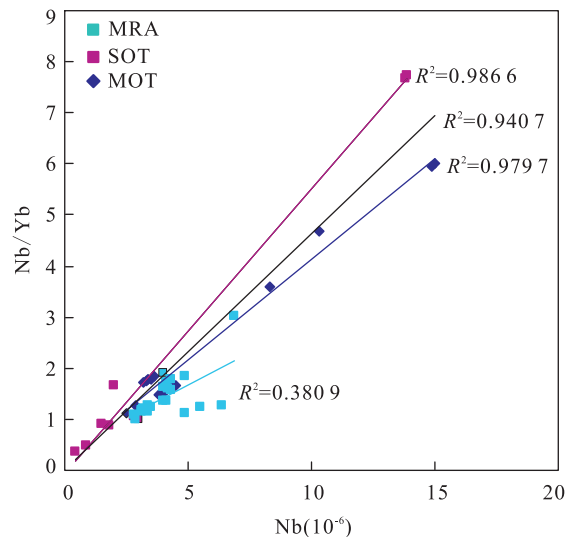


图 5 冲绳海槽玄武岩的 Nb/Yb-Nb 关系

Fig. 5 Relationships of Nb/Yb-Nb for basalts in the Okinawa Trough

关系数 $R^2=0.9797$, 南部玄武岩样品同样形成一条相关性极好 ($R^2=0.9866$) 的直线, 只是两条拟合线的斜率略有不同. 笔者对海槽中部和南部的所有玄武岩样品的数据共同拟合得到的曲线的相关系数仍高达 0.9407 . 相比之下, 琉球岛弧玄武岩样品之间不存在着类似的线性关系或相关性很弱 ($R^2=0.3809$), 其与海槽区玄武岩的演化趋势 (曲线斜率) 也不相同. 因此, 笔者认为冲绳海槽南部和中部玄武岩是同源岩浆不同程度熔融的产物, 而与琉球岛弧玄武岩并非来自同一岩浆源区. 图 4 和图 5 的分析结果表明, 冲绳海槽中部和南部玄武岩的岩浆源区成分变化不大, 二者可能主体上只是反映了熔融程度上的差异, 且南部地幔的熔融程度较中部要高.

3 岩浆源区地幔的熔融

俯冲板块的脱水去气作用可以大大降低地幔物质的熔点, 同时使得弧后盆地的扩张带与洋中脊环境明显不同. Pearce and Stern (2006) 利用 $(\text{Nb}/\text{Yb})_p\text{-Yb}_p$ 图解求出的不同构造环境下地幔的熔融程度为: MORB 型玻璃源于地幔 5%~15% 的熔融, 弧后盆地玄武岩玻璃则源于地幔 10%~20% 的熔融, 而岛弧熔岩和岛弧型弧后盆地熔岩反映的地幔熔融程度为 20%~33%. 如前所述, 冲绳海槽中部和南部的岩浆源区地幔的化学组成基本相同, Nb/Yb 和 Ta/Yb 所反映的中部和南部的差异可能是熔融程度不同所致.

熔岩中 Na_2O 和 FeO 含量可以用来分别指示产生岩浆的地幔熔融程度和熔融深度. Na 是强不相容性元素, 在地幔部分熔融过程中优先富集于熔体中, 早期或熔融程度较低的岩浆中 Na 的含量高. Fe 在深源岩浆中更加富集, Fe 的高含量在一定程度上反映岩浆来源深度较大 (于森等, 2013). 通常, 熔融程度低 (Na 值高) 的岩浆可能来源于相对浅 (Fe 值低) 的起始熔融深度 (Langmuir *et al.*, 1992). 由于岩浆在演化过程中其组分会受结晶分异作用的影响, 为消除结晶分异作用对岩浆成分的影响, 笔者将 Na_2O 和 FeO 含量数据校正到 $\text{MgO}=8\%$ 时的含量 (即 Na_8 和 Fe_8), 用来指示岩浆的熔融程度和熔融深度 (Taylor and Martinez, 2003). 从图 6 上可以看出, 冲绳海槽玄武岩与大洋中脊玄武岩的分布范围相差不大, 但缺少大洋中脊玄武岩样品之间的负相关趋势. 整体来看, 相对于 SOT 玄武岩, MOT 玄武岩具有较高的 Na_8 值和较低的 Fe_8 值, 表明中部岩

