

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03006

## 西南印度洋洋盆演化和岩浆地球化学印迹

李伟<sup>1</sup>, 金振民<sup>2</sup>, 陶春辉<sup>1,3</sup>

(1. 自然资源部第二海洋研究所海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 上海交通大学海洋学院, 上海 200240)

**摘要:**西南印度洋中脊(SWIR)平均扩张速率约为14 mm/yr,是全球洋中脊系统的重要组成端元,因其具有慢速-超慢速扩张特征,引起全球科学家的广泛关注。基于前人对SWIR的综合研究成果,从构造和岩浆作用两个角度出发,系统地回顾了SWIR的形成和演化历史,探讨了岩浆的分布特征和地幔不均一性成因。SWIR的形成始于冈瓦纳大陆的裂解,中段洋脊区域(26~42°E)是印度洋最早开启的窗口,历经多次洋脊跃迁和扩展作用形成了斜向扩张展布,多分段的构造格局。地幔热点在冈瓦纳大陆裂解过程中扮演了关键角色,并对SWIR的洋底地貌和岩浆作用具有显著影响,其中Bouvet和Marion热点在SWIR的西段和中段岩浆均留下了地球化学印迹。SWIR西段岩浆除却Bouvet热点影响之外表现出与大西洋-太平洋型玄武岩相似的同位素地球化学特征。在SWIR中段,39~41°E附近的岩浆具有显著的DUPAL异常特征,与冈瓦纳大陆的初始形成、裂解紧密相关。受俯冲改造的中-新元古代的造山带岩石圈地幔拆沉是造成SWIR中段地幔不均一性的重要根源。在SWIR东段,46~52°E区域内的局部岩浆组成异常,推测具有大陆地壳物质混染的成因。而在Melville转换断层以东,洋脊形成时间最晚,玄武岩的地幔源区受到了富集组分的交代作用,其同位素组成与相邻的中印度洋中脊(CIR)和东南印度洋中脊(SEIR)地幔源区具有亲缘性。

**关键词:**西南印度洋;洋盆演化;洋中脊玄武岩;地球化学;洋脊-热点相互作用;地幔不均一性

**中图分类号:**P736

**文献标识码:**A

洋中脊是板块初始扩张的策源地,也是全球最大的海底构造山系,发育大规模的岩浆和热液活动。从洋脊扩张初期开始,便经历了复杂的构造演化过程,形成现今的全球洋中脊构造格局。对现代洋中脊海底的多圈层相互作用和岩浆-构造活动研究离不开对洋盆演化的认识。近年来,伴随着深海探测技术的革新,海底资源调查也逐步从洋脊轴部向洋脊离轴区和深海洋盆延拓,形成横向拓展、纵向延生的三维立体式勘探格局,其中,对隐伏型“死亡”热液区的探寻成为新的海底资源突破方向。洋脊扩张和洋盆演化过程在整个环节中扮演了重要角色,对获取全球海底多金属热液矿床的空间分布和资源储量具有指导意义。

在全球洋盆系统中,印度洋洋盆的研究程度相对较低,但是其构造格局极为复杂,发育诸多地质地貌类型,如洋底高原、无震海岭、微陆块以及多期的扩张中心(Pushcharovsky, 2007, 2008; Seton, 2012; 李江海等, 2015)。典型的“入”字形的洋脊分割了印度洋洋盆(Pushcharovsky, 2014),构成了现今的印度洋洋中脊系统,主要由西南印度洋中脊(SWIR)、东南印度洋中脊(SEIR)、中印度洋中脊(CIR)和卡斯伯格脊(CR)组成。印度洋洋盆西周围环绕多个板块,包括非洲板块、阿拉伯板块、印度板块、澳大利亚板块以及南极洲板块,洋盆中发育凯尔盖朗(Kerguelen)、克洛泽(Crozet)、马里昂(Marion)和留尼旺(Reunion)等多个热点,它们处于

**收稿日期:**2021-01-07; **改回日期:**2021-02-27

**作者简介:**李伟(1989—),男,助理研究员,目前主要从事大洋岩石圈地幔演化和岩石变质作用研究。E-mail:lwttk189@126.com

**资助项目:**国家自然科学基金(洋中脊岩石圈地幔的交代变质作用—以西南印度洋“龙旗”热液区为例,41906072)和国家重点研发计划课题(超慢速扩张洋脊局部岩浆供给的深部过程及其成矿效应研究,2018YFC0309902)联合资助

非洲超级地幔柱之上,这些热点对印度洋洋盆打开、洋中脊的扩张和跃迁具有显著影响(李江海等, 2016)。整个印度洋洋盆系统可分为东西两支,前人提出的鱼尾构造模式认为印度洋盆衔接了大西洋洋盆和太平洋洋盆,在全球洋盆的发育和演化过程中扮演了调节作用(李江海等, 2016), SWIR 作为西支的独立组成,是衔接大西洋中脊和东南印度洋中脊-太平洋的桥梁。作为全球慢速-超慢速扩张洋脊的典型代表,它以贫岩浆活动著称,独特的岩浆作用和洋壳增生模式塑造了其特殊的岩石圈结构和海底地形地貌特征,也是窥视大陆裂解和洋脊扩张动力学过程的极好窗口。

得益于近 20 年来中国组织的航次调查,我国科

学家在 SWIR 的构造演化(李三忠等, 2015a, b; 李江海等, 2016)、岩石圈结构特征(Zhao et al., 2013; Li et al., 2015; Niu et al., 2015)、地幔组成和岩浆作用(Zhou and Dick, 2013; Yang et al., 2017; Li et al., 2017, 2019)以及海底热液成矿(Tao et al., 2012, 2020)等多个领域取得了重大研究突破。本文主要结合国内外学者的已有研究成果,从构造和岩浆作用两个角度出发,回顾了西南印度洋的形成演化历史,进一步审视 SWIR 不同构造域的岩浆作用和地球化学印迹,旨在为探讨冈瓦纳大陆的裂解提供基础性认识。同时,也为 SWIR 热液系统的岩浆-构造理论研究以及未来的找矿突破提供重要支撑。

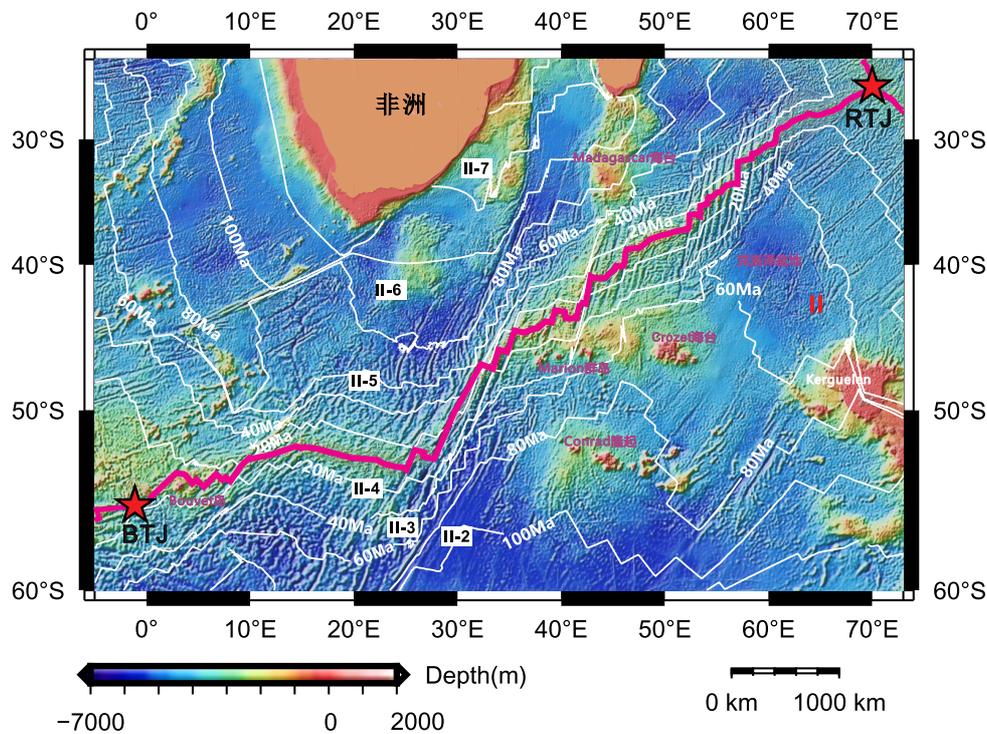


图 1 西南印度洋中脊水深地形及洋盆构造

RTJ—Rodriguez 三联点; BTJ—Bouvet 三联点; II-2-II-7 为根据年龄划分的洋底二级构造地貌单元编号(李三忠等, 2015a)

Fig. 1 Topography and structure of the mid-oceanic ridge of the Southwest Indian Ocean

## 1 区域地质概况

西南印度洋中脊(SWIR)西起南大西洋 Bouvet 三联点(BTJ: 54° 50' S, 00° 40' W), 东至印度洋 Rodriguez 三联点(RTJ: 25° 30' S, 70° 00' E), 全长约 7700 km(图 1), 是南极洲板块和非洲板块的分界线。SWIR 地形起伏变化剧烈, 局部发育的裂谷深度可达 5000 m, 洋脊被一系列近南北向的转换断层

