

马达加斯加海台地质属性及其构造-岩浆演化过程

许延成² 唐勇^{1, 3, 4*} 郭楚枫^{1, 3} 董崇志¹ 王征¹ 吴招才¹ 任建业²

1. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江杭州 310012

2. 中国地质大学海洋学院, 湖北武汉 430074

3. 上海交通大学海洋学院, 上海 200030

4. 浙江大学海洋学院, 浙江舟山 316021

摘要: 马达加斯加海台 (MADP) 作为冈瓦纳大陆分离裂解的产物, 具有独特的地形、地球物理特征。通过对穿过 MADP 区域深反射地震剖面 A-A' 的解释和分析, 结合重、磁异常数据, 深入研究了 MADP 的地质属性、地壳结构和沉积地层格架, 阐明了马达加斯加南部陆缘岩石圈伸展破裂的构造演化过程。通过重、震资料分析, 将 MADP 分为北部薄化陆壳、洋陆转换带 (OCT) 和南部增厚的洋壳。马达加斯加南部陆缘在 133Ma 经历了裂谷作用后, 在 120Ma 岩石圈伸展破裂并形成岩浆型被动陆缘, 后续在 Marion 热点作用下 (90-50 Ma), 陆壳与洋壳在岩浆作用下进一步增厚, 最终形成了现在的 MADP。本研究进一步深化了 MADP 发育演化过程的认识, 对于西南印度洋海底高地地形属性的确定具有重要的实际应用价值。

关键词: 马达加斯加海台, 海底高原, 洋脊, 原洋洋壳, Marion 热点

中图分类号: P736

收稿日期: 2025-01-15

Analysis of the Geological Characteristics and Tectono-Magmatic Evolution Processes of the Madagascar Plateau

Xu Yancheng², Tang Yong^{1,3,4*}, Guo Chufeng^{1,3}, Dong Chongzhi¹, Wang Zheng¹, Wu Zhaocai¹, Ren Jianye²

1. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

2. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201620, China

4. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China

Abstract: The Madagascar Plateau (MADP), as a product of the separation of the Gondwana continent, exhibits unique topographic and geophysical characteristics. Through the interpretation and analysis of deep reflection seismic section A-A' across the MADP region, combined with gravity and magnetic anomaly data, the geological properties, crustal structure and sedimentary stratigraphic framework of the MADP are deeply studied, and the tectonic evolution process of lithosphere extension and rupture in the southern continental margin of Madagascar is clarified.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC2808803、2023YFE0126100); 浙江省“高层次人才特殊支持计划”科技创新领军人才项目(2021R52058).

作者简介: 许延成(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事大陆边缘构造演化方面的研究.

ORCID: 0009-0006-9895-1825, E-mail: 2202110442@cug.edu.cn, Tel: 15827433460

*通讯作者: 唐勇(1974—), 男, 研究员, 主要从事海底动力演化与大陆架划界等方面的研究. ORCID: 0000-0003-0896-4771, E-mail: tangyong@sio.org.cn, Tel: 0571-81963137

Based on gravity and seismic data analysis, the MADP can be subdivided into the thinned continental crust in the north, the oceanic-continental transition zone (OCT) in the mid, and the thickened oceanic crust in the south. After undergoing rifting at 133 Ma, the southern continental margin of Madagascar experienced extension and rupture at 120 Ma, leading to the formation of a magmatic passive continental margin. Subsequently, influenced by the Marion hotspot (90–50 Ma), the continental and oceanic crust underwent further thickening due to magmatic activity, ultimately resulting in the present-day Madagascar Passive Margin (MADP). This research enhances our understanding of the development and evolution of MADP and has significant practical implications for determining seafloor high terrain attributes in the southwest Indian Ocean.

Key words: Madagascar Plateau; Submarine Elevation; Mid-ocean ridge; Proto-oceanic crust; Marion hotspot.

0. 引言

马达加斯加岛作为冈瓦纳大陆裂解的产物,其被动陆缘记录了丰富的板块构造运动及其与地幔柱相互作用信息,尤其是南部陆缘,是马达加斯加岛与西南印度洋中脊(SWIR)的过渡区域,其地质属性和形成机制始终是人们研究的热点。一般认为,马达加斯加南部陆缘的形成演化始于早白垩世(~133Ma)非洲-马达加斯与南极洲板块间的分离,经历了复杂的构造-岩浆作用,并最终形成了如今的马达加斯加海台(MADP)(Reeves, 2014; Tuck-Martin et al., 2018; 张涛等, 2011)。然而对于 MADP 的地质属性归类目前仍存在争议,根据地震折射资料,Recq 等(Recq and Goslin, 1981)将 MADP 分为南、北两个部分(以 31°S 为界),并推测南部地壳具有洋壳属性。Goslin 等(Goslin et al., 1980)根据水深资料、地震反射资料、地震折射资料以及磁异常资料指出 MADP 南、北两部分的地壳结构与基底地形存在较大差异,但均具有洋壳属性,不能将其简单的归因于马达加斯加陆地的南向延伸,或可能为白垩纪时期热点作用的产物。Coffin 等(Coffin and Eldholm, 1994)根据 ODP 第 25 航次 246、247 站点的钻孔资料将 MADP 南部划为陆壳,但是这些钻孔并未钻透沉积物。后续的研究则指出, MADP 向南延伸至扩张中脊的脊状隆起可能为 Marion 热点的活动轨迹(Georgen et al., 2001)。通过放射性同位素定年和板块构造重建模拟,发现 Marion 热点作用时间为~90-88Ma,开始发生于马达加斯加岛南部区域,并最终导致了马达加斯加与印度板块的分离(图 1a)(Reeves, 2014; Reeves and de Wit, 2000; Storey et al., 1995; 张涛等, 2011)。此后,随着洋脊扩张的进行,马达加斯加开始北向漂移,其南部陆缘逐渐漂移过 Marion 热点,直到约 50 Ma 时 Marion 热点跨过 SWIR(余星等, 2020; 张涛等, 2011)。因此,许多学者提出 MADP 可能是 Marion 热点作用的产物,是热点经过转换断层作用的结果(Douglass et al., 1995)。

2021 年“中国-马达加斯加国际合作调查航次”项目在马达加斯加海台及其周缘开展综合地球物理调查时,沿 MADP 长轴方向新采集了一条近 SN 向的区域长电缆 2D 地震剖面 A-A'(图 1),该剖面沿 MADP 的西部穿过,长度 640km,采用的多道地震电缆长度为 6 km,共 480 道,气枪总体积约为 4280 cu.in,道间距为 12.5 m,炮间距为 50 m,采样率 2 ms,记录长度为 14s。本文在 MADP 区域重磁异常、地形地貌研究的基础上,对 A-A'剖面进行了详细的地震界面、地层、特殊地质体和构造样式解释,划分了 MADP 地壳结构单元,结合区域板块构造和地幔柱活动历史讨论了马达加斯加海台的发育演化过程及其与马达加斯加岛地壳的关系,进而明确了 MADP 的地质属性和成因。本文的成果不仅有助于深化西南印度洋热点与洋脊相互作用的认识,而且,有助于为西南印度洋区域关于洋脊的地质属性在大陆架划界中的作用提供重要的参考价值。

1. 区域地形和地球物理概况

马达加斯加岛地处西印度洋，位于非洲大陆东南部，南端与 SWIR 相接，北端与索马里海盆相邻，西侧为莫桑比克海盆，东侧紧邻马斯克林海盆，是印度洋上的最大岛屿，面积约为 62.7 万平方千米，也是连接东、西冈瓦纳大陆的重要枢纽（图 1a）（Cande and Patriat, 2014; Coffin and Rabinowitz, 1992; 李江海等, 2015; 李三忠等, 2015）。随着冈瓦纳大陆的裂解分离，马达加斯加岛逐渐漂移到现今的位置 (Reeves, 2017; Reeves, 2014; Reeves and de Wit, 2000; Sinha et al., 2019)。

