

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.136>



西北印度洋脊的厘定及其地质构造特征

余 星, 韩喜球, 邱中炎, 王叶剑, 唐立梅

国家海洋局第二海洋研究所, 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江杭州 310012

摘要:西北印度洋的洋脊系统目前以“中印度洋脊”和“卡尔斯伯格脊”分别指示南北两段, 两者的分界点被认为是澳大利亚板块与印度板块的板块边界与洋脊的交点, 但具体分布位置不明确。基于已有的地质、地球物理和地球化学等多方面特征, 本文认为卡尔斯伯格脊和中印度洋脊可以统一称为“西北印度洋脊”, 从罗德里格斯三联点一直延伸到欧文断裂带。新的洋脊厘定将有助于更全面地了解整个西北印度洋的洋脊演化和地球动力学过程。西北印度洋脊地形上南北两端断裂较少, 中间断层密集, 形似吸管的弯折部位, 调节洋脊的转向。重力异常显示沿脊轴方向两端高中间低的特征, 表明两端岩浆供给相对充足, 而中间断层密集区岩浆量少。磁异常特征显示清晰的分带性, 指示多阶段的洋脊扩张历史。岩石地球化学特征显示南北两个同位素相对富集洋脊段, 可能与热点作用相关, 或与残留岩石圈或地壳物质对亏损软流圈地幔的富集改造有关。

关键词:西北印度洋脊; 卡尔斯伯格脊; 中印度洋脊; 洋脊玄武岩; 地质构造特征; 地球化学。

中图分类号: P541

文章编号: 1000-2383(2019)02-0000-14

收稿日期: 2018-12-08

Definition of Northwest Indian Ridge and Its Geologic and Tectonic Signatures

Yu Xing, Han Xiqiu, Qiu Zhongyan, Wang Yejian, Tang Limei

Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China

Abstract: The existing nomenclatures for the ridge system of Northwest Indian Ocean include Carlsberg Ridge and Central Indian Ridge from north to south. The demarcation point between them is thought to be the intersection of Australia-Indian plate boundary and the ridge axis, which is yet poorly constrained. Based on the current knowledge of geological, geophysical and geochemical investigation and research results of the whole ridge segment, a new terminology for the ridge system of Northwest Indian Ocean is proposed, i.e. the Northwest Indian Ridge (NWIR). The whole ridge extends from Rodrigues Triple Junction to Owen transform fault, which includes Carlsberg Ridge and Central Indian Ridge, no matter where the boundary is. The new term may promote the thorough recognition of evolution history of Northwest Indian Ridge, as well as its geodynamic process. The Northwest Indian Ridge is especially full of faults in the middle segment but less on both ends, just like the shape of a straw and its bend is an analog for the turning point of the ridge. The gravity anomaly shows that the magma supplies at both ends are relatively abundant, while the magma in the middle part is rather limited. The magnetic anomaly in the Northwest Indian Ocean is zoned and indicates a multi-stage ridge spreading processes. Besides, the most prominent feature in petrogeochemistry is the presence of relatively isotopically enriched ridge basalts from two ridge segments, which may be related to the hotspot intervention and/or contamination of depleted asthenosphere by residual lithosphere or crustal materials.

Key words: Northwest Indian Ridge; Carlsberg Ridge; Central Indian Ridge; mid-ocean ridge basalt; geotectonic characteristics; geochemistry.

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41872242); 浙江省自然科学基金项目(No.LY17D02001); 国家基本科研业务费专项(No.JG1518)。

作者简介:余星(1981—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事岩石大地构造研究。ORCID: 0000-0001-9029-8549。E-mail: yuxing@sio.org.cn

引用格式:余星, 韩喜球, 邱中炎, 等, 2019. 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.

洋中脊是最重要的板块离散边界,北大西洋中脊分离了北美板块和欧亚板块,南大西洋中脊分离了南美板块和非洲板块,环南极扩张洋脊打开了南大洋,加克洋脊拓展了欧亚海盆和北冰洋,东太平洋海隆助推了环太平洋的板片俯冲(Pitman and Talwani, 1972; Nürnberg and Müller, 1991; Briaies *et al.*, 2011; 李江海等, 2016; 李学杰等, 2017). 离散型边界洋中脊和汇聚型边界俯冲带共同构成了板块构造理论的核心(Whittaker, 2008). 洋中脊的扩张同时伴随洋壳增生,以岩浆作用或拆离断层模式调谐补偿板块裂离的空间缝隙,完成幔壳转化过程(Michael *et al.*, 2003; Ildefonse *et al.*, 2007; 余星等, 2013). 洋中脊的扩张作用研究是理解板块运动、深部地幔动力学过程、区域乃至全球大地构造演化的关键途径.

印度洋是全球最年轻的大洋,西北印度洋具有印度洋中最年轻的洋脊系统,它记录了最新的区域构造演化历史、深部地幔活动和岩浆作用过程,具有重要的研究价值. 西北印度洋的洋脊系统虽然很早被发现,如北部的卡尔斯伯格脊发现于 1929 年,但由于地理位置及周边局势,在该区开展的地质地球物理调查和研究仍然较少. 近十年来在国际洋中脊计划(Inter-Ridge)和国际海底区域多金属硫化物资源勘探的推动下,印度、法国、德国、英国、日本等国家在西北印度洋开展了一系列的地质地球物理调查和研究(Mudholkar, 2002; Kamesh Raju *et al.*, 2008, 2012; Yi *et al.*, 2014; Nauret *et al.*, 2006; Mukhopadhyay *et al.*, 2016). 我国从 2012 年以来积极投入对西北印度洋的地质地球物理调查,取得了一系列重要发现和研究成果(韩喜球等, 2012; 淳明浩等, 2015, 2016; Chen *et al.*, 2016; 黄凯晖等, 2018).

地形地貌和沉积特征可以反映洋脊的岩浆活动强度、周期性和分段性,进而了解构造—岩浆—沉积作用的协同响应(Ewing and Ewing, 1967). 磁条带可以反映洋脊扩张过程岩浆产物的喷出年龄,进而了解洋脊的扩张起止时间和扩张速率(Vine and Matthews, 1963; Gee and Kent, 2007; Müller *et al.*, 2008; Maus *et al.*, 2009). 洋脊玄武岩的岩相学、矿物学和地球化学特征可以帮助恢复岩浆的喷发状态、岩浆来源、熔融程度和分离结晶过程,进而了解洋脊深部的物质变化和热状态(Sun *et al.*, 1979; Presnall *et al.*, 1979; Rubin *et al.*, 2001; Workman and Hart, 2005; Ito and Dunn, 2009). 本文将结合国内外已有的调查研究成果,进一步明

确西北印度洋洋脊系统的相关概念,总结其地质构造特征以及新的认识,提出西北印度洋脊演化研究的相关科学问题,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,同时为我国后续的硫化物资源调查和研究工作提供帮助.

1 西北印度洋脊的新内涵

西北印度洋的洋脊系统目前尚缺乏统一的命名. 已有的命名方法将洋脊分为“中印度洋脊”和“卡尔斯伯格脊”南北两个部分,但两者的内涵仍存在较大争议. 首先,中印度洋脊的概念存在含糊之处. Hellebrand *et al.* (2002) 认为中印度洋脊是指罗德里格斯三联点至欧文断裂带之间的整个洋脊段,即包含卡尔斯伯格脊. Merkouriev and Sotchevanova (2003) 和 Mukhopadhyay *et al.* (2016) 则主张中印度洋脊与卡尔斯伯格脊独立,卡尔斯伯格脊位于中印度洋脊北部. 另一方面,即使区分卡尔斯伯格脊与中印度洋脊,两者的界线仍不明确. 一种观点认为卡尔斯伯格脊南界在 2°S , 即马巴希斯断裂带附近(Merkouriev and Sotchevanova, 2003; Mukhopadhyay *et al.*, 2016), 另一种观点认为其界线在赤道附近(Schlich, 1982; Dymant, 1998), 还有观点认为其南界在 2°N 左右(Krishna, 1996).

卡尔斯伯格脊和中印度洋脊界线模糊的主要原因是缺少明显的地质或地理标识,如三联点. 由于澳大利亚板块与印度板块的板块边界目前还无定论,因此由板块边界与洋脊相交的三联点位置难以判断(Bird, 2003). 已有的地质、地球物理和地球化学特征在假定的分界点两侧均未显示明显的变化,因此两个洋脊在地质、地球物理和地球化学上基本是连续变化的,可以统一为一个整体. 本文将欧文断裂带至罗德里格斯三联点之间的洋脊段统称为“西北印度洋脊”(Northwest Indian Ridge, 简称 NWIR). 它包括北部的卡尔斯伯格脊和南部的中印度洋脊(图 1). 通过前期的调查研究,认为卡尔斯伯格脊与中印度洋脊的分界在郿道元断裂带附近($\sim 2^{\circ}\text{N}$; 中国大洋协会办公室, 2016), 洋脊走向在郿道元断裂带处发生明显的改变(韩喜球等, 2012). 而中印度洋脊又可以细分为北中印度洋脊($2^{\circ}\text{N} \sim 12^{\circ}\text{S}$)和南中印度洋脊($12.0^{\circ}\text{S} \sim 25.5^{\circ}\text{S}$). 新厘定的“西北印度洋脊”具有更明确的指示性和更简洁的表述形式,在尺度上与西南印度洋脊和东南印度洋脊相匹配,更有助于理解整个印度洋的洋脊系统和大地构造格局.