切割错断, 而部分区域转换断层缺失, 仅由岩浆活动型洋脊段和非岩浆活动型的海槽相连, 表现为典型的超慢速扩张洋脊特征(Dick et al., 2003)。

在沿轴方向, SWIR 洋脊扩张速率变化不甚显著, 全扩张速率为 12 ~ 18 mm/y (Sauter and Cannat, 2010), 但部分洋脊段具有明显的斜向扩张特征, 例如 Bouvet (Bo) 转换断层和 Islas Orcadas (IO) 转换断层之间, 洋脊斜向扩张角度高达 51°(图 2)。洋脊

的沿轴水深变化具有以下特征:首先,在 SWIR 存在 3 处浅水深洋脊区,例如 Bo 和 IO 转换断层之间的洋脊段平均水深较浅( $<3000$  m),对应于较低的剩余地幔布格重力异常(RMBA),推测可能与靠近 Bouvet 热点有关。在 SWIR 中部,Marion (Ma)和 Discovery II (DII)转换断层之间的洋脊段,以及 Indomed (In)和 Gallieni (Ga)转换断层之间的洋脊段均具有较浅水深,对应于 RMBA 低值。RMBA 通常反映了洋壳厚度变化或者地幔温度的差异,因此洋脊水深变化与岩浆活动强弱紧密相关。SWIR 整体具有低岩浆补给率,局部的岩浆活动差异是对地幔源区组成和温度的极好响应。在 Prince Edward (PE)和 DII 转换断层之间,现有的最老磁条带年龄记录为 155 Ma,是非洲板块和 Nubia 与 Somalian 板块之间的弥散性离散边界 (Chu and Gordon, 1999; Royer et al., 2006),考虑到 SWIR 复杂的扩张演化

历史,对该区段的地幔属性的认识显得尤为重要。此外,鉴于 SWIR 中部被多个热点和海底高原环绕,洋脊与热点的相互作用不容忽视。除上述浅水区外,沿 SWIR 自西向东,由 Shaka (Sh)转换断层过渡到 Du Toit (DT)转换断层,洋脊水深逐渐加深,RMBA 逐渐升高。在 DT 转换断层以东,尤其是 Andrew Bain (AB)附近,RMBA 开始显著降低。在东部的 Ga 转换断层与 RTJ 之间,洋脊的平均斜向扩张角度为  $30^\circ$ ,洋脊水深变化起伏剧烈,尤其在 Melville (Me)转换断层东侧平均水深加剧,与此对应的是 RMBA 的增加。前人研究认为最东端区域形成于约 40 Ma 的一次重大调整,随后再无大规模的洋脊错段发育 (Sclater et al., 1981),虽然在约 24 Ma 时扩张速率发生降低,完成了向超慢速扩张的最终转变,但是对扩张方向和板块边界变化影响甚微 (Baines et al., 2007)。

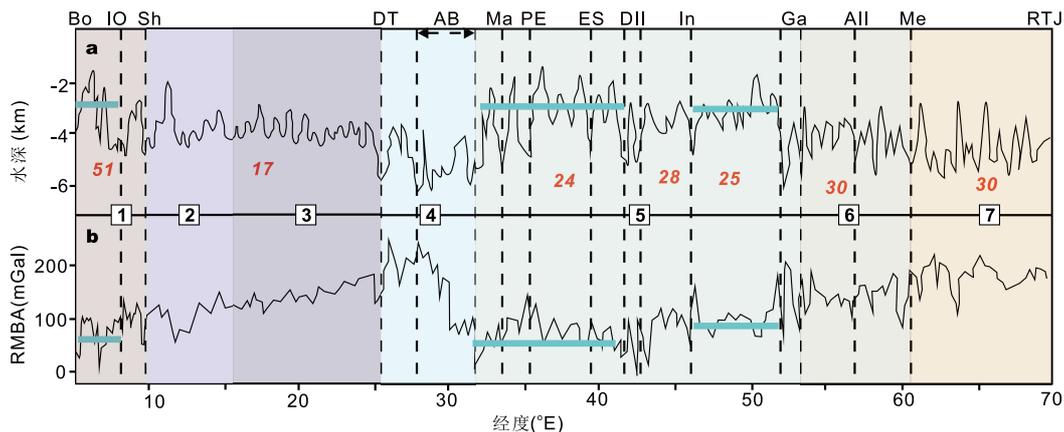


图2 SWIR 沿洋脊走向水深(a)和剩余地幔布格重力异常(RMBA)变化图(b)(根据 Georgen et al.,2001 修改)

图中横线标注了 3 个洋脊浅水深区段和对应的 RMBA (绿松石色),部分区段的扩张斜度 (红色斜体),扩张斜度根据 NUVELIA 板块动力学模型 (DeMets et al., 1994) 计算获得;1-7 编号为 Georgen et al. (2001) 提出的洋脊分段序号;转换断层及断裂带缩写如下: Bo—Bouvet 转换断层; IO—Islas Orcadas 转换断层; Sh—Shaka 转换断层; DT—Du Toit 转换断层; AB—Andrew Bain 转换断层; Ma—Marion 转换断层; PE—Prince Edward 转换断层; ES—Eric Simpson 转换断层; DII—Discovery II 转换断层; In—Indomed 转换断层; Ga—Gallieni 转换断层; All—Atlantis II 转换断层; Me—Melville 转换断层

Fig. 2 The along-axis profile of water depth (a) and residual mantle Bouguer anomaly (RMBA) of SWIR (b) (modified from Georgen et al.,2001)

## 2 洋底构造地貌单元

从全球尺度来说,洋底的构造单元划分主要依据地形地貌特征,常见的构造类型包括洋中脊、转换断层或破碎带、深海盆地、海山和俯冲带等。这些大尺度的构造单元划分有助于探讨大型洋盆的消亡和演化过程,即全球性的板块构造事件。而对洋盆区域尺度的研究则需要更为精细的划分准则,

不仅要考虑洋盆区域的复杂性和时空演化特征,同时也要充分考虑不同构造单元之间的相似性和差异性。以西南印度洋为例,前人综合考虑了区域构造和扩张对称性等因素,将西南印度洋划分为七级构造单元 (李三忠等, 2015a)。首先,东南印度洋洋盆(I)、西南印度洋洋盆(II)和西北印度洋(III)构成了 3 个一级构造单元。二级单元的划分主要以洋壳形成属性、转换断层走向、特定扩张转向年龄

和异常事件(如地幔热点影响)的叠加为依据,由南向北依次为:大于120 Ma的南侧洋壳(II-1)、大于80 Ma的南侧洋壳(II-2)、大于40 Ma的南侧洋壳(II-3)、小于40 Ma的洋壳(II-4)、大于40 Ma的北侧洋壳(II-5)、大于80 Ma的北侧洋壳(II-6)和大于80 Ma的北侧洋壳(II-7)(图1)。随后,聚焦于扩张洋脊及离轴区域,根据转换断层和其间洋脊段的构造相似性,进一步将小于40 Ma的洋壳单元(II-4)划分为4个三级构造单元,自西向东依次为PE和AB转换断层以西的超级洋中脊段(II-4-1)、AB和DII转换断层间的超级洋中脊段(II-4-2)、DII和Ga之间的超级洋中脊段(II-4-3)和Ga转换断层以东的超级洋中脊段(II-4-4),至此,SWIR的一级分段也初步形成。更为次级的(四至七级)构造地貌单元划分主要是为了更好地分析洋脊轴部的微地貌和微构造特征(如断裂组合、倾向和走向等)。以七级构造地貌单元为例,在In和Ga转换断层之间,洋脊中央裂谷区发育直线型雁列式组合、斜线型雁列式组合和斜线型侧列式组合段等,也充分体现了超慢速扩张洋脊的构造样式的多样性。

上述七级构造地貌单元的划分已经足够分析小尺度的洋脊构造演化过程,但随着深海调查技术的显著提高,尤其是搭载AUV获取的高精度海底地形,以及载人潜器的近底高清视像观测,使得微地形地貌研究精度大大提升,使更为精细的地貌单元类型,如平顶海山、丘状台地和平缓岩流等得以识别,极大地促进了对超慢速扩张洋脊的洋壳增生和演化的认识,尤其在热液区的控矿微构造研究方面发挥了重要作用(如Yoshikawa et al., 2012; Jamieson et al., 2014)。此外,注意到西南印度洋洋盆中发育诸多异常的构造地貌单元,如Marion、Conrad和Delcano隆起, Madagascar和Crozet海台等,它们在一定程度上与冈瓦纳大陆的裂解有关。虽然现今的SWIR整体处在Marion隆起的北侧,但研究表明在历史时期Marion热点相对SWIR发生移动,目前在SWIR中部DII破碎带西侧串珠状分布的海山,推测与洋脊北侧的Madagascar洋脊紧密相关。因此,对于这些异常构造地貌单元的成因研究对认识SWIR的整体演化具有重要意义。