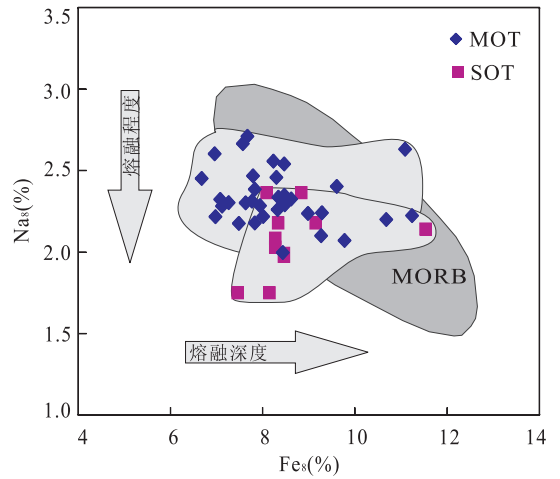


图 6 冲绳海槽玄武岩 $\text{Na}_8\text{-Fe}_8$ 关系

Fig. 6 Relationships of $\text{Na}_8\text{-Fe}_8$ for basalts in the Okinawa Trough

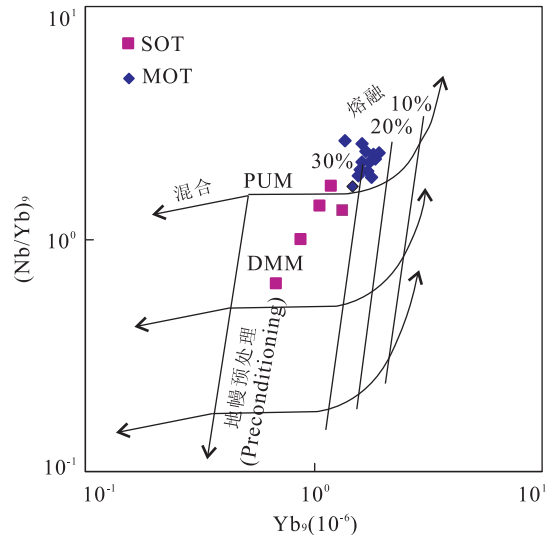


图 7 冲绳海槽玄武岩地幔熔融程度的 $(\text{Nb}/\text{Yb})_9\text{-Yb}_9$ 关系
Fig. 7 Relationships of $(\text{Nb}/\text{Yb})_9\text{-Yb}_9$ for degree of mantle melting of basalts in the Okinawa Trough

PUM, 原始上地幔; DMM, 亏损地幔

浆源区地幔较南部岩浆源区地幔熔融程度较低, 岩浆起始熔融深度也较浅. 马维林等 (2004) 利用 $\text{Ne}'\text{-Ol}'\text{-Q}'$ 三元图得出南部岩浆源区平均深度达 65 km, 而中部只有 27 km, 其结果与本文结果一致.

图 7 (将 Nb 和 Yb 数据校正到 $\text{MgO}=9\%$ 时的含量) 也可以很好地指示地幔的熔融程度 (Pearce and Parkinson, 1993). 冲绳海槽所有玄武岩样品所对应的地幔熔融程度均大于 20%, 明显大于成熟型弧后盆地玄武岩玻璃所指示的地幔熔融程度 (10%~20%; Pearce and Stern, 2006). 同时, 海槽中部玄武岩来自地幔 20%~30% 的熔融, 南部玄武

岩来自地幔大于 30% 的熔融,海槽南部地幔的熔融程度要高于海槽中部,这与前面根据其他指标分析的结果一致。

以上分析表明,导致冲绳海槽中部和南部玄武岩差异的原因是地幔熔融程度的差异。现有研究 (Stolper and Newman, 1994; Langmuir *et al.*, 2006; Kelley *et al.*, 2006) 表明,弧后区岩浆源区地幔的熔融程度与水含量成正相关,水主要是来自俯冲板片的脱水。由此笔者可以推断,造成冲绳海槽南部和中部地幔熔融程度差异的原因可能与板片俯冲过程中释放的含水流体通量差异有关。