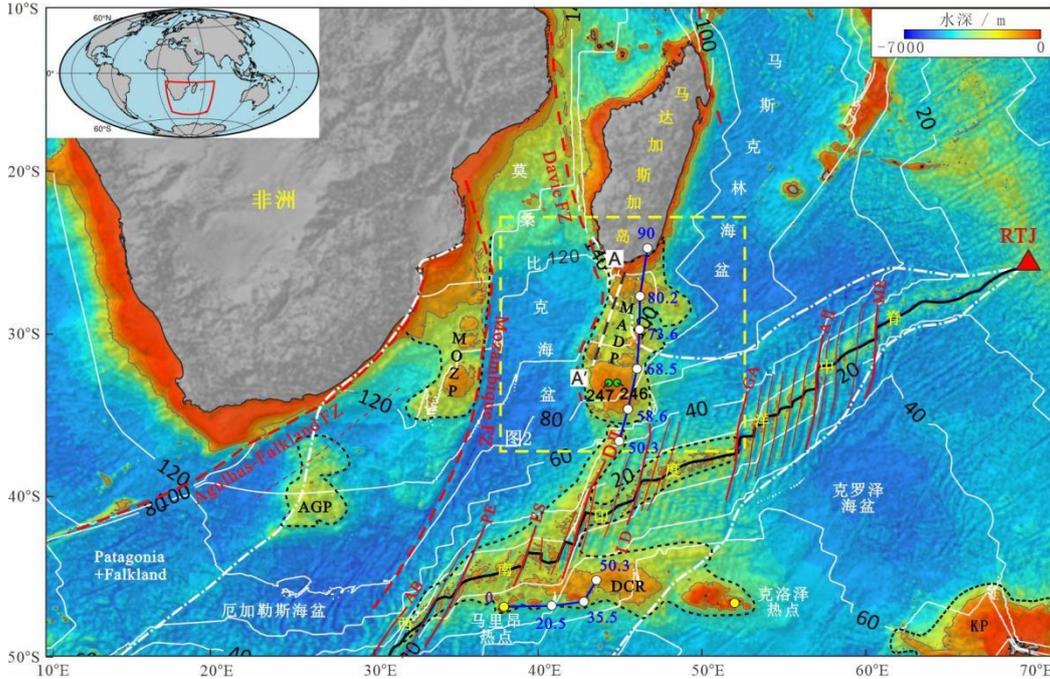


图 1 马达加斯加海台位置及周边地形特征

西南印度洋中脊水深分布图，沿洋脊中央裂谷的黑线为扩张中心。间隔 20Ma 的地壳年龄用白色线表示，并用黑色数字标注（洋壳年龄参考 Earth Byte），白色点划线包围区域为根据磁异常数据和地震反射数据推测的 SWIR 作用域（余星等，2020），黑色虚线包围区域为海底高原，白色实心圆代表不同年龄的 Marion 热点位置，热点轨迹及年龄参考张涛等（2011），绿色点为 DSDP246、247 钻井位置 (Schlich et al., 1974)。MADP—马达加斯加海台，MOZP—莫桑比克海底高原，AGP—厄加勒斯海底高原，DCR—德尔卡诺隆起，KP—凯尔盖朗海底高原，CR—康拉德隆起，BTJ—布维三联点，RTJ—罗德里格斯三联点。

Fig.1 The location and surrounding topography of Madagascar plateau

The bathymetry of SWIR. The thick black line along the ridge valley is the spreading center. The ages of the crust at intervals of 20Ma are shown as thin white lines and marked with black numbers (refer to Earth Byte for oceanic crust ages). The area enclosed by the white dash-dotted curves is the regime of SWIR (Yu et al., 2020). The area enclosed by the black dashed lines is the seafloor plateau. Solid white circles represent Marion hotspot locations of different ages (Zhang et al., 2011). The green spots are DSDP 246 and 247 drilling locations (Schlich et al., 1974). MADP—Madagascar Plateau, MOZP—Mozambique Plateau, AGP—Agulhas Plateau, DCR—Del Cano Rise, KP—Kerguelen Plateau, CR—Conrad Rise, BTJ—Bouvet Triple Junction, RTJ—Rodrigues Triple Junction.

1.1 区域地形地貌特征

西南印度洋整体处于非洲超级地幔柱之上，发育有克洛泽（Crozet）、凯尔盖朗（Kerguelen）和马里昂（Marion）等若干个热点。这些热点均位于相对稳定的南极洲板块之下，在板块上的运动轨迹叠加在相同区域，形成了许多海底高原 (Meyzen et al.,

2016)。在 SWIR 附近主要有北侧的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) 和南侧的康拉德海隆 (CR)，中段的德尔卡诺隆起 (DCR) (图 1)。SWIR 分布于布维三联点 (BTJ) 至罗德里格斯三联点 (RTJ) 之间, 全长约 7700 km (Bernard et al., 2005; 刘持恒等, 2018)。离轴 200km 范围内的水深范围为 6922-780 m, 其中主体水深在 5000-2000 m 之间, 布维岛海拔最高, 高于海平面约 780 m, 离轴距离约 70 km。深大断裂处水深最大, 如安德鲁-贝恩断裂带 (AB) 和梅尔维尔断裂带 (ME), 水深可达 6800 m (余星等, 2020)。

MADP 位于 SWIR 北侧, 从马达加斯加岛南端向南延伸 1300km, 区域范围位于 26° S 至 36° S 之间, 平均宽度为 400km, 最大宽度可达 750km, 是西南印度洋中的海底高原之一。海台的大部分区域水深在 1000 至 2500m 之间, 最浅部分位于海台的西南部, 深度约为 20m。MADP 将两个水深超过 5000m 的海盆隔开: 马斯克林海盆位于海台以东, 莫桑比克海盆位于海台以西, 南部则与 SWIR 相连。MADP 根据地形特征可分为两个区域。海台南部区域位于 32° S 和 35° S 之间, 深度小于 2000m, 地形较为平坦, 最浅处位于 33° 10' S, 43° 55' E 附近, 深度小于 20 m。海台北部区域, 位于 31° S 和马达加斯加大陆架之间, 海底地形较为复杂, 一系列深度小于 500m 的海山林立于此, 形成了复杂的隆凹格局, 平均深度为 2000 m 左右。海台南、北区域之间为一个深约 2500-3000 m 呈北西走向的海底低谷所分隔开来。MADP 的西翼与莫桑比克海盆相连, 地势陡峭, 在 50km 的宽度内深度从 2000m 陡降到 4000m。与马斯克林海盆相连的东翼则较为平缓, 在 160 km 的宽度内深度从 2000 m 降到了 4000 m (余星等, 2020; 张涛等, 2011)。

1.2 数据来源

本文中的长电缆多道地震数据采集使用的气枪总容量为 4280cu.in., 气枪压力为 2000PSI, 枪沉放深度 7m, 电缆深度为 15m, 电缆长度达到 6000m, 最小偏移距 125m。采集数据浅层有效频率达到 60HZ 以上, 受强屏蔽层影响, 中深层成像依赖 5-20HZ 的低频成分。经过复杂多次波压制、中深层弱信号恢复和速度建模三个步骤后, 最终得到长电缆多道地震剖面。

自由空间重力异常数据来源于全球卫星重力异常数据库 (Sandwell et al., 2014), 数据精度 (分辨率) 1 弧分 (约 1.8 公里), 局部地区精度能够达到 1.0mGal, 总精度为 3.03mGal。布格重力异常则通过自由空间重力异常数据进行完全布格校正消除水层和周围地形的影响后得到。

磁力异常数据来源于全球地壳磁场模型 EMAG2-V3, 是根据卫星, 船舶和机载磁测量结果编译而成的 (Meyer et al., 2017)。由于数据来源不同, 磁数据统一向上延拓到平均海平面之上 4km。数据间隔 2 弧分 (约 3.7 公里)。

地壳厚度数据来源于地震资料约束的地壳厚度反演结果 (Yang et al., 2024)。首先进行莫霍面深度反演, 基于重力异常、水深、沉积物厚度、洋壳年龄、横波波速模型数据, 我们收集了反演区域的数条 OBS 剖面用于对反演结果进行约束, 并提取了 CRUST1.0 和 ECM1 全球地壳模型的中莫霍面几何形态, 用于对反演结果进行约束和对比。具体步骤如下: (1) 在消除沉积层重力影响的基础上, 根据已知的莫霍深度控制点和布格重力异常进行线性回归计算, 获得初始莫霍面深度。(2) 计算初始莫霍面重力异常与布格重力异常的差值, 反演莫霍面深度校正值。(3) 将修正后的莫霍面深度与初始莫霍面深度相加, 得到新的莫霍面, 并计算其相对于约束点的均方误差。(4) 重复步骤(2)、(3), 迭代后计算均方误差最小, 得到最终反演结果。根据多道地震的解释, 我们从中提取了海底面以及沉积基底的双程走时, 使用沉积物的时间-深度关系将其转换到深度域, 最终得到沉积基底深度数据。浅部地层有较好的约束条件时, 利用二度半模型, 用来推测和分析下部地层、构造的形态特征及分布。参考前人在洋底高原所进行的地球物理相关研究 (Coffin and Eldholm, 1994; Goslin et al., 1980; Recq and Goslin, 1981), 我们建立了一个 5 层初始模型, 包括海水、沉积物、上地壳、下

地壳以及上地幔，考虑到地震速度-岩石密度之间的相关关系，结合前人研究成果，将五层模型的初始密度值分别设为 1.03、2.20、2.60、2.80、和 3.30 g/cm³。利用人机交互式 2.5D 重力反演软件，不断调整模型密度，最终达到计算值与观测值的较好拟合。

1.3 MADP 地球物理特征

MADP 区域自由空间重力异常受地形影响较大，在区域内能观察到由转换断层活动所导致的地形差异在重力异常中的反应（图 2a）。区域内，SWIR 和 MADP 均表现为高重异常特征，值得注意的是，MADP 虽然整体表现为海底高地形特征，但是受地形影响严重的自由空间重力异常却表现为不同的特征，以 30° S 为界，马达加斯加海台可以分为北侧的低值自由空间重力异常区与南侧的高值自由空间重力异常区，其中北侧低值区重力场值分布不均匀，表现为整体的低值区和中间零星的高值异常分布；在南部则表现为较为均匀的高值异常区。