### 3 SWIR洋脊分段

根据洋脊的几何形态、海底地形地貌和综合地球物理场特征,以及扩张历史的差异,SWIR可以划

分为若干不同洋脊段,分段方法由于划分标准的不同而存在明显差异(Rommevaux-Jestin et al., 1997; Georgen et al., 2001; Cannat et al., 2003)。

Georgen et al. (2001)根据洋脊的地形资料和脊轴的走向变化将SWIR整体划分为7个区段(图2)。第1段从BTJ到Sh转换断层(9°E),由一系列短的洋脊段构成,被密集分布的断裂带分割;第2段从Sh转换断层至15°E,该洋脊段具有非常低的扩张速率和斜向扩张特征(扩张斜度高达32°);第3段从15°E到25°E,洋脊段呈近垂向扩张,被一系列非转换断层不连续(NTD)错断;第4段由DT和AB转换断层之间的洋脊构成,该段洋脊走向与SWIR整体洋脊走向形成鲜明对比,其中AB转换断层也是全球洋中脊系统中将洋脊错断距离最长的断层之一,断距超过700 km;第5段由Ma转换断层和Ga转换断层之间的洋脊段组成,水深相对较浅;第6段位于Ga转换断层和Me转换断层之间,向东洋脊的水深逐渐增加,其中发育最主要的转换断层有AII断层;第7段为Me转换断层和RTJ之间的洋脊段,该区段的明显特征是缺失转换断层和NTD,具有较深的洋脊水深。通过对SWIR的文献综合分析不难发现该7段划分法与SWIR的区域地质特征,及岩浆岩地球化学组成的区域性差异吻合较好。因此,该划分方法在讨论区域构造演化和岩浆作用时具有适用性。

Cannat et al. (1999)根据多波束水深地形数据和重力资料将SWIR 49°~69°E之间洋脊划分为26个洋脊段,该划分适用于局部更为精细的海底构造和岩浆演化的研究,我国学者在实际研究过程中也主要沿用这一分段方法。然而目前该方法只针对SWIR中东部区段进行了分段,国内学者也只在我国多金属硫化物合同区进行了适当延拓,西至Indomed转换断层(~46°E),因此,尚有大量洋脊空白区域未进行分段编码。考虑到洋脊的分段机制较为复杂,洋脊拓展、叠加、跃迁或废弃、死亡等影响因素不容忽视(李三忠等, 2015a),而SWIR在地形地貌特征上又具有特殊性,在实际研究中可以参照李三忠等(2015a)提出的SWIR的4级分段进行灵活运用,该分段特征在一定程度上遵循了传统的快—慢速扩张洋脊的4级分段标准(Macdonald, 2001)。例如,当探讨大尺度的岩浆作用和地幔区域属性时,使用转换断层为作为边界的1级分段标准即可;如果讨论小微尺度的火山构造和洋壳增生

过程,则可以运用2~4级分段标准。

## 4 洋盆的形成和演化

前人研究表明,印度洋是冈瓦纳大陆裂解的关键区域,作为印度洋洋盆的重要组成,西南印度洋的形成与冈瓦纳大陆裂解密切相关(Ben-Avraham et al., 1995; Livermore and Hunter, 1996)。冈瓦纳大陆最早形成于新元古代末期,由东、西冈瓦纳陆块经过泛非-巴西造山运动(Pan-African/Brazilian Orogen, 简称泛非运动)组合形成。如果考虑西南印度洋的古地理环境和它的地幔归属,其根源可能要追溯到更早的构造事件,这得到了深海橄榄岩的Re-Os年代学的研究约束(>1 Ga; Li et al., 2019)。为此,我们将整个演化历程划分为三个阶段,分别为:(1)冈瓦纳大陆形成前期阶段;(2)冈瓦纳大陆裂解阶段;(3)西南印度洋的洋盆演化阶段。

### 4.1 冈瓦纳大陆的形成

对SWIR采集的深海橄榄岩标本进行的Re-Os年代学研究发现,它保留了较为古老的岩浆抽取记录(>1 Ga)(Day et al., 2017; Li et al., 2019),与Rodinia超大陆的形成时间(~1000 Ma)基本吻合,因此SWIR的初始地幔演化最早可追溯到新元古代。彼时,岩石圈地壳增厚,火山活动缺失,逐渐形成了稳定的克拉通和沉积层覆盖。在约825 Ma,裂谷和火山活动开始变得活跃,大规模的基性岩墙侵位开始发生。在世界范围内,基性岩浆和A型花岗岩的侵位时间在750~700 Ma,表明各地块之间的裂解时间不具一致性,劳亚古陆与东南极古陆裂解时间是800~750 Ma,而古澳洲大陆和劳亚古陆裂解则是在700 Ma左右。随着Rodinia超大陆的裂解,形成了北部和南部几个大陆,其中南方大陆在泛非运动期间,沿着高级变质作用发育的莫桑比克造山带再次碰撞拼合,形成了冈瓦纳大陆,这也是印度洋洋盆演化的前生。在冈瓦纳大陆形成过程中发育两条重要构造带(Acharyya, 2000);一条是介于东冈瓦纳(印度-南极-澳大利亚-新西兰)和西冈瓦纳(南美-非洲)之间的莫桑比克带(图3),波及范围较广,包括东非、马达加斯加、印度南部、斯里兰卡和东南极,主要以中低压麻粒岩相变质作用为标志,形成的时代为600~550 Ma(Kröner, 1993);另一条构造带则发育在东、西非之间,并延伸到刚果和巴西的东南部。其中,位于巴西东南部的元古代晚期岩浆弧的发育尤为引人

注目,长达2000 km。整个泛非造山运动的影响久远,一直持续到450 Ma左右。在随后较长的时间内,冈瓦纳大陆保持稳定,直到在约250 Ma成为了Pangea超大陆的组成部分。

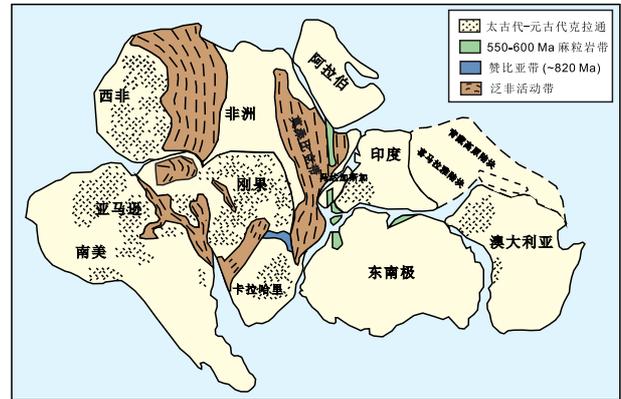


图3 冈瓦纳大陆复原图(据 Acharyya, 2000 修改)

Fig. 3 The restoration map of the Gondwana Mainland (modified from Acharyya, 2000)

### 4.2 冈瓦纳大陆裂解

在古生代末期,由于北侧的新特提斯洋和古太平洋发生外围裂解,其分支向冈瓦纳大陆拓展,使得冈瓦纳大陆在中生代以来开始发生裂解,进而导致了印度洋洋盆的形成(李江海等, 2016)。

冈瓦纳大陆的裂解过程存在3个重要时间节点。首先,在早侏罗世末期(~182 Ma),Karoo大火成岩省发育大规模的岩浆活动,导致了非洲板块在~170 Ma时最先从冈瓦纳大陆裂离,裂解主要沿着新元古代的东非造山带,在其东缘和东南缘分别发育戴维右行走滑断裂(Buiter and Torsvik, 2014)和莫桑比克-里瑟-拉森海裂谷盆地(Jokat et al., 2003)。其次,在中侏罗世末期(~166 Ma),大印度板块开始发生裂解,裂解主要沿新元古代的Kuungan造山带(Torsvik and Cocks, 2013),前人研究认为该裂解可能与Kerguelen热点有关(Chatterjee et al., 2013),其东缘与东北缘发育恩德比裂谷盆地和珀斯-Cuvier裂谷盆地(Stagg et al., 2004)。随后,在早白垩世(~136 Ma),澳大利亚和南极洲板块之间发生裂谷作用,造成彼此的分离(Whittaker et al., 2013)。与此同时,东南印度洋中脊和沃顿洋脊开始出现了新生洋壳(Ramana et al., 2001),两者之间可能通过一系列转换断层相连(Whittaker et al., 2013),最终导致了大印度板块从冈瓦纳大陆彻底分离。其间,在晚侏罗世(~155

Ma),西南印度洋发生了初始扩张,并向北扩展与西索马里盆地的扩张中心相连,形成了统一的扩张洋脊,也导致了非洲板块彻底从冈瓦纳大陆裂解(Jokat et al., 2003)。

#### 4.3 SWIR 洋盆演化

自早白垩世以来,印度洋洋盆进入了构造演化阶段,主要表现为洋脊扩展和扩张中心的跃迁等。李三忠等(2015b)对印度洋中脊的构造演化进行了重建,识别出一系列构造大事件,对现今的印度洋构造格局产生了深远影响。虽然西南印度洋洋盆最早打开,但是它和东南、西北印度洋洋盆同属一级构造单元,形成演化关系极为密切,在84~40 Ma期间,西北印度洋相继发生多次扩张中心的跃迁,而同时期的西南印度洋也存在洋脊跃迁事件,但其更为显著的是洋脊的扩展,地幔热点活动在三大洋盆的演化过程当中始终相伴。

