



西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究

孙国洪, 田丽艳, 李小虎, 张汉羽, 陈凌轩, 刘红玲

A review of studies on the magmatism at Southwest Indian Ridge from petrological and geochemical perspectives

SUN Guohong, TIAN Liyan, LI Xiaohu, ZHANG Hanyu, CHEN Lingxuan, and LIU Hongling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021021701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西南印度洋中脊扩张轴部(34.9° S)西翼沉积物地球化学分析及物源探讨

Geochemistry and provenance of the sediment from the west flank of the spreading southwest Indian Oceanic Ridge (34.9° S)

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(5): 14

西南印度洋脊龙热液场金属硫化物的矿物学组成及指示意义

Mineralogical composition and its significance of hydrothermal sulfides from the Longqi hydrothermal field on the Southwest Indian Ridge

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(4): 179

东北印度洋85° E海脊的性质和起源: 综述和新认识

Tectonic structure and origin of the 85° E ridge, Northeastern Indian Ocean: A review and new observations

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 1

西北印度洋天休热液区热液成因矿物特征与分布及其指示意义

Characteristics, distribution and implication of hydrothermal minerals in Tianxiu Hydrothermal Field, Carlsberg Ridge, northwest Indian Ocean

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 36

西太平洋-北印度洋及其洋陆过渡带: 古今演变与论争

West Pacific and North Indian Oceans and Their Ocean-continent Connection Zones: Evolution and Debates

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(4): 1

金在洋脊超镁铁质与镁铁质热液系统中的差异性聚集

Differential deposition of gold in mafic-hosted and ultramafic-hosted hydrothermal systems on the mid-ocean ridge

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 126



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021021701

西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究

孙国洪^{1,2}, 田丽艳¹, 李小虎³, 张汉羽¹, 陈凌轩^{1,2}, 刘红玲^{1,2}

1. 中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 自然资源部海底科学重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

摘要: 作为超慢速扩张脊的代表, 西南印度洋中脊 (SWIR) 因其独一无二的地形地貌特征、洋壳结构、洋壳增生机制、岩浆和热液活动以及深部动力学过程, 近 30 年来成为国内外研究的热点区域。基于近年来对 SWIR 玄武岩、辉长岩及橄辉岩的岩石学和地球化学研究成果总结, 重点探讨了沿 SWIR 轴向 (大尺度) 以及单个洋脊分段 (小尺度) 的岩石地球化学变化特征及其影响因素, 阐述了 SWIR 的岩浆供应及洋壳增生模式。其中, 在 9°~16°E 斜向扩张脊, 以构造作用为主的洋脊扩张模式导致了更宽的洋壳增生带和显著的地球化学异常; 而在 50°~51°E 脊段, 发育了强烈的火山活动, 其成因机制包括克洛泽热点与洋中脊相互作用、微热点、古老熔融事件的残留地幔再熔融等几种观点。此外, 西南印度洋中脊龙旗热液区 (~49.7°E) 的最新研究表明, 其热液循环路径与折离断层的发育密不可分, 热液流体循环最深可达莫霍面以下 6 km。因此, 在今后的一段时间, 应进一步加强 SWIR 不同空间尺度地幔源区性质、洋中脊构造与岩浆作用过程、热点-洋中脊相互作用和岩浆-热液活动与成矿等主要科学问题的研究。

关键词: 超慢速扩张脊; 岩石地球化学; 岩浆作用; 热液活动; 西南印度洋中脊

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

A review of studies on the magmatism at Southwest Indian Ridge from petrological and geochemical perspectives

SUN Guohong^{1,2}, TIAN Liyan¹, LI Xiaohu³, ZHANG Hanyu¹, CHEN Lingxuan^{1,2}, LIU Hongling^{1,2}

1. Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Key Laboratory of Submarine Science, Ministry of Natural Resources, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

Abstract: The Southwest Indian Ridge (SWIR), as an ultraslow spreading ridge, has attracted great attentions from the geo-society of the world in the past three decades due to its unique morphology, crustal architecture, crustal accretion mode, volcanism, hydrothermal activities and deep mantle processes. This paper is devoted to the recent research progress on the petrology and geochemistry of basalt, gabbro and mantle peridotite collected from the SWIR. The geochemical data well revealed the variations of the whole ridge and ridge segments. Based on the data mentioned above, we described and discussed the main factors, which control the geochemical variations, magma supply and crustal accretion. In the oblique spreading ridge segment of 9°~16°E, the tectonics-dominated ocean ridge spreading patterns resulted in the wider oceanic crust accretion zone with significant geochemical anomalies; in the 50°~51°E ridge segment, strong volcanic activities occur, and its genetic mechanism includes different points of view, such as the interaction between the Crozet hotspot and SWIR, the micro hotspot, and the remelting of the residual mantle left behind by the former melting events. The latest research about the Longqi hydrothermal area (~49.7°E) suggests that the hydrothermal circulation is closely related to the development of detachment faults, and the maximum depth of hydrothermal circulation may reach 6 km below the Moho boundary. Therefore, it is suggested that the future study be strengthened in such issues as the mantle heterogeneity in different spatial scales, the tectonic-magmatic processes in the ridge system, ridge-plume interaction, and the seafloor hydrothermal activity and deposits.

Key words: ultra-slow spreading ridge; petrology and geochemistry; magmatism; hydrothermal activity; Southwest Indian Ridge

资助项目: 国家自然科学基金“南海初始洋壳 (IODP1502B 钻孔) 的 Li-Mg-O 同位素组成: 对洋壳蚀变过程中同位素组成和分馏行为的初步研究” (41876044); 中国科学院深海科学与工程研究所知识创新工程领域前沿项目“冰岛和雷琼半岛 OIB 型火山熔岩的地球化学及岩石成因对比研究及其对地球动力学背景的指示” (Y570031QY1)

作者简介: 孙国洪 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事海底岩石学及地球化学研究, E-mail: sungh@idsse.ac.cn

通讯作者: 田丽艳 (1979—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事海底岩石学及地球化学研究, E-mail: lytian@idsse.ac.cn

收稿日期: 2021-02-17; **改回日期:** 2021-06-14. 周立君编辑

西南印度洋中脊(Southwest Indian Ridge: SWIR)是南极洲和非洲板块的分界线,平均半扩张速率约为 7 mm/a^[1]。作为超慢速扩张脊的代表,其地形地貌特征、地壳结构、岩浆和热液活动、地壳增生机制等都有别于其他洋中脊体系^[1-2]。例如,传统观点认为扩张中心处岩浆的充分供给和短断距、高角度的正断层共同导致了新洋壳的产生^[3],然而,在西南印度洋中脊,拆离断层诱发的洋中脊扩张是一种新的洋壳形成模式^[4-6]。

前人从地形地貌、岩浆作用、构造演化、热液活动与成矿等方面总结了 SWIR 部分脊段的研究成果。例如, Sauter 和 Cannat^[2]在汇总 SWIR 地球化学与地球物理数据的基础上,重点探讨了洋中脊东、西两端非岩浆增生脊段的形成和演化,提出了沿洋中脊轴向岩浆供应和分配的机制;索艳慧结合剩余布格重力异常与地球化学数据探讨了 SWIR 的构造-岩浆作用及成矿效应,重建了印度洋 120 Ma 以来关键时期的演化过程^[7];Carbotte 等^[8]总结了 SWIR 在 44°~68°E 脊段沿轴向的地形、地球物理和地球化学特征变化,探讨了洋中脊构造分段和岩浆分段的对应性;余星等^[9]总结了 SWIR 的地质构造特征,探讨了 SWIR 的演化过程、地幔源区性质和洋脊周边海底高原成因等问题。

多年来关于 SWIR 的研究拓展了板块构造理论的内容,但对许多关键科学问题的认知仍然有限,例如, 50°~51°E 脊段(第 27 脊段)异常强烈火山活动的成因机制^[10-16], 46°~52°E 脊段是否受到克洛泽热点的影响^[13-16], 马里昂隆起(Marion Rise)的成因^[10, 12]等。

本文归纳总结了近年来关于 SWIR 玄武岩、辉长岩及橄榄岩的岩石学和地球化学研究成果,重点探讨了沿 SWIR 轴向(大尺度, >200 km)以及单个洋中脊分段(小尺度, <200 km)的岩石地球化学变化特征及其影响因素、洋中脊的岩浆供应及洋壳增生模式,最后从不同空间尺度的地幔源区性质、洋中脊构造与岩浆作用过程、热点-洋中脊相互作用和岩浆-热液活动与成矿等几个方面提出有待进一步加强研究的主要科学问题和研究方向。

1 地质概况

西南印度洋中脊起自布维三联点(Bouvet Triple Junction: BTJ)(54°50'S、00°40'W),向东延伸至罗德里格斯三联点(Rodriguez Triple Junction: RTJ)(25°30'S、70°00'E),全长约 7700 km^[1-2],持续活动

时间超过 100 Ma^[17]。地形和地球物理资料表明 SWIR 自西向东被若干长期活动的大型南北向转换断层(错断距离>30 km, 表 1)和非转换不连续带(错断距离<10 km)错断,形成若干次级脊段(图 1)。

总的来说,以安德鲁-贝恩和加列尼断裂带为界,可以将 SWIR 分为三段:布维三联点—安德鲁-贝恩(西段)、安德鲁-贝恩—加列尼(中段)、加列尼—罗德里格斯三联点(东段)。