MADP 区域的布格重力异常数据可以反应深部区域界面的起伏特征，区域内，洋壳区域整体表现为为高值重力异常，代表了基底抬升；而 MADP 和马达加斯加岛区域为低值重力异常，代表了基底下沉。在大约 28 - 30° S 的区间内，MADP 布格重力异常明显增大，可将 MADP 进一步分为南、北两部分（图 2b）。

MADP 区域内的条带状磁异常丰富，其错断的位置与在自由空间重力异常中所识别到的转换断层一致。需要注意的是，区域内的磁条带异常表现为多个方向的延伸，反演了该区域内的复杂大地构造背景；西南印度洋中脊的周缘区域，整体磁异常条带延伸方向与洋中脊的延伸方向平行（图 2c）。

MADP 区域的地壳厚特征为洋壳区域地壳厚度较薄，平均厚度为 5-7 km 左右，而 MADP 区域地壳厚度较厚，在大约 28-30° S 的位置上，地壳厚度存在明显的分界，靠洋一侧平均厚度 15 km 左右，莫霍面起伏不大，靠陆一侧地壳厚度增加到 20 km 左右（图 3d）。

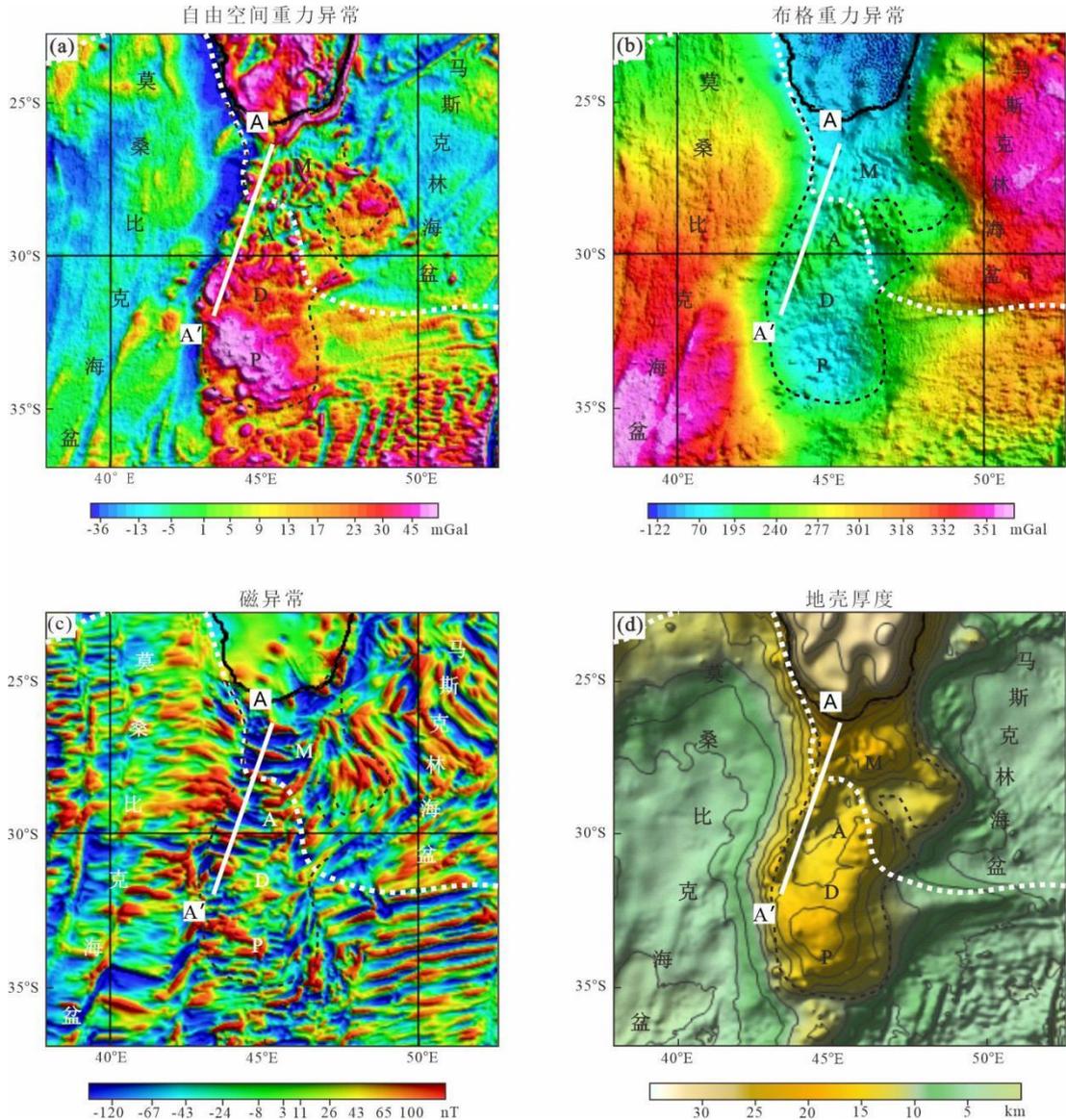


图2 马达加斯加海台地球物理特征（位置见图1中的黄色虚线）

白色虚线为根据磁异常数据、地震反射数据和重力异常数据推断的西南印度洋作用域边界。(a)马达加斯加海台自由空间重力异常(Sandwell et al., 2014). (b)马达加斯加海台布格重力异常。(c)马达加斯加海台磁异常(Meyer et al., 2017). (d)基于地震资料约束的地壳厚度反演结果。

Fig.2 The Geophysical characteristics of the Madagascar plateau (location see the yellow dotted box in Fig. 1)

The dashed white lines are the scope boundaries of the southwest Indian Ocean inferred from magnetic anomaly data, seismic reflection data, and gravity anomaly data. (a) The free air gravity anomalies for the Madagascar plateau (Sandwell et al., 2014). (b) The bouguer gravity anomalies for the Madagascar plateau. (c) The magnetic anomalies for the Madagascar plateau (Meyer et al., 2017). (d) The crustal thickness constrained by seismic data.

2. 研究方法

2.1 基于地震反射特征的关键界面识别

图3为本研究选取的穿过MADP北部区域的深反射地震剖面及其线描图、解释图，在该剖面上可以识别出多条不整合界面（图3b），其中海底界面作为沉积层的顶界面，是最为明显的界面。如图3c所示，从MADP最北侧开始，即640km处，海底深度较浅，位于双程反射时间（TWT）0.6s左右，随后向南深度快速增加，在640-600km处，海底深度可达TWT

1.4-1.6 s, 在跨过 600km 处后, 深度又快速增加至 TWT 2 s。在 600-450 km 区间内, 深度在 TWT 2-2.7 s 之间变化, 海底地形起伏变化较缓。450 km 处以南, 海底深度逐渐加深, 总体在 TWT 2.4-3 s 之间, 局部区域有变深现象, 例如 190 km 处, 深度达到最大值约 TWT 4 s。在海底界面之下, 可以识别出第二条明显的不整合界面, 为表述方便将其称为 Tbm 界面。如图 3c, Tbm 界面为一条低频强振幅反射界面, 连续性较好, 受岩浆和断层活动影响, 在全区内具有较大起伏, 深度保持在 TWT 2-4.4 s 之间, 局部可达 TWT 5 s (190 km 处)。Tbm 之上为一套连续性较好、结构清晰的层状反射, 局部区域存在等厚的空白反射结构 (590-450 km), 之下则为一套连续性较差的杂乱反射。Tbm 之下可以识别出第三条较为明显的不整合界面, 标注为 Tbc 界面。如图 3c, Tbc 界面为一条低频、强振幅界面, 连续性较好, 仅在局部区域清晰可见 (520-480 km, 590-570 km)。Tbc 界面仅能在测线左侧区域观察到 (600-480 km), 在 0-480 km 区段不显著。在 Tbm 与 Tbc 之间还存在一条次级的不整合界面, 即 BI 界面, 如图 3c 和 4 所示, 这条界面连续性较好, 具有低频强振幅反射特征, 仅在局部区域可见。界面之下为一些向海倾斜的层状反射, 界面之上则为一些近乎水平的连续性较弱的、上超于 BI 界面之上的层状反射。