4 俯冲板块的影响

俯冲板块组分(挥发性组分、洋壳物质和俯冲洋壳所驮载的沉积物)加入到了弧后盆地岩浆过程已为众多事实所证明 (Turner and Hawkesworth, 1997; 李怀明和翟世奎, 2008)。俯冲板块的脱水去气作用增加了地幔楔的部分熔融程度,同时部分微量元素(尤其是大离子亲石元素)随含水流体进入弧后盆地岩浆源区。上述过程导致弧后盆地玄武岩相对于大洋中脊玄武岩富含挥发性组分和大离子亲石元素。Honma *et al.* (1991) 分析得到冲绳海槽玄武岩中水的含量为 0.2%~0.43%,而 Yu *et al.* (2001) 测定的玄武岩包裹体中水的含量则高达 6%。另外,冲绳海槽玄武岩具有较高含量的 Al_2O_3 (>13%) 和稍低含量的 TiO_2 (大部分 <1.2%),且 Ba/Nb 和 Rb/Zr 比值明显高于

MORB。上述特征都说明冲绳海槽岩浆在形成过程中可能受到了含水流体组分的影响(罗文强, 2007)。

在给定的俯冲系统中,流体迁移元素与流体非迁移元素(或弱不相容元素)的比值经校正消除部分熔融和分离结晶影响后,可以指示俯冲组分的影响。浅俯冲(俯冲板块脱水释放流体)的贡献主要表现在低温活动性迁移元素(如 Ba、Rb、Sr 和 Pb)的富集,深俯冲(俯冲洋壳或其携带的沉积物熔融)的贡献则主要表现为低温活动性迁移元素和高温迁移元素(如 Th、LREE)的共同富集 (Pearce and Stern, 2006)。Ba 和 Th 的不相容性与 Nb 类似,但在有流体参与的地质作用过程中其表现得更为强烈。在板块俯冲过程中, Ba/Nb 和 Th/Nb 可以指示俯冲过程中流体带入地幔的影响。为了消除部分熔融和结晶分异作用的影响,笔者使用这些元素与 Yb 的比值, Nb/Yb 比值可以反映地幔源区的特征,而 Ba/Yb 和 Th/Yb 比值则可指示俯冲影响的程度。在图 8 上,富含俯冲组分的弧后玄武岩由于具有较高的 Ba 和 Th 含量,会投在 MORB 序列的上部区域。为进一步探讨冲绳海槽南部和中部玄武岩的区域性差异以及在垂直沟-弧-盆地体系方向上岩浆作用与板块俯冲之间的关系,笔者选取冲绳海槽、琉球岛弧及弧后的 KBS 和 SBS 地区玄武岩进行对比分析。MOT、SOT、MRA、KBS、SBS 的大部分样品均投在 MORB 序列的上部区域(图 8),表明它们均受到俯冲组分的影响。在 Nb/Yb 比值一定的情况下,琉球岛弧中部样品的 Ba/Yb 和 Th/Yb 比值明显高于冲