在 SWIR 西段,研究程度最高的是 9°~25°E 脊段,此区域又可分为两个“超级脊段”。其中,在 9°~16°E 脊段:洋中脊的整体延伸方向与扩张方向交角可达 32°,被称为“斜向扩张段”。该脊段的平均有效半扩张速率仅为 3.9 mm/a,是目前发现的全球扩张速率最慢的脊段。在此“超级脊段”,非岩浆增生脊段(9°30'~11°E, 11°35'~14°15'E, 14°54'~15°45'E)与大型火山(Joseph Mayes seamount: 11°~11°35'E, 高约 3500 m)及岩浆增生脊段(14°15'~14°54'E, 水深约 2700 m)相间存在^[1, 18]。而在 16°~25°E 脊段,洋中脊由斜向扩张转换为垂向扩张(洋中脊延伸方向与扩张方向夹角>80°),被称为“垂向扩张段”;该脊段的平均有效半扩张速率约为 7.1 mm/a。此外, 16°~25°E 脊段还可以被 14 个小于 10 km 的非转换不连续带划分为若干短(10~15 km)至中等长度(20~35 km)的次级脊段^[18]。

以安德鲁-贝恩转换断层为界, SWIR 东西两侧的洋脊错断距离超过 1000 km。其西侧的洋脊走向

表 1 SWIR 断裂带全称及其缩写^[7]
Table 1 The main parameters of fracture zones in SWIR^[7]

断裂名称(缩写)	走向	断距/km	活动时期/MaBP	东经
Bouvet (BO)	NE 65°	240	0~50	1°55'
Islas Orcadas (IO)	NE 65°	100	0~70	6°03'
Shaka (SH)	NE 60°	180	0~70	9°30'
DuToit (DT)	NE 35°	160	0~70	25°25'
Andrew Bain (AB)	NE 40°	720	0~>120	32°18'
Marion (MA)	NE 30°	125	0~>120	33°40'
Prince Edward (PE)	NE 25°	155	0~>120	35°30'
Eric Simpson (ES)	NE 18°	100	0~60	39°20'
Discovery I (DI)	NE 10°	320	0~60	41°50'
Discovery II (DII)	NE 10°	320	0~60	42°30'
Indomed (IN)	NE 15°	135	0~60	46°00'
Gallieni (GA)	NE 10°	90	0~60	52°20'
Atlantis II (AII)	NE 5°	190	0~50	57°00'
Melville (MEL)	NE 5°	125	0~50	60°45'

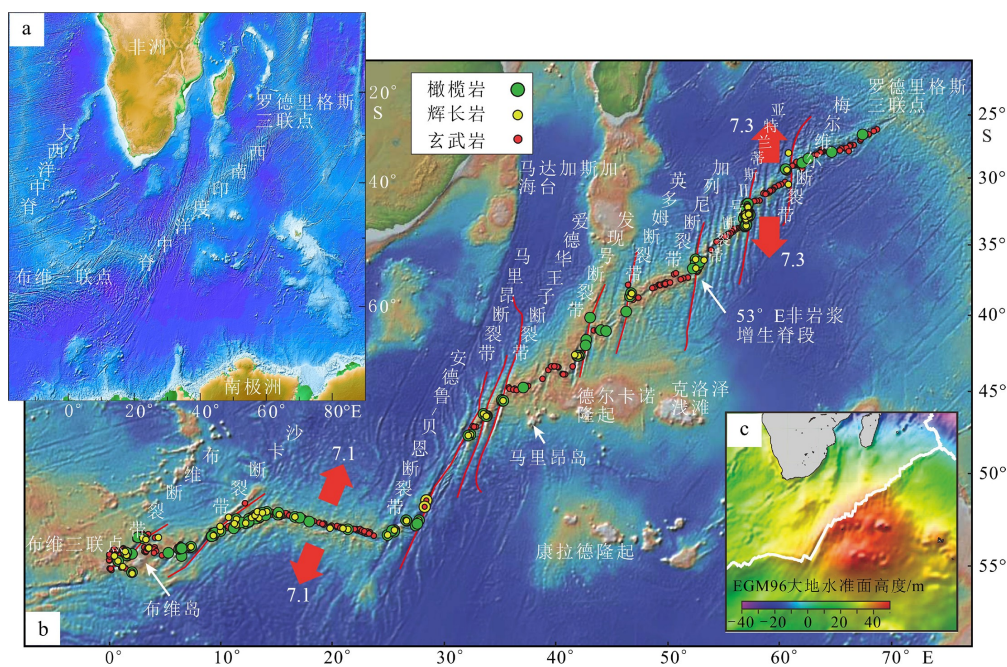


图 1 西南印度洋地理位置及地形图

a. 西南印度洋地理位置图, b. 西南印度洋脊地形图和岩石类型分布图, c. 西南印度洋自由空气大地水准面图(改编自文献[10])。

EGM96: 地球引力模型 1996; 红色箭头指示洋脊半扩张速率, 分别是 7.1 和 7.3 mm/a。

Fig.1 Geographical location and topographic map of Southwest Indian Ocean

a. Geographical location map of Southwest Indian Ocean, b. Topographic map and rock type distribution map of Southwest Indian Ridge, c. Free air geoid map of the Southwest Indian Ocean (modified from reference [10]). EGM96: Earth Gravitational Model 1996. Half spreading rate marked by red arrows, which is 7.1 and 7.3 mm/a, respectively.

近东西, 缺乏长寿命的断裂带和非转换不连续带; 其东侧洋脊走向为北东向, 发育较多长寿命断裂带(如加列尼、亚特兰蒂斯 II 号和梅尔维尔等)和非转换不连续带^[19]。

西南印度洋中脊中段(安德鲁-贝恩—加列尼)延伸约 3000 km, 是 SWIR 最为异常的脊段^[10]。Cannat 等^[20]将 SWIR(46°~52°E)自东向西命名为 25、26 32 脊段, 这一区域平均水深约 3200 m, 是 SWIR 热液活动调查程度最高的脊段; 50°~51°E(27 脊段)水深最浅仅 1500 m, 发育有大量平顶火山, 中央裂谷消失, 洋壳厚度可达 9.5 km^[11] 或 10.2 km^[21]。

西南印度洋中脊东段(加列尼—罗德里格斯三联点)延伸约 2500 km, 平均有效半扩张速率为 7.3 mm/a。加列尼断裂带是 SWIR 东段一个重要的分界线, 越过加列尼断裂带, 洋中脊的平均水深逐步增加, 中央裂谷发育, 洋壳厚度 < 5.5 km, 且自西向东逐渐减薄。这可能代表了从加列尼断裂带向东地幔潜能温度降低, 火山活动减少^[2, 8, 22]。

2 岩石学及地球化学特征

Zhou 和 Dick^[10]总结了多年来海底拖网采样的

结果, 绘制了在 SWIR 不同类型岩石的分布情况(图 1b)。总体上, 玄武岩、辉长岩和橄榄岩在整个洋脊都有出露, 其中 9°~35°E、41°~47°E、52°~68°E 等脊段分布有大量橄榄岩; 辉长岩在 SWIR 的分布范围也较广, 但是其总量不足, 如果不考虑在亚特兰蒂斯 II 号断裂带采集到的辉长岩, 剩余辉长岩只占全部拖网样品的 11%。

2.1 玄武岩地球化学特征

西南印度洋中脊玄武岩(MORB)的地球化学组成变化幅度较大(图 2), 既包括 $(La/Sm)_N < 1$ 的正常型 MORB(N-MORB), 又包括 $(La/Sm)_N > 1$ 的富集型 MORB(E-MORB); 其 Sr-Nd-Pb 同位素比值变化范围($^{87}Sr/^{86}Sr$: 0.70248~0.70520; $^{143}Nd/^{144}Nd$: 0.51237~0.51322; $^{206}Pb/^{204}Pb$: 16.58~19.66)也远大于东南印度洋和中印度洋 MORB^[9, 23-28]。

如前所述, SWIR 被若干转换断层和非转换不连续带错断, 由此形成的短段洋脊上的 MORB 表现出沿洋中脊轴向的地球化学组成变化(图 2)。尽管 SWIR 的 MORB 同位素比值在 39°~41°E 具有异常, 但 MORB 的同位素比值变化范围整体呈自西向东逐渐减小的趋势, 而且地幔源区的组成特征在安