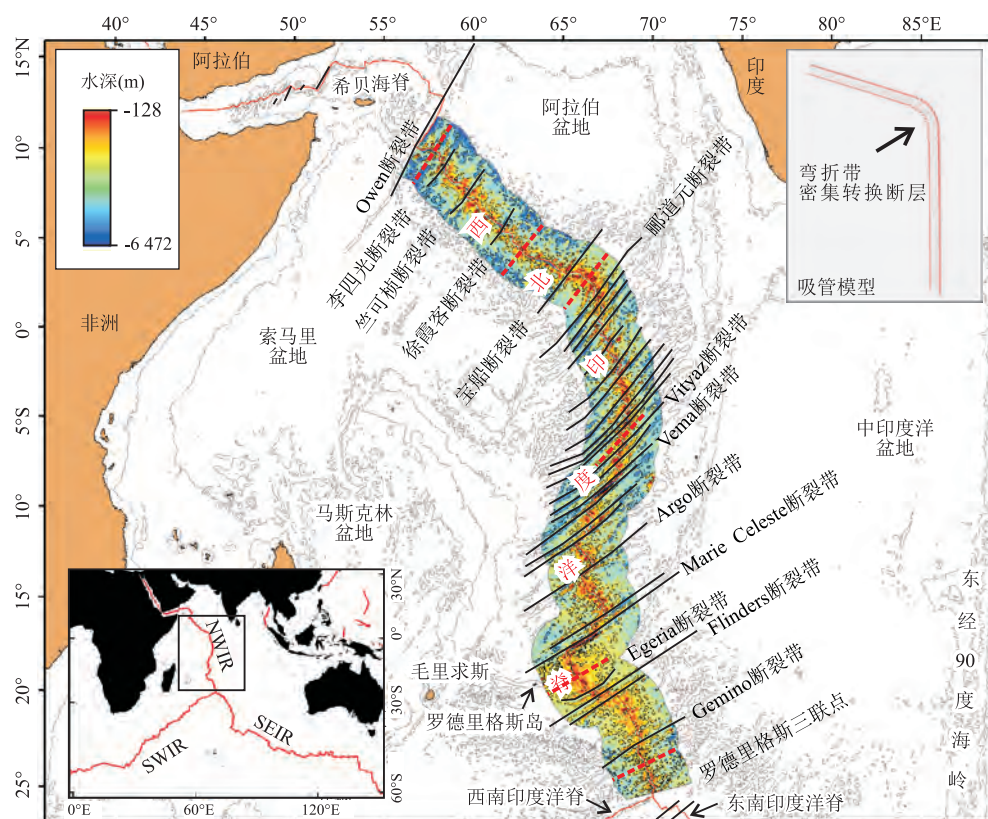


图1 西北印度洋脊离轴200 km内的地形特征及断裂带分布

Fig.1 The topography of Northwest Indian Ridge within the off-axis distance of 200 km, and the distribution of transform faults 地形等深线为2 000 m间隔,地形数据来源于GEBCO,分辨率为30".沿洋脊中央裂谷的红线为扩张中心,垂直于洋脊的黑线为断裂带,垂直于洋脊的红色虚线指示图3的剖面线位置.左下角内嵌图显示西北印度洋脊在印度洋中的位置,右上角内嵌图指示转换断层密集分布的洋脊段类似吸管的弯折带

2 洋脊地形及断裂带分布

西北印度洋脊离轴 200 km 内的洋壳水深范围为 128~6 472 m,其中主体水深为 2 000~4 000 m,面积达 90%以上(图 1).最大水深位于维玛断裂带以北的维玛海沟,水深可超过 6 000 m(图 2).最小水深位于罗德里格斯海脊,水深可浅于 500 m,且离洋脊约 260 km 的罗德里格斯岛已高出水面.西北印度洋脊最显著的地形特征是轴部裂谷和断裂带(转换断层)的分布(图 1).“断裂带”和“转换断层”是两个概念,一般来说,转换断层是指断裂带界于两条洋脊中间构成断距的部分,而两边延伸段均属于“断裂带”范畴.由于“转换断层”与“断裂带”空间叠置关系,通常两者可以混用,在特指板块转换边界时宜用“转换断层”.

西北印度洋脊轴部的地形特征同大西洋中脊等慢速扩张洋脊相似,呈现明显的轴部裂谷特征.沿整个洋脊的轴部裂谷,水深变化频繁,代表了沿脊新生

火山活动的不均一性和局域性(图 2).洋脊裂谷宽约 20~40 km,谷底至坡顶落差可达 2 000 m,从北到南总体落差逐渐减小,表明沿洋脊往南岩浆供应相对充足,且岩浆活动间隔时间短,因此地形起伏变化较小(图 3).局部呈现相反的变化趋势,如埃杰里亚断裂带(20°30'S)至罗德里格斯三联点(25°30'S)之间的洋脊段,由北往南裂谷逐渐加深,谷顶落差增大(Briais, 1995).

离轴较远的侧翼火山脊水深逐渐加大(图 3),这与洋壳冷却后的均衡效应有关,洋壳水深与年龄成正比(Niu, 2008).不过,卡尔斯伯格脊北段(如 9°56'N 剖面)离轴 100 km 以上仍有地形的明显突起,并可以高于轴部裂谷两侧的坡顶(图 3),这与正常的洋壳冷却模型相矛盾,可能与轻质的亏损地幔上浮有关(Zhou and Dick, 2013).

转换断层错断轴部裂谷,断层谷水深可明显大于洋脊裂谷,形成明显的地形中断(图 2).西北印度洋脊的转换断层分布具有明显的分带性,中间密集,南北两端稀疏,形似一枚弯折的“吸管”,其弯折带对

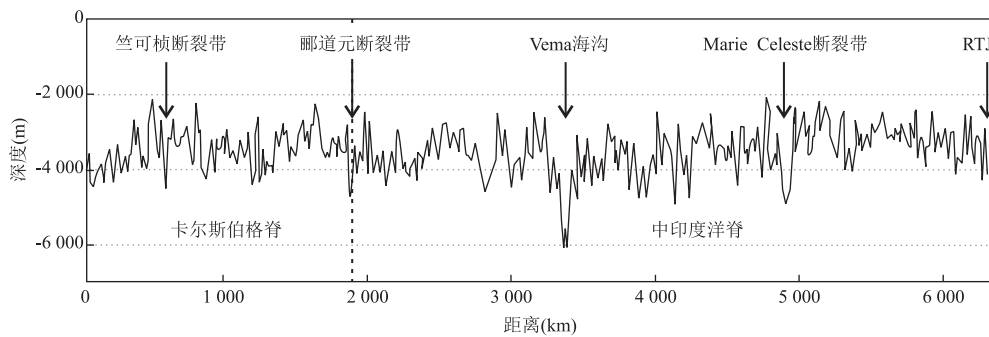


图 2 西北印度洋脊沿脊轴的水深变化图

Fig.2 The bathymetry along the ridge axis valley for Northwest Indian Ridge

横轴距离为各点至起点的累计路径长度(包含转换断层的断距),计算起点为欧文断裂带与卡尔斯伯格脊的交点;RTJ 为罗德里格斯三联点

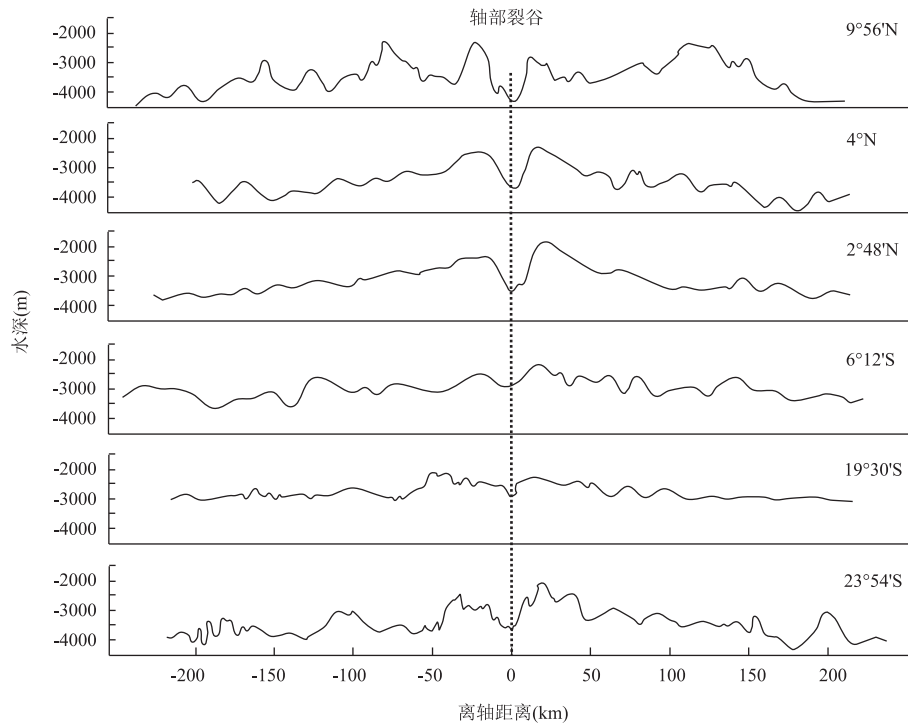


图 3 西北印度洋脊不同洋脊段的横向水深剖面图

Fig.3 The bathymetric profile of selected sections across the Northwest Indian Ridge

图中纬度值代表剖面穿过洋脊的交叉点纬度,具体剖面位置见图 1 的红色虚线

应转换断层密集分布带,由雁列式的密集转换断层调节洋脊走向的变化(图 1).各转换断层的分布参数统计如表 1.