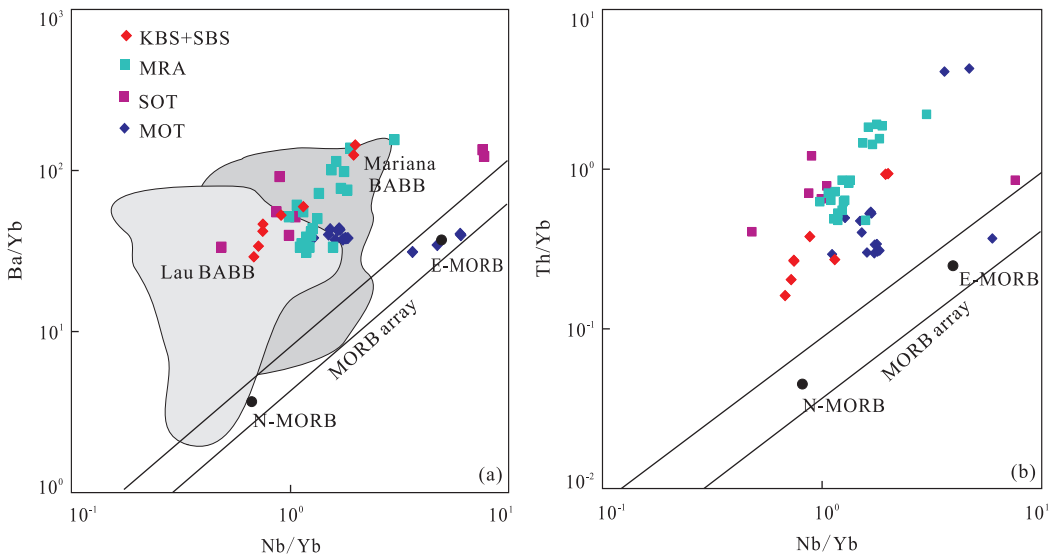


图 8 冲绳海槽玄武岩 $\text{Ba}/\text{Yb}-\text{Nb}/\text{Yb}$ (a) 和 $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Nb}/\text{Yb}$ (b) 关系

Fig. 8 Relationships of $\text{Ba}/\text{Yb}-\text{Nb}/\text{Yb}$ (a) and $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Nb}/\text{Yb}$ (b) for basalts in the Okinawa Trough

绳海槽中部样品,而海槽南部玄武岩的 Ba/Yb 和 Th/Yb 比值均高于 KBS 和 SBS 玄武岩,表现为离海沟距离越近的岩浆作用受俯冲作用影响越明显。再者,冲绳海槽南部玄武岩的 Ba/Yb 和 Th/Yb 比值高于中部玄武岩,这说明南部玄武岩受俯冲组分影响的程度较高。冲绳海槽南部的 2 个玄武岩样品和中部的 3 个样品均投在 E-MORB 区域附近,说明其原始岩浆可能来自于没有经过熔出陆壳组分的富集型原始地幔,或者来自有俯冲洋壳加入的熔融地幔(翟世奎和干晓群,1995)。

Th/Ta 比值的大小可以指示地幔岩浆是否受到板块深俯冲作用(俯冲洋壳或其携带的沉积物熔融组分的加入)的影响,对于未受深俯冲影响的 MORB,其比值接近于 1,受深俯冲作用影响的岩浆其 Th/Ta 比值将增大。在图 9 上,MORB 通常具有几近恒定的 Th/Ta 比值,而 Nb/Ta 比值具有一定的变化范围(Pearce and Stern, 2006)。冲绳海槽中部、南部、琉球岛弧中部、KBS 和 SBS 的大部分样品均落在 MORB 序列的上部,琉球岛弧中部和冲绳海槽南部样品的 Th/Ta 比值明显高于冲绳海槽中部、KBS 和 SBS 样品(图 9),与利用 Ba/Yb 和 Th/Yb 比值得出的结果一致。

结合图 1、图 8 和图 9 的分析,笔者可以判断,在俯冲板块深度相同的情况下,俯冲组分对玄武岩成分的影响程度相近,即 MRA 和 SOT 样品受俯冲影响的程度相近;MOT、KBS 及 SBS 样品受俯冲影响的程度相近(Ba/Yb、Th/Yb 和 Th/Ta 值相近)。MRA 和 SOT 样品站位之下的俯冲板块深度为 100~150 km(图 1),而 MOT、KBS 和 SBS 样品站位之下的俯冲板块深度大约是 200 km。根据俯冲带岩浆的成因模型,俯冲板片在适当的温度和压力下发生脱水去气(俯冲洋壳和其上的沉积物也可能发生部分熔融),超临界流体进入地幔楔,促使地幔熔融。随俯冲深度的增加,变质相由角闪岩相变为榴辉岩相,地幔楔熔融部位加深,熔融程度将会减小,俯冲释放的含水流体通量也相应降低,导致微量元素含量逐渐降低。因此,俯冲板块深度可能是影响冲绳海槽中部、南部以及邻区玄武岩所受俯冲作用影响程度不同的主要原因。不可否认,板块俯冲速度的区域性差异、俯冲方向和角度的不同、俯冲洋脊和台湾北部火山带碰撞等的影响也可能造成冲绳海槽岩浆作用的区域性差异,但是根据目前的地球化学资料笔者尚难以做出明确的判断。

