

南海玄武岩: 扩张洋脊与海山

黄小龙, 徐义刚, 杨帆

中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

摘要 南海存在两种火山岩: 洋中脊玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB)。国际大洋发现计划(IODP)第349、367、368、368X航次在南海海盆的成功钻取, 获得了南海初始扩张(~34 Ma)和停止扩张(~15—16 Ma)前的洋壳样品。南海东部、西南次海盆及北缘洋-陆过渡带代表海盆发展的不同阶段, 具有不同的地幔潜能温度、物质组成和洋脊扩张速度, 因此产生的洋中脊玄武岩成分差异显著。南海地区在扩张晚期及停止扩张之后存在大规模地幔上涌, 与其周缘地区的持续俯冲有关, 产出的海山OIB不同于地幔柱活动产生的火山链。南海虽小, 但蕴含的信息异常丰富, 是窥探地球深部难得的天然窗口。

关键词 洋中脊玄武岩; 洋岛玄武岩; 地幔源区; 南海

南海产有两种类型的火山岩, 即洋中脊玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB), 形成的原因不同。洋中脊(mid-ocean ridge), 又称洋脊、大洋中脊、中央海岭, 是位于全球海洋板块之间发育的一系列火山结构系统, 浅部地幔热对流在洋脊中央上升减压熔融产生地幔岩浆, 并在此涌出, 快速冷却为洋中脊玄武岩(MORB), 形成新的海洋地壳(洋壳), 因而洋中脊是新洋壳的出生地(图1(a)), 长期持续扩张形成大洋。地幔深部存在热异常时(如地幔柱), 地幔发生熔融产生岩浆并在大洋板块内部喷发形成海底火山, 被称为海山(图1(a)), 其主要组成为洋岛玄武岩(OIB)。OIB与洋盆的扩张没有直接的联系, 是深部地幔物质上升减压熔融的结果。OIB和MORB的来源深度范围、熔融温度及熔融程

度明显不同(图1(b)), 因而显示出不同的成份特征, 尤其在微量元素组成样式上差异显著(图1(c))。

1 南海洋中脊玄武岩和南海的扩张时限

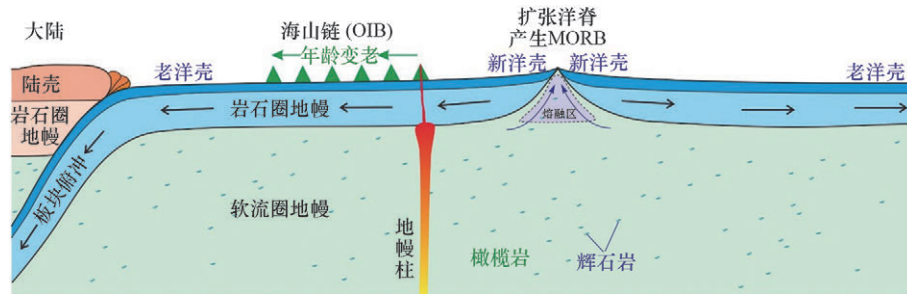
虽然南海在地形地貌上具有明显的海盆结构特征, 但由于巨厚沉积物和海水覆盖, 长期以来无法获取南海海盆的洋壳玄武岩样品, 有关南海是否存在洋壳的基本科学问题直至2014年IODP第349航次的实施才得以真正解决, 该航次在海盆中央残余洋脊邻近位置钻取到洋中脊玄武岩, 之后2017年IODP第367、368航次和2018年368X航次在海

收稿日期: 2020-04-15; 修回日期: 2020-06-23

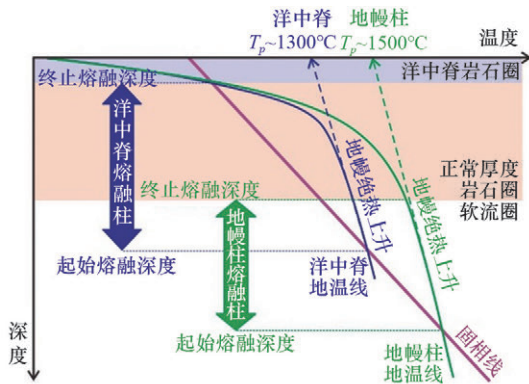
基金项目: 国家自然科学基金项目(41625007, 41890812); 国家海洋局国际合作专项(GASI-GEOGE-02)