根据洋脊地形和转换断层分布特征,西北印度洋脊总体可分为 3 个部分,即北部的卡尔斯伯格脊($10^{\circ}\text{N}\sim 2^{\circ}\text{N}$)、中部的北中印度洋脊($2^{\circ}\text{N}\sim 12^{\circ}\text{S}$)和南部的南中印度洋脊($12^{\circ}\text{S}\sim 25.5^{\circ}\text{S}$),其分界线分别为郇道元断裂带和 12°S 断裂带.卡尔斯伯格脊转换断层发育较少,密度小于 0.5 条/百公里.卡尔斯伯格脊从北往南分布的主要断裂带依次为欧文断裂带、李四光断裂带、竺可桢断裂带、徐霞客断裂带、宝

船断裂带和郇道元断裂带(韩喜球等,2012; 中国大洋协会办公室,2016).中印度洋脊的转换断层分布呈现北密南疏的特征,即北中印度洋脊从郇道元断裂带到 12°S 断裂带之间转换断层极其发育,长约 1 600 km 的洋脊段上发育 19 条断裂带,密度达 1.19 条/百公里,分割的平均洋脊段长度约 84 km,与西南印度洋脊加列尼断裂带到梅尔维尔断裂带之间的洋脊段相当(断层密度为 1.33 条/百公里).而南中印度洋脊从 12°S 断裂带到罗德里格斯三联点,转换断层出现频率较少,可识别的正式定名的断层有阿尔戈断裂带、玛丽·塞莱斯特断裂带、埃杰里亚断裂

表 1 西北印度洋脊主要转换断层(断裂带)参数

Table 1 The attributes of the main transform faults (fracture zones) along the Northwest Indian Ridge

洋脊段	序号	名称	英文名	断距(km)	断层位置		滑动方向	数据参考
					经度	纬度		
卡尔斯伯格脊	1	欧文断裂带	Owen FZ	300	58°E	12°N	右旋	多波束地形(韩喜球等, 2012; 中国大洋协会办公室, 2016)
	2	李四光断裂带	Li Siguang FZ	23	58°16'E	8°53'N	右旋	
	3	竺可桢断裂带	Cho Kochen FZ	44	59°38'E	7°31'N	右旋	
	4	徐霞客断裂带	Xu Xiake FZ	24	61°35'E	5°29'N	右旋	
	5	宝船断裂带	Bao Chuan FZ	16	65°13'E	2°57'N	左旋	
	6	郦道元断裂带	Li Daoyuan FZ	36	66°42'E	2°N	右旋	
北中印度洋脊	7	0°40'N 断裂带*	0°40'N FZ	73	67°09'E	0°40'N	右旋	多波束地形(Kamesh Raju <i>et al.</i> , 1997, 2012), 重力数据(Sandwell <i>et al.</i> , 2014)
	8	0°N 断裂带*	0°N FZ	60	67°08'E	0°N	右旋	
	9	0°37'S 断裂带*	0°37'S FZ	20	67°24'E	0°37'S	右旋	
	10	0°42'S 断裂带*	0°42'S FZ	23	67°23'E	0°42'S	右旋	
	11	1°06'S 断裂带*	1°06'S FZ	54	67°33'E	1°06'S	右旋	
	12	1°53'S 断裂带*	1°53'S FZ	25	68°02'E	1°53'S	右旋	
	13	马巴希斯断裂带	Mabahiss FZ	70	68°08'E	2°S	右旋	
	14	3°S 断裂带*	3°S FZ	45	68°10'E	3°S	右旋	
	15	锡拉克断裂带	Sealark FZ	60	68°30'E	4°S	右旋	
	16	4°50'S 断裂带*	FZ-J ^a	49.2	68°36'E	4°50'S	右旋	
	17	5°08'S 断裂带*	5°08'S	15	68°37'E	5°08'S	右旋	
	18	维特亚兹断裂带	Vityaz FZ	108	68°40'E	5°23'S	右旋	
	19	6°50'S 断裂带*	FZ-L ^a	92	68°10'E	6°50'S	右旋	
	20	7°45'S 断裂带*	FZ-M ^a	64.4	68°E	7°45'S	右旋	
	21	维玛海沟	Vema Trench/Vema FZ	243	67°40'E	9°S	右旋	
南中印度洋脊	22	10°S 断裂带*	FZ-O ^a	80	66°40'E	10°S	右旋	多波束地形及其他地球物理数据(Parson <i>et al.</i> , 1993; Briais, 1995; Pak <i>et al.</i> , 2017; Kim <i>et al.</i> , 2017)
	23	11°S 断裂带*	11°S FZ	77	66°30'E	11°S	右旋	
	24	12°S 断裂带*	12°12'S FZ ^b	110	65°36'E	12°S	右旋	
	25	阿尔戈断裂带	Argo FZ	120	66°10'E	13°45'S	右旋	
	26	16°20'S 断裂带*	FZ 5 ^c	113	67°E	16°20'S	右旋	
	27	玛丽·塞莱斯特断裂带	Marie Celeste FZ	214	66°00'E	17°30'S	右旋	
	28	埃杰里亚断裂带	Egeria FZ	40	66°30'E	20°30'S	左旋	
	29	弗林德斯断裂带	Flinders FZ	64	67°15'E	20°15'S	左旋	
	30	20°18'S 断裂带*	20°18'S FZ	30	67°59'E	20°18'S	左旋	
	31	格米诺断裂带	Gemino FZ	33	69°20'E	22°45'S	右旋	

注: * 表示本文使用的断裂带名称; a 表示 Kamesh Raju *et al.* (2012) 采用的命名方法; b 表示 Parson *et al.* (1993) 所用的命名方法; c 表示 Pak *et al.* (2017) 所用的命名方法; FZ 表示 Fracture Zone.

带、弗林德斯断裂带和格米诺断裂带等(Krishna, 1996).

由于多波束地形资料的不足,目前尚未对西北印度洋脊的分段规则达成共识.Mudholkar *et al.* (2002)根据卡尔斯伯格脊 4°20'N~3°45'N 的多波束地形资料,识别出非转换断层不连续带(NTD),或称脊轴不连续带(RAD),错断距离达 22 km.Kamesh Raju *et al.* (2008)基于卡尔斯伯格脊 4°20'N~3°N 约 440 km 洋脊段的多波束地形和磁异常资料,识别了唯一一条转换断层,即宝船断裂带,其将该段洋脊分为 2 个一级段,其中北边一级段又以非转换断层不连续带(NTD)分隔成 3 个二级段.韩喜球等(2012)利用卡尔斯伯格脊段的多波束地形数据,将卡脊划分为 5 个一级段,其分界线为欧文断裂带和

郦道元断裂带之间的 4 条转换断层(表 1).Kamesh Raju *et al.* (2012)利用多波束地形和磁异常资料分析了中印度洋脊 3°S~10°S 约 750 km 洋脊段的地形特征,识别了 8 个一级洋脊段.Parson *et al.* (1993)利用非多波束地球物理资料将中印度洋脊 12°12'S 至罗德里格斯三联点间的洋脊段划分为 5 个一级段和若干个二级段.Briais (1995)综合了埃杰里亚断裂带(20°30'S)至罗德里格斯三联点(25°30'S)之间 450 km 的海底多波束资料和侧扫声纳资料将洋脊段分成 2 个一级段共 11 个二级段.Mukhopadhyay *et al.* (2016)对中印度洋脊 20°30'S~23°07'S 近 300 km 的洋脊段进行了构造和岩石资料解译,认为该段洋脊由一级边界埃杰里亚断裂带、格米诺断裂带及其他二级边界分隔,共可分为 9 个二

