

余星, 迪克·亨利, 李小虎等. 2020. 西南印度洋中脊地质构造特征及其地球动力学意义. 地球物理学报, 63(10):3585-3603, doi:10. 6038/cjg2020N0230.

Yu X, Dick H, Li X H, et al. 2020. The geotectonic features of the Southwest Indian Ridge and its geodynamic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 63(10):3585-3603, doi:10. 6038/cjg2020N0230.

西南印度洋中脊地质构造特征及其地球动力学意义

余星¹, 迪克·亨利², 李小虎¹, 初凤友¹, 董彦辉¹, 胡航¹

1 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
2 美国伍兹霍尔海洋研究所地质与地球物理系, 美国马萨诸塞伍兹霍尔 02540

摘要 西南印度洋中脊(SWIR)增生的洋壳面积仅占印度洋的 15%左右,但其具有比东南印度洋中脊和西北印度洋中脊更悠久而复杂的演化历史. 基于已有的地质、地球物理和地球化学等资料,系统总结了 SWIR 的地质构造特征,并讨论了 SWIR 的演化过程、洋脊地幔的不均一性、洋脊周边海底高原成因等核心问题. SWIR 地形中段高、东西两段低,空间重力异常基本与地形变化一致. 按转换断层一级边界可将 SWIR 划分为 20 个一级段. SWIR 的磁异常条带呈现两端渐进式分布和中段带状分布特征,对应洋脊的三期演化历史. SWIR 的地幔源区极不均一,尤其是中新元古代造山带根部集中拆离的中段. 源区地幔的不均一性与大陆裂解和洋脊演化过程密切相关. SWIR 的东端与西北印度洋中脊和东南印度洋中脊的邻近洋脊段具有地球化学亲缘性,西端与大西洋中脊和南美洲—南极洲洋中脊的邻近洋脊段具有地球化学亲缘性,这与 SWIR 的渐进式扩张有关. SWIR 周边海底高原普遍具有较大的地壳厚度,其成因除了陆壳基底之外,可能与热点火山作用、热点-洋脊相互作用或热点-三联点相互作用有关,目前尚未形成统一的认识. SWIR 的形成演化及其作用域内的熔融异常(如海底高原)是冈瓦纳大陆裂解、残留岩石圈地幔、软流圈地幔和深部地幔热柱物质共同作用的结果. 了解 SWIR 的演化过程对揭示冈瓦纳大陆的裂解过程和印度洋的演化具有重要意义.

关键词 西南印度洋中脊; 洋中脊玄武岩; 地质构造特征; 地球化学; 海底高原

doi:10. 6038/cjg2020N0230 中图分类号 P541 收稿日期 2019-06-04, 2020-04-29 收修定稿

The geotectonic features of the Southwest Indian Ridge and its geodynamic implications

YU Xing¹, DICK Henry², LI XiaoHu¹, CHU FengYou¹, DONG YanHui¹, HU Hang¹

1 Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China
2 Department of Geology and Geophysics, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA 02540, USA

Abstract The Southwest Indian Ridge (SWIR) has a more complex evolution than the Southeast Indian Ridge (SEIR) and the Northwest Indian Ridge (NWIR), even though it takes up only 15% of the total area of Indian Ocean crust. On the base of existing geological, geophysical and geochemical data, we systematically summarized the geotectonic characteristics of SWIR, and tried to address the issues of evolution process of SWIR, the mantle heterogeneity beneath the ridge and the origin of adjacent oceanic plateau. The bathymetry of the ridge shows obvious shoaling up in the Mid-section of SWIR, while the East-section and West-section are relatively

deeper. The free-air gravity anomaly is consistent with the topography. Base on the gravimetric and topographic features, SWIR can be subdivided into 20 first-order segments according to the first-order boundaries, like transform faults. The magnetic anomaly of SWIR shows propagating spreading at both ends and horizontal zoning distribution in the Mid-section, suggesting a three-stage evolution history for the ridge. The mantle sources of SWIR are extremely heterogeneous, especially in the Mid-section, where the delamination could most probably happen beneath the Meso- to Neoproterozoic orogenic belt. The heterogeneity of the source is closely related to the continental breakup and ridge evolution. Both ends of SWIR show geochemical affinities with the adjacent ridge segments of Mid-Atlantic Ridge and South America-Antarctica Ridge, SEIR and NWIR, respectively. The oceanic plateaus close to SWIR generally have large crustal thickness, which may be related to the hotspot magmatism, hotspot-ridge interaction, or even hotspot-triple junction interaction, apart from the ghostly stranded continental fragment trapped in the asthenospheric mantle. Understanding the evolution history of SWIR is of great importance for revealing the break-up process of Gondwana supercontinent and the evolution of the Indian Ocean.

Keywords Southwest Indian Ridge; Mid-ocean ridge basalt; Geotectonic features; Geochemistry; Oceanic plateau

0 引言

西南印度洋中脊(Southwest Indian Ridge, 简称 SWIR)是印度洋中扩张速率最慢的洋中脊,属超慢速扩张洋中脊(Dick et al., 2003; Sauter et al., 2009). 根据洋脊及洋陆过渡带分布,估算 SWIR 作用形成的洋壳面积,即作用域,约 1000 万 km^2 ,占印度洋的 $\sim 15\%$,小于西北印度洋中脊(NWIR)和东南印度洋中脊(SEIR)(余星等, 2019a, b). 但相对 NWIR 和 SEIR, SWIR 具有更悠久的演化历史,其初始活动时间可上溯至 ~ 165 Ma,即非洲和南极洲板块的分离(Livermore and Hunter, 1996; Bernard et al., 2005). 整个 SWIR 的活动贯穿了印度洋演化的始终,印度洋区域构造演化、岩浆作用和深部地球动力学过程均在 SWIR 作用域上留下痕迹,因此研究 SWIR 的地质构造特征具有重要的地球动力学意义.

SWIR 的存在最早由 Rothé(1954)根据海底天然地震的分布提出,随后 Ewing 和 Heezen (1960)利用 R/V Vema 号获取的海底地形资料证实了其真实存在. 1959—1965 年间,在“国际印度洋考察计划(IIOE)”的推动下,西南印度洋的调查研究活动不断增加(Schlich, 1982). 1992 年启动的“国际大洋中脊研究计划(InterRidge)”为 SWIR 的调查研究提供了新的机遇. 截至目前,美国、南非、日本、英国、法国、德国和俄罗斯等国均在 SWIR 开展过相关的

调查研究工作. 我国在 SWIR 已成功申请获得一块多金属硫化物矿区,对矿区及周边区域的地质构造特征及成矿潜力开展了高密度的调查和研究工作,获取了丰富的资料和成果(Tao et al., 2012; Zhao et al., 2013; Niu et al., 2015; Li et al., 2015). 不过,由于调查和研究工作主要集中在合同区,对整个 SWIR 的研究和认识仍然十分有限(李江海等, 2015; 李三忠等, 2015; 刘持恒等, 2018),对 SWIR 的演化过程、洋脊地幔不均一性、洋脊周边海底高原成因等重要科学问题仍有待进一步研究.

本文利用国内外已有的调查和研究成果,进一步梳理 SWIR 的地质构造特征,包括地形地貌、重磁异常、岩石地球化学特征等,探讨 SWIR 的演化过程、洋脊下地幔的不均一性以及洋脊周边海底高原的成因等问题,为了解冈瓦纳大陆的裂解过程和印度洋演化过程提供支撑,为了解晚侏罗世以来印度洋区域的地球动力学过程提供帮助.

1 SWIR 地形及分段特征

SWIR 分布于布维三联点至罗德里格斯三联点之间(图 1a),全长 ~ 7700 km(Bernard et al., 2005; 曹红, 2010; 刘持恒等, 2018). 离轴 200 km 范围内的洋壳水深范围 $-6922 \sim -780$ m,其中主体水深 $-5000 \sim -2000$ m,布维岛海拔最高,高于海平面 ~ 780 m,离轴距离约 70 km(图 1b). 深大断裂处水深最大,如安德鲁—贝恩断裂带和梅尔维尔断裂带,

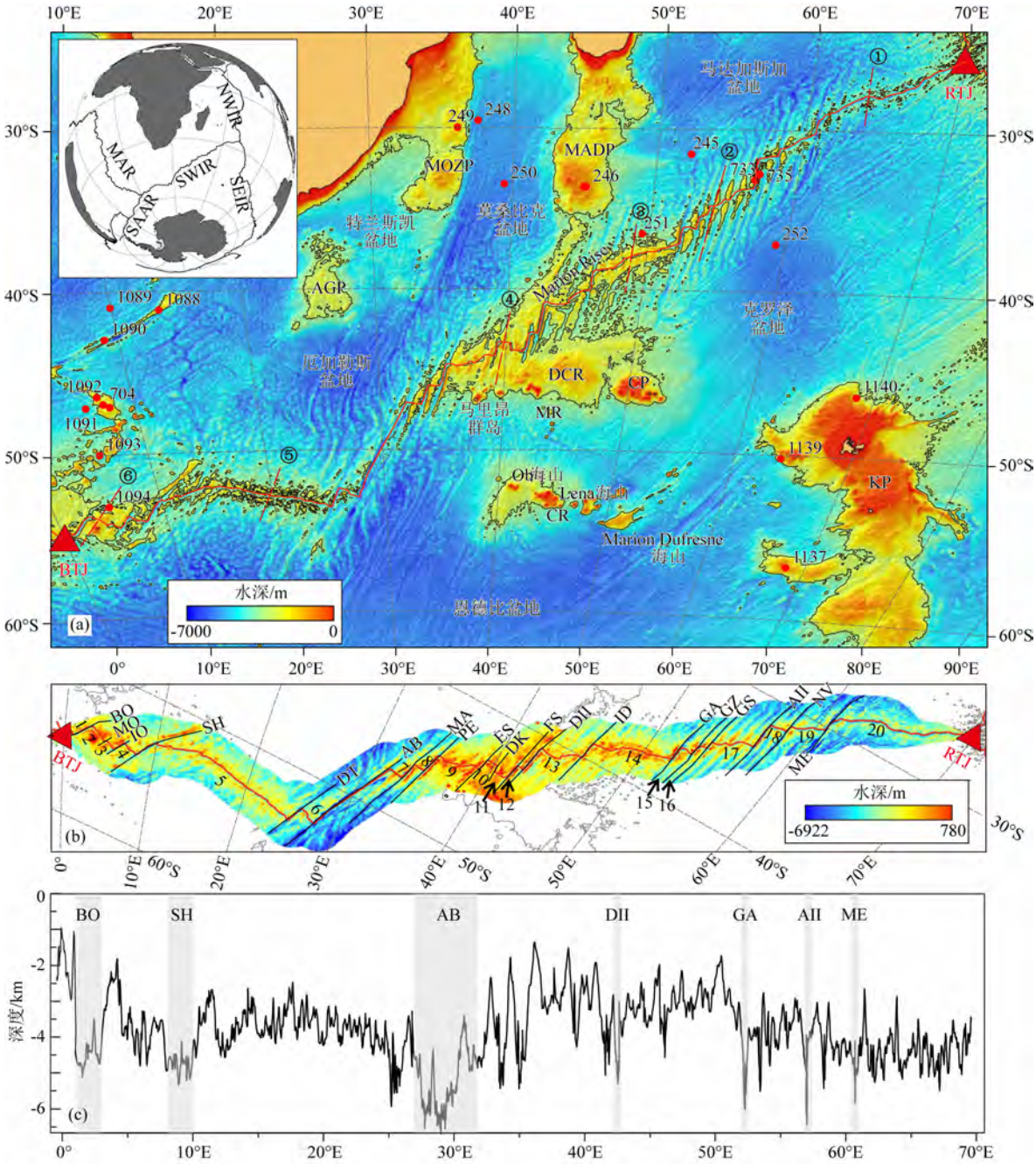


图 1 西南印度洋中脊及周边地形特征

(a) 西南印度洋中脊水深分布图,海底高原界线为-3000 m等深线,沿洋脊中央裂谷的红线为扩张中心,垂直于洋脊的红色虚线指示图 2 的剖面线位置,红色圆点为大洋钻探井位.投影方式为 Aitoff 等距投影,中央经线为 35°E.插图为西南印度洋中脊位置图.(b) 西南印度洋中脊离轴 200 km 内的水深分布图.垂直于洋脊的黑线为断裂带,断裂带缩写参照表 1.数字编号为一级洋脊段序号.(c) 沿 SWIR 轴部的水深变化图.地形图和水深剖面数据来源于 GEBCO. SWIR—西南印度洋中脊, NWIR—西北印度洋中脊, SEIR—东南印度洋中脊, MAR—大西洋中脊, SAAR—南美洲-南极洲洋中脊, BTJ—布维三联点, RTJ—罗德里格斯三联点, MADP—马达加斯加海底高原, MOZP—莫桑比克海底高原, AGP—厄加勒斯海底高原, MR—马里昂隆起, DCR—德尔卡诺隆起, CR—康拉德隆起, KP—凯尔盖朗海底高原.