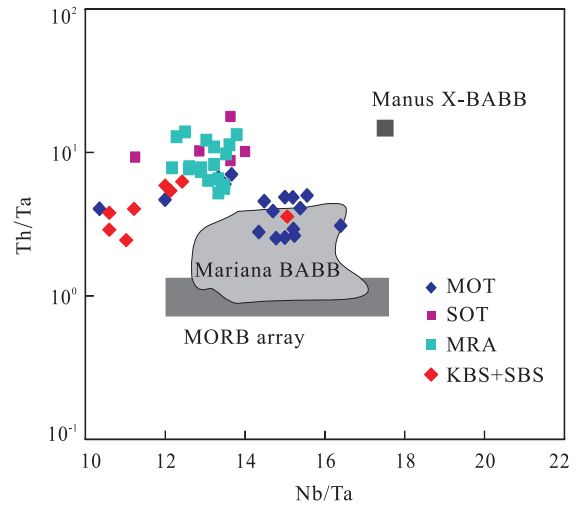


图 9 冲绳海槽玄武岩 Th/Ta-Nb/Ta 关系

Fig. 9 Relationships of Th/Ta-Nb/Ta for basalts in the Okinawa Trough

X-BABB, extreme-BABB, 指富集 LREE、P 和 Zr 的玄武岩,据 Sinton *et al.* (2003)

5 结论

(1) 冲绳海槽的源区地幔属于“印度洋型”地幔域。玄武质岩浆起源于 N-MORB 型的亏损地幔,海槽南部的地幔较中部的地幔表现为更加亏损型地幔,两者之间的差异可能是由地幔熔融程度差异所致,海槽南部地幔的熔融程度要高于海槽中部。

(2) 冲绳海槽玄武质岩浆在形成过程中受到了俯冲含水流体组分的影响,微量元素比值表明南部玄武岩浆受含水俯冲组分影响的程度高于中部。

(3) 玄武岩浆所受俯冲组分影响的程度差异可能与两个区域内岩石出露点之下的俯冲板块深度相关,俯冲板块深度相同时,所受俯冲组分影响的程度相近,而俯冲板块深度较浅时,所受俯冲组分影响程度较高。在海槽南部,俯冲过程中释放的较高含水流体通量导致该区地幔的熔融程度较高。

6 研究工作展望

尽管数十年以来前人对冲绳海槽岩浆作用已做了大量的调查研究,在冲绳海槽的地幔物质组成、岩浆的物质来源、岩浆形成演化过程、岩浆熔融的控制机制等方面取得了许多重要成果。但是,仍有许多科学问题没有解决或存在争议,笔者建议在今后的研究中注重以下几个方面。

(1) 基底岩石类型的甄别与分布。目前大部分研

究工作都是基于拖网获得的岩石样品,IODP 钻探也仅获得蚀变火山碎屑和浮岩砾块.要真正了解海槽区的地下结构和岩石学证据,必须在相对大的范围内获取基底岩石样品,并对其进行岩石类型的甄别与分布填图.

(2) 岩浆源区地幔的类型及特征. 冲绳海槽中部和其所处沟—弧—盆体系的 Pb 同位素特征表明冲绳海槽的地幔属于印度洋型地幔.但是 Pb 是强俯冲迁移元素,冲绳海槽玄武岩的 Pb 同位素组成易受到俯冲组分添加的影响,这在一定程度上掩盖了未受俯冲板块影响的地幔 Pb 同位素组成.除少量的 Sr、Nd 和 Pb 同位素数据外,笔者至今未见有关冲绳海槽玄武岩 Hf 或 U 系同位素资料的报道,目前仅有的同位素数据和微量元素数据相关性不理想,大多结论都带有推断或不确定性.因此,有待于更多岩石类型、更多的元素(微量与稀土元素)和同位素的分析资料,以确认岩浆源区地幔的类型及其主要特征.