作者简介: 黄小龙, 研究员, 研究方向为岩石圈组成、结构和演化及其动力学机制, 电子信箱: xlhuang@gig.ac.cn

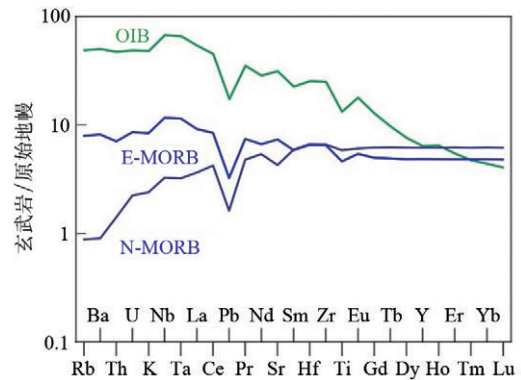
引用格式: 黄小龙, 徐义刚, 杨帆. 南海玄武岩: 扩张洋脊与海山[J]. 科技导报, 2020, 38(18): 46-51; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.18.007



(a) 扩张洋脊、地幔柱与海山链示意



(b) 洋中脊与地幔柱的地幔熔融柱模型



(c) 洋中脊玄武岩(N-MORB、E-MORB)和洋岛玄武岩(OIB)的微量元素蛛网图

图1 扩张洋脊、地幔柱及其相关岩浆活动

盆北部边缘洋-陆过渡带位置均钻取到了洋中脊玄武岩(图2(b))。

新洋壳的形成必然推挤老洋壳向洋脊的两侧迁移,因此,从洋脊扩张中心往两侧扩张方向洋壳年龄逐渐变老(图1(a))。IODP第349航次的U1431E、U1433B、U1434A钻孔接近于南海海盆中心的残余洋脊位置(图2),因而所获样品代表了南海扩张结束之前喷发的洋中脊玄武岩,而第367、368和368X航次U1500B、U1502B和U1503A钻孔则位于南海海盆北缘的洋-陆过渡带(图2),所获样品则代表了南海初始扩张时的洋中脊玄武岩。洋中脊玄武岩的³⁹Ar/⁴⁰Ar同位素定年结果表明,东部次海盆和西南次海盆海底扩张的结束时间分别为~15 Ma(百万年前)和~16 Ma^[1],23.6 Ma时东部次海盆发生一次向南的洋中脊跃迁,与此同时西南次海盆开始扩张^[2-3],而通过大洋钻探岩芯和深拖磁异常的综合分析得出的南海东北部的初始扩张

时间为~32—34 Ma^[2]。由此限定南海的扩张时限为34—15 Ma。

从新洋脊扩张中心向两侧扩张过程中,洋壳逐渐变冷、变重,当与相邻块体的密度差较大时可能发生板块俯冲作用,即密度大的洋壳及其岩石圈地幔下沉到密度小的邻近块体(如大陆)之下(图1(a)),并可能产生岛弧岩浆作用。同时,俯冲洋壳因变质作用,密度进一步变大,将拖曳整个洋壳向地幔运动并使得洋中脊被动扩张,从而又促进洋中脊下方的软流圈地幔被动上涌并减压熔融,继续形成新的玄武质洋壳。在南海海盆的北部边缘和南部边缘并未发生与洋脊扩张方向一致的板块俯冲作用,很可能是因为南海的扩张历史太短、形成时间较新,并且南北向的构造挤压还不足以导致南海洋壳的下沉俯冲。但是,在南海海盆东部发生了垂直洋脊扩张方向的俯冲作用,即南海海盆俯冲消减到吕宋岛弧之下(图2(b)),起始俯冲的时间(~11

Ma^[4])明显晚于南海扩张停止时间(~15 Ma^[1]),表明该俯冲作用并非南海洋脊扩张过程中老洋壳变冷变重所导致的,而主要与周缘的板块(如太平洋板块和菲律宾海板块;图2(a))作用力相关。根据地球物理探测以及模拟计算结果,已俯冲消减的南海海盆大小超过了目前残留海盆的面积^[5]。