在印度洋洋盆中曾有多多个扩张中心发育,现今已停止活动或俯冲消亡,如 Wharton 洋脊、Mascarene 盆地扩张中心(由 Madagascar 和 Seychelles 微大陆分离形成)、索马里盆地扩张中心、Gop 裂谷和 palitana 洋脊等。在晚白垩世(~70 Ma),印度板块的西缘发生裂谷和洋盆初始扩张,形成了 Gop 裂谷和 Palitana 新生洋中脊(Minshull et al., 2008),卡斯伯格洋脊开始扩张(Chatterjee et al., 2013)。此时,留尼旺热点到达地表(65 Ma),并相对印度板块发生南移,在~60 Ma 离开印度大陆(O'Neill et al., 2003)。扩张中心首先在 65 Ma 由马斯克林盆地跃迁至 Gop 裂谷,于 62 Ma 向西南方向跃迁至 Palitana 洋脊,随后伴随马斯克林盆地、Gop 裂谷和 Palitana 洋脊的扩张停止(Collier et al., 2009),扩张中心在 58.5 Ma 从 Palitana 洋脊跃迁至卡斯伯格洋脊(Minshull et al., 2008; Collier et al., 2009)。西南印度洋在~80 Ma 也可能发生了洋脊跃迁(李三忠等, 2015b),但是洋脊的双向扩展更加显著,其中 SWIR 西侧洋脊向西南方向延伸了 1000 km,东侧脊段在 65~60 Ma 前后由 DII 转换断层向 RTJ 方向快速延生达 2500 km(Patriat and Segoufin, 1988; 张涛等, 2011)。至此,印度洋统一的洋脊系统格局基本形成。40 Ma 以来,西南印度洋洋盆整体无重大调整,主要是以洋脊轴部的周期性岩浆活动和火山构建为主,大洋核杂岩也多有发育。

### 5 热点对洋中脊的影响

印度洋洋盆内存在多个已知热点,如 Karoo、

Bouvet、Marion、Crozet、Kerguelen 和 Reunion 等。对印度洋洋盆热点进行古位置恢复发现,印度洋洋盆大火成岩省和热点均落在大西洋-非洲地幔大剪切波低速省(LLSVP)边界上(图4)。这在一定程度上表明大剪切波低速省(LLSVP)控制了地幔热点的形成,进而对印度洋洋盆的打开存在潜在影响。尤其是自早白垩世以来,冈瓦纳大陆的裂解表现出与地幔柱活动较好的时空相关性,显示了地幔热点对大陆裂解的直接作用(Storey et al., 1995)。李江海等(2016)认为这些地幔热点是导致印度洋洋盆打开的深部诱因,而前寒武纪造山带的分布则控制了印度洋洋盆张开的地表位置。

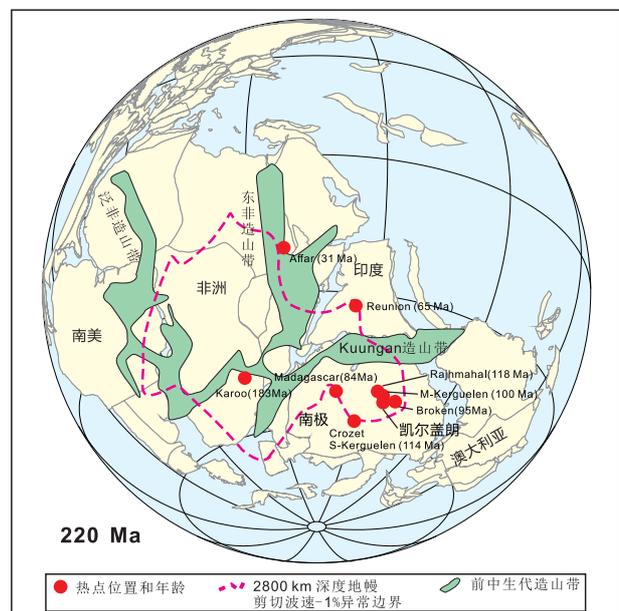


图4 晚中生代(220 Ma)冈瓦纳大陆古板块恢复及中生代主要热点古位置分布示意图(根据李江海等, 2016 底图修改)

Fig. 4 Schematic illustration of Gondwana Mainland during the Late Mesozoic (220 Ma) and the distribution of main hotspots during the Mesozoic and Cenozoic (modified from Li et al., 2016)

在印度洋洋盆打开之后,热点的影响持续存在,体现在对洋脊跃迁的控制和对洋盆地貌特征及岩浆活动的影响。在西北印度洋,伴随 Reunion 热点的逐渐南移,扩张中心不断跃迁,两者在时空上具有一致性,推测具有成因联系(李江海等, 2016)。在东南印度洋,Kerguelen 热点自 130 Ma 以来就有持续的岩浆活动记录(Coffin et al., 2002),塑造了印度洋独特的洋盆地貌,形成了规模庞大的

Kerguelen 海底高原,由南-中-北 Kerguelen 海底高原、Elan 和 Skiff 浅滩、Kerguelen 群岛、Heard 和 McDonald 岛等构成。Kerguelen 热点与 SEIR 洋脊之间存在较长的相互作用时间,一直持续到 40 Ma 左右,导致了 Broken 洋脊和 Kerguelen 海底高原的分离,形成统一的 SEIR。此外,现今位于北印度洋中的东经 90°海岭也被认为是 Kerguelen 热点活动的印迹(详见余星等, 2019)。在西南印度洋,张涛等(2011)运用板块重建的方法对 Marion 热点与 SWIR 的相互作用进行了深入研究,厘定了西南印度洋洋盆内 Del Cano 隆起和 Madagascar 海台的成因,均与 Marion 热点的影响有关。其中 Marion 热点的三阶段活动分别导致了 Del Cano 隆起东部、中部、西部区域的海台形成。而 Madagascar 海台的形成虽然不是 Marion 热点的直接移动轨迹,但是由于 Marion 热点相对 SWIR 发生移动所致(张涛等, 2011)。此外,在 DII 转换断层附近发育的串珠状海山地貌,也被认为是在 Marion 热点移动过程中发生岩浆泄露所形成。目前, Crozet 热点的成因及其影响争议较大,虽然有学者认为 Afanasy Nikitin 海台和 Rajmahal 火成岩的形成与 Crozet 热点有关,但缺乏地球物理和地球化学证据的一致支持。在 Crozet 热点的历史移动过程中没有发现明显的海山链轨迹,使得 Crozet 热点的起源仍是未解之谜。Crozet 热点现今位于 SWIR 南侧 1000 km 之外,它对 SWIR 的影响也是争论的焦点,究竟是热点的温度效应还是具有直接的物质贡献亟需新的研究。

## 6 SWIR 的岩浆地球化学印迹:地幔不均一性的成因

西南印度洋洋盆的形成始于冈瓦纳大陆裂解,推测与地幔柱活动影响有关。虽然关于超大陆裂解的驱动力存在地幔柱(Bottom-up)和深俯冲(Top-down)两大主流学派(李献华, 2021),但不容否认在冈瓦纳大陆的裂解过程当中有明显的热点活动参与。地幔柱柱头上升至地表,不仅影响海底的地形地貌特征,也在岩浆活动中释放出地幔柱的信号,在岩浆地球化学组成上有显著体现。另外需要考虑的是,在大陆裂解过程中由于受热侵蚀作用或者重力失稳(拆沉作用),大陆岩石圈地幔或陆壳物质极易被卷入到软流圈地幔中,导致地幔的不均一性。当不均一的地幔在新生的洋中脊附近上涌并减压熔融时,会在洋中脊玄武岩中显示出强烈的大

陆岩石圈或大陆地壳混染特征。在对印度洋洋盆中已有的具有热点成因的洋脊、海山或海底高原研究时发现,它们的同位素(Sr-Nd-Pb)地球化学特征中均有很强的陆源物质的混染指示,例如, Kerguelen、Naturaliste、Wallaby-Cuvier 海底高原、Broken 洋脊等。更为惊奇的是在 Kerguelen 群岛和 Elan 浅滩的玄武岩中发现了基性麻粒岩和地壳残片,以及片麻岩和花岗岩等陆壳属性岩石(Gregoire et al., 1994; Weis et al., 2001; Ingle et al., 2002)。无独有偶,在现今的 SWIR 洋脊轴部区域,也有多处砂岩、闪长岩和花岗岩的发现(Cheng et al., 2016)。因此,SWIR 源区地幔中陆缘物质的混入是大概率事件。另外也有假说认为在古生代特提斯洋向东冈瓦纳大陆的俯冲可能将俯冲改造的地幔楔物质、洋壳物质和沉积物等加入到现今的印度洋地幔中(Kempton et al., 2002)。综上所述,可以推断出冈瓦纳大陆裂解是造成印度洋地幔不均一性的主要途径,但不均一性的物质组成可能有多种来源,它们在现今的 SWIR 岩浆活动中保留了何种印迹是深入探讨的方向。