(3) 板块俯冲对冲绳海槽岩浆作用的贡献及制约机制. 板块俯冲与弧后盆地岩浆作用之间存在着因果关系. 板块俯冲作用导致弧后地幔的次生对流,从而引起弧后扩张形成弧后盆地,俯冲板块的脱水去气作用促进了上覆地幔的熔融,同时有俯冲组分加入熔浆之中,导致地幔楔组分的变化.这些推论已经持续了几十年,至今仍缺乏直接的证据和定量的估算,人们对这种作用的机制还几乎一无所知.

(4) 冲绳海槽岩浆作用与海底热液活动的内在联系. 海底热液活动总是伴生岩浆作用,二者之间存在有密切的成因联系,主要表现在岩浆作用为热液活动提供了热(能)源.但是,弧后盆地富含挥发性组分(包括水)的岩浆是否不仅为热液活动提供了热源而且也有物质贡献(例如岩浆后期热液进入海底热液循环系统)至今尚无确切的定论.总之,目前人们对岩浆作用与热液活动之间的相互作用机制还不了解,更无法给出确切的定量估算.

致谢:两位匿名审稿专家对本文提出了建设性的意见和建议,笔者在此表示衷心的感谢!

References

Gao, J. Y., Zhang, T., Fang, Y. X., et al., 2008. Faulting, Magmatism and Crustal Oceanization of the Okinawa Trough. *Acta Oceanologica Sinica*, 30(5): 62—70 (in Chinese with English abstract).

Han, B., 2008. Geophysical Field and Deep Tectonic Features of East China Sea (Dissertation). Institute of Oceanology,

Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 47—62 (in Chinese with English abstract).

Herman, B. M., Anderson, R. N., Truchan, M., 1979. Extensional Tectonics in the Okinawa Trough: Convergent Margins. *Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins*, 29: 199—208.

Hickey-Vargas, R., Hergt, J. M., Spadea, P., 1995. The Indian Ocean-Type Isotopic Signature in Western Pacific Marginal Basins: Origin and Significance, in Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific. *Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific*, 175—197. doi:10.1029/GM088p0175.

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, ¹⁸O/¹⁶O, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 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., Hu, N. J., et al., 2006. The Sr-Nd Isotopic Characteristics and U-Series Age of Volcanic Rocks from Okinawa Trough. *Science in China (Ser. D)*, 36(4): 351—358 (in Chinese).

Ishikawa, M., Sato, H., Furokawa, M., et al., 1991. Report on DELP 1988 Cruises in the Middle Okinawa Trough, Part 6: Petrology of Volcanic Rocks. *Bulletin of Earthquake Research Institute of Tokyo*, 66(1): 151—177.

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. C., 1995. Ocean Drilling Program and Earth Science in China. Tongji University Press, Shanghai, 207—216 (in Chinese).

Kelley, K. A., Plank, T., Grove, T. L., et al., 2006. Mantle Melting as a Function of Water Content beneath Back-Arc Basins. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B9): B09208. doi:10.1029/2005JB003732

Kimura, M., Kaneoka, I., Kato, Y., et al., 1986. Report on DELP 1984 Cruise in the Okinawa Trough, Part V: Topography and Geology of the Central Grabens and Their Vicinity. *Bulletin of Earthquake Research Institute of Tokyo*, 61(2): 269—310.