2.2 基于地震反射特征的地层单元划分

海底、Tbm 和 Tbc 三条关键界面控制了两套地震反射结构完全不同的地层单元。如图 3c 所示, 海底界面与 Tbm 界面之间为一套厚度较薄 (0.3-1.8 s/TWT), 连续性较好的层状反射结构体, 标注为 U1 地层单元 (图 3d)。在 600-480 km 之间 U1 厚度较厚, 两侧为两条断层所控制, 其内部可以进一步划分出多个次级地层单元。在剖面左侧区域 (600-480 km), Tbm 与 BI 之间为一套较厚 (1-2 s/TWT)、连续性较差、内部杂乱的反射结构体, 标注为 U2 地层单元 (图 3d)。U2 内局部可见连续性较好的低频、较强振幅层状反射结构, 中间为一些向上凸起的空白杂乱反射所阻断。U2 之下, BI 和 Tbc 之间则为一套相对较薄 (1-1.5 s/TWT)、连续性较好的低频强振幅层状反射结构, 内部为一些向上凸起的空白杂乱反射所阻断, 标注为 U3 地层单元 (图 4)。U3 被一系列陆倾正断层所控制, 内部反射层向断层一侧发散, 表现为由多个楔形构造组成的、整体向海倾斜的反射结构体。在 600 km 处的走滑断层左侧区域 (640-600 km), 可以大致识别出两套反射结构, 与右侧区域反射特征明显不同, 从下到上依次可以分为 S1、和 S2 (图 3d、4)。S1 为一套杂乱反射, 两侧被相向倾斜的正断层所控制, 呈地堑结构; S2 为一套连续性较差的层状反射, 覆盖于 S1 之上, 左侧为一条向陆倾的正断层所控, 向断层一侧层状反射发散, 尾部发生翘倾截, 整体呈半地堑结构。而在剖面右侧区域 (430-0 km), Tbm 界面之下均为向上凸起的、较弱反射、较高频、连续性差的杂乱反射结构, 局部区域存在向海倾斜的层状反射 (例如 480-450 km 处, 370-380 km 处)。这些以上凸为特征的杂乱反射之下为一套近水平、低频、连续性中等和反射强度中等的反射体, 两者之间没有明显的分界面, 但可以大体追踪出两套反射结构间的包络面, 标注为 Tbo 界面 (图 3c)。Tbm 与 Tbo 之间的反射结构与 Tbm 与 BI 之间的具有相似特征, 因此我们同样将其标注为 U2 地层单元 (图 3d)。

2.3 基于地震反射特征的断裂体系识别

在地震剖面内我们还可以观察到两套断裂体系。第一套断裂体系主要分布于浅层区域 (TWT 3-4 s), 错移了 Tbm 界面, 控制着地形起伏和新生代沉积层厚度, 呈现负花状构造特征, 具有走滑性质。走滑断层的发育对自由空间重力异常具有一定影响, 可以使其异常强度急速衰减 (例如 400 km 处, 280 km 处)。因此根据重力异常数据, 也可以大致推断出走滑断层所处位置。第二套断裂体系则主要分布于剖面左侧的深层区域 (TWT 5-8 s)。在剖面左侧区域 (600-480 km) 可以观察到连续性较差的 Tbc 界面, Tbc 界面被一套向陆倾斜的反射结构所错断。这些陆倾正断层的反射特征并不明显, 主要通过 Tbc 界面的错断和上覆扇形地层单元结构的不连续性确定其所处位置 (图 3c, 4)。

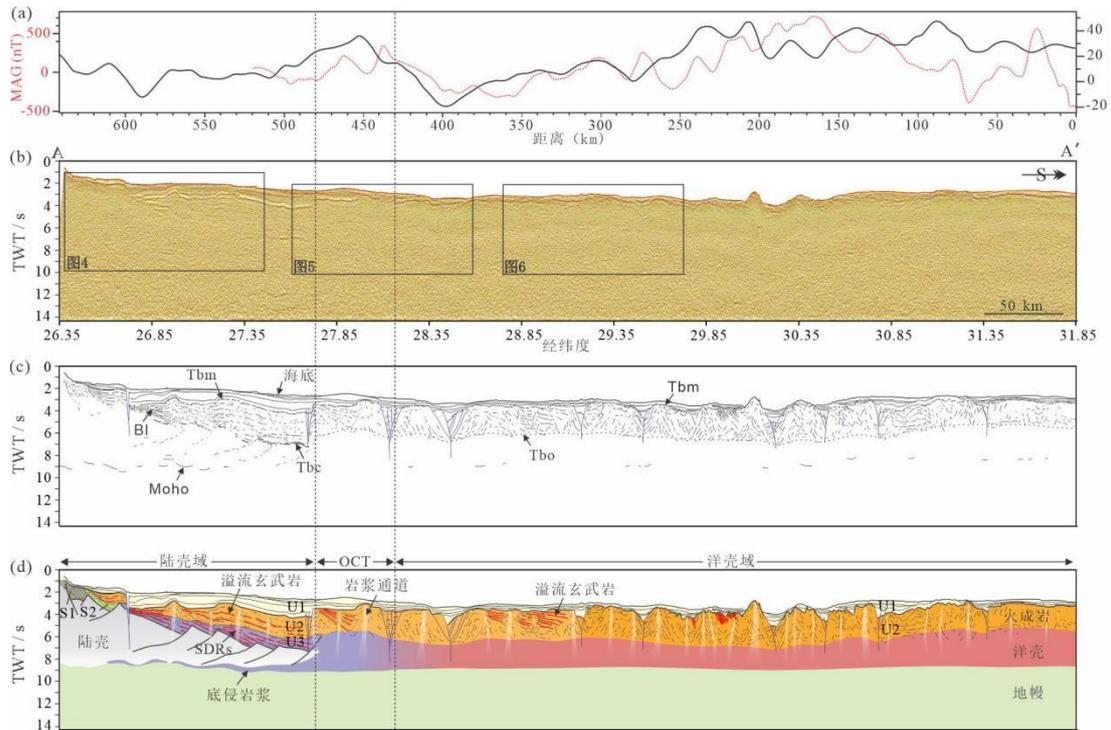


图 3 测线 A-A'剖面清绘图和构造解释图（测线位置见图 1）

(a) 沿剖面重力、磁异常数据。(b) 地震剖面。(c) 地震剖面线描图。(d) 地震剖面解释。SDRs—向海倾斜反射体，OCT—洋陆转换带，FAA—自由空间重力异常，MAG—磁异常。

Fig.3 The structural stratigraphic interpretation of Line A-A' (Location see Fig.1)

(a) The gravity and magnetic anomaly data along the profile. (b) The seismic profile. (c) The line drawing of seismic profile. (d) The interpretation of seismic profile. SDRs—Seaward dipping reflectors, OCT—Oceanic-continent transition, FAA—Free air gravity anomalies, MAG—Magnetic anomalies.

3. MADP 地震反射层地质属性分析和地壳结构构造单元划分

根据地震资料的识别与追踪,前文在测线 A-A'上识别出了 5 条关键界面,即海底、Tbm、Tbo、BI 以及 Tbc 界面。这 5 条界面作为不同反射结构体间的边界,框定了 MADP 的盆地充填特征。如图 3c 所示,海底界面与 Tbm 之间为一套连续性较好,受断层控制的层状反射结构体 U1,这套地层已经在 DSDP 246、247 站点钻遇到(位置见图 1),尽管井位并不在 A-A'剖面上,但是可以对比确定就是这套反射层。DSDP 246、247 井钻遇的这套反射是新生代沉积地层,其底部岩样为晚古新世-早始新世海绿石质-钙质砂岩(Schlich et al., 1974),因此我们将 U1 定义为一套新生代沉积地层(图 3d)。