目前,SWIR 主要和 Bouvet、Marion 和 Crozet 三个热点相邻,且离轴距离逐渐增加。虽然现今的 SWIR 洋脊形态非常复杂,但是结合其形成演化历史,可以得知在 SWIR 的中部,AB 和 DII 转换断层之间的洋脊段形成最早,是冈瓦纳裂解过程中的板块分离边界,而 AB 转换断层以西和 DII 转换断层以东的洋脊段都是 SWIR 快速扩展的结果,与冈瓦纳大陆裂解本身无关。因此,可以将 SWIR 大致划分为三个区段,分别探讨其地幔组成特征。由于我们更加关注大尺度的地幔属性,而非洋脊段或更小尺度的岩浆作用,这样的三段划分与传统的洋脊分段具有明显区别,更接近“构造省”的概念。此外,可以发现 Bouvet、Marion 和 Crozet 三个热点刚好分别落在三个区段内,它们在历史时期可能与相邻的 SWIR 洋脊段存在相互作用,因此对洋脊的影响也能够较好评估。

在 SWIR 西段(Bouvet 三联点至 ~26°E),洋中脊玄武岩的化学组成变化显著。Le Roex et al. (1983)根据主微量元素特征,曾将 BTJ 至 ~10°E 之间的玄武岩划分为三种类型:N-MORB 型、T-MORB 型和 P-MORB 型,其中 P-MORB 型即为受地幔柱(plume)影响之意,具有低 Zr/Nb 比值、高 Zr/Y 和 La/Yb 比值特征,与洋岛玄武岩组成相似,

推断源区地幔受到 Bouvet 热点的影响。随后, Le Roex et al. (1992) 对 12 ~ 15°E 区域的玄武岩研究发现主要类型为富  $K_2O$  (0.5 ~ 1.77wt%) 的碱性玄武岩, 这些碱性的玄武质岩浆不相容元素 Nb ( $24 \sim 60 \times 10^{-6}$ ) 和 Ba ( $170 \sim 470 \times 10^{-6}$ ) 高度富集, 具有“富集”的同位素信号, 推测与地幔源区低程度部分熔融有关, 且同样受到 Bouvet 热点的影响。总体来看, 相较于 SWIR 的中段和东段, 西段的玄武岩具有较高的  $^{206}Pb/^{204}Pb$  比值 (图 5),  $^{207}Pb/^{204}Pb$  和  $^{208}Pb/^{204}Pb$  亦是如此 (图 6)。其中部分岩浆 (主要是在 16°E 以西) 具有较低的  $^{143}Nd/^{144}Nd$  比值 ( $< 0.5130$ ) 和  $\epsilon_{Hf}$  值 ( $< 10$ ), 与 Bouvet 岛的岩浆组成接近。Janney et al. (2005) 曾研究指出 AB 转换断层 (26 ~ 32°E) 是 SWIR 的一个重要边界, SWIR 西段 ( $< 26^\circ E$ ) 的玄武岩具有和大西洋 - 太平洋域玄武岩相似的组成特征, 尤其是在 16 ~ 25°E 之间的超级垂向扩张脊段, 玄武岩同位素组成和大西洋最南端 ( $> 49^\circ S$ ) 的岩浆源区最为接近 (图 6), 因此可以将 SWIR 西段 ( $< 26^\circ E$ ) 的玄武岩归纳为大西洋 - 太平洋型玄武岩。在 16 ~ 25°E 之间, 玄武岩同位素组成表现出向西逐渐过渡的变化趋势, 尤其是 Pb 和 He 同位素组成较为明显 (图 5), 这种逐渐过渡的特征可以从 SWIR 的演化历史中找到答案。由于受西侧扩张脊的影响, SWIR 洋脊曾向西南方向快速延伸, 期间形成了 16 ~ 25°E 的超大扩张洋脊段 (可能在 83 Ma 之前), 洋脊的扩展使得该段洋脊部分继承了 SWIR 中段的地幔属性。如果将 16°E 看作西段的一个内部边界, 不难发现 16°E 以西的玄武岩普遍具有较高的 Sr 同位素组成, He 同位素组成也是 SWIR 变化最大的 (1.1 ~ 14.9 Ra)。其中 10°E 以西的玄武岩更加靠近 Bouvet 热点 (53°S, 3°E), 因此洋脊 - 热点相互作用更加显著, 玄武岩的高  $^3He/^4He$  比值是热点作用的最直接体现。而 10 ~ 16°E 之间的岩浆具有较低的  $^3He/^4He$  比值, Georgan et al. (2003) 推测是源区地幔中有再循环的洋壳或岩石圈地幔物质加入。注意到 10 ~ 16°E 洋脊段目前处于斜向扩张, 东侧与超级垂直扩张洋脊段相接, 西侧毗邻热点影响脊段, 区段内又有 Joseph Mayes 和 Narrowgate 两个海山发育, 洋脊的扩张几何形态对岩浆的形成格外显著 (Standish et al., 2008), 斜向扩张对地幔熔融的抑制作用和局部岩浆汇集可能更有利于小尺度不均一的岩浆出露。

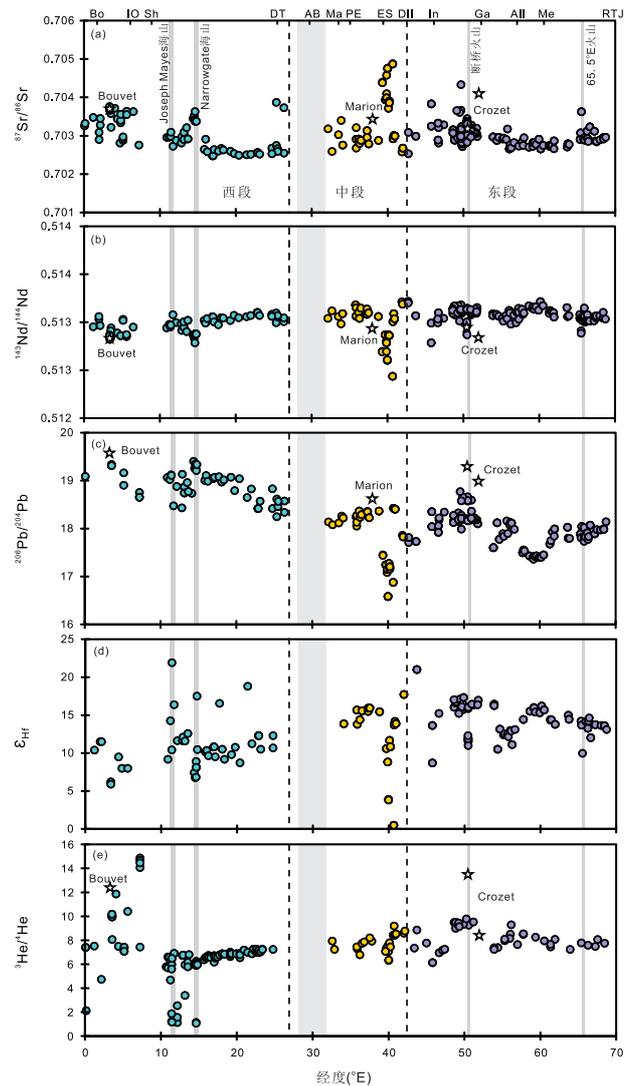


图 5 西南印度洋中脊玄武岩 Sr-Nd-Pb-Hf-He 同位素组成轴向分布变化图

玄武岩同位素数据主要来自 PetDB 数据库: <https://search.earthchem.org/>. 部分数据来自 Standish (2006) 和 Gautheron et al. (2015); Bouvet 岛, Marion 岛和 Crozet 热点的 East 岛、Penguins 岛数据数据来自 Le Roex et al. (1983, 2012)、Mahoney et al (1992) 和 Breton et al. (2013)

Fig. 5 The axial distribution of isotopic compositions of Sr, Nd, Pb, Hf and He

在 SWIR 中段 (AB 和 DII 转换断层之间), 玄武岩的主量元素组成基本落在西段范围内 (未展示), 但没有西段部分样品表现出的高  $P_2O_5$  和  $K_2O$  特征。Le Roex et al. (1989) 将该区域的玄武岩分为 N-MORB 和 E-MORB 两种类型, 他们发现 N-MORB 在靠近 Marion 热点附近的洋脊附近缺失, 而 E-MORB 在整个区域内零星分布, 在紧邻 Marion 热点的洋脊处则出露较多。因此不难推断, E-MORB 成

因与 Marion 热点存在某种联系。进一步研究发现, PE 和 ES 转换断层之间的玄武岩具有相对较低 Ba/Nb 值(5.1~9.0),代表了受 Marion 热点影响的岩浆类型,称之为“Marion 型”;另一种 E-MORB 具有更高的 Ba/Nb 比值(9~22),主要在 ES 和 DII 转换断层之间出露,称之为“DUPAL 型”。因此, SWIR 中段的源区地幔可能至少经历两次地幔富集事件,一次与 Marion 地幔柱有关,一次与 DUPAL 源区的物质参与有关。在同位素组成上, SWIR 中段的 Sr-Nd-Pb-Hf 变化最为显著,而 He 同位素变化相对较小,最大的同位素组成变化出现在 39~41°E 附近(图 5)。在 36~39°E,由于受到正南方 Marion 热点(38°E)的影响,源区地幔的同位素特征可以用 Marion 热点和正常的印度洋地幔源区相互作用解释;39~41°E 玄武岩则具有高<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(0.7026~0.7048)、低<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb(16.87~17.44)、<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd(0.5124~0.5131)和  $\epsilon_{\text{Hf}}$ (-4~+3)的特征(图 6),如此低的 Pb 同位素组成只在太古代克拉通地幔中有发现报道。因此,这种岩浆组成不同于 Marion (或其它印度洋中的)热点(图 6),前人研究推测与