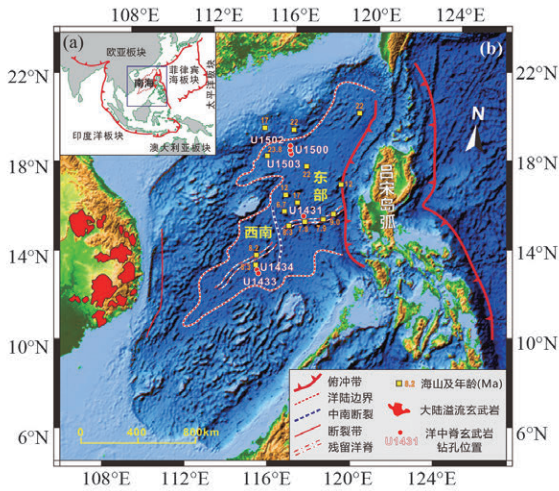
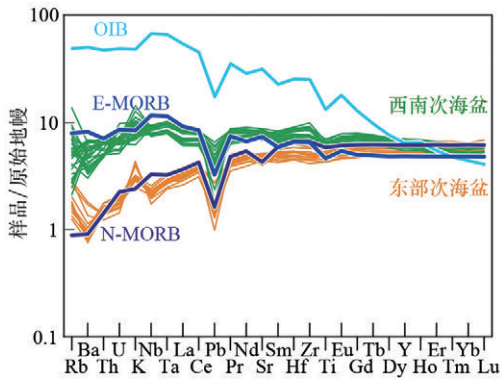
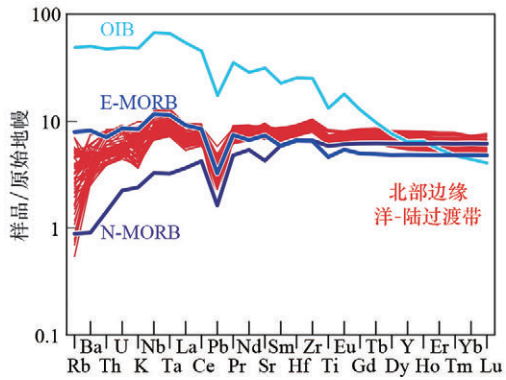


图2 南海洋中脊玄武岩钻孔位置及其海山年龄分布



(a)



(b)

图3 南海海盆洋中脊玄武岩代表性样品微量元素蛛网

2.2 导致南海洋中脊玄武岩成分不同的原因

洋中脊玄武岩的成分变化受控于岩浆源区、地幔潜能温度以及洋脊扩张速率。

1) 地幔源区组成差异。

上地幔主要由橄榄岩组成,但由于板块俯冲或者大陆下地壳拆沉,一些地壳物质组分(洋壳、陆壳、沉积物)进入地幔,经历一系列反应过程后,这

2 南海洋中脊玄武岩的时空变化特征及原因

2.1 南海洋中脊玄武岩的成分变化

南海虽小,存活时间也较短,但其成分却非常不均一,显示出巨大的时空差异。

1) 东部次海盆:主要为橄榄玄武岩,微量元素组成显示其主要为亏损型洋中脊玄武岩(N-MORB),少量为富集型洋中脊玄武岩(E-MORB;图3(a));Sr-Nd-Hf-Pb同位素组成显示印度洋型地幔域特征,并具有地幔柱的成分信息^[6]。

2) 西南次海盆:主要为斜斑玄武岩,微量元素成分显示为E-MORB(图3(a));Sr-Nd-Hf-Pb同位素组成显示印度洋型地幔域特征,并具少量大陆下地壳的成分信息^[6]。

3) 北部边缘洋-陆过渡带:主要为斜斑玄武岩,少量为橄榄玄武岩,微量元素成分总体显示为E-MORB,但部分显示出N-MORB和E-MORB之间的过渡成分(图3(b));Nd-Hf同位素组成比西南次海盆更为亏损。