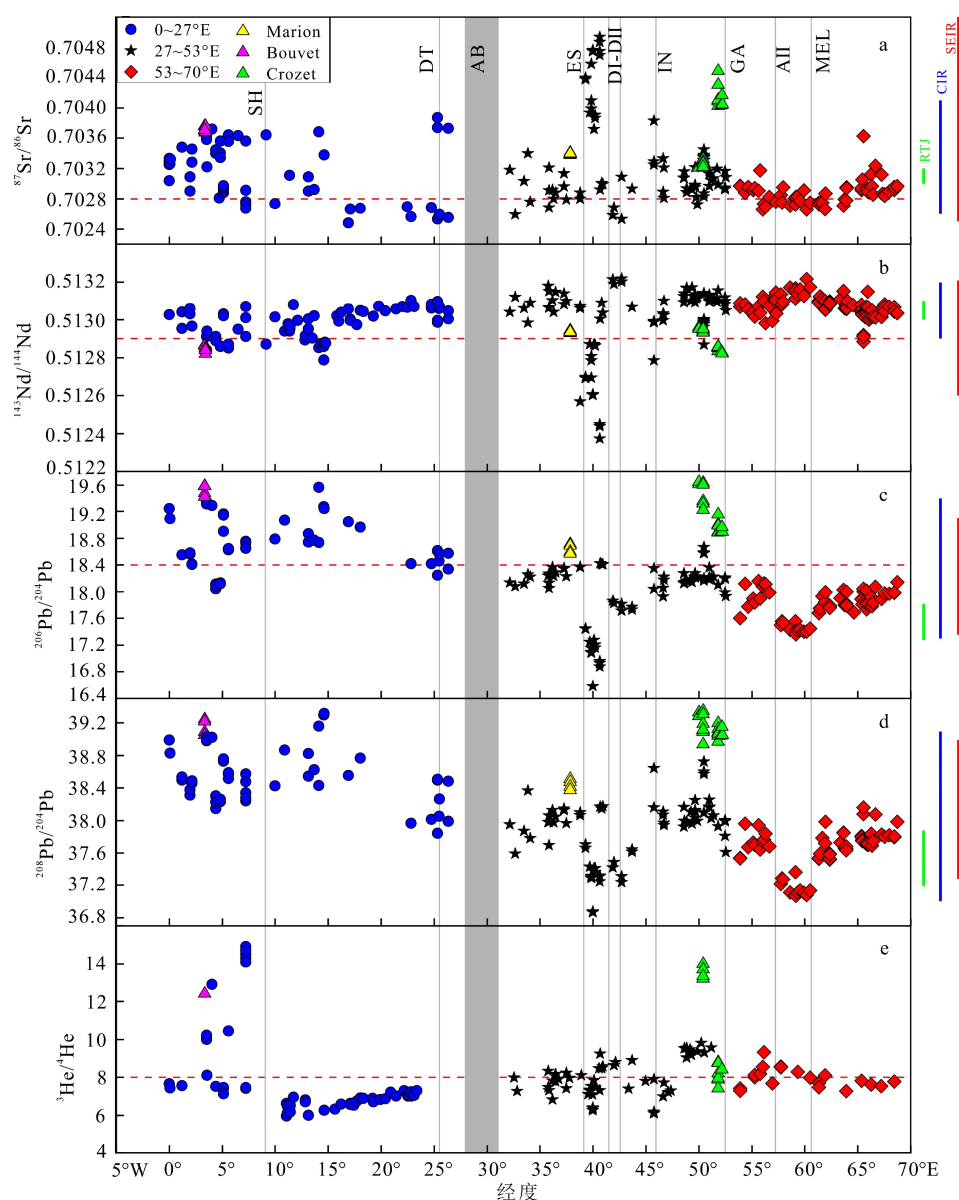


图 2 西南印度洋中脊玄武岩沿洋脊延伸方向同位素比值变化图

a. 横向红色虚线代表 MORB 参考线 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7028$, b. 横向红色虚线代表 MORB 参考线 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.5129$, c. 横向红色虚线代表 MORB 参考线 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.4$, e. 横向红色虚线代表 MORB 参考线 $^3\text{He}/^4\text{He}=8R_A$ (R_A = 空气中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$)。Sr-Nd-Pb 同位素数据来自文献 [27], 其余来自 PetDB 数据库 (<http://www.earthchem.org/petdb/>)。He 同位素数据来自文献 [30-32]。图中灰色实线为断裂带位置; 大写字母表示断裂带名称(简写)。

图中右侧色棒分别代表罗德里格斯三联点、中印度洋脊、东南印度洋脊玄武岩对应的同位素变化范围。

Fig.2 Variations in isotopic ratios of MORBs along SWIR

a. The horizontal red dotted line represents MORB reference line of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7028$; b. The horizontal red dotted line represents MORB reference line of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.5129$; c. The horizontal red dotted line represents MORB reference line of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.4$; e. The horizontal red dotted line represents the MORB reference line of $^3\text{He}/^4\text{He}=8R_A$ (R_A = $^3\text{He}/^4\text{He}$ in air). Sr-Nd-Pb isotopic data are from reference [27], and others are from petdb database (<http://www.earthchem.org/petdb/>). He isotope data are from reference [30-32]. The gray solid line in the figure shows the location of the fault zone; Capital letters indicate the name of the fault zone (abbreviation). Solid bars on right-hand side represent the range of isotope variations reported for Rodrigues Triple Junction (RTJ), Central Indian Ridge (CIR), and Southeast Indian Ridge (SEIR) MORB, respectively.

德鲁-贝恩断裂带 (AB) 附近由大西洋型同位素地幔过渡为印度洋型地幔 [23-29]。此外, SWIR 最东段 (距 RTJ 至少 78 km) MORB 的同位素特征与 RTJ MORB 的相比, 在给定 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值下具有更小的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 。因此, 该处东西两侧的地幔源区组成特征也存在差异 [27]。

具体来说, 在 SWIR 西段, MORB 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化范围 (0.7028~0.7036) 低于 SWIR 中段 (0.7026~

0.7048), 但高于 SWIR 东段 (0.7027~0.7032); 而 Nd 同位素比值变化范围 (0.5129~0.5131) 则低于 SWIR 中段 (0.5124~0.5132), 与 SWIR 东段 (0.5130~0.5131) 相似。在 SWIR 中段的埃里克辛普森 (ES) 和发现 II 号 (DII) 断裂带之间 (39°15'~42°37'E), MORB 的 Sr 和 Nd 同位素比值表现出了截然相反的分模式 (图 2a, b): 发现 I 号 (DI) 和发现 II 号 (DII) 断裂带之间具有 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 最低值 (0.70258) 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 最高值 (0.51322); 相反, 在埃里克辛普森 (ES) 和发现 I 号 (DI) 断裂带之间, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值较高 (0.7048), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值较低 (0.5124)。在 SWIR 东段, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在主要断裂带两侧无明显变化, 而部分 Nd 同位素比值在主要断裂带两侧发生变化。如穿过亚特兰蒂斯 II 号 (AII) 断裂带, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值变大, 穿过梅尔维尔 (MEL) 断裂带, 比值则变小。

从 Pb 同位素比值来看, 在 SWIR 西段, MORB 的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值高于全球平均值 (约 18.4), 其中在 13°~15°E, MORB 展现出整个 SWIR 最高的比值 (19.6)。在 SWIR 中段, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值低于全球平均值, 且具有更大的分布范围 (图 2c); 在 39°~41°E 区域 (位于埃里克辛普森 (ES) 和发现 I 号 (DI) 断裂带之间), MORB 展现出整个 SWIR 最低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值 (16.58), 这也是全球大洋玄武岩记录的最低值。在 SWIR 东段, 越过亚特兰蒂斯 II 号 (AII) 断裂带, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值下降; 越过梅尔维尔 (MEL) 断裂带, 比值则升高。与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 沿 SWIR 整体趋势相同, 自西向东, MORB 的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值整体上呈逐渐减小的趋势。在 SWIR 西段, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值明显高于中段和东段 (图 2d); 在 SWIR 中段 39°~41°E 区域, MORB 同样展现出了最低值; 而在 SWIR 东段, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值的分布模式和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值一致。

从 He 同位素比值来看, MORB 沿洋脊轴向也表现出极大的变化范围 (6.26~14.9 R_A) [30-32]。在 SWIR 西段和中段, MORB 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值范围较广。其中, 在 7°E 附近, MORB 的 He 同位素比值变化范围

为 7.4~14 R_A , 在 0°~11°E 和 46°~52°E 也出现了高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值 (>8 R_A)。而在 SWIR 东段, MORB 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值范围相对较小 (7.3~8.1 R_A), 与 N-MORB 的比值范围重合。

2.2 辉长岩地球化学特征

亚特兰蒂斯浅滩是 SWIR 辉长岩研究程度最高的地区, 其中一个代表性的研究对象便是大洋钻探计划 (ODP) 735B 岩芯 (32°43'S, 57°17'E)。该区发育的拆离断层使辉长岩和地幔橄榄岩剥露于海底表面, 进而与断层及上盘岩石共同组成大洋核杂岩 (OCC) [33]。西南印度洋脊大洋核杂岩的分布汇总于表 2。

ODP 735B 钻孔岩芯的研究表明, 该岩芯岩性以辉长质堆晶岩为主 [33]。根据岩芯的岩石学、矿物学和地球化学参数, 可将岩芯剖面划分为 5 个主要的地球化学旋回或 3 个地球化学系列 (图 3a)。其中岩芯顶部的地球化学系列 1 与 2 (或旋回 1 与 2) 的化学组成较底部原始 (即顶部 Mg# 高), 而在每个地球化学系列及亚单元 (或旋回) 内部的 Mg# 则由底部至顶部逐渐降低, 暗示从底部到顶部演化程度逐渐升高, 可能代表了一次深成熔体入侵事件 [35-36]。岩芯中锆石的 U-Pb 同位素测年表明 ODP 735B 钻孔顶部年龄为 12.175 ± 0.069 Ma, 底部为 11.902 ± 0.012 Ma [37], 因此, 辉长质洋壳形成时间 $\geq 0.214\pm0.032$ Ma。如果以 7 mm/a 的半扩张速率计算, 该处的岩浆增生区约为 2.6 ± 0.4 km。

ODP 735B 钻孔辉长岩的氧同位素比值随深度增加而递增, 最终在 800 mbsf 以下, $\delta^{18}\text{O}$ 比值趋于稳定 ($5.7\%\pm0.2\%$) [38-39], 据此推断, 海水的大量渗透局限在地下壳上部 (进入辉长岩层 800 m)。此外, 角闪石脉体在 700 mbsf 以下罕见, 表明在钻孔深部 (700 或 800 mbsf 以下) 的高温蚀变十分有限。岩芯样品的 Nd 同位素比值在整个深度剖面几乎恒定 (图 3c); Pb 同位素比值变化范围在钻孔上部