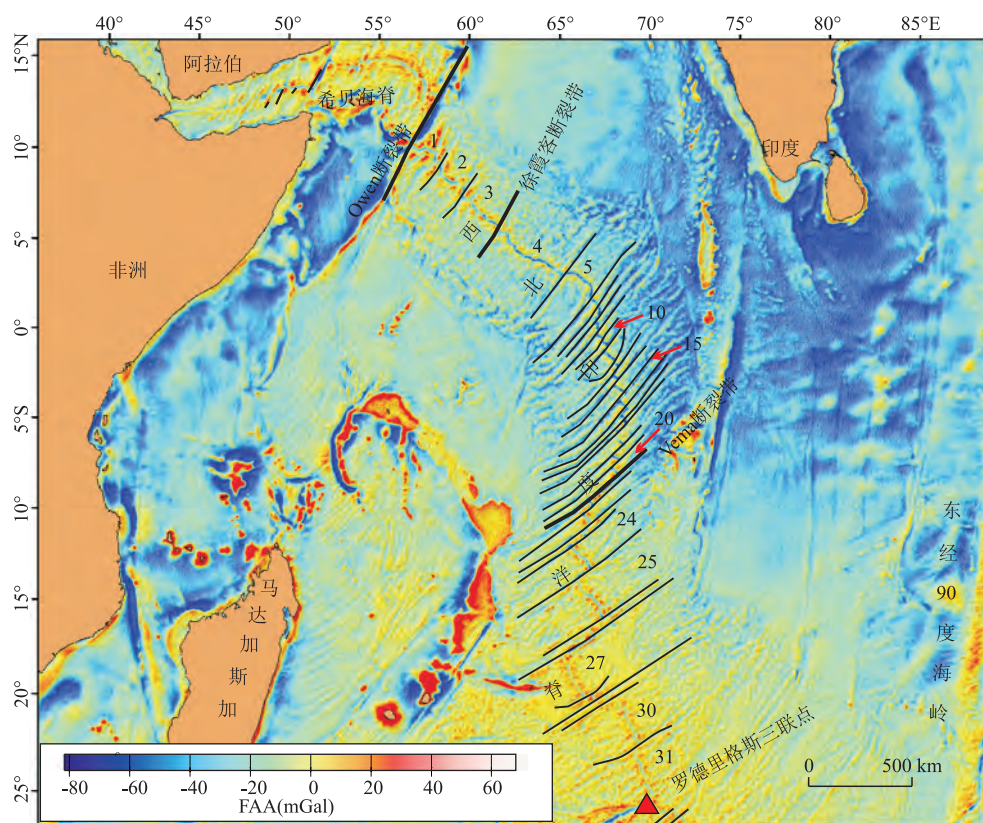


图 4 西北印度洋脊的自由空间重力异常分布图

Fig.4 The free-air gravity anomalies for Northwest Indian Ridge

沿洋脊的数字代表西北印度洋脊一级段的编号,重力异常数据参考 Sandwell *et al.* (2014)

级洋脊段。

根据前人的研究成果,结合已有的数据资料,可将西北印度洋脊初步划分为 31 个一级段,从北到南依次编号(图 4),各段的分隔转换断层见表 1。

3 重力异常特征

重力异常可以反映地质体的密度差异,从而有效揭示地壳浅部和深部的地质结构及异常体分布。西北印度洋脊的自由空间重力异常范围约 $-129.10 \sim +106.82$ mGal (Chatterjee *et al.*, 2013)。沿脊轴方向,自由空间重力异常总体呈现两端高中间低的特征,与水深异常相对应(图 4)。南端从罗德里格斯三联点至维玛断裂带之间洋脊段重力异常值较高,且高值向洋脊两侧延伸距离长,表明该段洋脊一直以来岩浆供应相对充足。北端从欧文断裂带至徐霞客断裂带重力异常同样较高,并在洋脊两侧呈对称分布。同南端相比,北端的异常分布范围较窄,仅限制于离轴约 250 km 范围内,往外迅速降低。中间段从徐霞客断裂带至维玛断裂带重力值较低,只

在中央裂谷两侧高地显示略高的重力异常特征。垂直于脊轴,洋脊两侧的重力异常基本呈对称分布,从中央裂谷往外延伸,重力异常先升高后降低。中央裂谷通常具有低的重力异常值,约 $-40 \sim -60$ mGal,而裂谷两侧的高地具有最高的异常值 (Kamesh Raju *et al.*, 1997)。洋脊两侧洋盆的重力异常普遍较低,而洋盆中的海底高原及海山链则呈重力异常高值,如马斯克林海台、查戈斯—马尔代夫—拉卡代夫海脊、罗德里格斯海脊、毛里求斯和留尼旺等。

关于西北印度洋脊的重力研究工作非常有限, Honsho *et al.* (1996) 对罗德里格斯三联点附近区域开展过相关的重力调查, Kamesh Raju *et al.* (1997) 对中印度洋脊 $7^{\circ}30'S \sim 8^{\circ}30'S$ 段进行了重力调查,认为洋脊段中部常出现负的地幔布格重力异常,这与沿洋脊轴向地壳厚度变化有关,中部岩浆量较大,地壳较厚。Samudrala *et al.* (2016) 对中印度洋脊 $3^{\circ}S \sim 10^{\circ}S$ 段开展了重力异常调查,发现维玛海沟的自由空间重力异常值为 -75 mGal,地幔布格异常 MBA 达 80 mGal,并认为 MBA 高值代表薄壳,而洋脊段中部的 MBA 低值区则指示洋壳加厚。

4 磁异常特征和洋脊扩张历史

目前对于西北印度洋脊高精度的磁力调查仍然较少,因而获得的高分辨率磁异常信息十分有限。Honscho *et al.* (1996) 对罗德里格斯三联点附近区域开展了磁力调查,认为罗德里格斯三联点可能存在连续和不连续两种演化模式,即中印度洋脊与东南印度洋脊时而连续时而不连续两种状态。Kamesh Raju *et al.* (1997) 对中印度洋脊 $7^{\circ}30'S \sim 8^{\circ}30'S$ 段进行了磁力调查,发现该段洋脊为非对称扩张的贫岩浆型。Droliia *et al.* (2000) 对中印度洋脊 $7^{\circ}S \sim 12^{\circ}S$ 段开展了磁力调查,测算维玛断裂带北侧扩张速率为 1.8 cm/a ,而南侧扩张速率为 2.1 cm/a 。

虽然高分辨率磁异常资料有限,但卫星、航空及船测磁力资料仍然可以帮助揭示研究区较大尺度的地磁异常特征(Maus *et al.*, 2009)。根据全球地磁异常网格数据(EMAG2),西北印度洋脊的磁异常条带总体是延续的,即中印度洋脊的磁条带与卡尔斯伯格脊相连,特别是 45 Ma 以来,显示西北印度洋脊整体的连续性。此外磁条带也显示明显的分带性,

轴部附近的洋壳显示较平缓的磁异常特征,条带细窄,变化频繁,指示扩张速率较慢(图 5)。而离轴较远的洋盆区,磁条带较宽,变化幅度大,并且磁条带展布的方向与轴部附近的洋壳不一致,指示洋脊扩张方向的变化。对于西北印度洋脊的轴部附近洋壳,南部的磁条带明显宽于北部,指示近期以来南部洋脊段的扩张速率较快,这与洋脊扩张速率的计算结果相一致(图 6,表 2)。从 62 Ma 年以来,西北印度洋脊的扩张速度由北往南逐渐加快,这与东南印度洋脊更快的扩张速度相协调。但是 45 Ma 年前后,西北印度洋脊中段的扩张速率相对较快,这可能与该段洋脊在这一时段快速发育雁列式的密集转换断层有关(表 2)。根据洋脊两侧的磁异常和洋壳年龄等时线,可以发现在单位时间内洋脊两侧的洋壳宽度可以存在差异,这指示了局部洋脊段在特定时间的非对称扩张模式(图 6)。

根据洋壳的磁异常特征,可以推测洋脊的扩张历史及西北印度洋的演化过程。索马里盆地具有西北印度洋区最古老的海底磁异常条带,指示在 155 Ma 年左右马达加斯加与非洲大陆分离,引起索

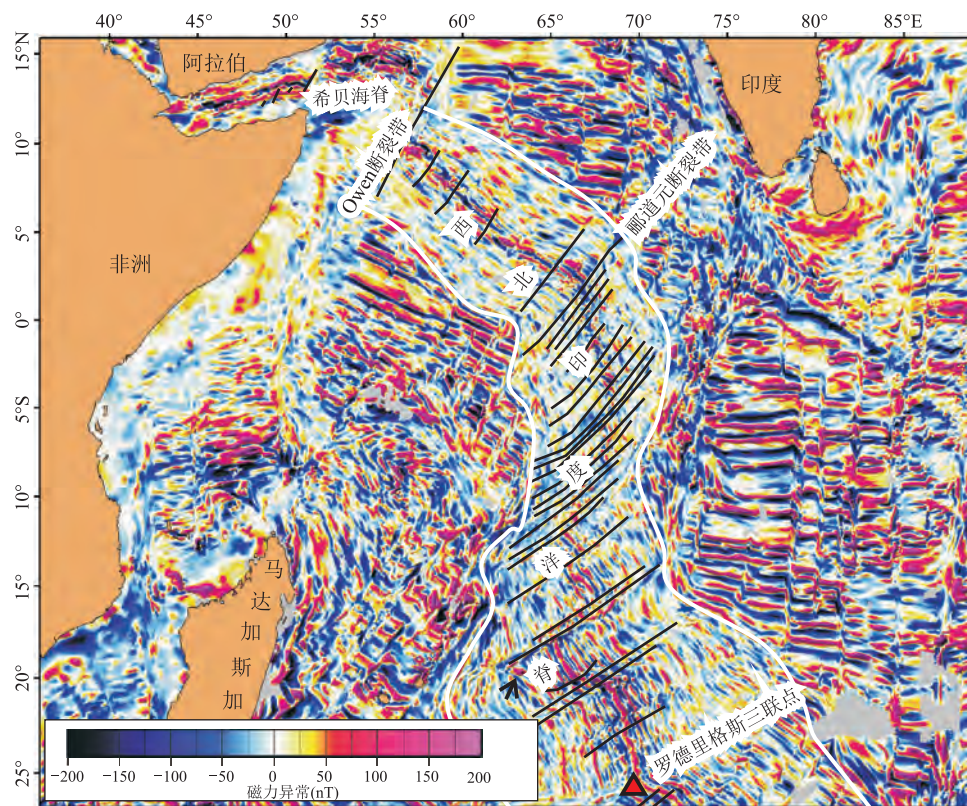


图5 西北印度洋脊及周边磁异常分布图

Fig.5 The magnetic anomalies for Northwest Indian Ridge and the adjacent area
白色粗线为不同类型磁条带的界线,磁异常数据来源于全球2°磁网格数据EMAG2