大陆岩石圈地幔和地壳物质的混染有关(Mahoney et al., 1992; Meyzen et al., 2005; Janney et al., 2005)。由于 SWIR 中段保留了最老的扩张演化记录,它与冈瓦纳大陆的裂解最为紧密,将构造演化恢复到 90 Ma 左右,此时的 Marion 热点刚好位于 Madagascar 岛南侧之下逐渐开始对 SWIR 产生影响(图 7)。可以发现历史时期的印度洋洋盆周围主要被中—新元古代的造山带(如莫桑比克带)环绕,表明 SWIR 形成初期主要与中—新元古代的造山带接壤。与稳定克拉通相比(密度较低),较重的造山带岩石圈更易于在大陆裂解时发生拆沉进入软流圈中。如果追溯到更早时期,随着莫桑比克洋的消亡闭合,在冈瓦纳大陆聚合时俯冲作用会使得这些造山带岩石圈发生强烈改造,带内的高级变质岩与变质火成岩发生混合,俯冲过程也可能将板片中释放的流体和沉积物组分加入到造山带岩石圈地幔中。正是这些俯冲改造的造山带岩石圈地幔导致了 SWIR 中段地幔源区的高度不均一性。综上所述, SWIR 中段玄武岩源区的既有 Marion 热点的物质加入,也有低<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 的 DUPAL 富集组分贡献。注

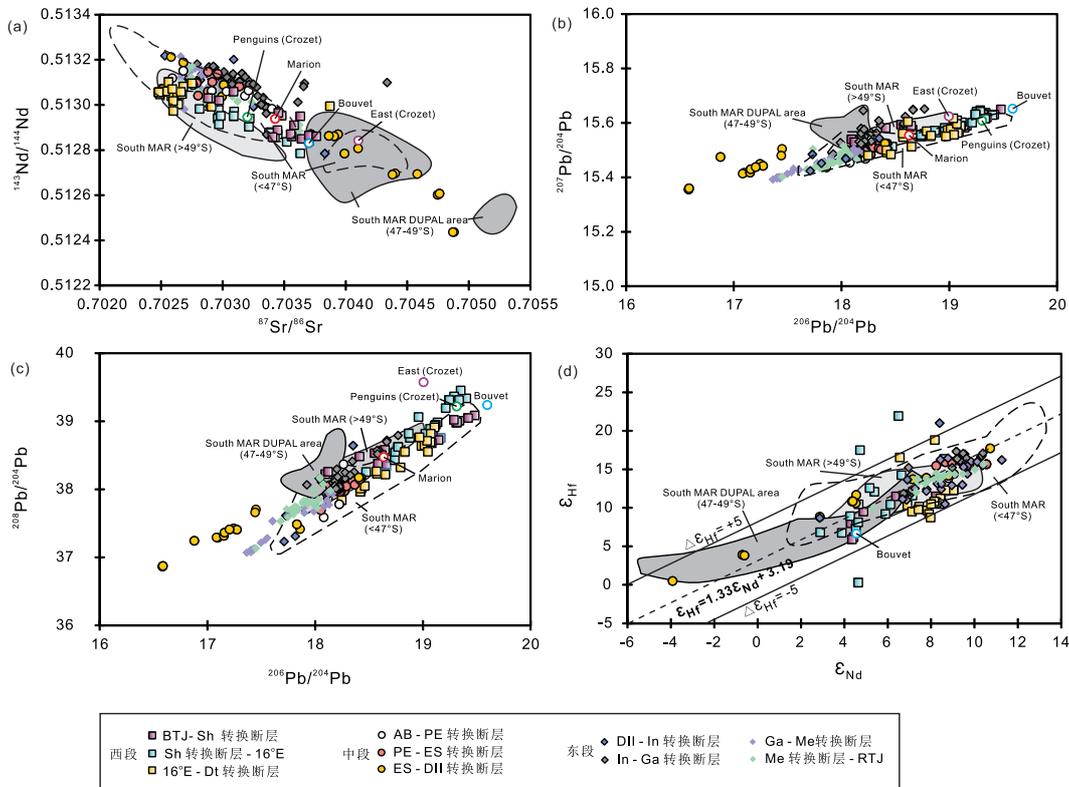


图 6 西南印度洋中脊玄武岩 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成特征

数据主要来自 PetDB 数据库: <https://search.earthchem.org/>.

Fig. 6 Isotopic compositions of Sr, Nd, Pb and Hf of the mid-oceanic ridge basalts in the Southwest Indian Ocean

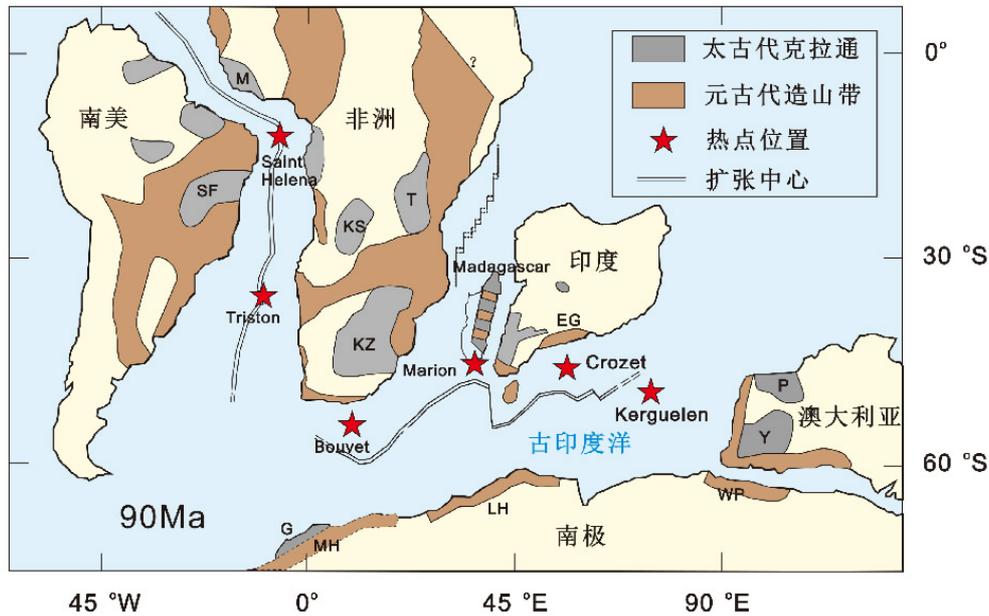


图7 90 Ma 时冈瓦纳大陆古板块恢复及太古代、中新元古代造山带和地幔热点位置分布(根据 Janney et al., 2005 底图修改)部分构造单元缩写如下:EG—Eastern Hhats 省;G—Grunchogna 克拉通;KS—Kasai 克拉通;KZ—Kaaopvaal-Zimbabwe 克拉通;LH—Lutzow-Holm Bay 省;M—Man 克拉通;MH—Maudheim 省;P—Pilbara 克拉通;SF—Sao Francisco 克拉通;T—Tanzanian 克拉通;WP—Wilkes 省;Y—Yilgarn 克拉通

Fig. 7 Schematic illustration of Gondwana Mainland at 90 Ma and the distribution of hotspots of the mantle and orogenic belts during the in Archeozoic, Mesoproterozoic, and Neoproterozoic (modified from Janney et al., 2005)

意到在大西洋南端47~49°E 同样有 DUPAL 异常的岩浆出露,但是 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值远低于 SWIR (图6),因此 DUPAL 异常在 SWIR 更加显著。

在 SWIR 东段(42°E ~ RTJ),玄武岩的同位素组成总体变化没有 SWIR 中段显著,但是却存在多处异常,其中 In 和 Ga 转换断层之间的最为明显(图5)。Nd-Hf 同位素在 46°E, 50.5°E 和 65.5°E 附近均有低值,对应较高的 Sr 同位素组成,但是 50.5°E 的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  却明显高于另外两处,在整个 SWIR 东段中具有最高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值(9.8),部分学者研究认为这是受到 Crozet 热点的影响(Breton et al., 2013; Yang et al., 2017),但是, Yu and Dick (2020) 认为 Crozet 热点的影响较难实现,而且很难解释为何 Crozet 热点只在 50.5°E 附近存在影响。是否有可能遥远的 Crozet 热点提供了热场效应,温度的异常扰动导致了该区域局部不均一的富集地幔的熔融? 这些猜想显然需要更多的研究去证实。在 Indomed 转换断层(~46°E)附近,研究发现有 E-MORB 的出露,总体具低 Ba/Nb 比值的特征,但 Nd 同位素组成明显低于其它热点,虽然从同位素和微量元素来看与“DUPAL 型”E-MORB 有所不同(图6),但是可以看作具有似“DUPAL”特征的玄武岩。