些再循环物质主要以辉石岩、榴辉岩或者挥发份等富集组分的形式存在于地幔中(图1(a))。东南亚地区自新生代以来受到西侧印度洋板块、南侧澳大利亚板块和东侧菲律宾板块的俯冲作用,并伴随着太平洋板块俯冲作用的远程效应影响,构成了东南亚环形俯冲系统(图2(a)、图4)。长期的板块俯冲作用,已使得南海地区地幔深部汇聚了大量的再循

环组分(图4)。由于辉石岩等富集组分相对于橄榄岩具有更低的熔点(易熔),因此具有不同再循环组分的地幔发生部分熔融时将有不同的熔融温度和熔融深度(图1(b)),由此产生不同成分的玄武质岩浆。南海东部、西部次海盆以及北缘的洋-陆过渡带具有不同的地幔演化历史,因而其地幔源区中的再循环组分不同,在一定程度上导致所形成的洋壳成分差异明显。总体上,东部次海盆经历了更长时间的洋脊扩张,地幔中的再循环组分以再循环洋壳为主,西南次海盆经历了较短时间的洋脊扩张,其地幔中的再循环组分包括再循环洋壳和少量大陆下地壳,而北缘洋-陆过渡带处于南海初始打开的阶段,其地幔中的再循环组分多为大陆下地壳并继承更多大陆岩石圈的特征,因而它们所产生的洋中脊玄武岩的Sr-Nd-Hf-Pb同位素组成存在明显差异^[6]。

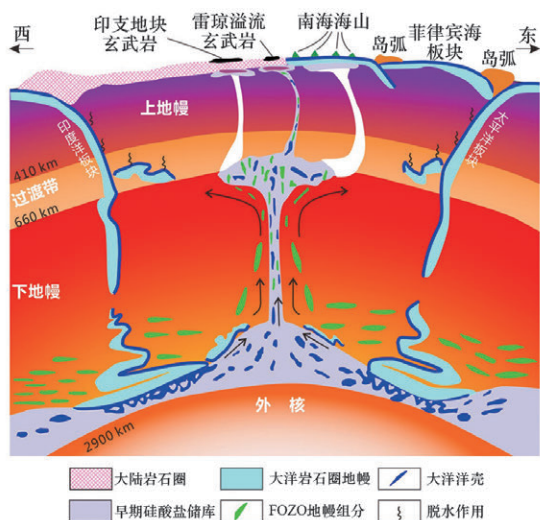


图4 南海及周边地区板块俯冲作用与地幔柱活动模型
(修改自文献[7])

2) 地幔潜能温度与洋脊扩张速率差异。

相对较高的地幔潜能温度会导致地幔熔融区域增大,从而加大地幔熔融程度及改变岩浆作用过程。因此,地幔潜能温度显著地影响着所产生岩浆的成分(图1(b-c))。东部、西南次海盆以及南海北缘洋-陆过渡带的洋中脊玄武岩在主、微量元素组成特征上的差异反映了它们的源区深度和熔融程度不同。

东部次海盆的洋中脊玄武岩具有相对低Si、高Mg和Ni的特征,主要为N-MORB的微量元素特征,反映其岩浆来源于熔融深度相对较浅、具有较大熔融程度的地幔源区,相应于较高岩浆产出率的快速扩张洋脊。另外,东部次海盆洋中脊玄武岩的原始橄榄石结晶温度明显高于其他正常的洋中脊玄武岩,表明南海海盆在洋脊扩张停止(~16 Ma)前的地幔潜能温度高于正常洋中脊,支持了南海地区在扩张期末存在地幔柱-洋中脊相互作用^[8]。

西南次海盆和南海北缘洋-陆过渡带的洋中脊玄武岩中没有发现高温橄榄石。西南次海盆的MORB相对高Si、低Mg和Ni,均为E-MORB,反映其岩浆来源于相对较深并且较小熔融程度的地幔源区,相应于岩浆产出率较低的相对慢速扩张洋脊^[9]。西南次海盆和南海北缘洋-陆过渡带的MORB主要为斜斑玄武岩,与全球慢速扩张洋脊普遍观察到斜斑玄武岩的特征一致,再次说明它们可能都具有相对较低的扩张速度。