Fig. 1 The topography of the Southwest Indian Ridge and its adjacent region

(a) The bathymetry of SWIR. The extent of oceanic plateau is indicated by -3000 m contour lines. The thin red line along the ridge valley is the spreading center. The red dashed lines across the ridge show the locations of profiles in Fig. 2. The red dots indicate the locations of deep ocean drilling. The map is projected in Atioff Equidistance Projection with central longitude of 35°E. The upper left inset shows the location of SWIR. (b) The bathymetry of SWIR within the off-axis distance of 200 km. The black lines across the ridge indicate the fracture zones. The abbreviations for fracture zones were listed in Table 1. The digit beside each ridge segment indicate the segment number. (c) The water depth variations along the ridge axis valley for the SWIR. The bathymetric data are from GEBCO. SWIR—Southwest Indian Ridge, NWIR—Northwest Indian Ridge, SEIR—Southeast Indian Ridge, MAR—Mid-Atlantic Ridge, SAAR—South America-Antarctic Ridge, BTJ—Bouvet Triple Junction, RTJ—Rodrigues Triple Junction. MADP—Madagascar Plateau, MOZP—Mozambique Plateau, AGP—Agulhas Plateau, MR—Marion Rise, DCR—Del Cano Rise, CR—Conrad Rise, KP—Kerguelen Plateau.

水深可超过-6800 m. 沿洋脊轴部水深从布维岛往东逐渐加深,直至安德鲁-贝恩断裂带附近. 安德鲁-贝恩断裂带至加列尼断裂带之间洋脊水深较浅,再往东水深逐渐加大(图 1c). 洋脊轴部普遍发育中央裂谷,裂谷规模可沿洋脊变化,19.60°E 和 54.48°E 洋脊段裂谷明显,宽约 50 km,落差达 2500 m (图 2). 从裂谷壁顶部往洋脊两翼,水深随离轴距离而加大,两翼的地形起伏在不同洋脊段呈现不同的频率特征. 梅尔维尔断裂带以东(如 63.59°E 剖面位置)洋脊段具有高频变化特征,即地形崎岖,变化频率快,但幅度较小,水深变化范围总体在-3000 ~ -5000 m(Cannat et al., 2006; Sauter et al., 2013). 洋脊南北两翼地形通常呈对称分布,但 39.93°E 和 3.89°E 附近洋脊段,南翼地形高于北翼,可能分别与南部布维热点和马里昂热点的活动有关(图 2).

超慢速扩张洋中脊普遍发育斜向扩张带和非转换断层不连续带,使洋脊分段边界复杂化. Mendel

等(1997)利用地形数据研究了 SWIR 57°E—70°E 之间洋脊段的分段机制,共识别出 4 种类型的非转换断层不连续带,划分了 20 个洋脊段,并认为 SWIR 具有比大西洋中脊更厚的岩石圈,岩浆更集中,因此分段更短,沿脊水深差异更大. Grindlay 等(1998)利用测深和其他地球物理调查方法对 SWIR 15°30'E—25°E 间的洋脊进行了分段研究,将其分为 3 个一级洋脊段和 14 个二级洋脊段. Muller 等(1999)利用折射地震数据研究了 SWIR 65°30'E—66°30'E 洋脊段的分段机制,认为超慢速扩张洋脊的分段可以反映地幔上涌和岩浆供给的差异,洋脊段中部岩浆集中,洋壳较厚,而洋脊段两端岩浆供应量少,地壳较薄. Cannat 等(1999)根据沿洋脊轴部的水深变化和地幔布格重力异常,将 SWIR 46°E—69°E 共划分为 26 个洋脊段. Baines 等(2007)将加列尼断裂带以东洋脊划分为 3 个一级段,分段边界分别为亚特兰蒂斯 II 号断裂带和梅尔维尔断裂带.

目前关于 SWIR 的分段和命名方式有多种,比如,用经度区间命名(Mahoney et al., 1992),从西到东按顺序编号(Rommevaux-Jestin et al., 1997),从东到西按数字编号(Cannat et al., 1999),用边界断层名编号(Hosford et al., 2003; Baines et al., 2007),等等. 另外,对于斜向扩张带的归属问题存在分歧,一般认为斜向扩张带与非转换断层不连续带均为洋脊段边界(Patriat et al., 1997),而 Bains 等(2007)主张将斜向扩张带视为特殊的洋脊段.

基于前人的分段研究结果,利用已有的地形和重磁异常资料,重新梳理 SWIR 的主要转换断层和断裂带,明确了 SWIR 的一级转换边界,并依此划分了 20 个一级洋脊段(表 1,图 1b). 分段命名建议使用 Hosford 等(2003)和 Baines 等(2007)的方法,即选取边界转换断层的首字母组合,如 BTJ 和 BO 断裂带之间的洋脊称为 BB 洋脊段,避免纯数字命名的易混淆性,同时比经度区间命名更简化. 二级洋脊段的细分,则可以在一级分段基础上加编号,如 MR-1(Baines et al., 2007). 由于目前高精度地形资料有限,暂时无法完成整个 SWIR 的二级分段.

2 重力异常特征

重力异常可以有效揭示地壳浅部和深部的地质结构,反映地质体的构造特征和演化过程. 在 SWIR 作用域内,针对洋中脊重力异常的专业调查较少,多数为途经 SWIR 的走航式重力测量,约 30 个航段,

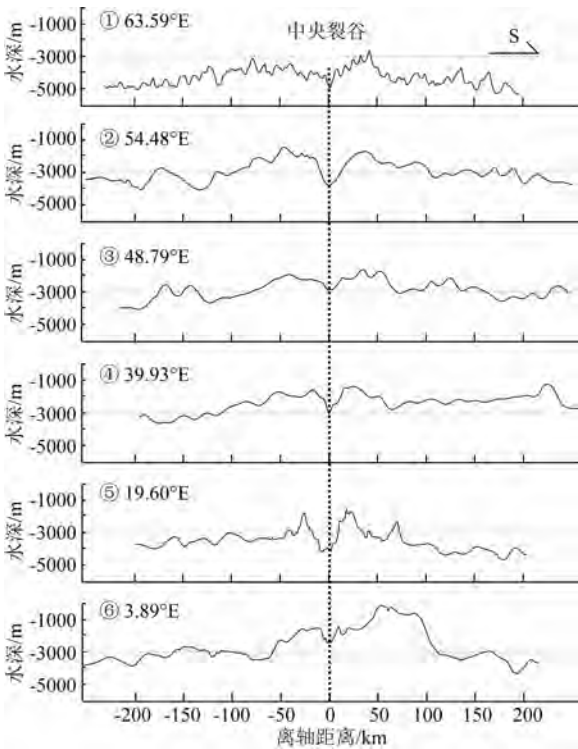


图 2 西南印度洋中脊不同洋脊段的横向水深剖面图
图中粗虚线代表扩张中心,细虚线为水深-3000 m 参考线. 经度值代表剖面与扩张中心的交叉点经度,具体剖面位置见图 1 的红色虚线.

Fig. 2 The bathymetric profiles of selected sections of the Southwest Indian Ridge

The bold dashed vertical line represents the location of spreading center. The thin dashed horizontal lines represent the reference depth of -3000 m. The longitude labeled in the upper left of each plot is the position of intersecting points of ridge and the profiles.

The profiles are also marked in Fig. 1 as dashed red line.

表 1 西南印度洋中脊主要转换断层(断裂带)参数统计表

Table 1 The parameters of the main transform faults along the Southwest Indian Ridge

一级洋脊段		前人分段命名规则	东界断裂带			断距 /km	断层位置		滑动方向	推测断层起始时间
编号	建议名		中文名	英文名	缩写		经度	纬度		
1	BB	Oblique and Orthogonal supersegments ^{a)}	布维断裂带	Bouvet FZ	BO	167	1°55'E	54°18'S	左旋	20 Ma
2	BM		魔术师断裂带	Moshesh FZ	MO	32	4°35'E	54°14'S	左旋	<5 Ma
3	MI		伊拉斯—奥卡达斯断裂带	Islas Orcadas FZ	IO	102	6°03'E	54°09'S	左旋	20 Ma
4	IS		沙卡断裂带	Shaka FZ	SH	192	8°59'E	53°24'S	左旋	20 Ma
5	SD		迪图瓦断裂带	DuToit FZ	DT	160	25°30'E	52°59'S	左旋	>90 Ma
6	DA		安德鲁—贝恩断裂带	Andrew Bain FZ	AB	720	29°49'E	49°44'S	左旋	>150 Ma
7	AM		马里昂断裂带	Marion FZ	MA	125	33°36'E	46°42'S	左旋	>120 Ma
8	MP	D4 ^{b)} ; D3 ^{b)} ; D2 ^{b)} ; D1 ^{b)} ; C3-C2 ^{b)} ; C1 ^{b)} ; 25—28 ^{c)} ; 24 ^{c)} ; 23 ^{c)} ; B3-B2 ^{b)} ; 20—22 ^{c)} ; S1 ^{d)} ; GA-1~GA-6 ^{e)} ; 18—19 ^{c)} ; S2~S3 ^{d)} ; AN-1~AN-2 ^{e)} ; B1 ^{b)} ; 15—17 ^{c)} ; S8~S17 ^{d)} ; NM-1 ^{c)} ; A3-A1 ^{b)} ; 1—14 ^{c)} ; S8~S17 ^{d)} ; MR-1~MR-3 ^{e)}	爱德华王子断裂带	Prince Edward FZ	PE	155	35°06'E	45°28'S	左旋	>120 Ma
9	PE		埃里克辛普森断裂带	Eric Simpson FZ	ES	112	39°15'E	43°47'S	左旋	>120 Ma
10	ED		德克勒克断裂带	DeKlerk FZ	DK	58	40°22'E	43°40'S	右旋	15 Ma
11	DF		费雪断裂带	Fisher FZ	FS	150	41°36'E	43°16'S	左旋	10 Ma
12	FD		发现 II 号断裂带	Discovery II FZ	DII	222	42°37'E	41°55'S	左旋	>96 Ma
13	DI		英多姆断裂带	Indomed FZ	ID	153	46°06'E	39°33'S	左旋	80 Ma
14	IG		加列尼断裂带	Gallieni FZ	GA	121	52°19'E	36°31'S	左旋	60 Ma
15	GZ		加泽尔断裂带	Gazelle FZ	GZ	96	53°23'E	35°44'S	左旋	55 Ma
16	GS		高斯断裂带	Gauss FZ	GS	80	54°03'E	34°57'S	左旋	47 Ma
17	GA		亚特兰蒂斯 II 号断裂带	Atlantis II FZ	AII	199	57°02'E	32°44'S	左旋	38 Ma
18	AN		诺瓦拉断裂带	Novara FZ	NV	57	58°24'E	31°23'S	左旋	38 Ma
19	NM		梅尔维尔断裂带	Melville FZ	ME	147	60°41'E	29°44'S	左旋	38 Ma
20	MR		罗德里格斯三联点	Rodriguez Triple Junction	RTJ		70°01'E	25°32'S		

注:^{a)}表示 Standish et al. (2008)的分段命名方法;^{b)}表示 Meyzen et al. (2005)的命名方法;^{c)}表示 Cannat et al. (1999)的命名方法;^{d)}表示 Rommevaux-Jestin et al. (1997)的命名方法;^{e)}表示 Hosford et al. (2003)和 Bains et al. (2007)的命名方法。

且主要集中在洋脊两端的三联点区域。West 等(1995)和 Honsho 等(1996)利用罗德里格斯三联点附近的地球物理调查资料开展了重力研究,发现这一地区的 SWIR 地幔布格异常变化很小。Grindlay 等(1998)研究了 SWIR 15°30'E—25°E 的地幔布格重力异常,发现该段洋脊可分为重力异常迥异的三段,西段 18°E—20°30'E 布格重力异常值低,地壳较厚,并显示岩浆源向东迁移的特征,形成 V 字型构造,中段为~84 km 的斜向扩张段,东段布格重力异常值高,地壳较薄。Georgen 等(2001)利用卫星空间重力异常和船测水深数据,计算了残余地幔布格异

常,认为布维三联点附近洋壳较厚,并认为 SWIR 中段附近的马里昂热点对洋脊有显著的影响,受转换断层阻挡效应,热点影响区域限于安德鲁—贝恩断裂带和发现 II 号断裂带之间。Sauter 等(2001)利用 1995 年 R/V L'Atalante 航次调查资料研究了 SWIR 49°15'E—57°E 洋脊段的重力异常特征,发现加列尼断裂带是 SWIR 的一个重要构造边界,其东侧洋脊比西侧洋脊具有更高的布格重力异常,指示地壳较薄,地幔温度较低。张涛等(2013)通过重力反演揭示 SWIR 49.3°E—51.2°E 区域,地壳厚度最厚超过 9.0 km,具有明显的熔融异常。

根据前人的重力调查结果,给合 Sandwell 等(2014)的全球海洋重力模型,发现 SWIR 离轴 200 km 内的空间重力异常主要集中于 $-30 \sim +90$ mGal. 空间重力异常形态基本与水深异常相一致,沿脊轴方向空间重力异常呈现中段高两端低的特征,中段高值区对应安德鲁—贝恩断裂带和加列尼断裂带之间的水深异常区. 垂直洋脊方向,中央裂谷重力异常值低,裂谷壁顶部高地重力值高,从洋脊高地往外随深度变深而重力异常值下降. 中央裂谷、转换断层和断裂带具有最低的重力异常值,深大断裂带可低至 -149 mGal,而洋脊两侧高地以及洋脊与转换断层构成的内角高地具有最高的重力异常,可达 150 mGal 以上(图 3).