由于它与 SWIR 中段更近,在 SWIR 向东快速扩展的过程中可能继承更多的地幔不均一性。此外, Hf 同位素组成在 54~56°E 存在低异常(图5),与 50.5°E 相似,对应较高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值,但是两者的 Sr-Nd-Pb 同位素组成又存在显著区别,因此成因尚不明确。在 Me 转换断层附近,玄武岩具有明显的亏损同位素特征(图5),是 SWIR 东段的一个重要化学边界(Meyzen et al., 2003, 2005)。Meyzen et al. (2003) 认为 Me 转换断层以东的玄武岩源区受到了富集组分的交代,由于 Me 到 RTJ 之间的洋脊段形成较晚(洋壳年龄<20 Ma),又与 SEIR 和 CIR 两支洋脊交汇于 RTJ,因此该区域的玄武岩同位素组成与这两支洋脊具有亲缘性,很有可能受到了这两个相邻洋脊的地幔物质混染。

## 7 结论

(1) 西南印度洋中脊(SWIR)为全球典型的超慢速扩张洋脊,洋脊地形复杂,洋底构造地貌特征丰富,是印度洋洋盆长期构造演化的产物。SWIR 起源于冈瓦纳大陆的裂解,形成于 155 Ma 左右,是印度洋洋盆最早打开的场所,历经多次洋脊跃迁和快速扩展,对整个印度洋洋盆的演化具有重要调节

作用。

(2) SWIR 洋盆中发育多个地幔热点,是印度洋洋盆打开的关键因素,也对后续的洋脊扩张和洋盆演化影响深远。根据构造演化历史,SWIR 可大致划分为三个区段:西段为 Bouvet 三联点至 Andrew Bain 转换断层( ~26°E);中段为 Andrew Bain 转换断层至 Discovery II 转换断层( ~42°E);东段为 Discovery II 转换断层至 Rodriguez 三联点。Bouvet 和 Marion 热点与洋脊均有明显的相互作用,在 SWIR 西段、中段分别留下了热点的化学印迹,是形成 SWIR 地幔不均一性的重要因素之一。Crozet 热点对 SWIR 的影响可能较小。

(3) 在 SWIR 西段,除 Bouvet 热点影响外,玄武岩具有和大西洋-太平洋型玄武岩的相似特征,尤其在 16~25°E 区域最为显著。在 SWIR 东段,尤其在 Indomed 和 Gallieni 转换断层之间,存在多处同位素异常特征,推测地幔源区仍有大陆地壳物质的污染。而在 Melville 转换断层以东,地幔交代作用较为明显,岩浆组成和 SEIR 和 CIR 具有亲缘性。

(4) 地幔的不均一性在 SWIR 中段尤为显著,39~41°E 附近的 DUPAL 异常特征揭示了 SWIR 复杂的构造演化过程,与冈瓦纳大陆形成和裂解紧密相关。其成因可归结如下:在冈瓦纳大陆拼合过程中,随着莫桑比克海的逐渐消亡,中一新元古代的造山带岩石圈地幔受到俯冲改造,随后在冈瓦纳大陆裂解过程中发生拆沉,进入到印度洋软流圈地幔,最终导致了 SWIR 岩浆 DUPAL 异常的形成。

## 参考文献 (References):

- Acharya S K, 2000. Break up of Australia-India- Madagascar block, opening of the Indian Ocean and continental accretion in Southeast Asia with special reference to the characteristics of the peri-Indian collision zones[J]. *Gondwana Research*, 3(4): 425-443.
- 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 [J]. *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 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 100(B4): 6199-6211.
- Breton T, Nauret F, Pichat S, et al., 2013. Geochemical heterogeneities within the Crozet hotspot [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 376: 126-136.
- Buiter S J H, Torsvik T H, 2014. A review of Wilson cycle plate margins; a role for mantle plumes in continental break-up along sutures? [J]. *Gondwana Research*, 26(2): 627-653.
- Cannat M, Rommevaux-Jestin C, Fujimoto H, 2003. Melt supply variations to a magma-poor ultra-slow spreading ridge (Southwest Indian Ridge 61° to 69° E) [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(8): 9104, doi: 10.1029/2002GC000480.
- 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) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 104 (B10): 22825-22843.
- 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 [J]. *Gondwana Research*, 23(1): 238-267.
- Cheng H, Zhou H Y, Yang Q H, et al., 2016. Jurassic zircons from the Southwest Indian Ridge [J]. *Scientific Reports*, 6: 26260, doi: 10.1038/srep26260.
- Chu D Z, Gordon R G, 1999. Evidence for motion between Nubia and Somalia along the Southwest Indian Ridge [J]. *Nature*, 398(6722): 64-67.
- Coffin M F, Pringle M S, Duncan R A, et al., 2002. Kerguelen hotspot magma output since 130 Ma [J]. *Journal of Petrology*, 43(7): 1121-1137.
- Collier J S, Minshull T A, Hammond J O S, et al., 2009. Factors influencing magmatism during continental breakup: new insights from a wide-angle seismic experiment across the conjugate Seychelles-Indian margins [J]. *Journal of Geophysical Research*, 114(B3): B03101, doi: 10.1029/2008JB005898.
- Day J M D, Walker R J, Warren J M, 2017. <sup>186</sup>Os-<sup>187</sup>Os and highly siderophile element abundance systematics of the mantle revealed by abyssal peridotites and Os-rich alloys [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 200: 232-254.
- DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al., 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions [J]. *Geophysical Research Letter*, 21(20): 2191-2194.
- Dick H J B, Lin J, Schouten H, 2003. An ultraslow-spreading class of ocean ridge [J]. *Nature* 426(6965): 405-412.
- 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 [J]. *Chemical Geology*, 417: 163-172.
- Georgen J E, Kurz M D, Dick H J B, et al., 2003. Low <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratios in basalt glasses from the western Southwest Indian Ridge (10°-24° E) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 206(3-4): 509-528.
- 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 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 187(3-4): 283-300.
- Gregoire M, Mattielli N, Nicollet C, et al., 1994. Oceanic mafic

- granulite xenoliths from the Kerguelen archipelago[J]. *Nature*, 367(6461): 360–363.
- Ingle S, Weis D, Frey F A, 2002. Indian continental crust recovered from Elan Bank, Kerguelen plateau (ODP Leg 183, site 1137) [J]. *Journal of Petrology*, 43(7): 1241–1257.
- Jamieson J W, Clague D A, Hannington M D, 2014. Hydrothermal sulfide accumulation along the Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 395: 136–148.
- 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) [J]. *Journal of Petrology*, 46(12): 2427–2464.
- Jokat W, Boebel T, König M, et al., 2003. Timing and geometry of early Gondwana breakup[J]. *Journal of Geophysical Research*, 108(B9): 2428, doi: 10.1029/2002JB001802.
- Kempton P D, Pearce J A, Barry T L, et al., 2002. Sr-Nd-Pb-Hf isotope results from ODP Leg 187: evidence for mantle dynamics of the Australian-Antarctic Discordance and origin of the Indian MORB source[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(12): 1–35, doi: 10.1029/2002GC000320.
- Kröner A, 1993. The PanAfrican belt of northeastern and eastern Africa, Madagascar, southern India, Sri Lanka and East Antarctica; terrane amalgamation during formation of the Gondwana supercontinent [M]//Thorweihe U, Schandlmeier H. *Geoscientific Research in Northeast Africa*. Rotterdam: CRC Press. 3–9.
- 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 [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 223–224: 11–28.
- Le Roex A P, Dick H J B, Erlank A J, et al., 1983. Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along the Southwest Indian Ridge between the Bouvet triple junction and 11 degrees east [J]. *Journal of Petrology*, 24(3): 267–318.
- Le Roex A P, Dick H J B, Fisher R L, 1989. Petrology and geochemistry of MORB from 25° E to 46° E along the Southwest Indian Ridge; evidence for contrasting styles of mantle enrichment [J]. *Journal of Petrology*, 30(4): 947–986.
- Le Roex A P, Dick H J B, Watkins R T, 1992. Petrogenesis of anomalous K-enriched MORB from the Southwest Indian Ridge; 11° 53'E to 14° 38'E [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(2–3): 253–268.
- 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 [J]. *Geophysical Research Letters*, 42(8): 2656–2663.
- Li W, Liu C Z, Tao C H, et al., 2019. 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*, 346–347: 105167.
- Li W, Soustelle V, Jin Z M, et al., 2017. Origins of water content variations in the suboceanic upper mantle: Insight from Southwest Indian Ridge abyssal peridotites [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(3): 1298–1329.
- Livermore R A, Hunter R J, 1996. Mesozoic seafloor spreading in the southern Weddell Sea [M]//Storey B C, King E C, Livermore R A. *Weddell Sea Tectonics and Gondwana Break-up*. Geological Society, London, Special Publications. 227–241.
- Macdonald K C, 2001. Mid-ocean ridge tectonics, volcanism, and geomorphology [M]//Steele J H. *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2nd ed. San Diego: Academic Press. 852–866.
- Mahoney J, Le Roex A P, Peng Z, et al., 1992. Southwestern limits of Indian Ocean Ridge mantle and the origin of low<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb mid-ocean ridge basalt; isotope systematics of the central Southwest Indian Ridge (17°-50°E) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 97(B13): 19771–19790.
- 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 [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(11): Q11k11, doi: 10.1029/2005GC000979.
- Meyzen C M, Toplis M J, Humler E, et al., 2003. A discontinuity in mantle composition beneath the Southwest Indian Ridge [J]. *Nature*, 421(6924): 731–733.
- Minshull T A, Lane C I, Collier J S, et al., 2008. The relationship between rifting and magmatism in the northeastern Arabian Sea [J]. *Nature Geoscience*, 1(7): 463–467.
- 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 [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(2): 468–485.
- O'Neill C, Müller D, Steinberger B, 2003. Geodynamic implications of moving Indian Ocean hotspots [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 215(1–2): 151–168.
- Patriat P, Segoufin J, 1988. Reconstruction of the central Indian Ocean [J]. *Tectonophysics*, 155(1–4): 211–234.
- Pushcharovsky Y M, 2007. Tectonic types of deepwater basins in the Indian Ocean [J]. *Geotectonics*, 41(5): 355–367.
- Pushcharovsky Y M, 2008. Tectonic types of oceanic abyssal basins and related potentially economic fields of ferromanganese nodules [J]. *Geotectonics*, 42(4): 245–257.
- Pushcharovsky Y M, 2014. Fragments of continental structures in the Indian Ocean [J]. *Geotectonics*, 48(1): 1–4.
- Ramana M V, Ramprasad T, Desa M, 2001. Seafloor spreading magnetic anomalies in the Enderby Basin, East Antarctica [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 191(3–4): 241–255.
- 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 [J]. *Marine Geophysical Researches*, 19(6): 481–503.
- Royer J Y, Gordon R G, Horner-Johnson B C, 2006. Motion of Nubia