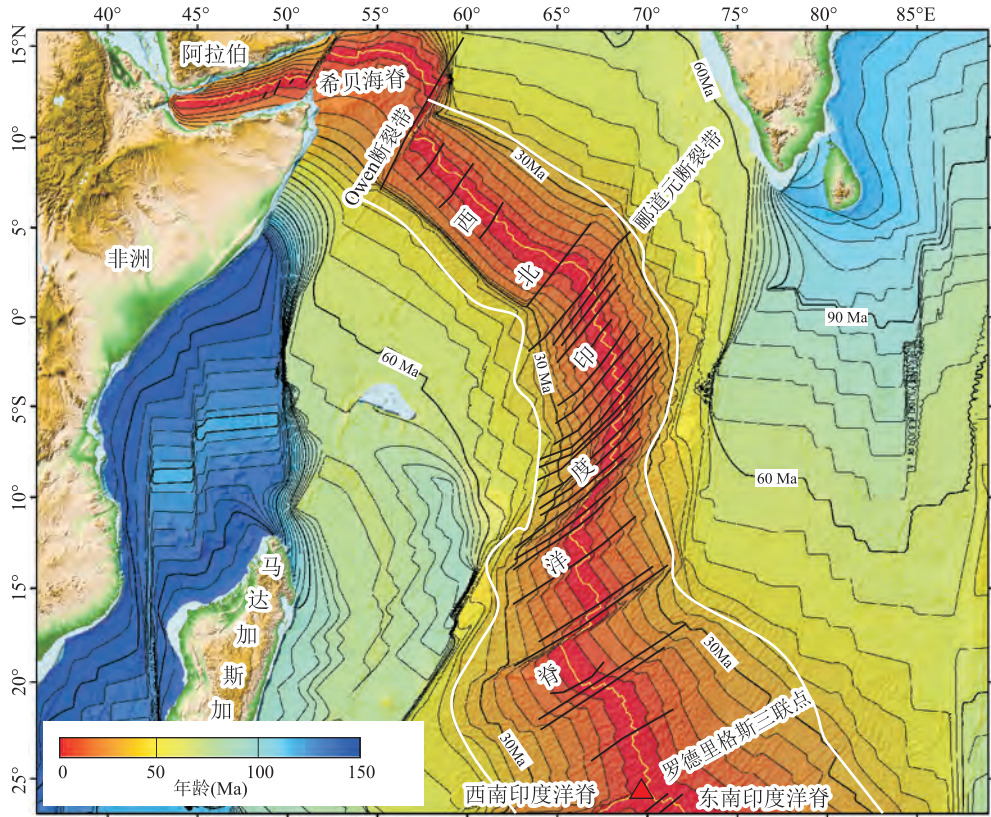


图6 西北印度洋洋壳年龄分布图

Fig.6 The oceanic crust ages for the Northwest Indian Ocean

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. 黄色线为扩张中心和转换断层连接线, 白色粗线示意扩张方向转变的临界点

表 2 西北印度洋脊不同洋脊段各时代平均全扩张速率对照

Table 2 Spreading rates for typical segments of Northwest Indian Ridge in different periods

洋脊段	剖面位置(纬度)	各时期扩张速率(mm/a)			
		62~45 Ma	45~30 Ma	30~10 Ma	10~0 Ma
卡尔斯伯格脊	9°56'N	82.0	23.3	16.6	23.9
	4°N	76.4	31.2	22.3	29.1
	2°48'N	95.6	42.0	27.2	31.7
中印度洋脊	6°12'S	?	61.2	31.2	36.3
	19°30'S	97.0	38.4	44.2	40.7
	23°54'S	112.0	45.5	52.5	45.8

* 注:剖面位置是指剖面与洋脊扩张中心相交点的纬度,剖面位置同图 3.局部区域磁条带分辨率较低,无法估算剖面位置对应时段的扩张速率.全扩张速率的计算依据为某时段生成洋壳总宽度除以时间间隔.计算结果基本与 McKenzie and Sclater (1971) 和 Fisher *et al.*(1971)的调查结果相符.

马里盆地的南北向扩张,直至 120 Ma 停止(Rabinowitz *et al.*,1983; 李三忠等,2015).Collier *et al.*(2008)通过对马斯克林盆地的磁异常条带的解译,认为在约 83.5 Ma,塞舌尔(与印度相连)从马达加斯加分离,古洋脊呈北东-南西方向扩张,直至约 62 Ma 停止.而现今的卡尔斯伯格脊于 65~62 Ma 开始扩张,使印度与塞舌尔分离(Chatterjee *et al.*,

2013;李江海等,2015).大约在 45 Ma,受印度与欧亚板块碰撞的影响,卡尔斯伯格脊和中印度洋脊的扩张方向发生改变(图 6),从近南北向扩张转变为北东-南西向扩张(Collier *et al.*,2008; Patriat and Segoufin,1988).在同一时期,西北印度洋脊的扩张速度有明显减慢的趋势(表 2),反映了印度与欧亚碰撞的远距离效应.在 45~30 Ma,查戈斯-马尔代

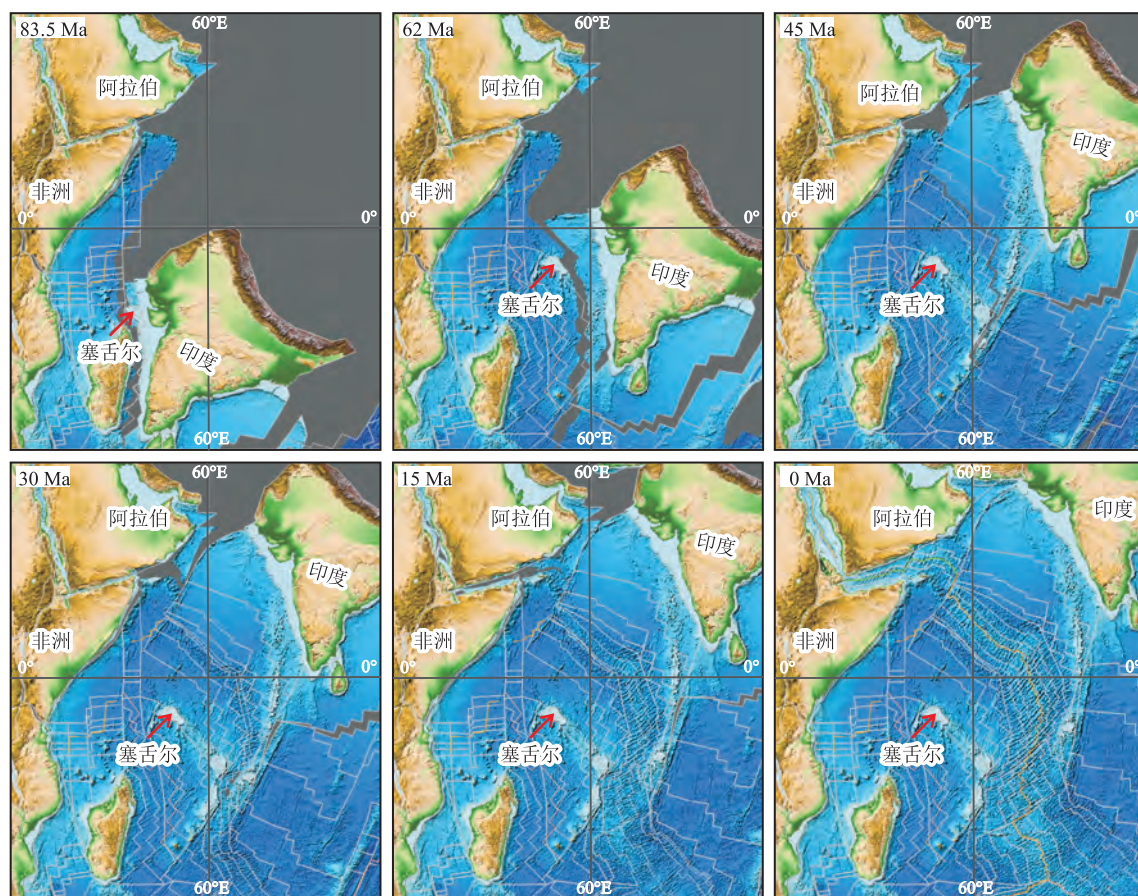


图7 西北印度洋 83.5 Ma 以来洋脊演化过程示意图

Fig.7 The evolution of spreading ridges in Northwest Indian Ocean since 83.5 Ma ago

演化模式基于 EarthByte 的海底洋壳年龄数据和 Gplate 软件,以非洲板块为固定参考点

夫一拉卡代夫海脊开始与马斯克林海底海台分离,基本形成了现今的西北印度洋脊形态(图6,图7)。从45~0 Ma,西北印度洋脊南北段呈现不同的扩张速率变化趋势,6°12' S以北的洋脊段扩张速率先变慢后加快,而6°12' S以南的洋脊扩张速率先变快后减慢,而这一边界正好位于查戈斯—马尔代夫—拉卡代夫海脊马斯克林海底海台的分离点附近,暗示了扩张速率变化与块体分离之间的内在关系(图6)。