SWIR 两侧的洋盆,如克罗泽盆地、恩德比盆地、厄加勒斯盆地、莫桑比克盆地、马达加斯加盆地等,重力基本均衡,重力异常值在零值上下. 而盆地中的海底高地,如马达加斯加海底高原(MADP)、莫桑比克海底高原(MOZP)、厄加勒斯海底高原(AGP)、克罗泽海底高原(CP)和康纳德隆起(CR)

等,则显示高重力异常特征(图 3). 海底高原与周边洋壳之间的重力异常呈现不同的过渡关系,AGP 与周边洋壳重力异常平缓过渡,而 MADP 和 MOZP 在莫桑比克盆地一侧均显示明显的重力凹槽,CP 的西侧、CR 的东侧也具有类似特征,反映不同部位不同的重力均衡状态. 在 SWIR 21°E — 39°E 洋脊两侧离轴约 500 km 处有明显的 S 型重力异常条带,指示转换断层的转向或地幔流向线的变化(Bernard et al., 2005). 从罗德里格斯三联点到加列尼断裂带之间的洋脊两侧显示明显的重力异常边界,指示 SWIR 作用域与东南印度洋中脊作用域、西北印度洋中脊作用域的界线,即代表罗德里格斯三联点的移动轨迹(图 3).

3 磁异常特征、洋脊作用域和扩张历史

磁异常反映地壳内不同磁性岩石受地磁场磁化而产生的磁力异常,其影响因素包括磁性体的大小、形态、走向、分布位置、岩石磁化强度等. 对于 SWIR

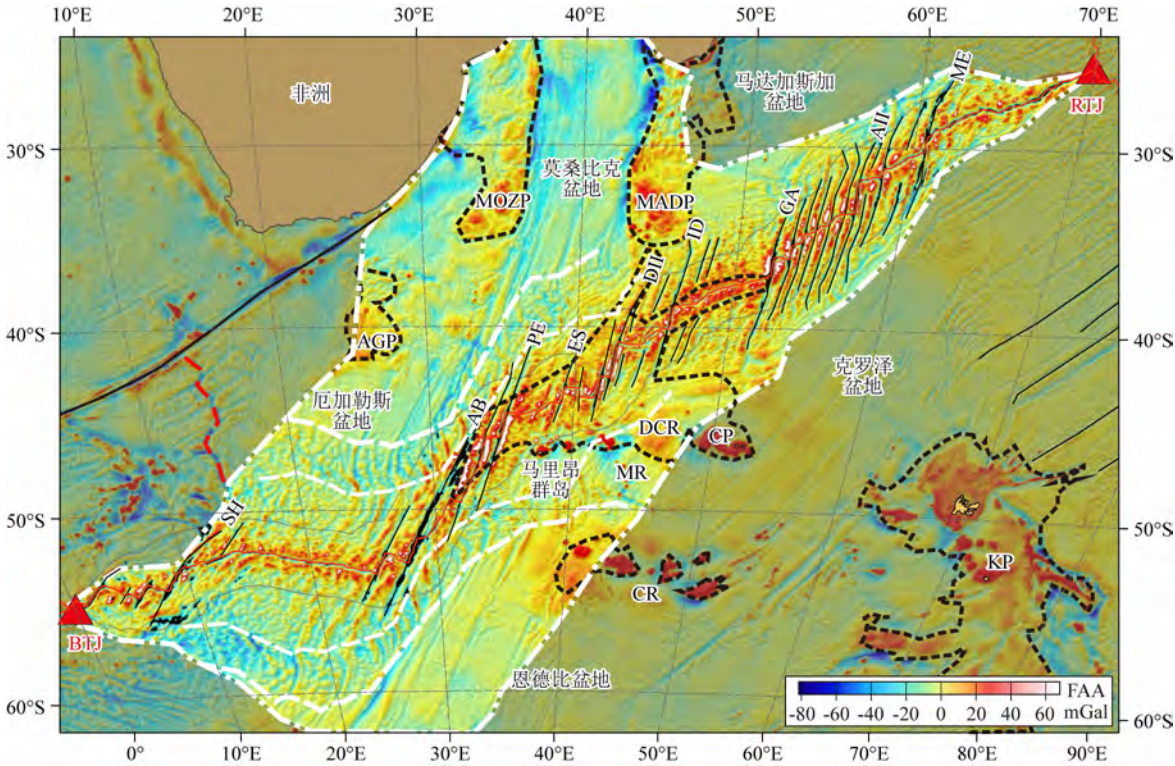


图 3 西南印度洋中脊的自由空间重力异常(FAA)分布图

红线代表扩张中心,黑线为断裂带,黑色虚线为海底高原分布,白色点划线包围的高亮区域为 SWIR 作用域,白色粗虚线和细虚线分别代表复杂扩张期界线. 重力异常数据参考 Sandwell et al. (2014).

Fig. 3 The free-air gravity anomalies (FAA) for the Southwest Indian Ridge

The red line shows the spreading center. The black lines across the ridge are fracture zones. The dashed black curves represent the location of oceanic plateau. The highlighted area enclaved by the white dash-dotted curves is the regime of SWIR. The bold and thin dashed white lines represent the boundary of complex spreading stage. The gravity data are according to Sandwell et al. (2014).

的磁力调查基本与重力调查同步. Bergh 和 Norton (1976)、Patriat(1979)等识别了 SWIR 中段的磁异常条带, Tapscott 等(1980)和 Sclater 等(1981)利用所有磁异常数据计算了旋转极, 并阐述了非洲和南极洲的相对运动过程. Royer 等(1988)利用磁异常、水深和卫星测高资料恢复了 SWIR 84—56 Ma 之间的扩张历史, 并发现在 74—56 Ma 期间洋脊扩张方向发生了转变. Honsho 等(1996)通过对罗德里格斯三联点附近的磁力异常调查发现, 靠近三联点的 SWIR 裂谷内的磁异常条带继承了 NWIR 与 SEIR 的磁异常条带, 反映 SWIR 向北东方向渐进式楔入的特征. Hosford 等(2003)利用 Atlantis II 断裂带附近洋中脊的近底走航重磁资料, 发现洋脊段中心的磁异常信号弱于洋脊段两端, 表明长时间蚀变作用会减弱磁异常, 而两端的下地壳则保留了较弱磁异常特征. Sauter 等(2004)研究了 SWIR 50°30'E、55°30'E 和 66°20'E 三个区的磁结构和分段性之间的关系, 发现洋脊段中部磁化强度较高, 两端非转换断层不连续带磁化强度较低. Baines 等(2007)分析了 SWIR 55°45'E—62°E 的磁异常特征, 认为该段

洋脊形成于 64—40 Ma 罗德里格斯三联点的北东向迁移, 并且 40 Ma 前后, 洋脊扩张方向发生顺时针方向旋转.

不同分辨率的磁异常数据可以揭示不同尺度的地质信息, 基于全球地磁异常 2' 分辨率网格数据 (EMAG2), 可以揭示 SWIR 大尺度的磁异常特征. 根据洋壳磁异常条带分布, 结合地形和重力异常特征, 可以圈定 SWIR 的作用域. SWIR 活动增生的洋壳呈纺锤形, 中段宽, 东西两端窄, 面积约 1000 万 km² (图 4). SWIR 的磁异常条带呈现渐进式分布和带状分布特征 (图 4). ~20°E 以西洋脊段磁条带往西逐渐减少, 英多姆断裂带以东洋脊段, 磁条带数目向北东方向逐渐减少, 表明 SWIR 不断向两端渐进式扩张. 20°E 至英多姆断裂带之间的中段洋脊, 两侧磁条带分布最完整, 呈现三期分带特征. 据 Bernard 等(2005)识别的磁异常条带, 从脊轴到 23o 异常带, 磁条带清晰细密且基本平行. 23o 到 33 之间的磁条带较杂乱, 为复杂磁异常带. 33 异常带之外, 磁异常条带较粗而模糊 (图 4).

磁条带分布指示了洋壳的年龄分布特征, 揭露

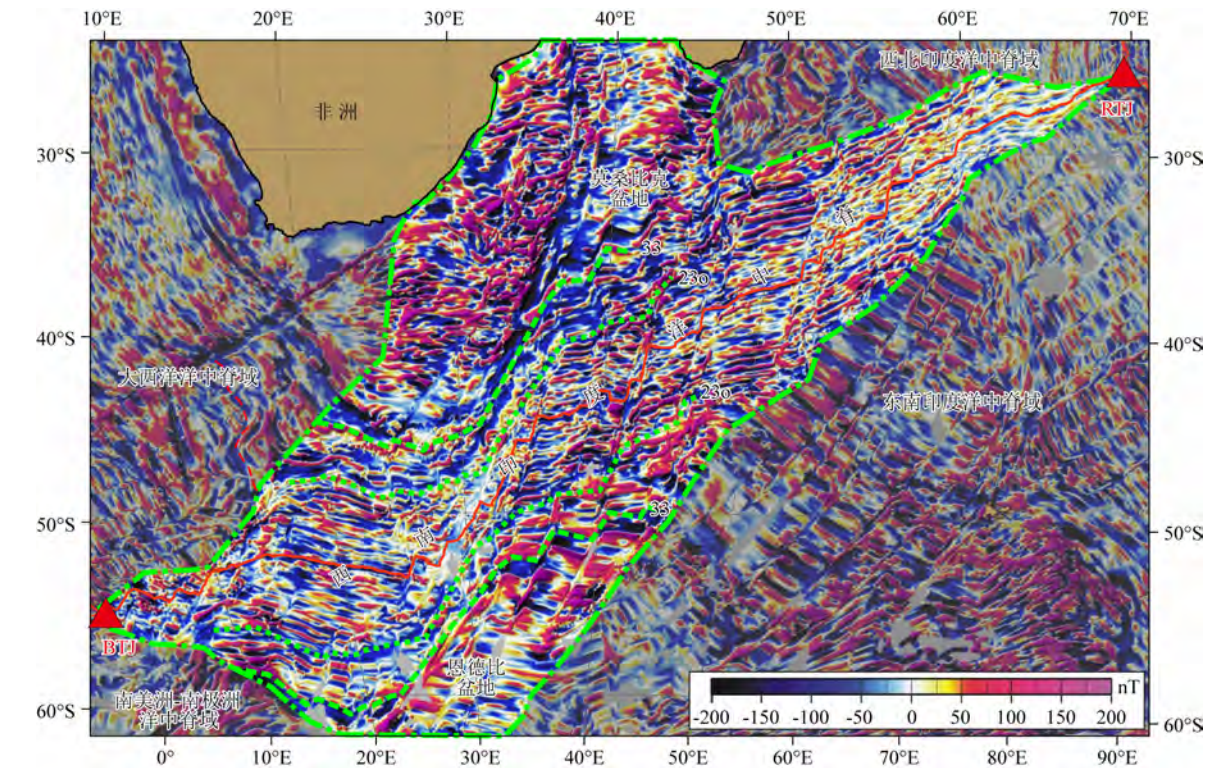


图 4 西南印度洋中脊及周边磁异常分布图

绿色点划线为根据磁条带推断的西南印度洋中脊作用域, 绿色粗虚线为 33 磁异常带, 绿色细虚线为 23o 磁异常带.

磁异常数据来源于全球 2' 分辨率磁力网格数据 EMAG2 (Maus et al., 2009).

Fig. 4 The magnetic anomalies for the Southwest Indian Ridge and adjacent area

The highlighted area enclaved by the green dash-dotted curves is the regime of SWIR. The bold and thin dashed green lines represent the magnetic anomalies 33 and 23o, respectively. The magnetic anomaly data are from EMAG2 (Maus et al., 2009).

了洋脊的演化历史. 在 SWIR 作用域内, 主要存在三期洋脊扩张历史(图 5). 约在 165 Ma 前后, 非洲的莫桑比克与南极洲的毛德皇后地开始分离(图 6), 孕育了初始的 SWIR(Livermore and Hunter, 1996). 洋脊扩张方向北北东向, 全扩张速率约 $62 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 属中速扩张洋脊(表 2). 76 Ma 以前, 古罗德里格斯三联点位于现今英多姆断裂带附近, 而布维三联点位于 20°E 附近, 即古 SWIR 仅发育于英多姆断裂带至 20°E 之间, 长度约为现今 SWIR 的三分之一(图 6).

在 $\sim 76 \text{ Ma}$, SWIR 扩张方向发生逆时针方向旋转, 从北北东向转至北北西向. 之后发生顺时针旋转, 在 $\sim 52 \text{ Ma}$ 时重新恢复至北北东向(图 3). Bernard 等(2005)将磁异常 33(76 Ma)—23o(52 Ma)期间的洋脊扩张称为复杂扩张期. 复杂扩张期洋脊扩张方向的旋转可能与 76 Ma 前后印度相对南极洲的快速北移以及 52 Ma 时北移速度骤然减慢有关. 在 76—52 Ma 期间, 罗德里格斯三联点快速向东北方向迁移, 从现今的英多姆断裂带位置移至现今亚特兰蒂

斯 II 号断裂带(57°E)附近, 迁移距离 $\sim 1500 \text{ km}$ (图 5). 同一时期, 布维三联点也往西迁移, 约从 20°E 迁移至 10°E 附近, 迁移距离大于 500 km . 另一方面, 在 76—52 Ma 期间, 20°E 至英多姆断裂带之间的洋脊段存在局部伸展现象, 如爱德华王子断裂带和埃里克辛普森断裂带之间洋脊段从 150 km 伸展为 300 km . 洋脊的伸长以及罗德里格斯三联点的快速北移均表明对流地幔向东北方向流动.