表 2 SWIR 大洋核杂岩分布信息

Table 2 Occurrences of oceanic core complexes (OCCs) in SWIR

名称或位置	全扩张速率/(mm/a)	岩石类型	相关热液区	主要参考文献
Dragon Flag (49°39'E)	14	玄武岩, 蛇纹石化橄榄岩	Dragon Flag	Zhao等[34]
53°E	15	蛇纹石化方辉橄榄岩、辉绿岩、辉长岩		Zhou和Dick[10]
Atlantis Bank (57°16'E)	14	辉长岩为主, 蛇纹石化橄榄岩		Baines等[4]
FUJI Dome (63°45'E)	14	玄武岩、辉长岩、蛇纹石化方辉橄榄岩	Mont Jourdanne	Searle等[5]
61°12'~65°30'E	14	未采到样品		Cannat等[6]

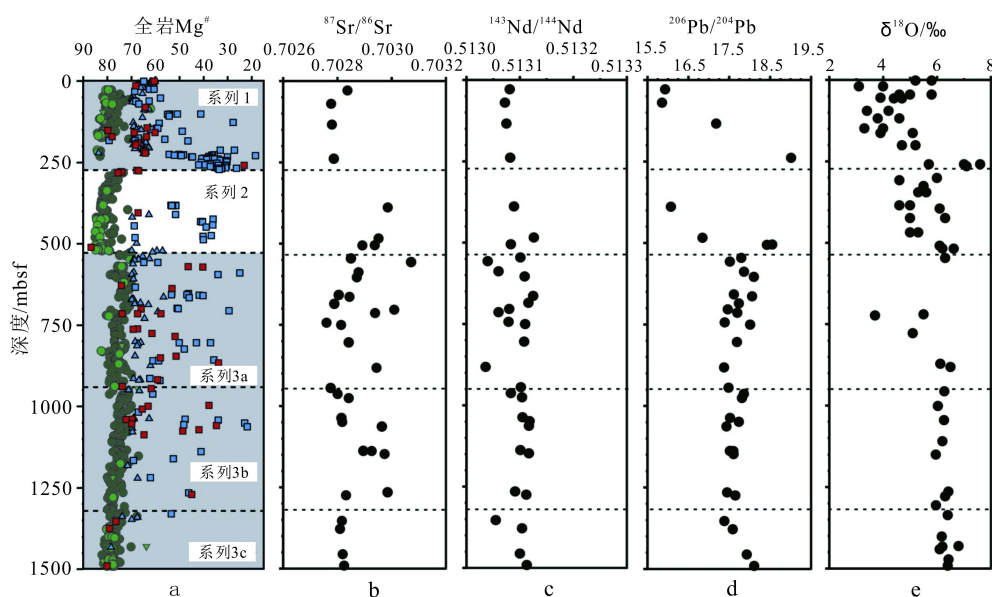


图 3 ODP 735B 孔辉长岩随深度变化剖面

a. 全岩 $Mg^{\#}$ 随深度变化剖面(改编自文献[37]), 不同符号代表不同类型辉长岩; b-d. 全岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ - $^{143}Nd/^{144}Nd$ - $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值随深度变化剖面; e. 长石 $\delta^{18}O$ 值随深度变化剖面。Sr-Nd-Pb 同位素数据来自文献[40-41]; 氧同位素数据来自文献[39, 42]。

Fig.3 Geochemical characteristics for gabbros versus depth from Hole ODP 735B

a. whole rock $Mg^{\#}$ versus depth profile (modified from reference [37]), different symbols represent different types of gabbros; b-d. whole rock $^{87}Sr/^{86}Sr$ - $^{143}Nd/^{144}Nd$ - $^{206}Pb/^{204}Pb$ profile with depth; e. feldspar $\delta^{18}O$ profile with depth. Sr-Nd-Pb isotope data are from references [40-41]; Oxygen isotope data are from references [39, 42].

(500 mbsf 以上)则比钻孔下部(500 mbsf 以下)大, 且在钻孔下部, Pb 同位素比值随深度呈递减趋势(图 3d), 同样表明海水蚀变仅限于钻孔上部[40-41]。Sr 同位素比值在整个深度剖面的变化范围大于 Nd 同位素比值变化范围, 但是小于 O 和 Pb 同位素比值变化范围(图 3b)。值得注意的是, ODP 735B 岩芯中代表下地壳下部(500 mbsf 以下)的样品与 Meyzen 等报道的 MORB 具有相似的 Sr-Nd-Pb 同位素组成[27, 40], 这可能表明在超慢速扩张脊, 岩浆房的混合过程极难发生, 因此, 代表下地壳的堆晶岩样品中可以保存地幔源区的同位素特征。

2.3 地幔橄榄岩地球化学特征

深海橄榄岩通常被认为是洋中脊软流圈地幔部分熔融抽取玄武质岩浆后的残留体。因此, 在地幔熔融程度极低的情况下, 深海橄榄岩相对 MORB 能更直接提供软流圈地幔的组成以及地幔熔融、熔体提取和后期改造等地质过程的信息[43]。西南印度洋脊的深海橄榄岩主要发育在 $9^{\circ}\sim 16^{\circ}E$ 和 $52^{\circ}\sim 68^{\circ}E$ 等脊段。岩相学和矿物学研究表明, 大部分的地幔橄榄岩遭受了不同程度的蛇纹石化(20%~70%): 辉石被角闪石、绿泥石和滑石交代, 原生尖晶石被次生尖晶石、铬铁矿和铬磁铁矿交代, 可见

粗粒结构、包橄结构, 或由于高温晶体塑性变形形成斑岩纹理[12, 44-45]。

尽管 SWIR 深海橄榄岩经历了广泛的后期改造(如交代作用、再富化作用), 主微量元素原始特征难以保存[12, 46], 但同位素比值依旧记录了原始地幔源区特征。Snow 等[47]首次报道了 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}E$ 和亚特兰蒂斯 II 号(AII)断裂带附近橄榄岩中辉石矿物的 Sr-Nd 同位素组成, 发现除了一个样品之外, 其余样品的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 范围与相邻 MORB 的相同。随后的研究表明, 尽管在全球尺度上, 深海橄榄岩与空间上对应 MORB 的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 平均值相同(0.513 167 vs 0.513 061), 但 SWIR 橄榄岩的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 平均值比相应 MORB 的更高[45, 48-50](图 4)。而 $9^{\circ}\sim 25^{\circ}E$ 橄榄岩辉石矿物的 Hf 同位素组成展现出类似的特征, 即橄榄岩 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值范围与其相应 MORB 的重合, 但趋向更高的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值, 其中 $14.6^{\circ}E$ 橄榄岩与其相应 MORB 的 Hf 同位素具有最大差异值[49]。

3 西南印度洋中脊地幔源区性质

西南印度洋中脊地幔源区组成的强烈不均一性是导致其 MORB 具有地球化学多样性特征的主要原因[23-29]。不同于其他洋中脊, SWIR 附近存在许

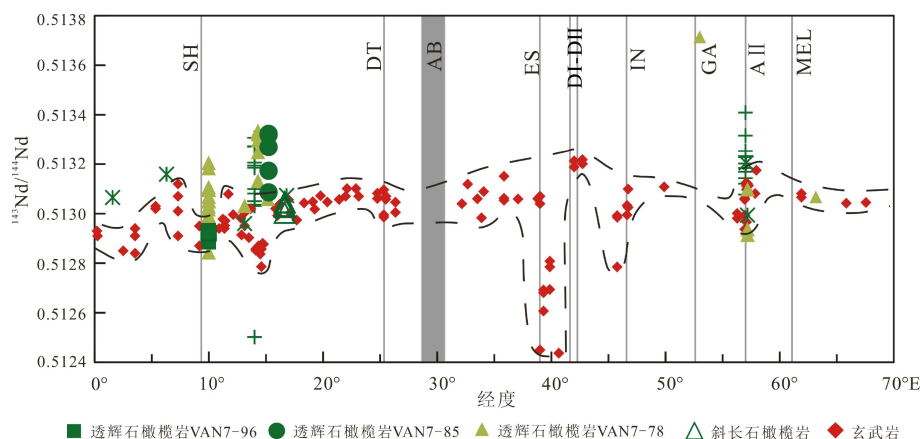


图4 西南印度洋中脊橄榄岩和对应的洋中脊玄武岩 Nd 同位素组成沿洋中脊延伸方向变化特征^[48]

绿色星号橄榄岩数据来自文献 [47], 绿色加号橄榄岩数据来自文献 [50], 其余橄榄岩数据来自文献 [44]。玄武岩数据来自 PetDB 数据库 (<http://www.earthchem.org/petdb/>)。

Fig.4 Variations in Nd isotopic compositions of peridotites and corresponding MORBs along SWIR^[48]

Green stars peridotite data are from reference [47], green plusses peridotite data are from reference [50], and other peridotite data are from reference [44]. Basalt data is from petDB database (<http://www.earthchem.org/petdb/>).