- relative to Antarctica since 11 Ma; implications for Nubia-Somalia, Pacific-North America, and India-Eurasia motion [J]. *Geology*, 34 (6): 501–504.
- Sauter D, Cannat M, 2010. 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: American Geophysical Union. 153–173.
- Slater 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 [J]. *Geophysical Journal International*, 64(3): 587–604.
- Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al., 2012. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma [J]. *Earth-Science Reviews*, 113(3–4): 212–270.
- Stagg H M J, Colwel J B, Direen N G, et al., 2004. Geology of the continental margin of Enderby and Mac. Robertson Lands, East Antarctica; insights from a regional data set [J]. *Marine Geophysical Researches*, 25(3–4): 183–219.
- Standish J J, 2006. The influence of ridge geometry at the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge (9°–25°E): basalt composition sensitivity to variations in source and process [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- 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 [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(5): Q05004, doi: 10.1029/2008GC001959.
- Storey M, Mahoney J J, Saunders A D, et al., 1995. Timing of hot spot—related volcanism and the breakup of Madagascar and India [J]. *Science*, 267(5199): 852–855.
- Tao C H, Seyfried Jr W E, Lowell R P, et al., 2020. Deep high-temperature hydrothermal circulation in a detachment faulting system on the ultra-slow spreading ridge [J]. *Nature Communications*, 11(1): 1300, doi: 10.1038/s41467-020-15062-w.
- Tao C, Lin J, Guo S, et al., 2012. First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge [J]. *Geology*, 40(1): 47–50.
- Torsvik T H, Cocks L R M, 2013. Gondwana from top to base in space and time [J]. *Gondwana Research*, 24(3–4): 999–1030.
- Weis D, Ingle S, Damasceno D, et al., 2001. Origin of continental components in Indian Ocean basalts; Evidence from Elan Bank (Kerguelen Plateau, ODP Leg 183, Site 1137) [J]. *Geology*, 29(2): 147–150.
- Whittaker J M, Williams S E, Müller R D, 2013. Revised tectonic evolution of the Eastern Indian Ocean [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(6): 1891–1909.
- 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 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 121(1): 191–213, doi: 10.1002/2016JB013284.
- Yoshikawa S, Okino K, Asada M, 2012. Geomorphological variations at hydrothermal sites in the southern Mariana Trough; relationship between hydrothermal activity and topographic characteristics [J]. *Marine Geology*, 303–306: 172–182.
- Yu X, Dick H J B, 2020. Plate-driven micro-hotspots and the evolution of the Dragon Flag melting anomaly, Southwest Indian Ridge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 531: 116002, doi: 10.1016/j.epsl.2019.116002.
- 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) [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(10): 4544–4563, doi: 10.1002/ggge.20264.
- Zhou H Y, Dick H J B, 2013. Thin crust as evidence for depleted mantle supporting the Marion Rise [J]. *Nature*, 494(7436): 195–200.
- 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 [J]. *海洋学报*, 37(7): 1–14.
- 李江海, 张华添, 李洪林, 等, 2016. 热点作用背景下的洋中脊跃迁和扩展作用: 印度洋盆地张开过程探讨 [J]. *高校地质学报*, 22(1): 74–80.
- 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等, 2015b. 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 [J]. *大地构造与成矿学*, 39(1): 30–43.
- 李三忠, 索艳慧, 余珊, 等, 2015a. 西南印度洋构造地貌与构造过程 [J]. *大地构造与成矿学*, 39(1): 15–29.
- 李献华, 2021. 超大陆裂解的主要驱动力——地幔柱或深俯冲? [J]. *地质学报*, 95(1): 20–31, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020267.
- 余星, 韩喜球, 唐立梅, 等, 2019. 东南印度洋中脊地质构造特征及研究进展 [J]. *科学通报*, 64(17): 1799–1816.
- 张涛, 林间, 高金耀, 2011. 90 Ma 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*, 41(6): 760–772.

## Evolution of the Southwest Indian Ocean and its relative geochemical evidences from magmatism

LI Wei<sup>1</sup>, JIN Zhenmin<sup>2</sup>, TAO Chunhui<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, Zhejiang, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geoscience (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 3. School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The Southwest Indian Ridge (SWIR) is an important component of global mid-oceanic ridge system, and it has been a focus for geo-scientists of the world because of its very slow average spreading rate about 14 mm/y. In this paper, we systematically reviewed, from tectonic and magmatic points of view, the formation and evolution history of SWIR and the distribution of magmatic rocks and the origin of mantle heterogeneity. The formation of SWIR began with the break-up of Gondwana and the middle part of SWIR (26°E to 42°E) was formed in the earliest stages. The present-day tectonic patterns of SWIR (e. g., multi-order ridge segments and oblique spreading) are the results of multi-stage ridge jumps and extensions. The mantle hotspots play a key role in the break-up of Gondwana and have a significant impact on geomorphology and magmatism of SWIR. Both the Bouvet and Marion hotspots have left their geochemical traces in the magmatic rocks in the western and central portions of SWIR. In addition, the basalts from the western part of SWIR show isotopic affinities with the Atlantic-Pacific-type basalts. In the middle part of SWIR (39°E to 41°E), the basalts display significant DUPAL anomalies, which are closely related to the initial formation and break-up of Gondwana. The delamination of subduction-modified lithospheric mantle in the Mesoproterozoic to Neoproterozoic orogenic belts led to the mantle source heterogeneity in the middle part of SWIR. In the east part of SWIR (about 46°E to 52°E), the chemical anomalies are probably caused by the contamination of continental crust. To the east of the Melville transform fault, the ridge was formed in the latest stages, and the mantle source of basalts experienced metasomatism due to enriched mantle components, showing isotopic affinities with the mantle source of the adjacent Central Indian Ridge (CIR) and Southeast Indian Ridge (SEIR).

**Key words:** Southwest Indian Ocean; ocean basin evolution; mid-ocean ridge basalt; geochemistry; ridge-hotspot interaction; mantle heterogeneity

### 《沉积与特提斯地质》录用论文网络首发公告

为了保护作者科研成果的首发权,提高论文传播效率,保证读者及时获取科研情报。《沉积与特提斯地质》已与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签署协议,经我刊审定录用的稿件,可在年、卷、期和页码暂不确定的情况下通过《中国学术期刊(网络版)》(CAJ-N)出版平台进行网络首发,确定刊期后,经过编辑、校对、排版、印刷等环节出版纸质期刊。

根据国家有关网络连续型出版物管理规定,网络首发论文视为正式出版论文,《沉积与特提斯地质》编辑部与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社共同为论文作者颁发论文网络首发证书。论文作者可以从中国知网论文检索界面下载、打印论文的网络首发证书,作为正式发表的论文提交至单位的人事、科研及管理等部门。

每篇网络首发论文将被赋予一个唯一的国际 DOI 编码,在版本变动中 DOI 维持不变。学者可以在第一时间检索、下载并引用论文,读者可以扫描信息页中的专有二维码,获取网络首发论文的电子版和引文格式。

特别需要注意的是,录用定稿的论文在网络首发之后,不得修改论文题目、作者署名、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字修改。