5 岩石地球化学异常

沿西北印度洋脊出露的岩石类型包括玄武岩、辉长岩、辉绿岩、橄榄岩等,其中玄武岩几乎在整个洋脊段均有分布,橄榄岩、辉长岩等主要分布于玛丽·塞莱斯特断裂带以北的转换断层密集区(Drolia and Demets, 2005; Kamesh Raju *et al.*, 2012; Yi *et al.*, 2014),此外还有少量分布于罗德里格斯三联点附近及卡尔斯伯格脊北端(Morishita *et al.*, 2009;

韩喜球等, 2012)(图8)。

目前已针对西北印度洋脊的玄武岩开展了岩石地球化学、地幔源区、熔融过程、混染程度等多方面的研究(Murton *et al.*, 2005; Nauret *et al.*, 2006; Füre *et al.*, 2011; Ray *et al.*, 2013; Yi *et al.*, 2014; 淳明浩等, 2015, 2016; Chen *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2017; 黄凯晖等, 2018)。前人通过对3°37' N的玄武岩样品的岩石学和地球化学研究,认为玄武岩经历了从原始岩浆的分离结晶作用。Ray *et al.* (2013)通过主量元素和微量元素模拟认为卡尔斯伯格脊的玄武岩主要受部分熔融过程控制,其源区亏损地幔经历了不同程度的大陆下地壳或上地壳的混染,这种混染过程可能与冈瓦纳大陆的第三阶段裂解(155~135 Ma)有关。Murton *et al.* (2005)认为中印度洋脊南部的MORB异常是留尼旺热点与洋脊相互作用的结果。Yi *et al.* (2014)通过研究中印度洋脊8°S~17°S的玄武岩地球化学特征,发现洋中脊玄武岩的La/Sm比值在洋脊段内变化很大,呈现

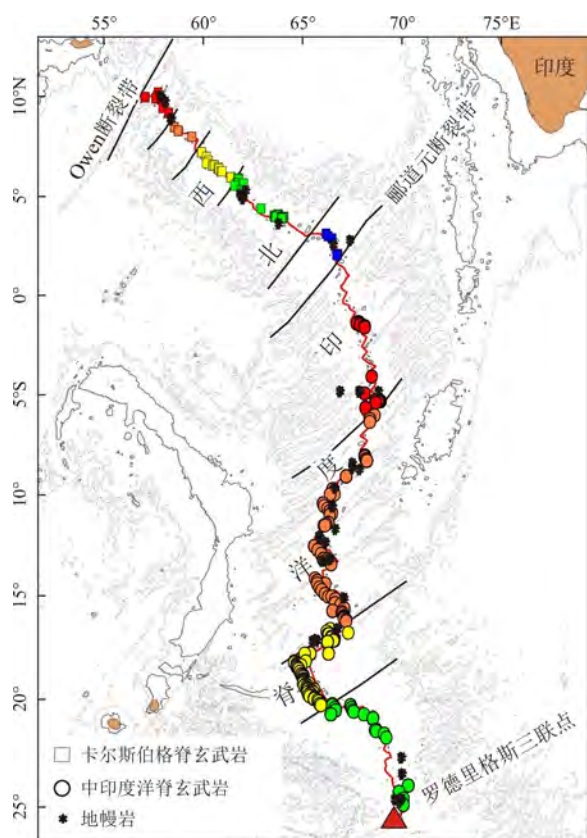


图 8 西北印度洋脊岩石样品分布

Fig.8 The sampled rocks from the seabed of Northwest Indian Ridge

不同颜色图标代表不同洋脊段,数据来源于 PetDB 以及淳明浩等(2015,2016)、Chen *et al.*(2016)和黄凯晖等(2018)

EMORB 和 NMORB 频繁变化的特征,指示地幔源区受不同程度的富集改造而引起的不均一性.Chen *et al.*(2016)根据 Pb 同位素特征认为卡尔斯伯格脊 $3^{\circ}\text{N} \sim 4^{\circ}\text{N}$ 玄武岩源区受大陆上地幔混染,而卡尔斯伯格脊 $9^{\circ}\text{N} \sim 10^{\circ}\text{N}$ 玄武岩源区受大陆下地壳(或岩石圈地幔)混染.淳明浩等(2016)研究发现卡脊斯伯格脊 3.5°N 附近玄武岩明显富集 K、Ba、La 及 U 等微量元素,不过地幔源区特征尚不清楚.Kim *et al.*(2017)利用 Sr-Nd-Pb-He 同位素示踪认为中印度洋脊 $8^{\circ}\text{S} \sim 17^{\circ}\text{S}$ 玄武岩也可能受到了留尼旺热点及循环洋壳的共同影响.

西北印度洋脊玄武岩显示的最显著地球化学特征是存在两个相对富集的洋脊段,宝船断裂带和郛道元断裂带之间($3^{\circ}\text{N} \sim 1.5^{\circ}\text{N}$)、玛丽·塞莱斯特断裂带和弗林德斯断裂带之间($17^{\circ}30'\text{S} \sim 20^{\circ}15'\text{S}$).图 9 显示这两个洋脊段均具有明显的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值特征.玛丽·塞莱斯特断裂带和弗林德斯断裂带之间的富集玄武岩可能是留尼旺热

点作用的结果(Murton *et al.*, 2005),He 同位素特征也支持这一结论(Füri *et al.*, 2011).而 Nauret *et al.*(2006)则认为中印度洋脊 $18^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{S}$ 的玄武岩异常与热点无关,而是源于上地幔的交代富集或是俯冲碱性玄武岩的循环.卡尔斯伯格脊南段宝船断裂带和郛道元断裂带之间玄武岩的富集程度较弱,有待进一步证实.另一方面,卡尔斯伯格脊南段附近未见有明显的热点活动,因此该段洋脊的富集机制也有待进一步研究.

6 总结

“西北印度洋脊”将西北印度洋区的卡尔斯伯格脊和中印度洋脊统一为一个整体,地质、地球物理和地球化学特征显示洋脊从南到北具有一级相似特征,尽管在细节特征方面仍存在差异.西北印度洋脊的地形特征是南北两端断裂较少,中间转换断层密集分布,形似吸管,成为洋脊转向的弯折段.横向上,洋脊南北两端的离轴洋壳水深变化较大,而中间段相对平缓,裂谷落差减小.重力异常在沿脊轴方向上呈现两端高中间低的特征,且高值区向离轴方向延伸更宽,表明一段时间以来持续且充足的岩浆供给,而中间断层密集区岩浆量少.西北印度洋区的磁异常具有分带性,表明多阶段的洋脊扩张历史,洋脊扩张方向、扩张速度、对称性等因素都随时间而改变.岩石地球化学方面的最显著特征是存在南北两个同位素相对富集的洋脊段,可能与热点的作用或残留岩石圈或地壳物质对软流圈的富集改造有关.

西北印度洋脊与东南印度洋脊一脉相承,由于西南印度洋脊在罗德里格斯三联点的切入而分隔.西北印度洋脊的扩张速率小于东南印度洋脊,大于西南印度洋脊.三条洋脊均存在热点与洋脊的相互作用,留尼旺热点约在 34 Ma 从西北印度洋脊的东侧移至西侧(Füri *et al.*, 2011),马里昂热点在约 50 Ma 从西南印度洋脊北侧移至南侧,St. Paul 和 Amsterdam 热点目前正在东南印度洋脊上,且可能与 Kerguelen 热点有成因联系.相对东南印度洋脊和西南印度洋脊,西北印度洋脊更年轻,记录了板块或微陆块裂解、洋脊发育的最新信息.通过联合北侧更年轻的希贝洋脊以及红海裂谷、南侧东南印度洋脊,将为全面认识大陆裂解和洋脊扩张过程提供完整的谱系.