Klein, E. M., Langmuir, C. H., Zindler, A., et al., 1988. Iso-

- tope Evidence of a Mantle Convection Boundary at the Australian-Antarctic Discordance. *Nature*, 333 (6174): 623—629. doi:10.1038/333623a0
- Langmuir, C. H., Klein, E. M., Plank, T., 1992. Petrological Systematics of Mid-Ocean Ridge Basalts; Constraints on Melt Generation Beneath Ocean Ridges. *Geophysical Monograph Series*, 20: 183—280. doi:10.1029/gm071p0183
- Langmuir, C. H., Bezos, A., Escrig S., et al., 2006. Chemical Systematics and Hydrous Melting of the Mantle in Back-Arc Basins, Back-Arc Spreading Systems; Geological, Biological, Chemical, and Physical Interactions. American Geophysical Union, San Francisco, 87—146.
- Letouzey, J., Kimura, M., 1985. Okinawa Trough Genesis: Structure and Evolution of a Backarc Basin Developed in a Continent. *Marine and Petroleum Geology*, 2 (2): 111—130. doi:10.1016/0264—8172(85)90002—9
- Li, H. M., Zhai, S. K., 2008. Advances and Developments in Study of the Magmatism in the Okinawa Trough. *Geological Review*, 54(1): 120—124 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. R., Yang, Z. S., Wang, Y. J., et al., 1997a. The Petrochemical Features of the Volcanic Rocks in Okinawa Trough and Their Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 13(4): 538—550 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. R., Yang, Z. S., Zhang, B. M., et al., 1997b. Study on the Olivine Tholeiite of the Southern Okinawa Trough. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 28(6): 665—672 (in Chinese with English abstract).
- Liang, R. C., Wang, S. G., Wu, J. L., 2001. Preliminary Study on Geophysical Field and the New Crust in the Middle of the Okinawa Trough. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(1): 57—64 (in Chinese with English abstract).
- Luo, W. Q., 2007. Influence of Subduction Component on Magma Genesis in Back Arc Basins; Take Example for the Mariana Trough and the Okinawa Trough (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao, 33—56 (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).
- Pearce, J. A., Parkinson, I. J., 1993. Trace Element Models for Mantle Melting; Application to Volcanic Arc Petrogenesis. *Geological Society, London, Special Publications*, 76(1): 373—403. doi:10.1144/gsl.sp.1993.076.01.19
- Pearce, J. A., Peate, D. W., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic Arc Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23 (1): 251—285. doi:10.1146/annurev. ea. 23. 050195. 001343
- 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): Q07006. doi:10.1029/2004gc000895
- Pearce, J. A., Stern, R. J., 2006. Origin of Back-Arc Basin Magmas; Trace Element and Isotope Perspectives. Back-Arc Spreading Systems; Geological, Biological, Chemical, and Physical Interactions. American Geophysical Union, San Francisco, 63—86.
- Seno, T., Stein, S., Gripp, A. E., 1993. A Model for the Motion of the Philippine Sea Plate Consistent with NUVEL-1 and Geological Data. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 98 (B10): 17941—17948. doi:10.1029/93jb00782
- Shinjo, R., 1998. Petrochemistry and Tectonic Significance of the Emerged Late Cenozoic Basalts Behind the Okinawa Troughs Ryukyu Arc System. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 80(1—2): 39—53. doi:10.1016/s0377—0273(97)00042—5
- Shinjo, R., Chung, S. L., Kato, Y., et al., 1999. 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. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 104 (B5): 10591—10608. doi:10.1029/1999jb900040
- Sibuet, J. C., Letouzey, J., Barbier, F., et al., 1987. Back Arc Extension in the Okinawa Trough. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 92 (B13): 14041—14063. doi:10.1029/jb092ib13p14041
- Sinton, J. M., Ford, L. L., Chappell, B., et al., 2003. Magma Genesis and Mantle Heterogeneity in the Manus Back-Arc Basin, Papua New Guinea. *Journal of Petrology*, 44(1): 159—195. doi:10.1093/petrology/44. 1. 159
- Stolper, E., Newman, S., 1994. The Role of Water in the Petrogenesis of Mariana Trough Magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 121 (3—4): 293—325. doi:10.1016/0012—821x(94)90074—4
- Tatsumoto, M., Nakamura, Y., 1991. DUPAL Anomaly in the Sea of Japan; Pb, Nd and Sr Isotopic Variations at the Eastern Eurasian Continental Margin. *Geochimical et Cosmochimica Acta*, 55 (12): 3697—3708. doi:10.1016/0016—7037(91)90068—g
- Taylor, B., Martinez, F., 2003. Back-Arc Basin Basalt Sys-

- tematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(3–4): 481–497. doi:10.1016/s0012-821x(03)00167-5
- Turner, S., Hawkesworth, C., 1997. Constraints on Flux Rates and Mantle Dynamics beneath Island Arcs from Tonga-Kermadec Lava Geochemistry. *Nature*, 389(6651): 568–573. doi:10.1038/39257
- Wang, K. L., Chung, S. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2004. Geochemical Constraints for the Genesis of Post-Collisional Magmatism and the Geodynamic Evolution of the Northern Taiwan Region. *Journal of Petrology*, 45(5): 975–1011. doi:10.1093/petrology/egh001
- Yan, Q. S., Shi, X. F., 2014. Petrologic Perspectives on Tectonic Evolution of a Nascent Basin (Okinawa Trough) Behind Ryukyu Arc: A Review. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(4): 1–12. doi:10.1007/s13131-014-0400-2
- Yu, M., Su, X., Tao, C. H., et al., 2013. Petrological and Geochemical Features of Basalts at 49.6°E and 50.5°E Hydrothermal Fields along the Southwest Indian Ridge. *Geoscience*, 27(3): 497–508 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z. H., Zhai, S. K., 2004. Three-Component Mixing Model of the Magma Source in the Okinawa Trough. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24(3): 129–133 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z. H., Zhai, S. K., Li, X. Z., 2001. Glass Inclusions in Volcanic Rocks in the Okinawa Trough Back-Arc Basin: Constraints on Magma Genesis and Evolution. *Acta Oceanologica Sinica*, 20(3): 383–390.
- 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., Chen, L. R., Shen, S. X., et al., 1994. Evolution of Magmatic Activity in the Early Spreading of the Okinawa Trough. *Acta Oceanologica Sinica*, 16(3): 61–73 (in Chinese).
- Zhai, S. K., Chen, L. R., Zhang, H. Q., 2001. Magmatism and Submarine Hydrothermal Activity in Okinawa Trough. China Ocean Press, Beijing, 1–3 (in Chinese).
- 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).
- Zhang, M. S., 1982. Knowledge for the Second Voyage Geological Survey in Okinawa Trough. *Marine Geology Research*, 2(1): 84–85 (in Chinese).
- Zhao, J. H., Tang, J., Wang, S. J., 2003. Structural Evolution of Cenozoic of the Okinawa Trough. *Offshore Oil*, 23(3): 1–9 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 高金耀, 张涛, 方银霞, 等, 2008. 冲绳海槽断裂、岩浆构造活动和洋壳化进程. *海洋学报*, 30(5): 62–70.
- 韩波, 2008. 东海地球物理场及深部地质构造研究 (博士学位论文). 青岛: 中国科学院研究生院 (海洋研究所), 47–62.
- 黄朋, 李安春, 胡宁静, 等, 2006. 冲绳海槽火山岩 Sr-Nd 同位素特征及 U 系年龄. *中国科学 (D 辑)*, 36(4): 351–358.
- 金性春, 1995. 大洋钻探与中国地球科学. 上海: 同济大学出版社, 207–216.
- 李怀明, 翟世奎, 2008. 冲绳海槽岩浆活动研究进展及思考. *地质评论*, 54(1): 120–124.
- 李巍然, 杨作升, 王永吉, 等, 1997a. 冲绳海槽火山岩岩石化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 13(4): 538–550.
- 李巍然, 杨作升, 张保民, 等, 1997b. 冲绳海槽南部橄榄拉斑玄武岩研究. *海洋与湖沼*, 28(6): 665–672.
- 梁瑞才, 王述功, 吴金龙, 2001. 冲绳海槽中段地球物理场及其对新生洋壳的认识. *海洋地质与第四纪地质*, 21(1): 57–64.
- 罗文强, 2007. 俯冲组对弧后盆地岩浆作用的影响——以马利亚纳和冲绳海槽为例 (硕士学位论文). 青岛: 中国海洋大学, 33–56.
- 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.
- 于淼, 苏新, 陶春辉, 等, 2013. 西南印度洋中脊 49.6°E 和 50.5°E 区玄武岩岩石学及元素地球化学特征. *现代地质*, 27(3): 497–508.
- 于慧慧, 翟世奎, 2004. 冲绳海槽岩浆源的三分量混合模型. *海洋地质与第四纪地质*, 24(3): 129–133.
- 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, 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, 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, 1–3.
- 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.
- 张明书, 1982. 冲绳海槽第二航次地质调查新知. *海洋地质研究*, 2(1): 84–85.
- 赵金海, 唐建, 王舜杰, 2003. 冲绳海槽新生代构造演化讨论. *海洋石油*, 23(3): 1–9.