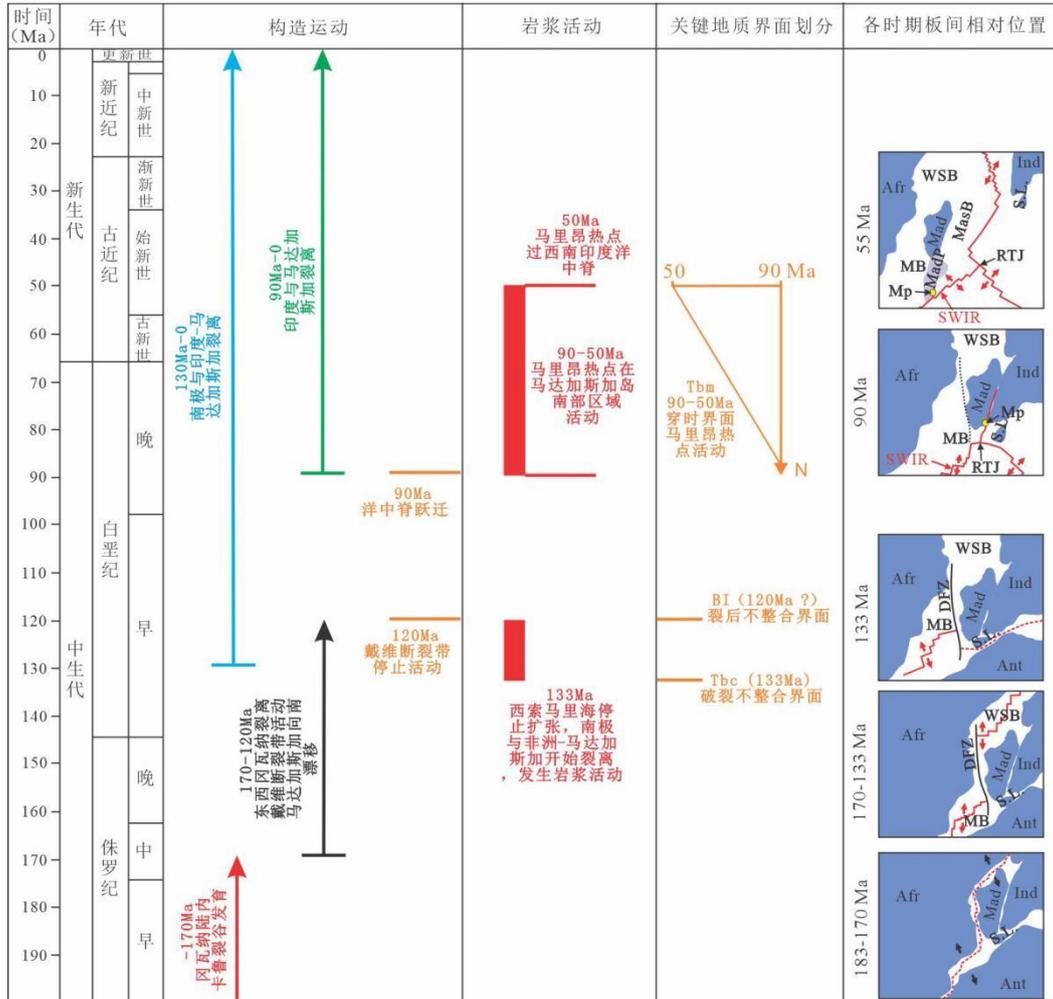


图 4 马达加斯加海台区域构造-岩浆演化历史及关键界面划分

(Reeves and de Wit, 2000; Reeves, 2014; Reeves et al., 2016; Reeves, 2017; Tuck-Martin et al., 2018; 张涛等, 2011)

Afr—非洲板块, Ind—印度板块, Ant—南极洲板块, Mad—马达加斯加岛, SWIR—西南印度洋脊, S.L.—斯里兰卡岛, MB—莫桑比克海盆, WSB—西索马里海盆, MasB—马斯克林海盆, MadP—马达加斯加海台, DFZ—戴维转换断层, RTJ—罗德里格斯三联点, Mp—马里昂地幔柱

Fig.4 Tectono-magmatic evolution history and division of key interfaces in the Madagascar plateau region (Reeves and de Wit, 2000; Reeves, 2014; Reeves, et al., 2016; Reeves, 2017; Tuck-Martin, et al., 2018; Zhang, et al., 2011)

Afr—Africa, Ind—India, Ant—Antarctica, Mad—Madagascar, SWIR—Southwest Indian Ridge, S.L.—Sri Lanka, MB—Mozambique Basin, WSB—West Somali Basin, MasB—Mascarene Basin, MadP—Madagascar Plateau, DFZ—Davie Fracture Zone, RTJ—Rodriguez Triple Junction, Mp—Marion plume.

沉积层 U1 厚度较薄, 覆盖了整条剖面, 在其之下为 Tbm 和 BI 界面以及 Tbm 和 Tbo 界面所限定的地层单元 U2 (图 3)。其内部有一系列向上凸起的杂乱反射结构, 推断为火山岩或可能为向上延伸并刺穿了内部层状反射结构的岩浆通道, 观测到的层状反射推测为溢流玄武岩, 岩浆的侵入、侵出作用破坏了层状反射的连续性, 也改造了海底地形, 形成许多海山 (例如 570 km 处, 200 km 处)。区域研究表明冈瓦纳大陆的裂解和马达加斯加陆缘的演化都伴随有强烈的岩浆作用影响 (Cox, 1992; Reeves, 2014; Reeves and de Wit, 2000; Storey et al., 1995), 特别是在马达加斯加岛的南部具有与地幔柱活动相关

联的岩浆活动，发生于晚白垩世初期（90-88 Ma），并一直持续活动至今（张涛等, 2011）（图 4）。在马达加斯加岛西侧，例如穆伦达瓦和莫桑比克盆地区域，地震剖面 and 岩性柱状图均显示了这套岩浆活动的痕迹 (Bassias, 1992; Salman and Abdula, 1995; 臧晓琳等, 2023)，据此，我们推断 Tbm-BI 之间的层状反射体是与 Marion 热点活动有关的熔岩流层系。Marion 热点自从 88Ma 以来一直活动，并具有向南迁移的规律 (Reeves and de Wit, 2000; Storey et al., 1995; 张涛等, 2011)，结合其活动轨迹（图 1），我们把地震剖面上记录的这套熔岩流层系的年龄确定为 90-50 Ma 之间。

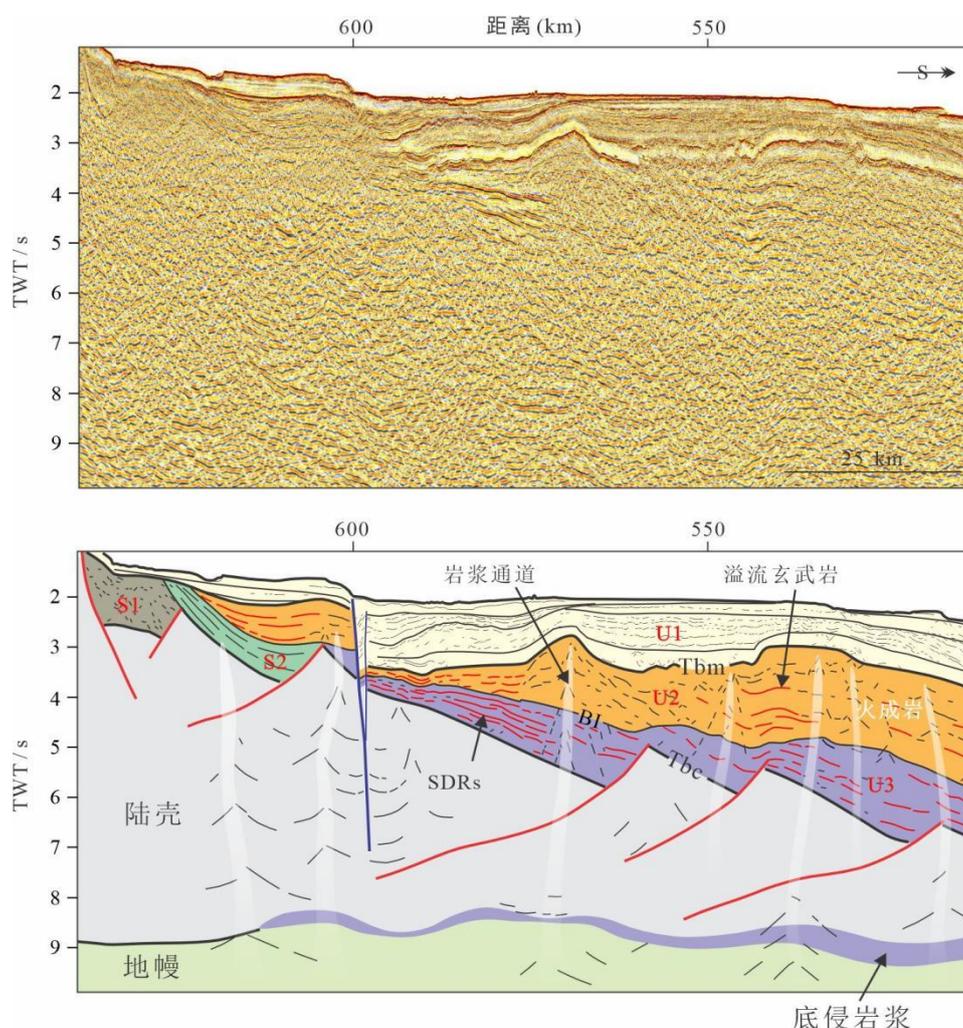


图 5 测线 A-A'局部区域放大线描解释图（位置见图 3b）

Fig.5 Line drawing of parts of Line A-A' (Location see Fig.3b)

在剖面左侧区域（640-480 km），U2 之下为 BI 与 Tbc 界面所限定的地层单元 U3，其内部发育有向海倾斜反射体（SDRs），被一系列向上突起的杂乱反射结构所阻断，在上文中已将这些杂乱反射定义为火山岩或岩浆通道，可能与 Marion 热点活动有关，因此我们认为，Marion 热点活动破坏、改造了 U3 内部结构。区域研究表明，马达加斯加南部陆缘的形成始于早白垩世（~133Ma）马达加斯加与南极洲板块间相对运动的开始 (Reeves, 2014; Tuck-Martin, et al., 2018)（图 4），剖面上观测到的一系列陆倾正断层及其所控制的 SDRs 表明其南部陆缘或可能具有富岩浆型被动陆缘演化特征 (Geoffroy et al., 2015)，U3 则为岩石圈伸展破裂时期（~133-120 Ma）受陆倾断层控制的溢流玄武岩体（图 3, 5）。根据 S1、S2 地震反射特征，结合马达加斯加陆缘演化历史，我们推测 S1 可能为卡鲁裂谷作用