多长期活动的热点, 如布维 (Bouvet)、马里昂 (Marion)、克洛泽 (Crozet) 等。以克洛泽热点为例, 地球物理调查发现了洋脊轴部正地形和低的剩余布格重力异常值等证据, 表明 50°~51°E 脊段的构造-岩浆活动受到了热点的影响, 但是却没有发现具有 E-MORB 特征的岩浆岩样品。

3.1 地球物理证据

洋中脊地形的变化是其受热点影响最直观的表现。英多姆 (IN)-加列尼 (GA) 断裂带之间的脊段存在与马里昂 (MA)-发现 II 号 (DII) 断裂带之间相似的轴部正地形和剩余布格重力异常低值区^[2, 22, 51-52]。尤其是第 27 脊段 (50°~51°E), 岩浆活动强烈, 轴向裂谷缺失, 发育有一个最大水深达 1390 m 的中央火山^[11]。Sauter 等^[13] 根据对英多姆-加列尼断裂带之间洋脊的地形地貌和地幔布格重力异常等地球物理特征的分析, 提出在 11~8 MaBP, 克洛泽热点与英多姆-加列尼之间的洋脊相互作用, 导致该脊段发生了一次剧烈的岩浆喷发事件。

近年来, 中国科学家对英多姆 (IN)-加列尼 (GA) 断裂带之间的洋脊开展了大量的地球物理研究^[11, 21, 34, 53-55]。例如, 结合地震层析成像和海底地震仪数据的全波形反演, Jian 等^[56] 在 50°28'E 处海底下 4~9 km 发现低速异常区, 并且认为就是存在于下地壳的轴向岩浆房, 强烈的岩浆作用产生了该区约 9.5 km 厚的洋壳, 而古老亏损地幔的再熔融不可能产生如此巨量的熔体, 这为克洛泽热点影响了英多姆-加列尼脊段的推断再次提供了佐证^[14]。

3.2 地球化学证据

从地球化学角度讲, E-MORB 的出现通常被认为是热点与洋中脊相互作用最有力的证据^[55-57]。如图 2 所示, 受到布维 (Bouvet) 和马里昂 (Marion) 热点影响的脊段 (分别是 1°55'~4°35'E 和 33°36'~42°37'E), 其 MORB 的 Sr-Nd-Pb-He 同位素比值具有明显的热点印记^[25, 27, 29]。以布维热点附近的 SWIR 为例, 由于布维热点的影响, 布维岛 (3°21'E、54°24.6'S) 本身的³He/⁴He 比值为 12.4R_A, 附近 MORB 的³He/⁴He 变化范围为 8.1~12.9R_A, ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 变化范围为 18.2~19.6, 均显示出热点的印记^[30]。

与相邻脊段相比, 位于英多姆 (IN)-加列尼 (GA) 断裂带之间的脊段虽然具有较高的部分熔融程度 (如 Na₈、(Sm/Yb)_N 较低, CaO/Al₂O₃ 较高), 前人的研究也多归因于受到克洛泽 (Crozet) 热点的影响^[50, 58], 但该脊段却没有发现 E-MORB。Breton 等^[15] 认为英多姆断裂带以西 (~45°45'E) 的 E-MORB 是克洛泽热点与该脊段相互作用的结果, 但这些 E-MORB 却与克洛泽群岛玄武岩具有不同的同位素比值 (如克洛泽群岛玄武岩的 Pb 同位素比值更高)^[14]。Yang 等^[14] 发现取自该脊段的 47 件玄武岩均为 N-MORB, 但 50°28'E 的 MORB 表现出富集的 Sr-Nd-Pb 同位素比值特征, 即具有更高的 Sr、Pb 同位素比值和更低的 Nd、Hf 同位素比值。他们提出具有同位素富集特征的 MORB 可能受到克洛泽热点的影响: 在克洛泽热点物质流向洋中脊的过程中, 由于减压熔融作用, 热点组分逐渐亏损不相容

元素, 但减压熔融未能影响其同位素的组成特征; 因此, 最终到达洋中脊时, 亏损的残余熔体会在洋中脊处再次减压发生部分熔融, 从而形成了富集同位素特征的 N-MORB。

4 岩浆供应及地壳增生模式

4.1 洋中脊岩浆供应量的轴向变化

通常认为地壳厚度是板块扩张速率与熔体供应速率的函数^[59], 但西南印度洋中脊的整体扩张速率均一(半扩张速率约为 7 mm/a), 沿轴向的地壳厚度变化却很大。例如, 9°~16°E 非岩浆增生脊段的地壳厚度为 4 km, 而相邻的 Narrowgate 脊段和 Joseph Mayes 海山地壳厚度分别达到 7.5 和 10 km。因此, SWIR 地壳厚度的变化直接反映了洋脊之下熔体供应量的差异^[18, 51]。

地球物理参数(如布格重力异常和剩余布格重力异常)的变化趋势表明 SWIR 轴下熔体供应量存在大尺度(>200 km)的变化。例如, 沿轴方向, SWIR 布格重力异常呈现中段高两端低的特征, 中段布格重力异常高值区与水深异常区对应; 而位于 46°~52°E 脊段 MORB 的 Na₈ 值(平均为 2.61%)低于 52°~65°E 脊段(高达 3.89%), 表明 46°~52°E 脊轴下的岩浆供应量更加充足。这种大尺度(>200 km)上的岩浆量供应变化主要受控于地幔潜能温度和源区物质组成的变化^[51]。

此外, 在相对较小的脊段尺度上, 熔体供应也存在显著变化。例如, 9°~16°E 区域, 岩浆活动整体较弱, 但却存在局部强烈火山活动, 非岩浆增生脊段与大型火山相间存在, 说明沿洋脊轴向岩浆供应相对高度集中。而且, MORB 的一些元素比值分布模式也可以体现岩浆供应的差异, 例如, 在岩浆供应少的非岩浆增生脊段, MORB 具有相对较低的 K₈/Ti₈ 比值; 而在岩浆供应多的 Joseph Mayes 海山和 Narrowgate 脊段, MORB 具有相对较高的 K₈/Ti₈ 比值。Standish 等^[18]认为高角度倾斜扩张导致的局部热结构的差异、岩石圈厚度变化和不同的有效扩张脊段规模等都使熔体倾向于集中分布, 在该脊段, 熔体产生之后的运输与各种反应过程比地幔源区不均一性对 MORB 组分的影响程度更大(图 5)。

但是, 熔体沿轴向再分配的机制并不能合理解释第 27、28、29 脊段的洋壳厚度异常(相比于 9°~16°E 区域, 英多姆-加列尼断裂带之间岩浆活动强烈, 扩张脊几何形态变化较小, 但是第 27、28、29 脊

段的洋壳厚度差异达 5 km 以上), 似乎克洛泽热点的影响更大^[14]。Li 等^[60-61]根据英多姆-加列尼洋脊橄榄岩中单斜辉石计算得出的初始熔体水含量(1.3±0.3%)远远大于 N-MORB 的水含量(0.1~0.3%), 地幔源区的高水含量不仅指示地幔曾发生过早期含水熔融事件, 也极易诱发强烈的岩浆活动, 为此区域强烈的岩浆活动提供了一种解释。最近, Yu 和 Dick^[16]则提出了由板块运动驱动的“微热点”作用模式: SWIR 广泛分布的一些熔融异常区域(如第 27 脊段、Joseph Mayes 海山、Narrowgate 脊段、60°~70°E 脊段), 与区域板块运动过程中局部应力变化引起的岩浆聚集作用有关。这些微热点可以沿洋脊自由迁移, 可以解释 SWIR 熔融异常区域分布的随机性、区域性和间断性, 是研究超慢速扩张脊熔融异常的一种新思路。

4.2 地壳增生模式

通常认为, 在快-慢速扩张脊, 洋壳增生模式相似, 即来自地幔源区的熔体在渗透边界形成熔体注入区, 然后继续向上运移并通过席状岩墙群喷出, 形成狭窄的新生火山扩张轴, 洋壳增生区域一般小于 4 km^[62]。然而, 在超慢速扩张的 SWIR, 洋壳增生类型以构造作用为主, 大量地幔橄榄岩直接出露海底^[1, 18], 不能用经典的洋壳增生模式简单解释。

Standish 等^[63]对 9°~16°E 区域的火成岩用 U 系列同位素进行了定年, 结果显示年轻的火山广泛分布在整个洋中脊裂谷内, 显然, 此处的洋壳增生带更宽。对超慢速扩张脊的数值模拟结果表明, 长寿命、大偏移距的正断层可以向轴外延伸近 20 km, 这些正断层的底部可以达到脆性/塑性过渡带(即熔体注入区)^[64]。虽然非岩浆增生脊段下方冷且厚的岩石圈可能会阻碍岩浆从注入带的运移, 但是, 较厚的岩石圈使脆性/韧性转变区以及穿透它的断层深度更深, 也可以为熔体流动提供潜在的通道。

不同于 9°~16°E 区域与正断层有关的离轴火山作用控制的地壳增生, SWIR 中部和东部广泛发育以拆离断层为主导的地壳增生类型, 如亚特兰蒂斯浅滩、Fuji Dome 和 49°~51°E 脊段等^[4-5, 34]。例如, Zhao 等^[34]通过第 28 脊段获取的 OBS 三维地震数据, 发现该脊段的南北两翼呈不对称扩张。北翼主要以火山建造增生; 而南翼构造活动强烈, 拆离断层将辉长岩等岩石组合暴露海底, 并且南翼发育了一个地壳浅层速度高、垂直速度梯度强的块体, 被命名为龙旗大洋核杂岩(Dragon Flag OCC, 表 2)。Tao 等^[55]通过对第 28 脊段南翼热液活动区微地震的最