52 Ma 前后, SWIR 已基本形成了现今的洋脊扩张方向和形态, 只是长度较短, 约为现今 SWIR 的三分之二. 52 Ma 之后, 洋脊继续向两端渐进式延伸, 并且局部发育新的转换断层和斜向扩张段. 埃里克辛普森断裂带和发现 II 号断裂带之间在 15—10 Ma 期间发育德克勒克断裂带和费雪断裂带, 并且德克勒克断裂带是 SWIR 唯一右旋错动的断裂带(表 1). 沿 SWIR 发育多处斜向扩张洋脊段, 如 $11^\circ36'\text{E}$ — $14^\circ30'\text{E}$, $36^\circ24'\text{E}$ — $37^\circ18'\text{E}$, $37^\circ45'\text{E}$ — $38^\circ22'\text{E}$, $44^\circ27'\text{E}$ — $45^\circ20'\text{E}$, $47^\circ35'\text{E}$ — $48^\circ27'\text{E}$, $54^\circ30'\text{E}$ — $55^\circ10'\text{E}$ 和 $55^\circ30'\text{E}$ — 56°E (图 3), 这些

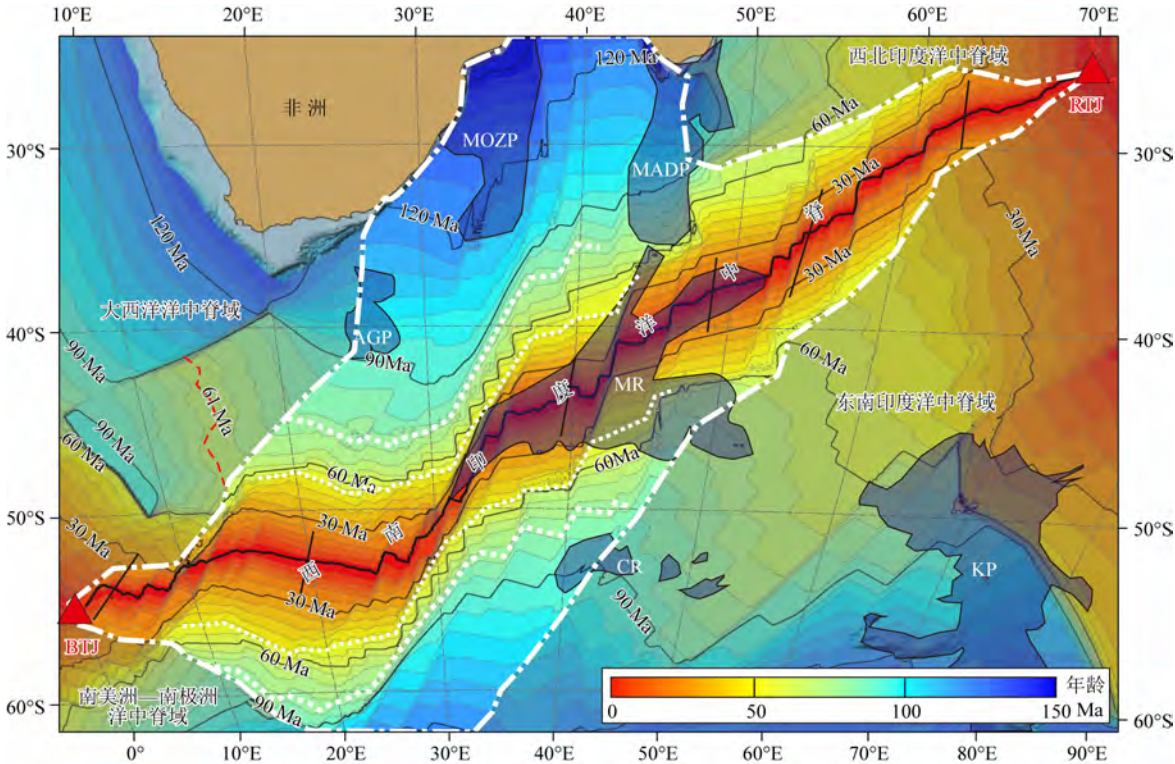


图 5 西南印度洋中脊作用域洋壳年龄分布图

白色点划线为根据磁条带推断的 SWIR 作用域, 白色粗点线为 33 磁异常带(76.3 Ma), 白色细点线为 23o 磁异常带(51.7 Ma). 黑色阴影区为海底高原分布, 洋壳年龄数据参考 EarthByte, 等时线间隔为 5 Ma, 每 30 Ma 的整数倍用粗线条表示.

Fig. 5 The oceanic crust ages for the Southwest Indian Ocean

The highlighted area enclosed by the white dash-dotted curves is the regime of SWIR. The bold and thin dotted white lines represent the magnetic anomalies 33 (76.3 Ma) and 23o (51.7 Ma), respectively. The shaded area indicates the location of oceanic plateau. The oceanic crust ages are referenced from EarthByte. The contour interval is 5 Ma, with highlighted curves for every 30 Ma.

表 2 西南印度洋中脊不同时期的平均半扩张速率(单位:mm · a⁻¹)

Table 2 Half spreading rates of the Southwest Indian Ridge during different periods (unit:mm · a⁻¹)

时代	剖面位置	3. 89°E	19. 60°E	39. 93°E	48. 79°E	54. 48°E	63. 59°E
	最老洋壳	~20 Ma	~120 Ma	~165 Ma	~65 Ma	~60 Ma	~30 Ma
>76 Ma	北翼	—	~33. 1	~26. 5	—	—	—
	南翼	—	~8. 06	~28. 4	—	—	—
76—52Ma	北翼	—	10. 84	15. 92	~12. 4	~18. 6	—
	南翼	—	13. 08	9. 56	~16. 6	~10. 7	—
52—30 Ma	北翼	—	10. 8	13. 3	13. 6	12. 6	—
	南翼	—	14. 2	8. 7	13	11. 9	—
30—10 Ma	北翼	~5. 8	10. 4	6. 9	10. 4	9. 7	~10. 1
	南翼	~8. 1	11. 1	13. 5	10. 4	11	~6. 5
10—0 Ma	北翼	6. 1	7. 1	7	5. 4	6. 3	6. 2
	南翼	10. 9	10. 1	9. 6	11. 9	11. 9	9. 8

注:剖面位置是指剖面与洋脊扩张中心相交点的经度,最老洋壳是指剖面位置可追溯的最老 SWIR 域洋壳年龄,半扩张速率的计算方法为某时段洋脊一翼生成洋壳宽度除以时间间隔,~表示近似估算值;—表示缺失相应的磁条带。

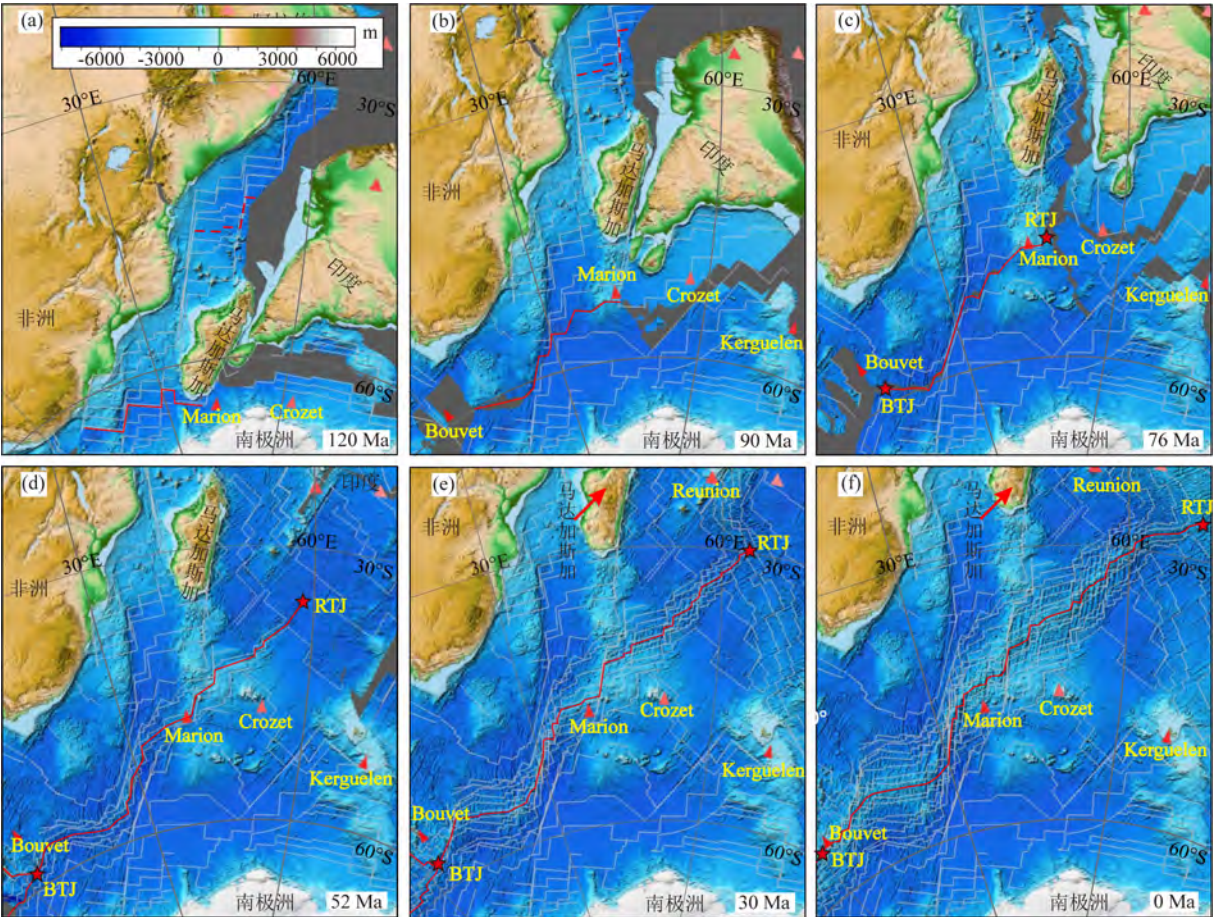


图 6 西南印度洋 120Ma 以来洋脊演化过程示意图

(a) — (f) 分别为 120, 90, 76, 52, 30, 0 Ma 各个时期的板块重建图。演化模式基于 EarthByte 的洋壳年龄数据和 Gplate 软件, 固定参考板块为非洲板块。图中白色细线代表洋壳等时线, 间隔为 10 Ma; 红色线代表扩张中心位置; 三角形代表热点。

Fig. 6 The evolution of spreading ridges in the Southwest Indian Ocean since 120 Ma

(a) — (f) The reconstructed plates at 120, 90, 76, 52, 30, and 0 Ma, respectively. The model is generated by Gplate based on the oceanic crust age data from EarthByte. The fixed reference is African Plate. The thin white lines represent the isochron of oceanic crust at 10 Ma interval. The red lines represent the location of spreading center. The little triangles represent the location of adjacent hotspots.

斜向扩张段由转换断层或非转换断层不连续带演化而来,斜向扩张使 SWIR 进一步伸长. 从 52—0 Ma, SWIR 东段的罗德里格斯三联点继续向东北方向迁移近 1600 km, 迁移速率约 $30.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 这与同一时期三联点附近的西北印度洋中脊和东南印度洋中脊扩张速率相吻合(余星等, 2019a, b). 洋脊北东向延伸的过程中, 发育亚蒂斯 II 号、诺瓦拉和梅尔维尔等断裂带, 断层形成时间相近, 约 38 Ma. 在 SWIR 西段, 布维三联点从 10°E 迁移至 0°E 附近, 迁移距离约 700 km, 并发育沙卡、伊拉斯—奥卡达斯和布维等断裂带. 在 52—30 Ma 间, SWIR 半扩张速率约为 $8.7 \sim 14.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 30 Ma 之后, 扩张速率略微减慢, 半扩张速率约为 $5.8 \sim 13.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. 10 Ma 以来, 扩张速率进一步减慢, 半扩张速率小于 $10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 为典型的超慢速扩张洋脊(表 2). 从 30 Ma 以来, SWIR 南翼的扩张速率明显快于北翼, 平均快 $3 \sim 6 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 这可能表明西南印度洋区域软流圈地幔的整体流向偏北, 结合罗德里格斯三联点的迁移方向, 认为整体地幔流为北东方向. 按目前的 SWIR 演化趋势, 洋脊将继续向两端延伸, 并且东北端延伸速率更快.

4 西南印度洋中脊地幔不均一性

SWIR 具有全球最不均一的地幔源区同位素组成(Meyzen et al., 2005; Yu and Dick, 2020). 其洋中脊玄武岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值范围为 $0.70248 \sim 0.70494$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值 $0.51237 \sim 0.51322$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值分别为 $16.58 \sim 19.66$ 、 $15.35 \sim 15.67$ 、 $36.87 \sim 39.31$, 跨度很大(图 7 和图 8). 按同位素特征可以将洋脊分为三段, 分别为西段 ($< 26^\circ\text{E}$)、中段 ($32^\circ\text{E} \sim 52^\circ\text{E}$) 和东段 ($> 52^\circ\text{E}$), 其中中段具有最明显的地幔不均一性特征.