初期的沉积层（183-170 Ma），S2 为马达加斯加南部陆缘裂解时期的沉积层（133-120 Ma）（图 4）(Reeves, 2014; Tuck-Martin et al., 2018)。

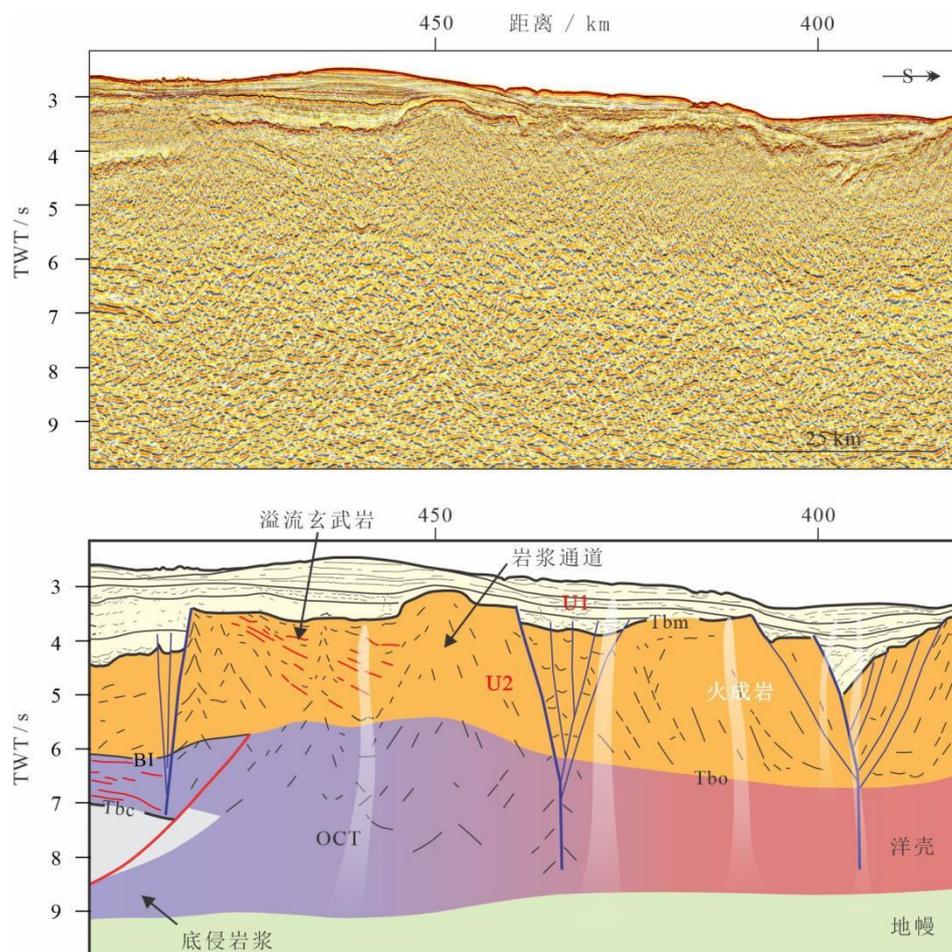


图 6 测线 A-A'局部区域放大线描解释图（位置见图 3b）

Fig.6 Line drawing of parts of Line A-A' (Location see Fig.3b)

Tbc 之下为一套均一空白反射，内部发育有一系列陆倾正断层，在 Tbc 界面之下 TWT 8-9 s 的区域内，还可以看到一些连续性较差的层状反射（图 3c），为莫霍面（Moho）反射层，进一步根据重-震联合反演得到的该区域地壳平均厚度可达 20 km（图 2d），也验证了该区域莫霍面大约在 TWT 9 s 的深度处。因此，本文确定地震剖面解释确定的 Tbc 界面为陆壳的顶界面，Tbc 与 Moho 面之间为薄化的陆壳。

在剖面右侧区域（430-0 km），Tbm 与 Tbo 之间的 U2 地层单元同样也为一套杂乱反射结构体，存在许多向上凸起的杂乱反射结构，推定为岩浆通道，局部区域存在层状反射结构，为溢流的玄武岩（图 7）。因此我们认为 Tbm 和 Tbo 之间为一套火山岩体，被后续的走滑断层作用改造为现今的格局。

Tbo 之下为一套均一空白的反射，与剖面左侧区域相比较（640-480 km），其内部看不到断层反射结构，且自由空间重力异常值明显高于左侧区域（图 2a, 3a），局部的自由空间重力异常低谷可能与走滑断层的发育有关。此外该区域布格重力异常值明显高于左侧区域，表明莫霍面深度存在明显抬升，加之线性磁异常特征（图 2c），我们认为剖面左侧和右侧区域地质属性有所不同，Tbo 之下可能存在洋壳结构，Tbo 则为洋壳顶界面。在地震剖面 TWT 8-9 s 的深度处依稀可见一些断断续续的层状反射结构（图 3c），根据重-震联合反演得到的该区域地壳平均厚度为 15 km(图 2d)，也证实该区域莫霍面大约在 TWT 8-9 s 的深度处。该

区 15 km 地壳厚度为海底高原的地壳厚度，根据相邻无海底高原发育区域的洋壳厚度，我们推定 A-A'地震剖面区域的洋壳厚度大约为 $2s / TWT$ ，6-7km 厚。

总的来说，MADP 的地质属性和地壳结构从南往北具有较大变化。在靠近陆地一侧（640-480 km）为陆壳域，发育一系列导致陆壳薄化的陆倾正断层，陆壳之上覆盖大量的侵入和喷出的火山岩，两者总体厚度较厚（~20 km）。而向洋一侧（430-0 km）为洋壳域，发育加厚的洋壳结构，洋壳之上也为大量侵入和喷出的火山岩，总厚度较薄（~15 km）。两者之间过渡区域存在一个明显的重力异常和磁异常峰值（480-430 km）（图 3a）， T_{bo} 界面也存在明显的向上隆起特征，推测可能是因为存在大量的岩浆侵入体，因此将该区域划分为洋陆转换带（OCT）（图 3, 6），其地壳结构为鳄鱼嘴式结构，即沿 Moho 底侵岩浆和喷出岩浆夹持伸展破碎地壳岩石圈碎块的所谓的原洋壳。

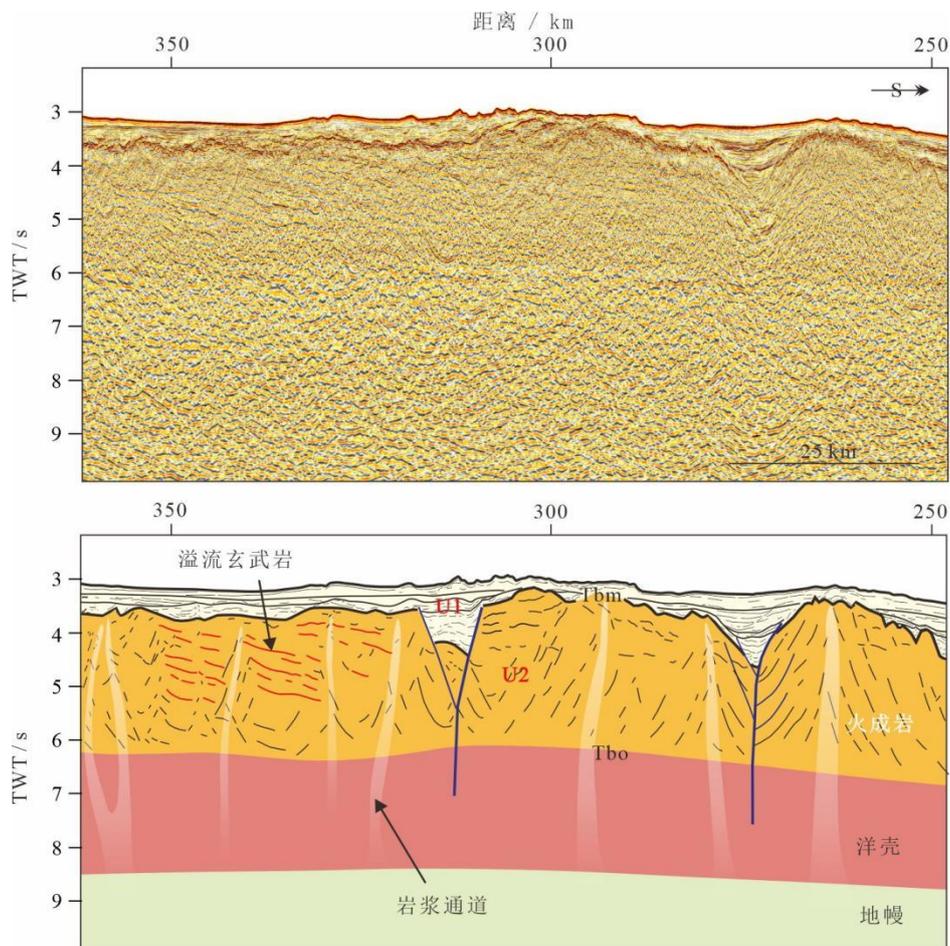


图 7 测线 A-A'局部区域放大线描解释图（位置见图 3b）

Fig.7 Line drawing of parts of Line A-A' (Location see Fig.3b)