3 南海海山玄武岩与“新型”地幔柱活动

大洋地幔热异常有时与起源于核-幔边界的地幔柱活动有关。地幔柱具有异常高温,其上升过程会产生一个巨大的柱头和细长的柱尾,柱头发生大程度熔融产生大规模岩浆喷发,形成大洋高原,而柱尾导致的岩浆活动范围较小,产生海山。因为地幔柱的位置相对不动,早先喷发形成的海山将随着大洋板块向洋脊扩张方向运移,若热点持续时间较长,将产生一系列海山随着洋脊扩张方向有规律地排列,构成海山链。由地幔柱产生的火山链最重要的一个特点是海山的年龄从热点向着板块运动方向逐渐变老(图1(a)),成分上为典型的OIB,具有高温岩浆的高MgO特征。

在南海海盆内的海山显示出一定的空间展布规律(图2(b)),如主要沿西南次海盆和中央海盆残余洋脊的方向排列,少数沿着洋脊扩张方向排列,它们的地球化学特征显示出典型的OIB特征^[10]。根据³⁹Ar/⁴⁰Ar同位素定年结果,南海沿残余

洋脊方向分布的海山主要形成于~8 Ma,少数位于海盆北部的海山形成于南海扩张期,目前测得的最老海山位于海盆北缘(年龄为 23.8 Ma;图 2(b)),并未展现出类似于热点作用的火山链的时空分布特征。因此,南海海盆的海山应主要沿着残余洋脊等构造薄弱带形成的板内岩浆活动,与地幔柱活动产生的火山链具有本质的区别。另外,与东部次海盆相比,西南次海盆的板内岩浆作用较弱,沿残余洋脊发育的海山仅在与东部次海盆衔接处大量发育,向西南逐渐减少(图 2(b))。已有的资料暗示地幔上涌可能由环形俯冲带引起(图 4),代表了一种“新型”地幔柱。

实际上,南海海盆内的板内岩浆活动规模巨大,根据南海北部 45 座海山计算出平均每座海山的体积达 54.1 km^3 ,这些海山总的岩浆喷出体积达 2436 km^3 ^[11];除了喷出地表形成海山外,近期地球物理探测发现南海北缘存在大量未喷出地表的岩浆,它们侵入下地壳底部或者停留在中上地壳,推测可能发生在南海扩张之前或者扩张期间^[12]。除了在南海海盆内部,其周边地区(海南、雷州半岛、北部湾、中南半岛等)也分布大量 OIB 型板内玄武质岩浆活动(图 2(b)),具有较高的地幔潜能温度($T_p > 1500^\circ\text{C}$ ^[13]),形成时代主要为 $< 15 \text{ Ma}$ ^[14],为南海海盆扩张停止之后产生,因而被认为是海南地幔柱作用的结果^[10,13-14]。但目前仍没有证据显示南海海盆的初始打开与地幔柱活动有直接的成因联系。

4 结论

现有资料显示,东部次海盆、西南次海盆以及南海北缘洋-陆过渡带代表了南海海盆发展演化的不同阶段,具有不同的地幔潜能温度和地幔源区物质组成,经历的洋脊扩张速率也不一样,因而最终产物—洋中脊玄武岩的成分千差万别。

一个共同点是南海上地幔中存在大量再循环洋壳,与南海海盆的异常水深相吻合,说明这一地区地幔异常重(作者未发表资料)。这些特点的形成与南海周缘地区板块的持续俯冲作用是分不开的,也可能是“新型”大规模地幔上涌的潜在动力学

因素^[15]。

简言之,南海虽小,但隐含的科学内涵却极其丰富,是探究地球深部奥秘的不可多得的窗口。

参考文献(References)