SWIR 中段 ($32^\circ\text{E} \sim 52^\circ\text{E}$) 位于安德鲁—贝恩断裂带和加列尼断裂带之间, 其 Sr-Nd-Pb 同位素变化幅度最大. 中段的 $39^\circ\text{E} \sim 41^\circ\text{E}$ 洋脊段具有全 SWIR 最高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, 最低的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值, 不过 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $6.4 \sim 8.5 \text{ Ra}$, 与正常洋中脊玄武岩相似, 这反映了稀有气体同位素与重同位素不同的分馏机制和演化过程. 关于 SWIR $39^\circ\text{E} \sim 41^\circ\text{E}$ 段的玄武岩成因有不同的观点. Mahoney 等(1992)认为其地幔源区中可能含有滞留的大陆岩石圈, 这些岩石圈组分来源于印度—马达加斯加陆块底部的热侵蚀. Escrig 等

(2004) 和 Meyzen 等(2005)主张下地壳物质的混染引起了 SWIR $39^\circ\text{E} \sim 41^\circ\text{E}$ 玄武岩的地球化学异常. Janney 等(2005)通过 Hf-Nd 同位素研究发现太古代大陆岩石圈地幔和大陆下地壳物质加入亏损地幔都可以解释 SWIR $39^\circ\text{E} \sim 41^\circ\text{E}$ 的同位素特征. 尽管 SWIR $39^\circ\text{E} \sim 41^\circ\text{E}$ 同位素异常成因仍存在争议, 但基本可以排除马里昂热点的影响, 因为马里昂热点的同位素组成无法解释 SWIR $39^\circ\text{E} \sim 41^\circ\text{E}$ 的异常特征.

SWIR 中段除了 $39^\circ\text{E} \sim 41^\circ\text{E}$ 洋脊段, 发现 II 号断裂带以东的 $42^\circ\text{E} \sim 46^\circ\text{E}$ 洋脊段也具有较分散的同位素组成, 且该洋脊段显示从西到东同位素富集的趋势(图 7). SWIR $48^\circ\text{E} \sim 52^\circ\text{E}$ 洋脊段分布有明显的熔融异常(Sauter et al., 2009; Niu et al., 2015), 且部分样品显示有同位素富集特征(Yang et al., 2017), $^3\text{He}/^4\text{He}$ 同位素比值略高于周边洋脊段, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $8.6 \sim 9.8 \text{ Ra}$ (Gautheron et al., 2015). 该段洋脊的熔融异常及同位素异常有多种解释, Yang 等(2017)认为是克罗泽热点远距离影响洋脊的结果, Yu 和 Dick(2020)则认为克罗泽热点与洋脊相互作用在物理机制上比较困难, 且无法解释洋脊段较高的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值, SWIR $48^\circ\text{E} \sim 52^\circ\text{E}$ 洋脊段的局部同位素异常是地幔源区中残余的下地壳物质的影响. 中段的其余洋脊段同位素变化较小, 与东段相似. SWIR 中段极不均一的地幔源区组成需要至少三个地幔端元的混合, 如大西洋型亏损地幔、印度洋洋岛型地幔富集组分, 以及低 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的富集组分(Meyzen et al., 2005).

SWIR 西段位于 26°E 以西, 与中段以安德鲁—贝恩断裂带 ($26^\circ\text{E} \sim 32^\circ\text{E}$) 相隔. 西段洋中脊玄武岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值明显高于中段和东段(图 7 和图 8). Janney 等(2005)将 SWIR 西段 ($< 26^\circ\text{E}$) 玄武岩归纳为大西洋-太平洋型洋中脊玄武岩(MORB), 而中段和东段为印度洋型 MORB, 以安德鲁—贝恩断裂带为界. 不过, 安德鲁—贝恩断裂带以西的 $20^\circ\text{E} \sim 26^\circ\text{E}$ 洋脊段显示有过渡性质的 Pb 同位素组成, 即 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值介于印度洋型 MORB 和大西洋-太平洋型 MORB 之间, 这与 $20^\circ\text{E} \sim 26^\circ\text{E}$ 洋脊段的扩张历史相符. 古 SWIR 有向东西两端渐近式扩张的特征, 且西端渐近式扩张的起点可能就在安德鲁—贝恩断裂带附近, 在 76 Ma 前后 SWIR 西端已经到达 20°E 附近, 因此这段洋脊继承了部分中段洋脊特征. 西段玄武岩的 He 同位素变化范围

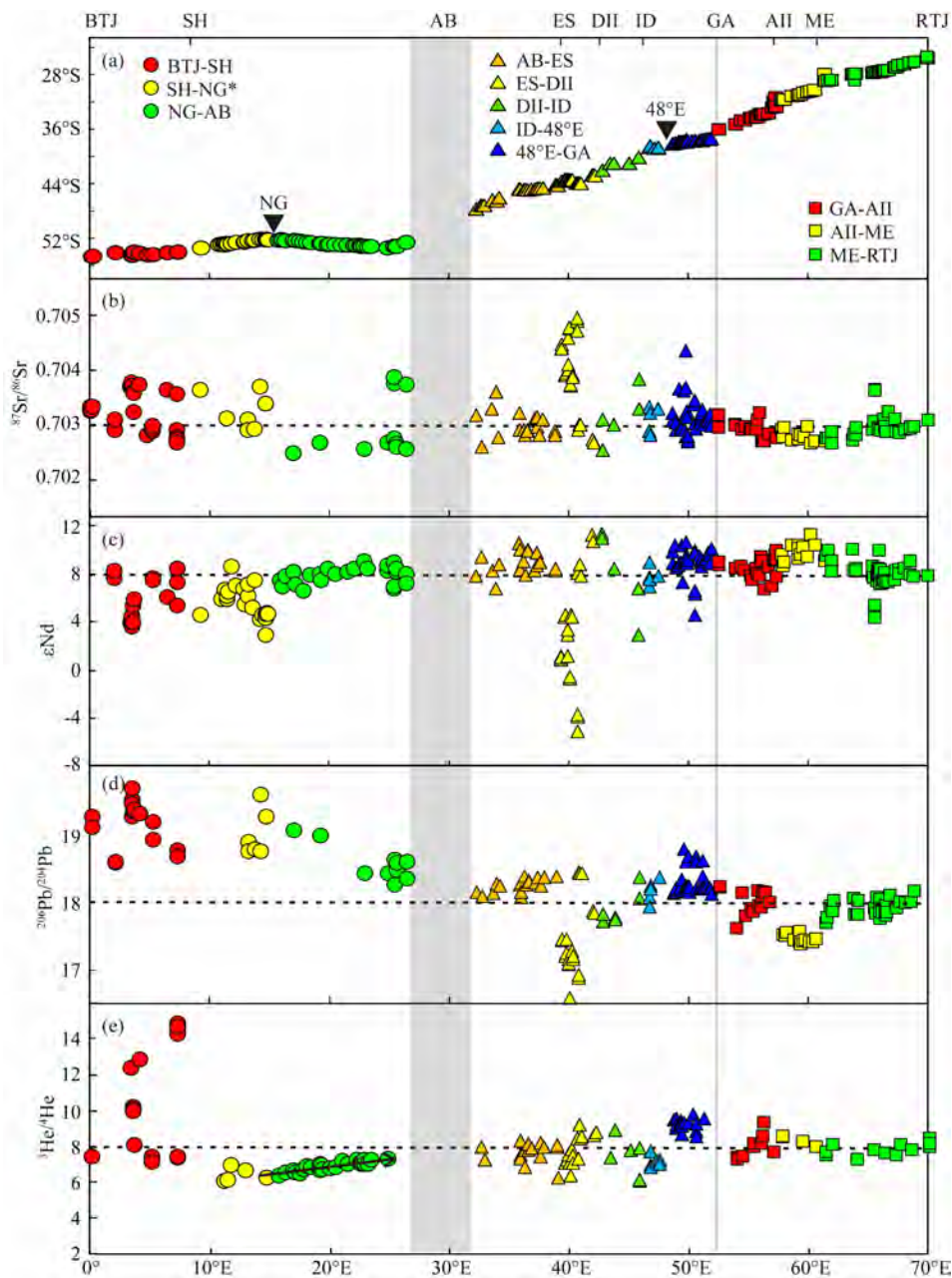


图 7 西南印度洋中脊沿轴玄武岩分布及 Sr-Nd-Pb-He 同位素特征

NG—Narrowgate Seamount (Standish et al. , 2008). 同位素数据来源于 PetDB.

Fig. 7 The distribution of MORBs from the Southwest Indian Ridge and their Sr-Nd-Pb-He isotopic compositions

NG—Narrowgate Seamount (Standish et al. , 2008). The isotopic data are collected from PetDB.

较广, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 6.26~14.5 Ra(Kurz et al. , 1998;Georgen et al. ,2003). 其中 3°E—9°E 洋脊段具有最高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$,比值为 7.12~14.9 Ra,而 9°E—26°E 洋脊段具有较低的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值,为 6.26~7.3 Ra,且从西到东略有升高的趋势. 3°E—9°E 洋脊段靠近布维热点,可能受到热点-洋脊相互作用的影响(Kurz et al. ,1998). SWIR 9°E—26°E 洋脊段的低 He 同位素特征可能是由于再循环的地壳或岩石圈物质影响(Georgen et al. ,2003).

SWIR 东段(>52°E)位于加列尼断裂带以东,其同位素组成比较稳定,Sr-He 同位素变化较小,除个别异常外,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.7026~0.7032, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 7.3~8.1 Ra(图 7). 但是,Nd-Pb 同位素存在局部异常,AII-ME 洋脊段具有明显较低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值和较高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值,指示这一洋脊段相对亏损的地幔源区特征(图 7). SWIR 东段洋脊轴部水深增加,地壳厚度减薄.此外,在梅尔维尔断裂带处,洋脊斜

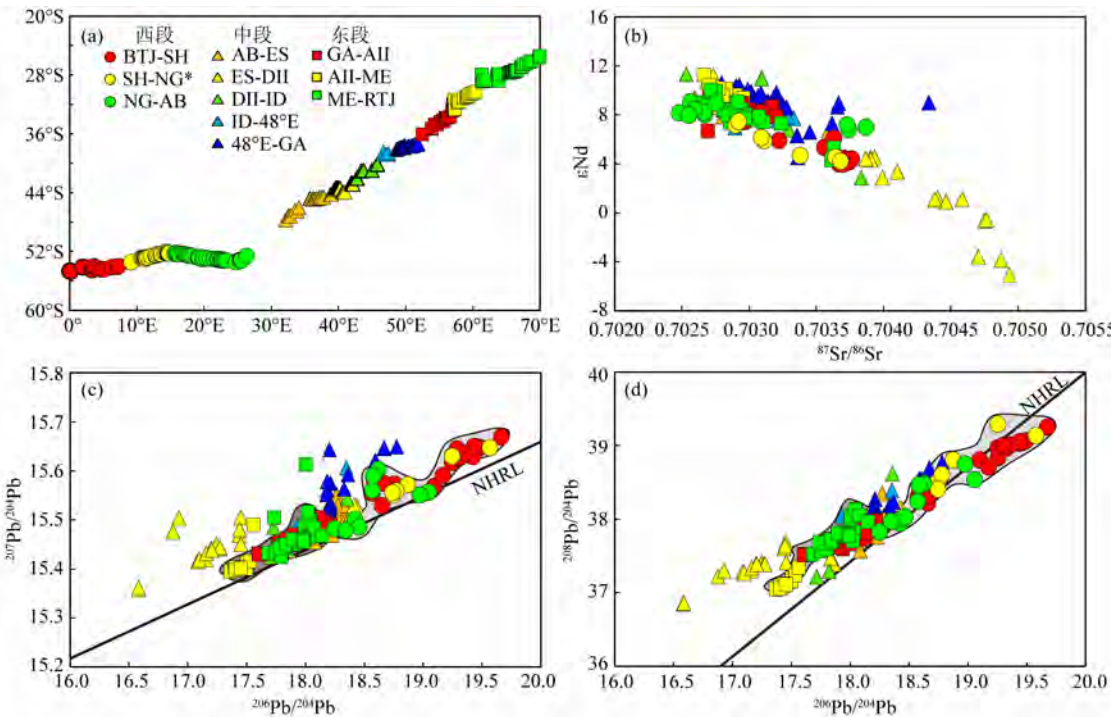


图 8 西南印度洋中脊 MORB 的 Sr-Nd-Pb 同位素特征
浅灰色范围为西段洋脊 Pb 同位素分布, 深灰色范围为东段同位素分布. 同位素数据来源于 PetDB.

Fig. 8 The Sr-Nd-Pb isotopic compositions for the Southwest Indian Ridge

The light grey area indicates the Pb isotopic composition of the Western section of SWIR, while the dark grey area for the Eastern section. The isotopic data are collected from PetDB.

向扩张的夹角(即洋脊展布方向与扩张方向的夹角)发生变化,断裂带以西(52°E—61°E 段)夹角为 40°,以东(61°E—70°E 段)夹角为 25°(Meyzen et al., 2005). 这一夹角的变化与 AII-ME 洋脊段 Nd-Pb 同位素的异常可能存在内在的联系,有待进一步的研究.