围绕西北印度洋脊的地质地球物理调查和研究正在不断开展,目前虽已积累了不少的基础地质资料,但仍有更多的问题和细节亟待解决和揭示,比

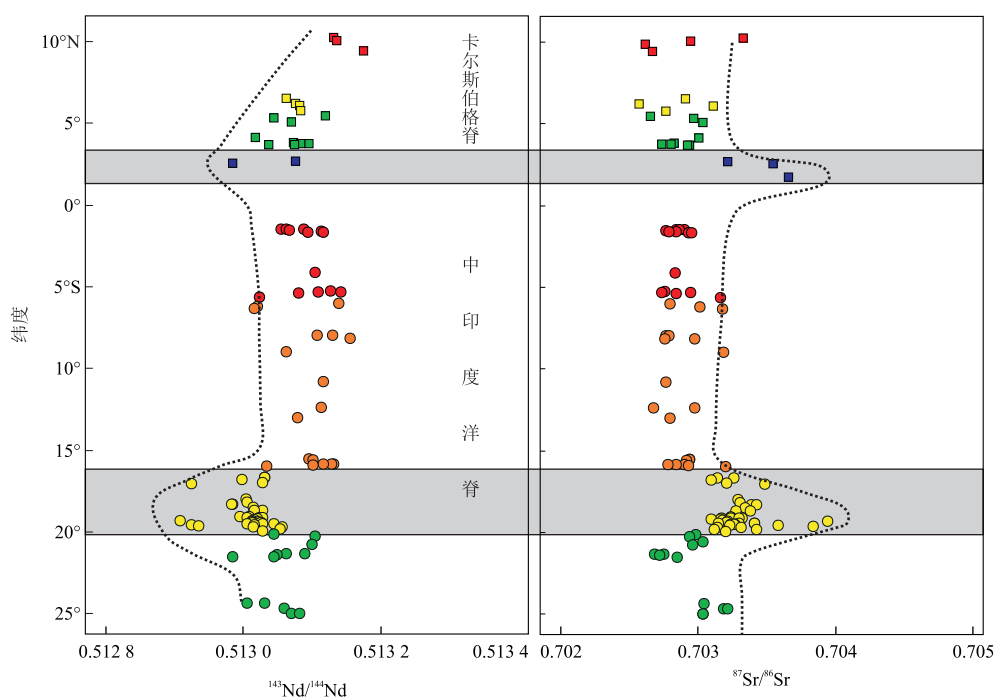


图9 西北印度洋脊玄武岩的 Sr-Nd 同位素特征

Fig.9 The Sr-Nd isotopic compositions for the Northwest Indian Ridge basalts

样品分布位置和图标样式参考图8, Sr-Nd 同位素数据来源于 PetDB

如,西北印度洋脊与东南印度洋脊的继承关系以及西南印度洋脊对其的影响;西北印度洋脊密集转换断层发育的控制因素及吸管模型的动力学机制;西北印度洋脊扩张方向的改变与转换断层展布方向变化的耦合关系;查戈斯—马尔代夫—拉卡代夫海脊与马斯克林海台拉开后在西北印度洋脊软流圈地幔中的残留体痕迹;45 Ma 前后西北印度洋脊磁条带突然变化的地球动力学机制;残留大陆岩石圈地幔或下地壳对西北印度洋脊软流圈地幔的富集改造作用;热点物质对西北印度洋脊的影响;南北两个富集洋脊段的地球化学异常及其构造特征的响应机制;西北印度洋脊构造岩浆活动与热液活动、硫化物成矿的关系;西北印度洋脊与东南印度洋脊、亚丁湾希贝海脊及红海的热液生物亲缘性和继承性关系;等等。了解西北印度洋脊的地质构造特征是解决这些问题的前提和基础。

致谢:感谢匿名审稿人对论文提出的宝贵修改意见,感谢编辑部在本文送审、编辑、校样等方面付出的辛勤劳动,没有你们的奉献和支持,文章不会获得如此巨大的改进,并最终得以顺利刊出。

References

- Briais, A., 1995. Structural Analysis of the Segmentation of the Central Indian Ridge between 20°30' and 25°30' S (Rodriguez Triple Junction). *Marine Geophysical Researches*, 17 (5): 431 — 467. <https://doi.org/10.1007/bf01371787>
- Bird, P., 2003. An Updated Digital Model of Plate Boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4 (3): 1027. <https://doi.org/10.1029/2001gc000252>
- Briais, A., Park, S., Chavagnac, V. E. R., et al., 2011. Circum-Antarctic Ridges. Inter-Ridge International Workshop, Toulouse, France.
- Chatterjee, S., Goswami, A., Scotese, C. R., 2013. The Longest Voyage: Tectonic, Magmatic, and Paleoclimatic Evolution of the Indian Plate during Its Northward Flight from Gondwana to Asia. *Gondwana Research*, 23 (1): 238 — 267. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.07.001>
- Chen, L., Tang, L. M., Yu, X., et al., 2016. Mantle Source Heterogeneity and Magmatic Evolution at Carlsberg Ridge (3.7°N): Constrains from Elemental and Isotopic (Sr, Nd, Pb) Data. *Marine Geophysical Research*, 38 (1—2): 47 — 60. <https://doi.org/10.1007/s11001-016-9292-1>
- China Ocean Mineral Resources R & D Association, 2016. Chinese Gazetteer of Undersea Features on the International Seabed. China Ocean Press, Beijing, 508 (in Chinese).
- Chun, M. H., Yu, Z. H., Li, H. M., et al., 2016. Mantle Source Features of Basalts in the Northwest Indian Ridge. *Marine Sciences*, 40 (8): 108 — 118 (in Chinese with Eng-

- lish abstract).
- Chun, M. H., Yu, Z. H., Zhai, S. K., 2015. The Geochemistry and Geological Significances of Basalts from Carlsberg Ridge in Indian Ocean. *Haiyang Xuebao*, 37(8): 47–62 (in Chinese with English abstract).
- Collier, J. S., Sansom, V., Ishizuka, O., et al., 2008. Age of Seychelles-India Break-up. *Earth and Planetary Science Letters*, 272 (1–2): 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.04.045>
- Drobia, R. K., DeMets, C., 2005. Deformation in the Diffuse India–Capricorn–Somalia Triple Junction from a Multibeam and Magnetic Survey of the Northern Central Indian Ridge, 3°S–10°S. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6 (9): Q09009. <https://doi.org/10.1029/2005gc000950>
- Drobia, R. K., Ghose, I., Subramanyam, A. S., et al., 2000. Magnetic and Bathymetric Investigations over the Vema Region of the Central Indian Ridge: Tectonic Implications. *Marine Geology*, 167 (3–4): 413–423. [https://doi.org/10.1016/s0025-3227\(00\)00029-3](https://doi.org/10.1016/s0025-3227(00)00029-3)
- Dyment, J., 1998. Evolution of the Carlsberg Ridge between 60 and 45 Ma: Ridge Propagation, Spreading Asymmetry, and the Deccan-Reunion Hotspot. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103 (B10): 24067–24084. <https://doi.org/10.1029/98jb01759>
- Ewing, J., Ewing, M., 1967. Sediment Distribution on the Mid-Ocean Ridges with Respect to Spreading of the Sea Floor. *Science*, 156(3782): 1590–1592. <https://doi.org/10.1126/science.156.3782.1590>
- Fisher, R. L., Sclater, J. G., McKenzie, D. P., 1971. Evolution of the Central Indian Ridge, Western Indian Ocean. *Geological Society of America Bulletin*, 82 (3): 553. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82\[553:eotcir\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[553:eotcir]2.0.co;2)
- Füri, E., Hilton, D. R., Murton, B. J., et al., 2011. Helium Isotope Variations between Réunion Island and the Central Indian Ridge (17°–21°S): New Evidence for Ridge–Hot Spot Interaction. *Journal of Geophysical Research*, 116 (B2). <https://doi.org/10.1029/2010jb007609>
- Gee, J. S., Kent, D. V., 2007. Source of Oceanic Magnetic Anomalies and the Geomagnetic Polarity Time Scale. *Treatise on Geophysics*, 5: 455–507. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00097-3>
- Han, X. Q., Wu, Z. C., Qiu, B. B., 2012. Segmentation of Carlsberg Ridge in Northwest Indian Ocean and Its Tectonic and Morphologic Features—The Introduction to the Result from DY24 Cruise (in Chinese).
- Hellebrand, E., Snow, J. E., Hoppe, P., et al., 2002. Garnet–Field Melting and Late-Stage Refertilization in ‘Residual’ Abyssal Peridotites from the Central Indian Ridge. *Journal of Petrology*, 43 (12): 2305–2338. <https://doi.org/10.1093/petrology/43.12.2305>
- 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. <https://doi.org/10.1029/96jb00644>
- Huang, K. H., Han, X. Q., Wang, Y. J., et al., 2017. Geochemical Characteristics of Basalt Samples from the Ridges Adjacent to Aden–Owen–Carlsberg Triple Junction and Their Mantle Sources. *Journal of Marine Sciences*, 35 (4): 44–60 (in Chinese with English abstract).
- Ildefonse, B., Blackman, D. K., John, B. E., et al., 2007. Oceanic Core Complexes and Crustal Accretion at Slow-Spreading Ridges. *Geology*, 35(7): 623. <https://doi.org/10.1130/g23531a.1>
- Ito, G., Dunn, R. A., 2009. Mid-Ocean Ridges: Mantle Convection and Formation of the Lithosphere. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 37 (6): 867–880. <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00654-8>
- Kamesh Raju, K. A., Chaubey, A. K., Amarnath, D., et al., 2008. Morphotectonics of the Carlsberg Ridge between 62°20′ and 66°20′ E, Northwest Indian Ocean. *Marine Geology*, 252 (3–4): 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.03.016>
- Kamesh Raju, K. A., Ramprasad, T., Subrahmanyam, C., 1997. Geophysical Investigations over a Segment of the Central Indian Ridge, Indian Ocean. *Geo-Marine Letters*, 17 (3): 195–201. <https://doi.org/10.1007/s003670050026>
- Kamesh Raju, K. A., Samudrala, K., Drobia, R. K., et al., 2012. Segmentation and Morphology of the Central Indian Ridge between 3°S and 11°S, Indian Ocean. *Tectonophysics*, 554–557: 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.001>
- Kim, J., Pak, S. J., Moon, J. W., et al., 2017. Mantle Heterogeneity in the Source Region of Mid-Ocean Ridge Basalts along the Northern Central Indian Ridge (8°S–17°S). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18 (4): 1419–1434. <https://doi.org/10.1002/2016GC006673>
- Krishna, M. R., 1996. Isostatic Response of the Central Indian Ridge (Western Indian Ocean) Based on Transfer Function Analysis of Gravity and Bathymetry Data. *Tectonophysics*, 257 (2–4): 137–148. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00114-x](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00114-x)
- Li, J. H., Liu, Z. L., Wang, L., et al., 2016. The Tectonic Setting