4. 讨论：马达加斯加南部陆缘的演化与 MADP 的形成

4.1 冈瓦纳的裂解与区域构造事件的响应

马达加斯加陆缘自早侏罗世以来经历了较为复杂的构造-岩浆演化过程（图 4）。侏罗纪早期的卡鲁热点作用引发了冈瓦纳大陆的裂解，使得冈瓦纳大陆中部区域在裂谷作用下开始广泛发育裂谷盆地（183-177 Ma），并最终导致了东-西冈瓦纳大陆的裂解，索马里海和莫桑比克海盆逐渐打开(Cox, 1992; Reeves and de Wit, 2000; Storey et al., 1995; Tuck-Martin et al., 2018; 曹亮等, 2024; 李威等, 2024)。索马里海盆的打开（~170 Ma）(Geiger et al., 2004)使得马达加斯加与非洲板块分离开来，导致了马达加斯岛北部陆缘

的形成, 随后莫桑比克海在~165Ma时打开(Leinweber and Jokat, 2011; Leinweber and Jokat, 2012; Tuck-Martin et al., 2018)。随着洋脊扩张的持续进行, 两海盆之间开始发育转换断层, 即戴维转换断层(~158-120 Ma)(Reeves et al., 2016), 调节了扩张脊之间的相对运动, 并将马达加斯加岛与莫桑比克海分隔开来, 形成马达加斯加西部陆缘。马达加斯加南部陆缘的形成始于马达加斯加与南极洲板块间的裂谷作用, 在白垩纪早期(~133Ma), 随着西索马里海的停止扩张, 马达加斯加与非洲板块合并为一个完整板块开始与南极洲板块间发生相对运动, 马达加斯加南部陆缘开始形成(Tuck-Martin et al., 2018)。随后在白垩纪晚期(90-88 Ma), 马达加斯加岛南部的 Marion 地幔柱开始活动并最终导致了马达加斯加与印度板块的分离, 马斯克林盆地开始发育, 马达加斯加东部陆缘初步形成(Reeves, 2014; Reeves and de Wit, 2000; Storey et al., 1995; 张涛等, 2011)。

发生于马达加斯加南部陆缘的裂谷作用导致该区域陆倾正断层的发育, 岩石圈开始伸展破裂, 其中 Tbc 界面即为破裂不整合界面, Tbc 之上的 U3 地层单元为裂谷作用时期受陆倾断层控制的溢流玄武岩层系, 随后在大约 120 Ma, 新的洋壳在马达加斯加南部开始形成, 裂谷作用结束(洋壳年龄参考 Earth Byte)。因此我们认为 U3 的形成时间为 133-120 Ma, 其顶界面 BI 为岩石圈破裂不整合界面, 代表着裂谷作用的停止。在上文中我们已通过区域分析指出 U2 为 Marion 热点活动的产物, 形成时间为 90-50 Ma, 其底界面为破裂不整合界面(BI)和洋壳的顶界面(Tbo), 顶界面为 Tbm, 代表 Marion 热点作用的停止, 具有穿时性。根据前人推测的 Marion 热点活动轨迹(图 1), MADP 靠陆一侧的 Tbm 界面较老(~90-88 Ma), 代表 Marion 热点开始活动的时间, 逐渐向南, Tbm 界面年龄趋于年轻, 在 MADP 最南端可能达到 50 Ma 左右, 这也与 DSDP 246、247 井在 MADP 南端钻遇的最深处岩样年龄相近(晚古新世-早始新世)(Schlich et al., 1974)。Marion 热点活动之后, 马达加斯加南部陆缘再未经历较大的构造事件, 地壳结构处于相对稳定状态, Tbm 之上开始发育沉积地层 U1, 局部被走滑断层错断。考虑到 Marion 热点活动轨迹, 我们认为 MADP 北部 U1 底部沉积年龄比南部更早, 在测线 A-A'上观测到的 MADP 北部的 U1 相较于南部其底部多了一套空白反射的现象也与本文的认识相一致(图 3b)。

4.2 MADP 的形成演化过程分析

基于上文的分析, 我们已经确定 MADP 区域地壳属性和盆地充填。MADP 靠陆一侧薄化的地壳可归因于白垩纪早期发生于马达加斯加与南极洲板块间的裂谷作用, Tbc 为破裂不整合界面。根据在剖面上观测到的发育于陆壳内的陆倾正断层以及其所控制的向海倾斜的溢流玄武岩体, 即 SDRs, 我们推测马达加斯加南部陆缘属于岩浆型被动陆缘, 强烈的岩浆作用熔断了岩石圈, 最终在约 120 Ma 软流圈涌出地表, 海底扩张系统建立, 新的洋壳开始形成(洋壳年龄参考 EarthByte)。在 Tbc 与 Tbm 之间存在一条次级不整合界面, 即 BI(图 3c, 5), 该界面为裂后不整合界面, 它的不连续性可能与后期岩浆作用的破坏有关。随后在 90-88 Ma, Marion 热点活动开始作用于马达加斯加岛南部, 产生了大量的火山岩构造并导致了马达加斯加与印度板块的分离(Reeves and de Wit, 2000; Storey et al., 1995; 张涛等, 2011)。此后, 随着洋脊扩张运动的进行, 马达加斯加岛持续北向漂移, 热点作用贯穿了整个马达加斯加南部陆缘, 强烈的岩浆作用改造并增厚了马达加斯加南部陆缘地壳厚度, 形成现今所看到的 MADP(张涛等, 2013, 2011)。Tbm 为 Marion 热点作用的顶界面, Tbm 之后, 岩浆活动急速弱化。

总体来说, 马达加斯加南部陆缘的演化过程可以分为以下三个阶段:

1) 裂谷作用的开始与岩石圈的薄化

早在侏罗纪早期, 马达加斯加西南部在卡鲁裂谷作用下就形成了许多裂谷盆地, 其中 S1 即为裂谷作用下的沉积物(183-170 Ma)。后续随着马达加斯加与南极洲板块的分离, 马达加斯加南部陆缘在~133 Ma 时开始形成, 强烈的裂谷作用导致了岩石圈的最终破裂。裂谷作

用初始阶段构造伸展作用较弱,但可通过镁铁质岩浆作用强烈扩容,局部发育正断层,控制着 S2 地层沉积。随着软流圈物质的持续上涌,两条相背倾斜的陆倾断层(CDFs)开始发育,地壳发生薄化,岩浆透过地壳渗透至地表形成大量溢流玄武岩,这些熔融物质受断层控制形成一系列向海倾斜反射体,即 SDRs (Geoffroy et al., 2015)。该阶段的构造岩浆活动造成了内 SDRs 和中央陆块—C 块的形成,两个相背倾斜的 CDFs 共同的下盘形成了一个由 C 块组成的中部刚性陆块(图 8a)。随后在地幔岩石圈热驱动的软化作用下,C-块内部开始形成一系列陆倾的拆离断层,控制着外 SDRs 的边界并逐渐将其拆离薄化(图 8b)。

2) 岩石圈的破裂与洋壳的形成

随着拆离断层的发育,岩石圈的伸展开始受构造力学作用的控制,导致地壳的伸展和岩石圈的薄化,形成了裂谷中部岩浆房。当伸展作用强化时陆壳被强烈的岩墙作用扩容形成初始的地表扩张中心,成为表层熔岩的供给通道(图 8b)。在~120Ma,随着板块分离作用的发生,洋中脊扩张系统开始建立,这时形成的洋壳厚度往往超过正常厚度,属于原洋洋壳。之后海底扩张系统趋于稳定,洋壳厚度逐渐恢复正常(图 8c)。根据板块重建模拟结果,在 120-88 Ma 期间,马达加斯加南部陆缘洋脊扩张了至少 1000km 以上(余星等, 2020)。

3) Marion 热点作用的改造

通过放射性同位素定年和板块构造重建模拟,前人的研究已证实 Marion 热点在 90-88Ma 开始作用于马达加斯加岛南部,后续随着洋脊的扩张,其在板块上的运动轨迹如图 1a 所示。在 90-50 Ma 期间,Marion 热点轨迹基本上已覆盖了整个马达加斯加海台,并逐渐向洋中脊靠近,热点活动强度较高,在 74 Ma 时达到峰值(张涛等, 2011)。Marion 热点作用可以导致岩浆透过地壳喷发至海底,或是在地壳底部发生岩浆底侵,从而进一步增厚地壳,改变海底地形(图 8d)。由热点向地壳表层运输的物质在其路径上,对地壳产生热侵蚀作用,使通道所在的岩石圈强度降低,而这些熔融物质部分向上“渗漏”,从而形成了现在我们在其路径上看到的火山建造(Morgan, 1978; Small, 1996)。