SWIR 极不均一的同位素组成,表明了其地幔源区的不均一性. 地幔源区的不均一性与大陆裂解和洋脊演化过程密切相关. 冈瓦纳大陆裂解初期,环古印度洋分布有广泛的中新元古代造山带,在地幔柱的热侵蚀下造山带底部下地壳或岩石圈地幔碎片拆离进入软流圈,引起软流圈地幔的不均一性,并且这种不均一性可能长期滞留在软流圈中. SWIR 西段、中段和东段具有不同的演化历史,其中中段发育时间最长,并且是造山带根部拆离的最主要部位. Dick 等(2020, 个人通讯)将中段命名为 Origenia,意为造山带区. 这与中段显示最强烈的地幔不均一性相符. 东段和西段分别为 Ciria 和 Cratonia,是古 SWIR 向两端延伸的结果,其不均一性相对较弱. 东段和西段玄武岩具有明显的 Pb 同位素差异,西段的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 比值明显高于东段(图 8). 西段局部异常的 He 同位素特征主要

为布维热点的影响.

5 西南印度洋中脊与邻近洋脊的对比

SWIR 西侧经布维三联点与大西洋中脊(MAR)和南美洲-南极洲洋中脊(SAAR)相连,东侧经罗德里格斯三联点与 NWIR 和 SEIR 相接(图 1a).

MAR 靠近布维三联点的洋脊段初始扩张时间约 138 Ma(Pérez-Díaz and Eagles, 2014),与 SWIR 20°E 附近的洋脊段扩张历史相近,但早于布维三联点至 20°E 之间的洋脊段. 在非洲板块与南极洲板块分离的过程中,南美洲板块与非洲板块开始分离,形成 MAR(Le Roex et al., 2002; Veevers, 2012). MAR 南段扩张方向为近东西向(略偏北),平均半扩张速率约 25 mm · a⁻¹,明显大于相邻的 SWIR(表 2). 在洋中脊玄武岩地球化学特征方面,靠近布维三联点的 MAR(>49. 15°S)与 SWIR(<26°E)洋脊段具有相似的同位素特征,而远离三联点的 MAR(47°S—49. 15°S)则具有明显更高的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和更低的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 同位素比值,且在给定²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值下,具有更高的²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 比值,表现为更显著的南半球大洋地幔同位素异常

(DUPAL 异常),与 SWIR 39°E—41°E 洋脊段相似(图 8 和图 9)。由此可见,DUPAL 异常最明显的洋脊段并非为离布维三联点最近的洋脊段,而是远离三联点的 MAR(47°S—49.15°S)和 SWIR 39°E—41°E 洋脊段。这表明 DUPAL 异常分布可以为不连

续体,其展布与构造部位及洋脊的扩张历史有关。SWIR 的东、中、西三段具有不同的扩张历史,中段初始扩张时间最早,显示最强的 DUPAL 异常信号,而东段和西段均为洋脊向两端渐进式延伸的结果,DUPAL 异常信号相对较弱(图 9)。

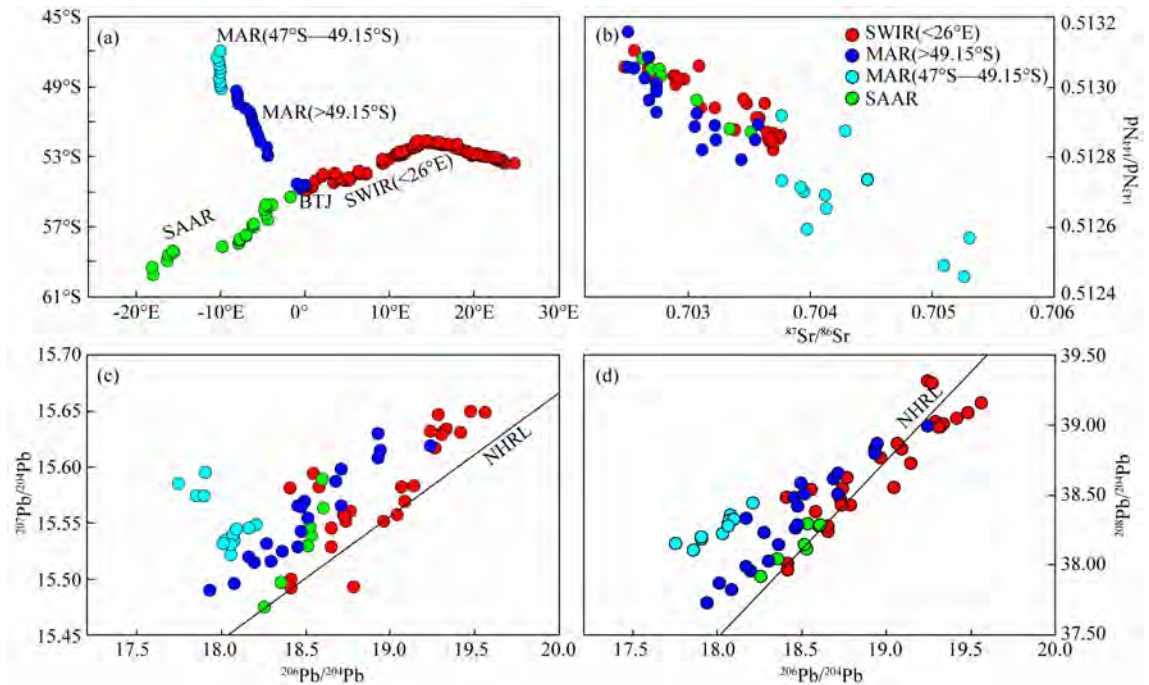


图 9 西南印度洋中脊及邻近洋脊的 MORB Sr-Nd-Pb 同位素特征
同位素数据来源于 PetDB.

Fig. 9 The Sr-Nd-Pb isotopic compositions for the Southwest Indian Ridge and its adjacent ridges
The isotopic data are collected from PetDB.

SAAR 从布维三联点延续到南桑威奇断裂带,洋脊全长约 2000 km (包含转换断层断距)。目前洋脊扩张方向近东西向(略偏南),靠近布维三联点的洋脊段半扩张速率为 $\sim 11.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,为慢速扩张洋脊。根据磁异常条带,推测靠近布维三联点的 SAAR 初始扩张时间早于 85 Ma,不过 85 Ma 以前磁条带显示的扩张方向为北北西向(Schneider et al., 2006)。SAAR 同时存在富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)和正常型洋中脊玄武岩(N-MORB),其地幔源区被认为是正常洋脊亏损地幔与布维热点的混合(Le Roex and Dick, 1981)。SAAR 玄武岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成与 SWIR($< 26^\circ\text{E}$)相似,两者均符合布维热点与亏损地幔混合的同位素特征(图 9)。不过,SWIR($< 26^\circ\text{E}$)相对 SAAR 显示有更高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值,指示 HIMU 地幔端元在 SWIR 地幔源区中的贡献更大。

SWIR 东侧的 NWIR 和 SEIR 具有一脉相承的扩张特征(余星等, 2019a, b),SWIR 沿 NWIR-SEIR

在罗德里格斯三联点处的一条断裂带楔入,并不断向北东方向渐近式扩张。新生的洋脊发育于 NWIR 和 SEIR 作用域之下,软流圈地幔熔融的岩浆上升时会受到 NWIR 和 SEIR 作用域的岩石圈的混染,因此,SWIR 东段玄武岩地球化学特征在理论上应该与 NWIR-SEIR 具有一定的亲缘性。对比 SWIR 东段与 NWIR-SEIR 玄武岩,发现其 Sr-Nd-Pb 同位素组成具有相似性,证实 SWIR 东段与 SEIR 和 NWIR 的继承关系(图 9)。

6 洋中脊周边海底高原的成因

SWIR 周边海盆中分布众多的海底高原,但未见明显的海山链,这是由于目前西南印度洋区的三大热点均位于洋脊南侧的南极洲板块之下,而南极洲板块相对稳定(King and Adam, 2014),因此热点在板块上的轨迹叠加在一个区域,更易形成海底高原(Meyzen et al., 2016)。SWIR 北侧发育马达加斯

加海底高原(MADP)、莫桑比克海底高原(MOZP)和厄加勒斯海底高原(AGP),南侧发育康拉德隆起(CR),此外,还有叠加在 SWIR 中段之上的马里昂隆起(MR)(图 1,表 3)。

6.1 马达加斯加海底高原(MADP)

MADP 位于马达加斯加岛以南,水深 ~ 3000 m 等深线约位于 26°S — 36°S 之间,南北长 ~ 1000 km,东西宽 ~ 400 km,面积 ~ 45 万 km^2 (表 3)。MADP 东侧地形变化较缓,西侧坡度较大。关于 MADP 的成因,最早认为其是马达加斯加岛向南延伸的部分,属陆壳性质。Recq 等(1979)利用地震折射资料发现 MADP 分为南北两部分,其中北部(31°S 以北)地壳厚度达 26 km,南部地壳约为 14 km,推测南部地壳具有洋壳性质。Goslin 等(1981)根据地形和地震资料分析认为整个马达加斯加海底高原均为洋壳性质。DSDP 246 和 247 钻孔曾在 MADP 南部实施,但未获得基底岩石样品,因此仍无法确定 MADP 的基底性质。根据板块构造重建结果,马里昂热点在 84 Ma 时位于 MADP 所在的位置,推测马里昂热点是形成 MADP 的原因(Zhang et al., 2011)。

6.2 莫桑比克海底高原(MOZP)

MOZP 从非洲大陆东南部边缘一直向南延伸到 35°S ,长 ~ 1200 km,南窄北宽,南边宽度 ~ 300 km,水深 3000 m 等深线面积达 40 万 km^2 。MOZP 与 MADP 以莫桑比克海盆相隔,靠近莫桑比克盆地一侧地形较陡,而另一侧地形较缓,与重力异常特征相符。关于 MOZP 的成因,最早认为其是非洲大陆的一部分,具有陆壳性质。Hales 和 Nation 于 20 世纪 70 年代利用地震折射资料推测其为洋壳基底,且洋壳厚度达 22 km。Fischer 等(2017)利用高分辨率地震反射资料揭示 MOZP 的地壳厚度为 18~24 km。DSDP 248 钻孔钻遇了 MOZP 基底岩石,主要为气孔含量很高的玻璃质玄武岩,因而认为 MOZP 具有洋壳基底。Jacques 等(2019)系统采集了 MOZP 的基底岩石样品,发现 MOZP 上出露大面积玄武岩,玄武岩主微量元素组成介于洋岛玄武岩(OIB)和 E-MORB 之间,同位素组成具有显著的 DUPAL 异常特征。Jacques 等(2019)认为 MOZP 是深部地幔柱作用的结果,形成时间约 130 Ma。不过,事实上在 MOZP 东北部、中部和西南部均采集到了陆源样品(Jacques et al., 2019),并且火成岩出露面积仅占 MOZP 的小部分,因此 MOZP 是否存在隐伏的大陆基底,大火成岩省是否发育于大陆基底之上,仍有待进一步研究。

6.3 厄加勒斯海底高原(AGP)

AGP 位于南非南部 500 km 处,呈南北向展布,长 ~ 560 km,南宽北窄,南部宽 ~ 300 km,水深 3000 m 等深线面积 ~ 12 万 km^2 。AGP 距离东北部的 MOZP 约 500 km,中间以特兰斯凯(Transkei)盆地相隔。AGP 最初被认为是大陆地壳的一部分(Ben Avraham et al., 1995)。同 MOZP 相似,AGP 也分为南北两个区块,北部地形较崎岖,南部地形起伏较小。地震速度结构显示 AGP 基底具有洋壳特征,莫霍面深度约 25 km,其形成时间为 100—94 Ma(Gohl and Uenzelmann-Neben, 2001; Parsieglia et al., 2008)。AGP 发育 E-MORB,相对 MOZP 具有更高的 Pb 同位素组成,显示明显的 DUPAL 异常(Jacques et al., 2019)。

6.4 马里昂隆起(MR)

马里昂隆起(MR)是跨越 SWIR 中段的一块三角形海底高原(Zhou and Dick, 2013; Dick and Zhou, 2015)。按水深 3000 m 等深线圈定,其总面积可达 72 万 km^2 ,包括从爱德华王子断裂带到加列尼断裂带之间的洋脊地形高地、洋脊北侧延伸至 MADP 南面的 V 字型地形凸起、洋脊南侧的马里昂群岛、德尔卡洛隆起(DCR)和克罗泽海底高原(CP)(图 1)。

马里昂群岛主要由马里昂岛和爱德华王子岛组成,岛上主要为碱性玄武岩,并发现有流纹质浮岩, K-Ar 同位素定年显示火山岩喷发年龄为 <0.45 Ma (McDougall et al., 2001)。玄武岩为轻稀土富集的 OIB 型, Sr-Nd 同位素显示亏损特征, Pb 同位素位于北半球参考线(NHRL)附近,未见明显的 DUPAL 异常,表明其源区为亏损地幔,经历了后期的富集改造,富集组分可能来源于马里昂热点(Le Roex et al., 2012)。洋脊北侧的 V 字型地形凸起是马里昂热点留下的痕迹(Zhang et al., 2011)。

德尔卡诺隆起(DCR)紧临马里昂群岛东侧,东西宽 ~ 700 km。地震折射资料和重力模拟显示 DCR 的地壳厚度达 16 km,其形成于洋脊附近。DCR 一般被认为与 MADP 南部共轭(图 6),两者在 ~ 54 Ma 是一个整体(Goslin and Diamant, 1987)。由于 DCR 上覆沉积物可达 600 m,目前尚未获得基底岩石样品。

克罗泽海底高原(CP)紧临 DCR 东侧,由东西两组群岛组成,中间由 Indivat 盆地分隔,两部分地壳深部结构存在差异,西部地壳厚,东部薄,西侧显示深源特征,这与 He 同位素表现的东西差异相符(Recq et al., 1998; Breton et al., 2013)。CP 和 DCR 具有不同的地壳均衡特征,反映不同的形成过

程. DCR 可能是洋脊-热点相互作用的结果,而 CP 则是东南印度洋中脊作用域老洋壳(年龄约 70 Ma)之上的板内岩浆作用(Goslin and Diamant,1987). CP 的形成年龄约 54 Ma,但几个活动火山岛的年龄

为<9 Ma(表 3). CP 玄武岩的地球化学组成可以用三个地幔端元的混合来解释,分别是 FOZO 组分、East-Possession 组分和亏损地幔(Breton et al., 2013).