- [1] Koppers A A P. On the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of low-Potassium ocean crust basalt from IODP Expedition 349, South China Sea[C]//AGU Fall Meeting Abstract, 2014.
- [2] Li C F, Xu X, Lin J, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15(12): 4958–4983.
- [3] Ding W, Sun Z, Dadd K, et al. Structures within the oceanic crust of the central South China Sea basin and their implications for oceanic accretionary processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 488: 115–125.
- [4] Liu H Q, Yumul Jr G P, Dimalanta C B, et al. Western Northern Luzon isotopic evidence of transition from Proto-South China Sea to South China Sea fossil ridge subduction[J]. *Tectonics*, 2020, 39(2): e2019TC005639.
- [5] Wu J, Suppe J, Lu R, et al. Philippine Sea and East Asian plate tectonics since 52 Ma constrained by new subducted slab reconstruction methods[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(6): 4670–4741.
- [6] Zhang G L, Luo Q, Zhao J, et al. Geochemical nature of sub-ridge mantle and opening dynamics of the South China Sea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 489: 145–155.
- [7] Wang X C, Li Z X, Li X H, et al. Coexistence of an ancient mantle reservoir and young recycled materials in the source region of a young mantle plume: Implications for potential linkage between plume and plate tectonics [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 377–378: 248–259.
- [8] Yang F, Huang X L, Xu Y G, et al. Plume-ridge interaction in the South China Sea: Thermometric evidence from Hole U1431E of IODP Expedition 349[J]. *Lithos*, 2019, 324–325: 466–478.
- [9] Yang F, Huang X L, Xu Y G, et al. Magmatic processes associated with oceanic crustal accretion at slow-spreading ridges: Evidence from plagioclases in mid-ocean ridge basalts at the South China Sea[J]. *Journal of Petrology*, 2019, 60: 1135–1162.
- [10] Yan Q, Shi X, Metcalfe I, et al. Hainan mantle plume

- produced late Cenozoic basaltic rocks in Thailand, Southeast Asia[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2640.
- [11] Fan C, Xia S, Zhao F, et al. New insights into the magmatism in the northern margin of the South China Sea: Spatial features and volume of intraplate seamounts[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(6): 2216–2239.
- [12] Sun Z, Lin J, Qiu N, et al. The role of magmatism in thinning and breakup of the South China Sea continental margin[J]. *National Science Review*, 2019, 6(5): 871–876.
- [13] Wang X C, Li Z X, Li X H, et al. Temperature, pressure, and composition of the mantle source region of Late Cenozoic basalts in Hainan Island, SE Asia: A consequence of a young thermal mantle plume close to subduction zones?[J] *Journal of Petrology*, 2012, 53: 177–233.
- [14] Xu YG, Wei J X, Qiu H N, et al. Opening and evolution of the South China Sea constrained by studies on volcanic rocks: Preliminary results and a research design[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57: 3150–3164.
- [15] Lin J, Xu Y, Sun Z, et al. Mantle upwelling beneath the South China Sea and links to surrounding subduction systems[J]. *National Science Review*, 2019, 6(5): 877–881.

Basalts in the South China Sea: Mid-ocean ridges and seamounts

HUANG Xiaolong, XU Yigang, YANG Fan

State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract There are two types of volcanic rocks in the South China Sea (SCS): the mid-ocean ridge basalts (MORB) and the ocean island basalts (OIB). The International Ocean Discovery Program (IODP) Expeditions 349, 367, 368 and 368x have successfully drilled out the basement of the SCS basin, for the first time, with samples of the oceanic crust during the initial opening (~34 Ma) and the final spreading (~15–16 Ma) of the SCS. The East Subbasin, the Southwest Subbasin and the continent-ocean transition (COT) zone in the northern margin of the SCS represent different evolution stages of the basin. Due to the differences of the mantle evolution, the mantle potential temperature and the recycled materials in the mantle sources, the MORBs generated at the mid-ocean ridges with different spreading rates show distinct compositions. The large-scale mantle upwelling beneath the SCS during the post-spreading, probably induced by the continuous subduction in the surrounding area, has produced the seamounts at the fossil ridges in the SCS, unlike the volcano chain generated by the mantle plumes. Although the SCS is a small marginal sea, it has recorded incredibly abundant information and thus provides a rare window for probing the deep earth.

Keywords mid-ocean ridge basalts; ocean island basalts; mantle source; South China Sea ●



(责任编辑 祝叶华)