- and Geological Evolution of the Arctic—From Compiling of Tectonic Map of the Arctic. *Haiyang Xuebao*, 38(7): 85—96 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Haiyang Xuebao*, 37(7): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z., Suo, Y. H., Liu, X., et al., 2015. Tectonic Reconstruction and Mineralization Models of the Indian Ocean: Insights from SWIR. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(1): 30—43 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. J., Yao, Y. J., Yang, C. P., et al., 2017. Regional Geological Features and Tectonic Evolution in the Eastern Eurasian Arctic. *Earth Science*, 42(3): 315—324 (in Chinese with English abstract).
- 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): Q08005. <https://doi.org/10.1029/2009gc002471>
- McKenzie, D., Sclater, J. G., 1971. The Evolution of the Indian Ocean since the Late Cretaceous. *Geophysical Journal International*, 24(5): 437—528. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1971.tb02190.x>
- Merkouriev, S. A., Sotchevanova, N. A., 2003. Structure and Evolution of the Carlsberg Ridge: Evidence for Non-Stationary Spreading on Old and Modern Spreading Centres. *Current Science*, 85(3): 334—338.
- Michael, P. J., Langmuir, C. H., Dick, H. J. B., et al., 2003. Magmatic and Amagmatic Seafloor Generation at the Ultraslow-Spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean. *Nature*, 423(6943): 956—961. <https://doi.org/10.1038/nature01704>
- Morishita, T., Hara, K., Nakamura, K., et al., 2009. Igneous, Alteration and Exhumation Processes Recorded in Abyssal Peridotites and Related Fault Rocks from an Oceanic Core Complex along the Central Indian Ridge. *Journal of Petrology*, 50(7): 1299—1325. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp025>
- Mudholkar, A., Kodagali, V. N., Kamesh Raju, K. A., et al., 2002. Geomorphological and Petrological Observations along a Segment of Slow-Spreading Carlsberg Ridge. *Current Science*, 82(8): 982—989.
- Mukhopadhyay, R., Iyer, S. D., Ray, D., et al., 2016. Morphotectonic and Petrological Variations along the Southern Central Indian Ridge. *International Journal of Earth Sciences*, 105(3): 905—920. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1193-z>
- Müller, R. D., Sdrolias, M., Gaina, C., et al., 2008. Age, Spreading Rates, and Spreading Asymmetry of the World's Ocean Crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(4): Q04006. <https://doi.org/10.1029/2007gc001743>
- Murton, B. J., Tindle, A. G., Milton, J. A., et al., 2005. Heterogeneity in Southern Central Indian Ridge MORB: Implications for Ridge-Hot Spot Interaction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(3): Q03E20. <https://doi.org/10.1029/2004gc000798>
- Nauret, F., Abouchami, W., Galer, S., et al., 2006. Correlated Trace Element—Pb Isotope Enrichments in Indian MORB along 18—20°S, Central Indian Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(1—2): 137—152. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.015>
- Niu, Y. L., 2008. Global Correlations of Ocean Ridge Basalt Chemistry with Axial Depth: A New Perspective. *Journal of Petrology*, 49(4): 633—664. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm051>
- Nürnberg, D., Müller, R. D., 1991. The Tectonic Evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to Present. *Tectonophysics*, 191(1—2): 27—53. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90231-g](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90231-g)
- Parson, L. M., Patriat, P., Searle, R. C., et al., 1993. Segmentation of the Central Indian Ridge between 12°12' S and the Indian Ocean Triple Junction. *Marine Geophysical Researches*, 15(4): 265—282. <https://doi.org/10.1007/bf01982385>
- Patriat, P., Segoufin, J., 1988. Reconstruction of the Central Indian Ocean. *Tectonophysics*, 155(1—4): 211—234. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90267-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90267-3)
- Pitman, W. C., Talwani, M., 1972. Sea-Floor Spreading in the North Atlantic. *Geological Society of America Bulletin*, 83(3): 619. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83\[619:ssitna\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[619:ssitna]2.0.co;2)
- Presnall, D. C., Dixon, J. R., O'Donnell, T. H., et al., 1979. Generation of Mid-Ocean Ridge Tholeiites. *Journal of Petrology*, 20(1): 3—35. <https://doi.org/10.1093/petrology/20.1.3>
- Rabinowitz, P. D., Coffin, M. F., Falvey, D., 1983. The Separation of Madagascar and Africa. *Science*, 220(4592): 67—69. <https://doi.org/10.1126/science.220.4592.67>
- Ray, D., Misra, S., Banerjee, R., 2013. Geochemical Variability of MORBs along Slow to Intermediate Spreading Carlsberg-Central Indian Ridge, Indian Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70—71: 125—141. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.03.008>
- Rubin, K. H., Smith, M. C., Bergmanis, E. C., et al., 2001. Geo-

- chemical Heterogeneity within Mid-Ocean Ridge Lava Flows: Insights into Eruption, Emplacement and Global Variations in Magma Generation. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(3–4): 349–367. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(01\)00339-9](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(01)00339-9)
- Samudrala, K., Kamesh Raju, K. A., Rao, P. R., 2016. Gravity Anomalies over the Central Indian Ridge between 3°S and 11° S, Indian Ocean: Segmentation and Crustal Structure. *Journal of Earth System Science*, 125(8): 1523–1542. <https://doi.org/10.1007/s12040-016-0760-4>
- Sandwell, D. T., Muller, 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. <https://doi.org/10.1126/science.1258213>
- Schlich R., 1982. The Indian Ocean: Aseismic Ridges, Spreading Centers, and Oceanic Basins. In: Nairn, A. E. M., Stehli, F. G., eds., *The Ocean Basins and Margins: The Indian Ocean*. Plenum Press, New York.
- Sun, S. S., Nesbitt, R. W., Sharaskin, A. Y., 1979. Geochemical Characteristics of Mid-Ocean Ridge Basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 44(1): 119–138. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(79\)90013-x](https://doi.org/10.1016/0012-821x(79)90013-x)
- Vine, F. J., Matthews, D. H., 1963. Magnetic Anomalies over Oceanic Ridges. *Nature*, 199(4897): 947–949. <https://doi.org/10.1038/199947a0>
- Whittaker, J., 2008. Tectonic Consequences of Mid-Ocean Ridge Evolution and Subduction. University of Sydney, Sydney.
- Workman, R. K., Hart, S. R., 2005. Major and Trace Element Composition of the Depleted MORB Mantle (DMM). *Earth and Planetary Science Letters*, 231(1–2): 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.12.005>
- Yi, S. B., Oh, C. W., Pak, S. J., et al., 2014. Geochemistry and Petrogenesis of Mafic-Ultramafic Rocks from the Central Indian Ridge, Latitude 8°–17° S: Denudation of Mantle Harzburgites and Gabbroic Rocks and Compositional Variation of Basalts. *International Geology Review*, 56(14): 1691–1719. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.955539>
- Yu, X., Chu, F. Y., Dong, Y. H., et al., 2013. Detachment Fault and Oceanic Core Complex: A New Mode of Seafloor Spreading. *Earth Science*, 38(5): 995–1004 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H. Y., Dick, H. J. B., 2013. Thin Crust as Evidence for Depleted Mantle Supporting the Marion Rise. *Nature*, 494(7436): 195–200. <https://doi.org/10.1038/nature11842>

附中文参考文献

- 淳明浩, 于增慧, 李怀明, 等, 2016. 西北印度洋中脊玄武岩源区地幔特征. *海洋科学*, 40(8): 108–118.
- 淳明浩, 于增慧, 翟世奎, 2015. 印度洋 Carlsberg 脊玄武岩岩石地球化学特征及其地质意义. *海洋学报*, 37(8): 47–62.
- 韩喜球, 吴招才, 裴碧波, 2012. 西北印度洋 Carlsberg 脊的分段性及其构造地貌特征—中国大洋 24 航次调查成果介绍.
- 黄凯晖, 韩喜球, 王叶剑, 等, 2018. 亚丁—欧文—卡尔斯伯格脊三联点邻近洋脊的玄武岩地球化学特征及其地幔源区性质. *海洋学研究*, 35(4): 44–60.
- 李江海, 刘仲兰, 王洛, 等, 2016. 北极地区大地构造特征及其构造演化——北极地区大地构造编图研究进展. *海洋学报*, 38(7): 85–96.
- 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.
- 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等, 2015. 印度洋构造过程重建与成矿模式: 西南印度洋洋中脊的启示. *大地构造与成矿学*, 39(1): 30–43.
- 李学杰, 姚永坚, 杨楚鹏, 等, 2017. 欧亚北极区东部区域地质与构造演化. *地球科学*, 42(3): 315–324.
- 余星, 初凤友, 董彦辉, 等, 2013. 拆离断层与大洋核杂岩: 一种新的海底扩张模式. *地球科学*, 38(5): 995–1004.
- 中国大洋协会办公室, 2016. 中国大洋海底地理实体名录. 北京: 海洋出版社, 508.