表 3 西南印度洋中脊附近海底高原基本参数统计表
Table 3 The summarized information of oceanic plateaus close to SWIR

海底高原	英文名	面积 /(万 km ²)	地壳厚度 /km	形成时间 /Ma	周边洋壳 年龄	参考文献
马达加斯加 海底高原	Madagascar Plateau (Ridge)	45	14~26	~84?	>60 Ma	Goslin et al., 1980,1981; Sinha et al., 1981; Recq et al., 1979; Zhang et al.,2011
莫桑比克 海底高原	Mozambique Plateau (Ridge)	40	18~24	~130	>110 Ma	Fischer et al., 2017; König and Jokat, 2010; Jacques et al., 2019
厄加勒斯 海底高原	Agulhas Plateau	12	25	100~94	110~90 Ma	Gohl and Uenzelmann-Neben, 2001
马里昂群岛	Marion Islands	10	?	0.45~0	~30 Ma	Verwoerd et al., 1990
德尔卡诺隆起	Del Cano Rise	22	16	80~43	~60 Ma	Goslin and Diamant, 1987; Zhang et al.,2011
克罗泽 海底高原	Crozet Plateau (Bank)	7	30~35	54, 8.9~0	~70 Ma	Goslin et al., 1981; Verwoerd et al., 1990; Breton et al., 2013
康纳德隆起	Conrad Rise	17	30~35	?	90~75 Ma	Goslin, 1979

注:海底高原面积为-3000 m 等深线的估算面积;周边洋壳年龄根据磁条带分布估算;地壳厚度及海底高原形成时间参考文献资料,部分数据缺失.

6.5 康拉德隆起(CR)

CR 位于 DCR 以南~500 km 处,其北侧为克罗泽盆地,南侧为恩德比盆地. CR 由一系列的海山组成,从西到东分别为 Ob 海山、Lena 海山和 Marion Dufresne 海山等. 水深 3000 m 等深线面积~17 万 km²,其中主体是由西部 Ob 海山、Lena 海山组成的海底高原,面积~10 万 km². Marion Dufresne 海山明显受到古东南印度洋中脊断裂带的影响而呈北东-南西向展布(图 1a),由此可知,CR 东半部分主要发育于东南印度洋中脊作用域内. Zhang 等(2011)根据板块构造重建认为 CR 西半部分与 MADP 的北部共轭,因此 CR 可能形成于罗德里格斯三联点附近,年龄约 100—80 Ma(图 6). 由于 CR 位置偏远,研究较少,目前尚无基底岩石样品,其基底的性质尚不明确.

6.6 不同海底高原之间的成因对比

综合 SWIR 周边海底高原的特征及成因模式,可以发现以下特征:

(1)马达加斯加海底高原(MADP)分为南北两部分,南部莫霍面深度约为 14 km,具有洋壳性质,北部地壳较厚,不排除存在陆壳的可能.

(2)莫桑比克海底高原(MOZP)基底具有洋壳特征,厚度达 22 km,形成时间约 130 Ma. 岩石化学

组成介于 OIB 和 E-MORB 之间,显示明显的 DUPAL 异常. 不过陆源样品的发现以及火成岩出露面积的局限性仍不排除存在陆壳基底的可能.

(3)厄加勒斯海底高原(AGP)基底具有洋壳特征,发育 E-MORB,显示明显的 DUPAL 异常. AGP 形成时间约 100—94 Ma,具有比 MOZP 更亏损的 Sr-Nd-Hf 同位素特征.

(4)马里昂隆起(MR)显示有极不均一的地幔源区特征,包括 SWIR 39°E—41°E 的低²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 源区,马里昂群岛的弱 DUPAL 异常亏损源区和克罗泽海底高原(CP)的 FOZO、East-Possession 和亏损地幔的三端元混合源区等.

(5)康纳德隆起(CR)和德尔卡诺隆起(DCR)均与 MADP 共轭,但 CR 是 100—80 Ma 罗德里格斯三联点附近大规模岩浆作用的结果,其形成时间与 AGP 相近. 而 DCR 则形成时间较晚,形成于 80—43 Ma. 由此可推断 MADP 南北两部分有不同的成因机制,但需要进一步研究来论证.

7 结论

西南印度洋中脊(SWIR)总体中段地形高,东西两段低,西段受布维热点影响洋脊段地形显著升

高. 洋脊扩张中心发育裂谷, 两翼水深随离轴距离加大而变深, 两翼地形一般呈对称分布, 局部非对称地形可能与热点的影响有关. SWIR 的分段比较复杂, 斜向扩张和非转换断层不连续带使洋脊分段界线不明显. 根据一级转换断层边界可将 SWIR 划分为 20 个一级洋脊段. SWIR 空间重力异常形态基本与水深相一致, 呈现中段高两端低的特征, 中段高值区对应安德鲁—贝恩断裂带和加列尼断裂带之间的水深异常区. SWIR 两侧的洋盆重力基本均衡, 除了盆地中的海底高地显示高重力异常特征. SWIR 的磁条带呈渐进式分布和带状分布特征, 两端分别向罗德里格斯三联点和布维三联点呈渐进式分布, 中段呈现三期分带特征, 对应三期洋脊扩张历史. 165—76 Ma 非洲莫桑比克与南极洲毛德皇后地分离, 孕育了初始的 SWIR, 即 20°E 至英多姆断裂带之间洋脊段. 76—52 Ma 为复杂扩张期, SWIR 扩张方向发生逆时针方向旋转, 从北北东向转至北北西向, 之后顺时针旋转恢复至北北东向. 这时的 SWIR 两端分别扩展到 10°E 和亚特兰蒂斯 II 号断裂带附近. 52—0 Ma 以来, 斜向扩张和渐进式扩张使 SWIR 进一步伸长, 扩张速率进一步减慢成为超慢速扩张洋中脊. 根据磁异常特征, 划定 SWIR 的作用域呈中段宽、两端窄的纺锤形, 面积约 1000 km². SWIR 的地幔源区极不均一, 特别是中段, 因为中段是中新元古代造山带根部拆离的最主要部位. 源区地幔的不均一性与大陆裂解和洋脊演化过程密切相关.

SWIR 两端分别与 MAR、SAAR 和 NWIR、SEIR 具有地球化学亲缘性. 靠近布维三联点的 SWIR(<26°E) 与 MAR(>49.15°S) 具有相似的同位素特征, DUPAL 异常不明显. 而远离三联点的 MAR(47°S—49.15°S) 和 SWIR 39°E—41°E 洋脊段 DUPAL 信号最强. SWIR(<26°E) 与 SAAR 玄武岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成相似, 两者均符合布维热点与亏损地幔混合的同位素特征, 但 SWIR(<26°E) 显示更强的 HIMU 地幔端元贡献. SWIR 东北端的玄武岩具有与 SEIR 和 NWIR 相似的地球化学特征, 显示与 NWIR-SEIR 的亲缘关系. SWIR 周边海底高原多而海山链较少, 这是由于热点均处于洋脊南侧相对稳定的南极洲板块之下, 因此热点在板块上的轨迹集中在一个区域, 形成海底高原. 海底高原普遍具有较大的地壳厚度, 其成因除了陆壳基底之外, 可能与热点火山作用、热点-洋脊相互作用或热点-三联点相互作用有关. 不同海底高原由于其成因不同, 显示不同的地球化学特征. 总体表现为

早期发育的海底高原 DUPAL 异常明显, 如 MOZP 和 AGP.

SWIR 是印度洋中研究程度最高的洋脊, 同时也是演化历史最复杂的洋脊. 目前对于 SWIR 的扩张历史、地幔源区不均一性、热点火山作用等已取得了不少的认识, 但仍然存在众多问题, 比如, SWIR 演化的深部地球动力学机制; SWIR 双向渐进式扩张的动力学过程; 布维三联点和罗德里格斯三联点的形成及演化趋势; SWIR 复杂扩张期(76—52 Ma) 的驱动因子; SWIR 斜向扩张段的发育机制; SWIR 转换断层/断裂带的演化趋势; SWIR 小尺度地幔不均一性的形成原因; SWIR 局部熔融异常的成因; SWIR 周边海底高原的地壳属性; 西南印度洋 DUPAL 异常的分布及成因; HIMU 地幔端元的分布及成因; Sr-Nd-Pb-Hf 与 He 等不同同位素的解耦问题; 板块裂解过程中残留大陆岩石圈地幔或下地壳对洋中脊岩浆作用的影响; 地幔柱/热点的起源、演化与消亡; 冈瓦纳大陆裂解过程与洋脊扩张历史, 等等, 亟待进一步研究解决.

致谢 感谢意大利帕多瓦大学 Christine Meyzen 教授在西南印度洋中脊玄武岩地球化学数据解译方面的指导和有益讨论, 感谢评审人和编辑对本文提出的宝贵修改意见.

References

- Baines A G, Cheadle M J, Dick H J B, et al. 2007. Evolution of the Southwest Indian Ridge from 55°45'E to 62°E: Changes in plate-boundary geometry since 26 Ma. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(6): Q06022, doi: 10.1029/2006GC001559.
- Ben-Avraham Z, Hartnady C J H, Le Roex A P. 1995. Neotectonic activity on continental fragments in the Southwest Indian ocean: Agulhas plateau and Mozambique ridge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B4): 6199-6211.
- Bergh H W, Norton I O. 1976. Prince Edward fracture zone and the evolution of the Mozambique basin. *Journal of Geophysical Research*, 81(29): 5221-5239.
- Bernard A, Munsch M, Rotstein Y, et al. 2005. Refined spreading history at the Southwest Indian Ridge for the last 96 Ma, with the aid of satellite gravity data. *Geophysical Journal International*, 162(3): 765-778.
- Breton T, Nauret F, Pichat S, et al. 2013. Geochemical heterogeneities within the Crozet hotspot. *Earth and Planetary Science Letters*, 376: 126-136.
- Cannat M, Rommevaux-Jestin C, Sauter D, et al. 1999. Formation of the axial relief at the very slow spreading Southwest Indian Ridge (49° to 69°E). *Journal of Geophysical Research: Solid*