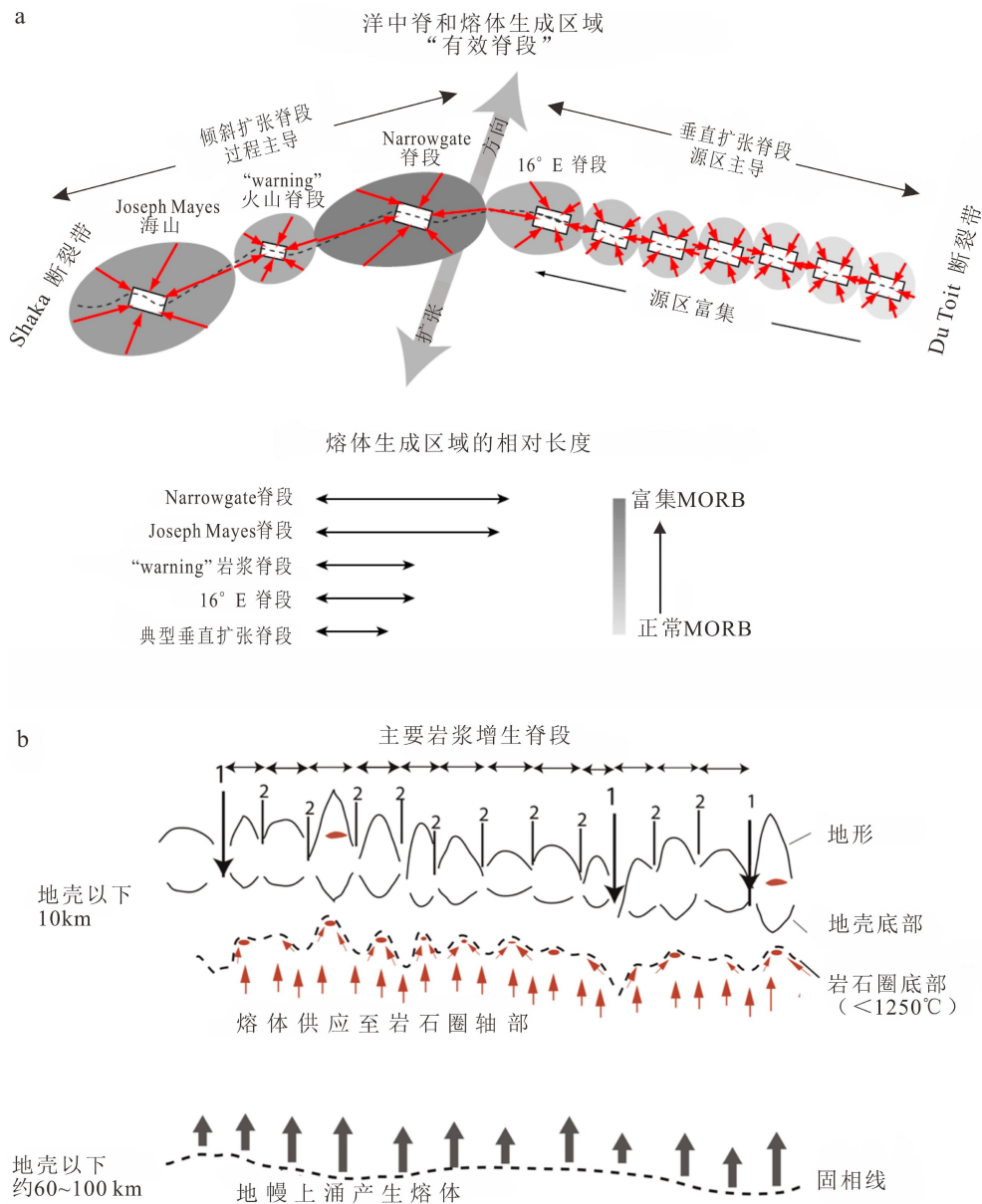


图5 西南印度洋中脊不同脊段的岩浆供应及地壳增生模式

a. 9°~25°E 岩浆脊段及“有效脊段”。红色箭头代表每个岩浆脊段下方熔体集中的方向和岩石圈底部的坡度；灰色区域代表每个脊段熔岩相对富集的程度(改编自文献[18])。b. 在慢速扩张脊,主要的岩浆脊段与二级构造脊段对应(图中标注数字“2”的直线)。熔体的高度集中(小的水平和垂直箭头)导致脊段内地壳厚度的变化,短周期的岩浆体(地壳内的椭圆填充)在洋中脊中段形成,并由此形成了较厚的洋壳(改编自文献[8])。

Fig.5 The model of magma supply and crustal accretion in different segments of SWIR

a. 9°~25°E magmatic segmentation and associated “effective segmentation”. Red arrows indicate simplified direction of melt focusing beneath each magmatic segment and theoretical slope of lithospheric base; the shade of gray reflects the relative enrichment of lavas for each segment (modified from reference [18]). b. At slow-spreading ridges, principal magmatic segments coincide with second-order tectonic segments (numbered vertical lines indicate discontinuities of orders 1~2). Strong melt focusing (indicated with small subhorizontal to subvertical arrows) results in large variations in crustal thickness within segments, short-lived crustal magma bodies (filled ellipses in crust) can be formed in mid-segment where thicker crust typically emplaced (modified from reference [8]).

新研究,进一步发现该处存在两个拆离断层(深大断层可作为热液喷口热量和物质通道),其深度可达莫霍面边界以下6 km。在超慢速扩张脊,深部岩浆对于脆性岩石圈的供给不足以填补洋中脊扩张

带来的物质和空间空缺,不能完全平衡洋中脊扩张的速率,因此,在洋中脊两侧应变应力集中区域,发育变形量足以与洋中脊扩张匹配的拆离断层。传统观点认为,岩浆供应的不足是导致拆离断层发育

的一个重要因素,但是进一步的研究发现过多或者过少的岩浆供给都会对拆离断层造成不利的影响,甚至使其终止^[64]。因此,岩浆供给量与拆离断层和大洋核杂岩形成之间的关系还需要进一步明确。

5 研究展望

5.1 不同空间尺度地幔源区性质的精细研究

前人研究表明,从全球尺度到矿物尺度,都存在地幔组分的不均一性^[65]。常规的岩石取样主要依靠岩石拖网、电视抓斗等手段,获取的样品在空间上的跨度可达几十甚至几百千米。低密度的样品获取严重限制了对洋脊段内部地球化学特征差异性的观测,更多小尺度的地幔不均一性研究依赖于自主式水下航行器(如 AUV)获取的高精度地形数据和使用载人潜水器进行取样。例如, Mougél 等^[66-67]利用载人潜水器对东太平洋海隆(15°37'~15°47'N)沿轴约 15 km 的范围内进行了系统采样,采样密度小于 1 km,通过高密度的取样,进而识别出一个未知的地幔储库。

在全岩地球化学的基础上,结合单矿物及包裹体的多元素体系和微区研究,也是亟需的工作。例如,玄武岩中熔体包裹体的成分相对寄主岩浆更为原始,可能形成于岩浆房下部的岩浆通道甚至源区,因此,熔体包裹体成分的研究对讨论地幔初始成分特征和岩浆来源具有重大意义^[68]。如 Li 等^[69]以采自 SWIR 的 Mount Jourdanne 火山的斜长石超斑状玄武岩为研究对象,结合全岩、玻璃基质和斜长石斑晶熔体包裹体的地球化学特征,提出了其地幔源区存在辉石岩富集组分,岩浆演化过程复杂,可能发育晶粥带构造。此外,利用实验岩石学方法和计算机软件对已有地球化学数据进行模拟,对超慢速扩张脊下岩浆供应进行量化,也有助于增强对地幔源区性质和岩浆在岩浆房内混合形式的认识。

5.2 洋中脊构造活动与岩浆作用

西南印度洋脊的地形、岩石类型及其地球化学组成等诸多特征,究其原因是超慢速扩张脊独特的构造活动与岩浆作用的综合产物。例如, SWIR 的半扩张速率约为 7 mm/a,熔体供应相对贫乏,但在 11°E、15°E 和 50°E 却均出现了强烈的岩浆作用和大型火山。前两个脊段的异常成因被解释为地幔源区不均一性和高度变化的洋脊扩张形态造成的

熔体倾向性分布^[18];而 50°E 附近脊段异常的成因则比较复杂,不同的研究提出包括热点、早期熔融事件的残留地幔、微热点、地幔不均一性和岩浆运移机制的变化等多个观点^[10-16],这些观点都需要进一步的验证。

此外,关于克洛泽热点对 SWIR 地幔源区的影响也无定论。例如,第 27 脊段加厚的洋壳以及发育的自西向东逐渐变窄的“V”字型构造一直被认为是受到克洛泽热点影响的最直接证据^[13, 21, 52],但克洛泽热点对洋中脊是否造成了影响,影响的程度究竟有多大,仍是一个需要回答的问题。即使 Yang 等^[14]假设正确:远离轴的脊柱相互作用产生的是具有富集同位素特征的 N-MORB,而不是 E-MORB,但是在一些方面还存在争议。例如, Yu 和 Dick^[16]对此洋脊-热点作用方式提出质疑:如是克洛泽热点的影响,为何在相邻的第 28、29 脊段完全没有看到相应的特征,热点只影响了第 27 脊段?如此小规模异常很难用热点影响来解释。此外,根据板块重构的结果,克洛泽热点现今位于东南印度洋中脊形成的地壳之下,而不是 SWIR^[70],因此岩石圈底部克洛泽热点物质的流动方向与 Yang 等^[14]认为的并不一致。

随着对 53°E 非岩浆增生脊段橄榄岩的深入研究,关于马里昂隆起的成因机制也有了新的认识,即马里昂隆起的形成不一定是热点造成的。减薄的、不连续的地壳并不是近期洋中脊活动的结果,软流圈地幔的亏损更可能是反映了晚元古代莫桑比克洋关闭,形成冈瓦纳古陆之前/期间的古老熔融事件^[10, 12]。因此,对 SWIR 的岩浆活动和热点-洋中脊相互作用的动力学机制、热点对地形地貌及洋壳结构的影响还需要更多的认识。

5.3 岩浆-热液活动与成矿

早期的研究认为洋中脊岩浆供应量很大程度上控制了热液喷口的发育,热源为其主控因素^[71]。在 SWIR,岩浆供应相对不足,有的脊段甚至完全缺失岩浆活动,热源条件不佳,似乎不利于热液活动的形成。但 Tao 等^[53]在 49°39'E 脊段发现了世界上第一个在超慢速扩张洋中脊活动的热液区(龙旗热液区),之后的调查发现在 49°~52°E 脊段,热液喷口的分布密度为每 100 km 约 2.5 个喷口,与大西洋中脊(36°~38°N)的富岩浆区域相当。这些发现表明在 SWIR,至少在岩浆活动脊段,可能存在着广泛的热液活动。

在没有岩浆房存在的超慢速扩张脊,热源如何驱动热液循环?这种超慢速扩张脊的热液循环系

统可以达到多大的深度?通过对第 28 脊段龙旗热液区的详细研究,Tao 等发现在脊段中央裂谷的南翼存在两条显著的拆离断层,最大拆离深度可达到海底以下 13 km,而高温热液喷口的流体化学成分也支持该热液循环系统需要较长的水岩反应区^[55]。虽然第 28 脊段之下并没有发育岩浆房,但拆离断层的发育提供了热液活动存在的可能,岩石圈下部发育的熔体聚集带可以使拆离断层的底部温度迅速升至 650℃,为热液流体循环提供了驱动力。

值得注意的是,受热点影响的洋中脊虽然具有充足的岩浆供应以及加厚的地壳,但是却发育更少的热液喷口^[72]。例如,南大西洋 7°~11°S 脊段,受阿森松热点的影响,洋壳厚度可达 11 km,但却仅仅识别出了一个高温热液喷口^[73];类似的情况也发生在雷克雅内斯洋脊(57°45'~63°09'N)。但 Yue 等^[54]在 SWIR 第 27 脊段识别出了 1 个原本存在的热液区(断桥热液区),3 个可能的热液区,5 个有待确定的疑似热液区,说明在受到热点影响的第 27 脊段(虽然存在一定争议),亦存在高密度的热液喷口,且分布密度是根据数据库(InterRidge database)得到的计算密度的 3.6~8 倍。他们提出深部发育的岩浆房提供了热液喷口所需的热源,第 27 脊段的席状岩墙群导致的破裂岩石圈是其扩张轴热液的上升通道;至于远离扩张轴的热液区,则是深大断层插入到岩浆注入带的结果。

此外,如何开展 SWIR 硫化物资源勘探,带动超慢速扩张脊的基础科学研究,也是目前面临的挑战。例如,地球物理数据(例如 RMBA 值)和 MORB 地球化学数据均表明,在大尺度上,整个印度洋中脊自西向东受到不同的热点影响,受热点影响的热液产物在地球化学和矿物成分上与正常洋中脊的热液产物有何不同?在远离洋中脊/已经停止的扩张中心是否也存在热液系统?SWIR 广泛分布橄榄岩,超镁铁质热液系统以及热液硫化物成矿的机制如何?因此,对 SIWR 典型热液区洋壳的三维结构、构造-岩浆控制机制、深部动力学过程以及热液硫化物矿床分布、类型和规模等问题今后仍有待进一步加强研究。

参考文献 (References)

- [1] Dick H J B, Lin J, Schouten H. An ultraslow-spreading class of ocean ridge [J]. *Nature*, 2003, 426 (6965): 405-412.
- [2] Sauter D, Cannat M. The ultraslow spreading southwest Indian ridge [M]//Rona P A, Devey C W, Dymant J, et al. Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 2010, 88: 153-173.
- [3] Smith D K, Escartin J, Schouten H, et al. Active long-lived faults emerging along slow-spreading Mid-Ocean Ridges [J]. *Oceanography*, 2012, 25 (1): 94-99.
- [4] Baines A G, Cheadle M J, Dick H J B, et al. Mechanism for generating the anomalous uplift of oceanic core complexes: Atlantis Bank, southwest Indian Ridge [J]. *Geology*, 2003, 31 (12): 1105-1108.
- [5] Searle R C, Cannat M, Fujioka K, et al. FUJI Dome: A large detachment fault near 64° E on the very slow-spreading southwest Indian Ridge [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4 (8): 9105.
- [6] Cannat M, Sauter D, Escartin J, et al. Oceanic corrugated surfaces and the strength of the axial lithosphere at slow spreading ridges [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288 (1-2): 174-183.
- [7] 索艳慧.印度洋构造-岩浆过程:剩余地幔布格重力异常证据[D].中国海洋大学博士学位论文,2014 [SUO Yanhui.Tectonic-magmatic processes of the Indian Ocean:Evidence on the residual mantle Bouguer gravity anomaly[D].Doctor Dissertation of Ocean University of China,2014.]
- [8] Carbotte S M, Smith D K, Cannat M, et al. Tectonic and magmatic segmentation of the Global Ocean Ridge System: A synthesis of observations [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2016, 420 (1): 249-295.
- [9] 余星,迪克·亨利,李小虎,等.西南印度洋中脊地质构造特征及其地球动力学意义[J].*地球物理学报*, 2020, 63 (10): 3585-3603. [YU Xing, DICK H, LI Xiaohu, et al. The geotectonic features of the Southwest Indian Ridge and its geodynamic implications [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63 (10): 3585-3603.]
- [10] Zhou H Y, Dick H J B. Thin crust as evidence for depleted mantle supporting the Marion Rise [J]. *Nature*, 2013, 494 (7436): 195-200.
- [11] Li J B, Jian H C, Chen Y J, et al. Seismic observation of an extremely magmatic accretion at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42 (8): 2656-2663.
- [12] Gao C G, Dick H J B, Liu Y, et al. Melt extraction and mantle source at a Southwest Indian Ridge Dragon Bone amagmatic segment on the Marion Rise [J]. *Lithos*, 2016, 246-247: 48-60.
- [13] Sauter D, Cannat M, Meyzen C M, et al. Propagation of a melting anomaly along the ultraslow Southwest Indian Ridge between 46°E and 52°20'E: interaction with the Crozet hotspot? [J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 179 (2): 687-699.
- [14] Yang A Y, Zhao T P, Zhou M F, et al. Isotopically enriched N - MORB: A new geochemical signature of off - axis plume - ridge interaction-A case study at 50°28'E, Southwest Indian Ridge [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2017, 122 (1): 191-213.
- [15] Breton T, Nauret F, Pichat S, et al. Geochemical heterogeneities within the Crozet hotspot [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 376: 126-136.
- [16] Yu X, Dick H J B. Plate-driven micro-hotspots and the evolution of the Dragon Flag melting anomaly, Southwest Indian Ridge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 531: 116002.
- [17] Patriat P, Sauter D, Munsch M, et al. A survey of the southwest Indian ridge axis between Atlantis II fracture zone and the Indian