- Earth, 104(B10): 22825-22843.
- Cannat M, Sauter D, Mendel V, et al. 2006. Modes of seafloor generation at a melt-poor ultraslow-spreading ridge. *Geology*, 34(7): 605-608.
- Cao H. 2010. Hydrothermal Mineralization and Geological and Geochemical Characteristics of SWIR [Master's thesis] (in Chinese). Qingdao: Ocean University of China.
- Dick H J B, Lin J, Schouten H. 2003. An ultraslow-spreading class of ocean ridge. *Nature*, 426(6965): 405-412.
- Dick H J B, Zhou H Y. 2015. Ocean rises are products of variable mantle composition, temperature and focused melting. *Nature Geoscience*, 8(1): 68-74.
- Escrig S, Capmas F, Dupré B, et al. 2004. Osmium isotopic constraints on the nature of the DUPAL anomaly from Indian mid-ocean-ridge basalts. *Nature*, 431(7004): 59-63.
- Ewing M, Heezen B C. 1960. Continuity of mid-oceanic ridge and rift valley in the southwestern Indian Ocean confirmed. *Science*, 131(3414): 1677-1679, doi: 10.1126/science.131.3414.1677.
- Fischer M D, Uenzelmann-Neben G, Jacques G, et al. 2017. The Mozambique Ridge: a document of massive multistage magmatism. *Geophysical Journal International*, 208(1): 449-467, doi: 10.1093/gji/ggw403.
- Gautheron C, Moreira M, Gerin C, et al. 2015. Constraints on the DUPAL anomaly from helium isotope systematics in the Southwest Indian mid-ocean ridge basalts. *Chemical Geology*, 417: 163-172.
- Georgen J E, Lin J, Dick H J B. 2001. Evidence from gravity anomalies for interactions of the Marion and Bouvet hotspots with the Southwest Indian Ridge: effects of transform offsets. *Earth and Planetary Science Letters*, 187(3-4): 283-300.
- Georgen J E, Kurz M D, Dick H J B, et al. 2003. Low $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in basalt glasses from the western Southwest Indian Ridge ($10^\circ\text{-}24^\circ\text{E}$). *Earth and Planetary Science Letters*, 206(3-4): 509-528.
- Gohl K, Uenzelmann-Neben G. 2001. The crustal role of the Agulhas Plateau, southwest Indian Ocean: evidence from seismic profiling. *Geophysical Journal International*, 144(3): 632-646.
- Goslin J. 1979. Résultats de gravimétrie sur les monts sous-marins du Marion Dufresne, de la Léna et de l'Ob (Océan Indien austral). *C. R. Acad. Sci., Paris*, 288(B): 241-244.
- Goslin J, Segoufin J, Schlich R, et al. 1980. Submarine topography and shallow structure of the Madagascar Ridge, Western Indian Ocean. *GSA Bulletin*, 91(12): 741-753.
- Goslin J, Recq M, Schlich R. 1981. Emplacement and evolution of the Madagascar ridge and Crozet submarine Plateau. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 23: 609-618.
- Goslin J, Diamant M. 1987. Mechanical and thermal isostatic response of the Del Cano Rise and Crozet Bank (southern Indian Ocean) from altimetry data. *Earth and Planetary Science Letters*, 84(2-3): 285-294.
- Grindlay N R, Madsen J A, Rommevaux-Jestin C, et al. 1998. A different pattern of ridge segmentation and mantle Bouguer gravity anomalies along the ultra-slow spreading Southwest Indian Ridge ($15^\circ30'\text{E}$ to 25°E). *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1-4): 243-253.
- Honsho C, Tamaki K, Fujimoto H. 1996. Three-dimensional magnetic and gravity studies of the Rodriguez Triple Junction in the Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B7): 15837-15848.
- Hosford A, Tivey M, Matsumoto T, et al. 2003. Crustal magnetization and accretion at the Southwest Indian Ridge near the Atlantis II fracture zone, 0~25 Ma. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B3): 2169, doi: 10.1029/2001JB000604.
- Jacques G, Hauff F, Hoernle K, et al. 2019. Nature and origin of the Mozambique Ridge, SW Indian Ocean. *Chemical Geology*, 507: 9-22.
- Janney P E, Le Roex A P, Carlson R W. 2005. Hafnium isotope and trace element constraints on the nature of mantle heterogeneity beneath the central southwest Indian ridge (13°E to 47°E). *Journal of Petrology*, 46(12): 2427-2464.
- King S D, Adam C. 2014. Hotspot swells revisited. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 235: 66-83.
- König M, Jokat W. 2010. Advanced insights into magmatism and volcanism of the Mozambique Ridge and Mozambique Basin in the view of new potential field data. *Geophysical Journal International*, 180(1): 158-180.
- Kurz M D, Le Roex A P, Dick H J B. 1998. Isotope geochemistry of the oceanic mantle near the Bouvet triple junction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(5): 841-852.
- Le Roex A P, Dick H J B. 1981. Petrography and geochemistry of basaltic rocks from the Conrad fracture zone on the America-Antarctica Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 54(1): 117-138.
- Le Roux P J, Le Roex A P, Schilling J G, et al. 2002. Mantle heterogeneity beneath the southern Mid-Atlantic Ridge: trace element evidence for contamination of ambient asthenospheric mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(1): 479-498.
- Le Roex A P, Chevallier L, Verwoerd W J, et al. 2012. Petrology and geochemistry of Marion and Prince Edward Islands, Southern Ocean: Magma chamber processes and source region characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 223-224: 11-28.
- Li J B, Jian H C, Chen Y J, et al. 2015. Seismic observation of an extremely magmatic accretion at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge. *Geophysical Research Letters*, 42(8): 2656-2663.
- Li J H, Zhang H T, Li H L. 2015. The tectonic setting and evolution of Indian Ocean—Research progress of tectonic map of Indian Ocean. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 37(7): 1-14, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2015.07.001.
- Li S Z, Suo Y H, Yu S, et al. 2015. Morphotectonics and tectonic processes of the Southwest Indian Ocean. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 39(1): 15-29.
- Liu C H, Li J H, Zhang H T, et al. 2018. Magma supply of the Southwest Indian Ocean: evidence from crustal thickness anomalies. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 61(7): 2859-2870,

- doi: 10.6038/cjg2018L0395.
- Livermore R A, Hunter R J. 1996. Mesozoic seafloor spreading in the Southern Weddell Sea. *Geological Society, London, Special Publications*, 108(1): 227-241.
- Mahoney J, Le Roex A P, Peng Z, et al. 1992. Southwestern limits of Indian Ocean Ridge Mantle and the origin of low $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ mid-ocean ridge basalt: Isotope systematics of the central Southwest Indian Ridge (17° - 50° E). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B13): 19771-19790.
- Maus S, Barckhausen U, Berkenbosch H, et al. 2009. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(8): Q8005, doi: 10.1029/2009GC002471.
- McDougall I, Verwoerd W, Chevallier L. 2001. K-Ar geochronology of Marion Island, Southern Ocean. *Geological Magazine*, 138(1): 1-17.
- Mendel V, Sauter D, Parson L, et al. 1997. Segmentation and morphotectonic variations along a Super Slow-spreading center: The Southwest Indian Ridge (57° E- 70° E). *Marine Geophysical Researches*, 19(6): 505-553.
- Meyzen C M, Ludden J N, Humler E, et al. 2005. New insights into the origin and distribution of the DUPAL isotope anomaly in the Indian Ocean mantle from MORB of the Southwest Indian Ridge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(11): Q11K11, doi: 10.1029/2005GC000979.
- Meyzen C M, Marzoli A, Bellieni G, et al. 2016. Magmatic activity on a motionless plate: the case of East Island, Crozet Archipelago (Indian Ocean). *Journal of Petrology*, 57(7): 1409-1436.
- Muller M R, Minshull T A, White R S. 1999. Segmentation and melt supply at the Southwest Indian Ridge. *Geology*, 27(10): 867-870.
- Niu X W, Ruan A G, Li J B, et al. 2015. Along-axis variation in crustal thickness at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge (50° E) from a wide-angle seismic experiment. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(2): 468-485.
- Pérez-Díaz L, Eagles G. 2014. Constraining South Atlantic growth with seafloor spreading data. *Tectonics*, 33(9): 1848-1873, doi: 10.1002/2014TC003644.
- Parsiegla N, Gohl K, Uenzelmann-Neben G. 2008. The Agulhas Plateau: Structure and evolution of a large igneous province. *Geophysical Journal International*, 174(1): 336-350.
- Patriat P. 1979. L'océan Indien: La dorsale ouest-Indienne. // Mémoire du Museum National d'Histoire Naturelle, série C, 43: 49-52.
- Patriat P, Sauter D, Munsch M, et al. 1997. 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. *Marine Geophysical Researches*, 19(6): 457-480.
- Recq M, Goslin J, Patriat P, et al. 1979. Profil de réfraction sur le plateau malgache, résultats préliminaires, 7ème Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, Lyon, April 1979, Abstract.
- Recq M, Goslin J, Charvis P, et al. 1998. Small-scale crustal variability within an intraplate structure: the Crozet Bank (southern Indian Ocean). *Geophysical Journal International*, 134(1): 145-156.
- Rommevaux-Jestin C, Deplus C, Patriat P. 1997. Mantle Bouguer anomaly along an ultra slow-spreading ridge: Implications for accretionary processes and comparison with results from Central Mid-Atlantic Ridge. *Marine Geophysical Researches*, 19(6): 481-503.
- Rothé J P. 1954. La zone sismique médiane Indo-Atlantique. *Proc. Roy. Soc. A; Math. Phys. Eng. Sci.*, 222(1150): 387-397.
- Royer J Y, Patriat P, Bergh H W, et al. 1988. Evolution of the Southwest Indian ridge from the Late Cretaceous (anomaly 34) to the Middle Eocene (anomaly 20). *Tectonophysics*, 155(1-4): 235-260.
- Sandwell D T, Müller R D, Smith W H F, et al. 2014. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, 346(6205): 65-67.
- Sauter D, Patriat P, Rommevaux-Jestin C, et al. 2001. The Southwest Indian Ridge between $49^{\circ}15'$ E and 57° E: Focused accretion and magma redistribution. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 303-317.
- Sauter D, Carton H, Mendel V, et al. 2004. Ridge segmentation and the magnetic structure of the Southwest Indian Ridge (at $50^{\circ}30'$ E, $55^{\circ}30'$ E and $66^{\circ}20'$ E): Implications for magmatic processes at ultraslow-spreading centers. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(5): Q05K08, doi: 10.1029/2003GC000581.
- Sauter D, Cannat M, Meyzen C, et al. 2009. Propagation of a melting anomaly along the ultraslow Southwest Indian Ridge between 46° E and $52^{\circ}20'$ E: interaction with the Crozet hotspot? *Geophysical Journal International*, 179(2): 687-699.
- Sauter D, Cannat M, Rouméjon S, et al. 2013. Continuous exhumation of mantle-derived rocks at the Southwest Indian Ridge for 11 million years. *Nature Geoscience*, 6(4): 314-320.
- Schlich R. 1982. The Indian Ocean: aseismic ridges, spreading centers, and oceanic basins. // Nairn A E M, Stehli F G eds. The Ocean Basins and Margins. Boston, MA: Springer.
- Schreider A A, Schreider A I, Bulychev A A, et al. 2006. Geochronology of the American-Antarctic ridge. *Oceanology*, 46(1): 114-122.
- Sclater J G, Fisher R L, Patriat P, et al. 1981. Eocene to recent development of the South-west Indian Ridge, a consequence of the evolution of the Indian Ocean Triple Junction. *Geophysical Journal International*, 64(3): 587-604.
- Sinha M C, Loudon K E, Parsons B. 1981. The crustal structure of the Madagascar ridge. *Geophysical Journal International*, 66(2): 351-377.
- Standish J J, Dick H J B, Michael P J, et al. 2008. MORB generation beneath the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge (9° - 25° E): Major element chemistry and the importance of process versus source. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(5): Q05004, doi: 10.1029/2008GC001959.
- Tao C H, Lin J, Guo S Q, et al. 2012. First active hydrothermal

vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge. *Geology*, 40(1): 47-50.

Tapscott C R, Patriat P, Fisher R L, et al. 1980. The Indian Ocean triple junction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B9): 4723-4739.

Veevers J J. 2012. Reconstructions before rifting and drifting reveal the geological connections between Antarctica and its conjugates in Gondwanaland. *Earth-Science Reviews*, 111(3-4): 249-318.

Verwoerd W, Chevallier L, Thomson J W, et al. 1990. F. Oceanic islands on the Antarctic Plate. //LeMasurier W E, Thomson J W, Baker P E eds. *Volcanoes of the Antarctic Plate and Southern Oceans*. Washington DC: Antarctic Research Series, 396-463.

West B P, Fujimoto H, Honsho C, et al. 1995. A three-dimensional gravity study of the Rodrigues Triple Junction and the Southeast Indian ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 133(1-2): 175-184.

Yang A Y, Zhao T P, Zhou M F, et al. 2017. Isotopically enriched N-MORB: A new geochemical signature of off-axis plume-ridge interaction-A case study at 50°28'E, Southwest Indian Ridge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(1): 191-213.

Yu X, Han X Q, Qiu Z Y, et al. 2019a. Definition of Northwest Indian ridge and its geologic and tectonic signatures. *Earth Science* (in Chinese), 44(2): 626-639.

Yu X, Han X Q, Tang L M, et al. 2019b. The geotectonic features of the Southeast Indian Ridge and its current research progress. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 64(17): 1799-1816.

Yu X, Dick H J B. 2020. Plate-driven micro-hotspots and the evolution of the dragon flag melting anomaly, southwest Indian ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 531: 116002, doi: 10.1016/j.epsl.2019.116002.

Zhang T, Lin J, Gao J Y. 2011. Interactions between hotspots and the Southwest Indian Ridge during the last 90 Ma; Implications on the formation of oceanic plateaus and intra-plate seamounts. *Science China Earth Sciences*, 54(8): 1177-1188.

Zhang T, Lin J, Gao J Y. 2013. Magmatism and tectonic processes in Area A hydrothermal vent on the Southwest Indian ridge. *Science China Earth Sciences*, 56(12): 2186-2197.

Zhao M H, Qiu X L, Li J B, et al. 2013. Three-dimensional seismic structure of the Dragon Flag oceanic core complex at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge (49°39'E). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(10): 4544-4563.

Zhou H, Dick H J B. 2013. Thin crust as evidence for depleted mantle supporting the Marion Rise. *Nature*, 494(7436): 195-200.

附中文参考文献

曹红. 2010. 西南印度洋中脊热液成矿作用及其地质地球化学研究 [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学.

李江海, 张华添, 李洪林. 2015. 印度洋大地构造背景及其构造演化——印度洋底大地构造图研究进展. *海洋学报*, 37(7): 1-14, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2015.07.001.

李三忠, 索艳慧, 余珊等. 2015. 西南印度洋构造地貌与构造过程. *大地构造与成矿学*, 39(1): 15-29.

刘持恒, 李江海, 张华添等. 2018. 西南印度洋岩浆补给特征研究: 来自洋壳厚度的证据. *地球物理学报*, 61(7): 2859-2870, doi: 10.6038/cjg2018L0395.

余星, 韩喜球, 邱中炎等. 2019a. 西北印度洋脊的厘定及其地质构造特征. *地球科学*, 44(2): 626-639.

余星, 韩喜球, 唐立梅等. 2019b. 东南印度洋中脊地质构造特征及研究进展. *科学通报*, 64(17): 1799-1816.

张涛, Lin J, 高金耀. 2013. 西南印度洋中脊热液区的岩浆活动与构造特征. *中国科学: 地球科学*, 43(11): 1834-1846.

(本文编辑 何燕)