- Ocean Triple Junction: regional setting and large scale segmentation [J]. *Marine Geophysical Researches*, 1997, 19 (6): 457-480.
- [18] Standish J J, Dick H J B, Michael P J, et al. MORB generation beneath the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge (9°–25°E): Major element chemistry and the importance of process versus source [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9 (5): Q05004.
- [19] Patriat P, Segoufin J. Reconstruction of the central Indian Ocean [J]. *Tectonophysics*, 1988, 155 (1-4): 211-234.
- [20] Cannat M, Rommevaux-Jestin C, Sauter D, et al. Formation of the axial relief at the very slow spreading Southwest Indian Ridge (49° to 69°E) [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104 (B10): 22825-22843.
- [21] Niu X W, Ruan A G, Li J B, et al. Along - axis variation in crustal thickness at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge (50° E) From A wide - angle seismic experiment [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16 (2): 468-485.
- [22] Sauter D, Patriat P, Rommevaux-Jestin C, et al. The Southwest Indian Ridge between 49°15'E and 57°E: focused accretion and magma redistribution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192 (3): 303-317.
- [23] Escrig S, Capmas F, Dupré B, et al. Osmium isotopic constraints on the nature of the DUPAL anomaly from Indian mid-ocean-ridge basalts [J]. *Nature*, 2004, 431 (7004): 59-63.
- [24] Hanan B B, Blichert-Toft J, Hemond C, et al. Pb and Hf isotope variations along the Southeast Indian Ridge and the dynamic distribution of MORB source domains in the upper mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 375: 196-208.
- [25] Janney P E, Le Roex A P, Carlson R W. Hafnium isotope and trace element constraints on the nature of mantle heterogeneity beneath the central Southwest Indian Ridge (13°E to 47°E) [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46 (12): 2427-2464.
- [26] Janney P E, Le Roex A P. Mantle heterogeneity and mixing beneath the Bouvet triple junction region: Hf isotope constraints from the westernmost southwest Indian ridge (0-11°E)[C]//AGU Fall Meeting Abstracts. AGU, 2013.
- [27] Meyzen C M, Ludden J N, Humler E, et al. New insights into the origin and distribution of the Dupal isotope anomaly in the Indian Ocean mantle from MORB of the Southwest Indian Ridge [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6 (11): Q11K11.
- [28] Meyzen C M, Blichert-Toft J, Ludden J N, et al. Isotopic portrayal of the Earth's upper mantle flow field [J]. *Nature*, 2007, 447 (7148): 1069-1074.
- [29] Mahoney J, Le Roex A P, Peng Z, et al. Southwestern limits of Indian Ocean ridge mantle and the origin of Low ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb mid - ocean ridge basalt: Isotope systematics of the central Southwest Indian Ridge (17°-50° E) [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1992, 97 (B13): 19771-19790.
- [30] Kurz M D, Le Roex A, Dick H J B. Isotope geochemistry of the oceanic mantle near the Bouvet triple junction [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62 (5): 841-852.
- [31] Georgan J E, Kurz M D, Dick H J B, et al. Low ³He/⁴He ratios in basalt glasses from the western Southwest Indian Ridge (10°-24° E) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 206 (3-4): 509-528.
- [32] Gautheron C, Moreira M, Gerin C, et al. Constraints on the DUPAL anomaly from helium isotope systematics in the Southwest Indian mid-ocean ridge basalts [J]. *Chemical Geology*, 2015, 417: 163-172.
- [33] Dick H J B, Natlan J H, Alt J C, et al. A long in situ section of the lower ocean crust: Results of ODP Leg 176 drilling at the Southwest Indian Ridge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179 (1): 31-51.
- [34] Zhao M H, Qiu X L, Li J B, et al. Three-dimensional seismic structure of the Dragon Flag oceanic core complex at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge (49°39'E) [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14 (10): 4544-4563.
- [35] Natland J H, Dick H J B. Formation of the lower ocean crust and the crystallization of gabbroic cumulates At A very slowly spreading ridge [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2001, 110 (3-4): 191-233.
- [36] Robinson C J, Bickle M J, Minshull T A, et al. Low degree melting under the Southwest Indian Ridge: the roles of mantle temperature, conductive cooling and wet melting [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 188 (3-4): 383-398.
- [37] Rioux M, Cheadle M J, John B E, et al. The temporal and spatial distribution of magmatism during lower crustal accretion at an ultraslow-spreading ridge: High-Precision U–Pb zircon dating of ODP Holes 735B and 1105A, Atlantis Bank, Southwest Indian Ridge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 449: 395-406.
- [38] Bach W, Alt J C, Niu Y L, et al. The geochemical consequences of late-stage low-grade alteration of lower ocean crust at the SW Indian Ridge: Results from ODP Hole 735B (Leg 176) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65 (19): 3267-3287.
- [39] Gao Y J, Hoefs J, Przybilla R, et al. A complete oxygen isotope profile through the lower oceanic crust, ODP Hole 735B [J]. *Chemical Geology*, 2006, 233 (3-4): 217-234.
- [40] Holm P M. Sr, Nd and Pb isotopic composition of in situ lower crust at the Southwest Indian Ridge: results from ODP Leg 176 [J]. *Chemical Geology*, 2002, 184 (3-4): 195-216.
- [41] 靳野. 西南印度洋脊ODP 735B钻孔上部辉长岩研究[D]. 中国地质大学 (北京)博士学位论文, 2013 [JIN Ye. An approach to the Gabbros from the upper part of ODP 735B hole at the Southwest Indian ridge[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2013.]
- [42] Kempton P D, Hawkesworth C J, Fowler M. Geochemistry and isotopic composition of gabbros from Layer 3 of the Indian ocean crust, Leg 118, Hole 735B[M]//Von Herzen R P, Robinson P T. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1991, 118: 127-143.
- [43] Warren J M. Global variations in abyssal peridotite compositions [J]. *Lithos*, 2016, 248-251: 193-219.
- [44] Warren J M, Shimizu N, Sakaguchi C, et al. An assessment of upper mantle heterogeneity based on abyssal peridotite isotopic compositions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114 (B12): B12203.
- [45] Seyler M, Brunelli D, Toplis M J, et al. Multiscale chemical

- heterogeneities beneath the eastern Southwest Indian Ridge (52°E-68°E): Trace element compositions of along-axis dredged peridotites [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(9): Q0AC15.
- [46] Li W, Liu C Z, Tao C H, et al. Osmium isotope compositions and highly siderophile element abundances in abyssal peridotites from the Southwest Indian Ridge: Implications for evolution of the oceanic upper mantle [J]. *Lithos*, 2019, 346-347: 105167.
- [47] Snow J E, Hart S R, Dick H J B. Nd and Sr isotope evidence linking mid-ocean-ridge basalts and abyssal peridotites [J]. *Nature*, 1994, 371(6492): 57-60.
- [48] Mallick S, Dick H J B, Sachi-Kocher A, et al. Isotope and trace element insights into heterogeneity of subridge mantle [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15(6): 2438-2453.
- [49] Mallick S, Standish J J, Bizimis M. Constraints on the mantle mineralogy of an ultra-slow ridge: Hafnium isotopes in abyssal peridotites and basalts from The 9-25°E Southwest Indian Ridge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 410: 42-53.
- [50] Salters V J M, Dick H J B. Mineralogy of the mid-ocean-ridge basalt source from neodymium isotopic composition of abyssal peridotites [J]. *Nature*, 2002, 418(6893): 68-72.
- [51] Cannat M, Sauter D, Bezou A, et al. Spreading rate, spreading obliquity, and melt supply at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(4): Q04002.
- [52] Georgen J E, Lin J, Dick H J B. Evidence from gravity anomalies for interactions of the Marion and Bouvet hotspots with the Southwest Indian ridge: effects of transform offsets [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 187(3-4): 283-300.
- [53] Tao C H, Lin J, Guo S Q, et al. First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge [J]. *Geology*, 2012, 40(1): 47-50.
- [54] Yue X H, Li H M, Ren J Y, et al. Seafloor hydrothermal activity along mid-ocean ridge with strong melt supply: study from segment 27, southwest Indian ridge [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 9874.
- [55] Tao C H, Seyfried W E Jr, Lowell R P, et al. Deep high-temperature hydrothermal circulation in a detachment faulting system on the ultra-slow spreading ridge [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1300.
- [56] Jian H C, Singh S C, Chen Y J, et al. Evidence of an axial magma chamber beneath the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge [J]. *Geology*, 2017, 45(2): 143-146.
- [57] Ito G, Lin J, Graham D. Observational and theoretical studies of the dynamics of mantle plume-mid-ocean ridge interaction [J]. *Reviews of Geophysics*, 2003, 41(4): 1017.
- [58] Meyzen C M, Toplis M J, Humler E, et al. A discontinuity in mantle composition beneath the southwest Indian ridge [J]. *Nature*, 2003, 421(6924): 731-733.
- [59] MacLennan J, McKenzie D, Gronv Id K, et al. Crustal accretion under northern Iceland [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 191(3-4): 295-310.
- [60] Li W, Jin Z M, Li H M, et al. High water content in primitive mid-ocean ridge basalt from southwest Indian ridge (50.56°E): implications for recycled hydrous component in the mantle [J]. *Journal of Earth Science*, 2017, 28(3): 411-421.
- [61] Li W, Soustelle V, Jin Z M, et al. Origins of water content variations in the suboceanic upper mantle: Insight from Southwest Indian Ridge abyssal peridotites [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(3): 1298-1329.
- [62] Smith D K, Tivey M A, Schouten H, et al. Locating the spreading axis along 80 km of the Mid-Atlantic Ridge south of the Atlantis Transform [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1999, 104(B4): 7599-7612.
- [63] Standish J J, Sims K W W. Young off-axis volcanism along the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(4): 286-292.
- [64] Tucholke B E, Behn M D, Buck W R, et al. Role of melt supply in oceanic detachment faulting and formation of megamullions [J]. *Geology*, 2008, 36(6): 455-458.
- [65] Anderson D L. Speculations on the nature and cause of mantle heterogeneity [J]. *Tectonophysics*, 2006, 416(1-4): 7-22.
- [66] Mougél B, Agranier A, Hemond C, et al. A highly unradiogenic lead isotopic signature revealed by volcanic rocks from the East Pacific Rise [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4474.
- [67] Mougél B, Moreira M, Agranier A. A "high ⁴He/³He" mantle material detected under the East Pacific Rise (15°4'N) [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(5): 1375-1383.
- [68] Wanless V D, Shaw A M. Lower crustal crystallization and melt evolution at mid-ocean ridges [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(9): 651-655.
- [69] Li W, Tao C H, Zhang W, et al. Melt inclusions in plagioclase macrocrysts at mount Jourdanne, Southwest Indian ridge (~64° E): implications for an enriched mantle source and shallow magmatic processes [J]. *Minerals*, 2019, 9(8): 493.
- [70] 张涛, 林间, 高金耀. 90Ma以来热点与西南印度洋中脊的交互作用: 海台与板内海山的形成 [J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 54(8): 1177-1188. [ZHANG Tao, LIN Jian, GAO Jinyao. Interactions between hotspots and the Southwest Indian Ridge during the last 90 Ma: Implications on the formation of oceanic plateaus and intra-plate seamounts [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(8): 1177-1188.]
- [71] Baker E T, German C R. On the global distribution of hydrothermal vent fields [C]//German C R, Lin J, Parson L M. Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans. Washington, DC: American Geophysical Union, 2004, 148: 245-266.
- [72] Baker E T, Haymon R M, Resing J A, et al. High-resolution surveys along the hot spot-affected Galápagos Spreading Center: 1. Distribution of hydrothermal activity [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(9): Q09003.
- [73] Melchert B, Devey C W, German C R, et al. First evidence for high-temperature off-axis venting of deep crustal/mantle heat: The Nibelungen hydrothermal field, southern mid-Atlantic ridge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 275(1-2): 61-69.