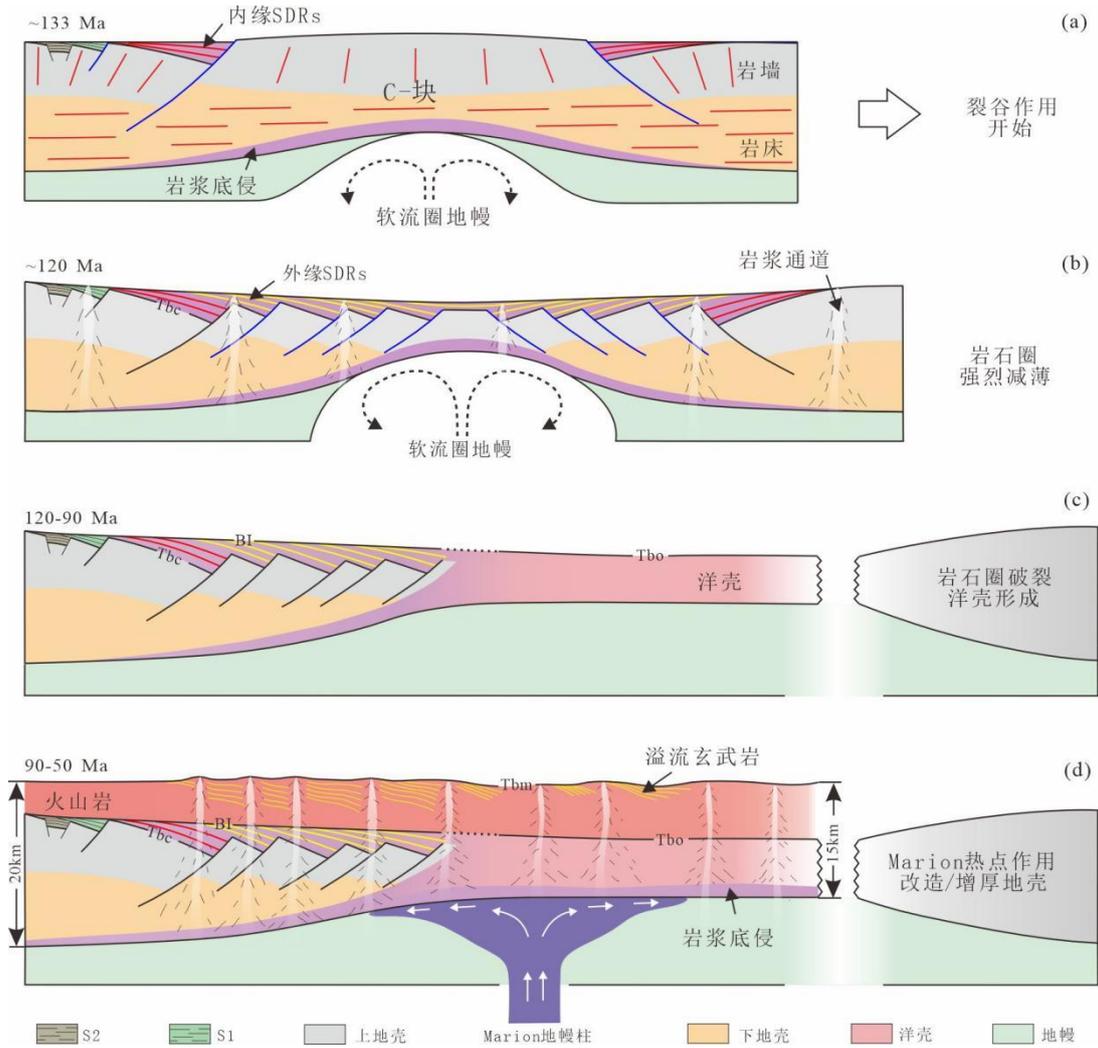


图 8 马达加斯加南部陆缘形成演化示意图。

蓝色断层为正在活动的断层，黑色断层为已停止活动断层。(a) 裂谷作用开始。(b) 岩石圈强烈薄化。(c) 岩石圈的破裂与洋壳的形成。(d) Marion 热点作用改造、增厚原始地壳。SDRs—向海倾斜反射体。

Fig.8 Schematic diagram of evolution of the southern continental margin of Madagascar

Blue faults represent active faults, whereas black faults correspond to inactive faults.

(a) Initiation of rifting. (b) intense thinning of the lithosphere. (c) rupture of the lithosphere and formation of the oceanic crust. (d) transformation and thickening of the original crust by Marion hot spot. SDRs—Seaward dipping reflectors.

5. 结论

(1) 通过对贯穿 MADP 深反射地震剖面的详细解释，在研究区域内识别出了五条关键界面，由下到上分别为 Tbc、BI、Tbo、Tbm 以及海底界面，这些界面限定了三套地层单元，分别为 U3 (Tbc-BI)、U2 (BI-Tbm、Tbo-Tbm) 和 U1 (Tbm-海底)。结合地震反射特征和区域构造背景分析，研究发现 U3 地层单元为马达加斯加南部陆缘裂陷期形成的受陆倾正断层控制的溢流玄武岩体，即 SDRs，其底界面 Tbc 为破裂不整合界面 (~133 Ma)，标志着裂谷作用的开始，顶界面 BI 为裂后不整合界面 (~120 Ma)，标志着裂谷作用的结束；U2 地层单元为 Marion 热点作用下形成的火山岩层，其顶界面为 Tbm，标志着 Marion 热点作用的结束，从南往北具有穿时性 (90-50 Ma)；U1 地层单元为沉积层，受 Marion 热点活动影

响，年龄从北向南有逐渐年轻化趋势。

(2) 通过地震剖面解释，结合重、磁数据分析，MADP 是由薄化的陆壳与增厚的洋壳组合而成。其中靠陆一侧为薄化的陆壳，Tbc 为陆壳顶界面，上覆厚层火山岩 (U3、U2)，总平均厚度可达 20 km。向洋一侧大部分区域为增厚的洋壳，Tbo 为洋壳顶界面，洋壳之上也覆盖有厚层火山岩 (U2)，总平均厚度可达 15 km。二者之间存在宽度约 50 km 的洋陆转换带。

(3) 马达加斯加南部陆缘的形成始于白垩纪早期 (~133 Ma) 马达加斯加与南极洲板块间的裂谷作用，其陆缘类型为岩浆型被动陆缘，强烈的岩浆作用导致了岩石圈的熔断破裂，并在 120 Ma 开始生成新的洋壳。在 120-90 Ma 期间，马达加斯加南部洋脊处于稳定扩张状态，90 Ma 之后，Marion 热点开始在马达加斯加南部活动，随着洋脊扩张的进行其运行轨迹在 50Ma 贯穿了整个马达加斯加南部陆缘并跨过了洋中脊。Marion 热点作用导致岩浆透过马达加斯加南部陆缘陆壳和洋壳喷发至海底，或是在莫霍面附件发生岩浆底侵，从而进一步增厚原地壳厚度，改变海底地形，形成了现今看到的马达加斯加海台。

(4) 通过地震剖面解释，结合区域重磁异常分析，在前人研究基础上对 MADP 地质属性进行了归类，研究成果不仅有助于深化西南印度洋热点与洋脊相互作用的认识，而且，有助于为西南印度洋资源勘探 (如油气、多金属结核) 以及大陆架划界提供重要的参考价值。

参考文献

- Bassias, Y., 1992. Petrological and Geochemical Investigation of Rocks from the Davie-Fracture Zone (mozambique Channel) and Some Tectonic Implications. *JOURNAL OF AFRICAN EARTH SCIENCES*, 15 [http://doi.org/10.1016/0899-5362\(92\)90018-8](http://doi.org/10.1016/0899-5362(92)90018-8)
- 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*, 162 765-778. <http://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02672.x>
- Coffin, M. F., Eldholm, O., 1994. Large Igneous Provinces: Crustal Structure, Dimensions, and External Consequences. *Reviews of Geophysics*, 32 1-36. <http://doi.org/10.1029/93rg02508>
- Cox, K. G., 1992. Karoo Igneous Activity, and the Early Stages of the Break-Up of Gondwanaland. *Geological Society Special Publication*, 68 137-148. <http://doi.org/10.1144/gsl.sp.1992.068.01.09>
- Douglass, J., Schilling, J. G., Kingsley, R. H., 1995. Influence of the Discovery and Shona Mantle Plumes on the Southern Mid - Atlantic Ridge: Rare Earth Evidence. *Geophysical research letters*, 22 2893-2896. <http://doi.org/10.1029/95gl02665>
- Geiger, M., Clark, D. N., Mette, W., 2004. Reappraisal of the Timing of the Breakup of Gondwana Based on Sedimentological and Seismic Evidence from the Morondava Basin, Madagascar. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 38 363-381. <http://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.02.003>
- Geoffroy, L., Burov, E. B., Werner, P., 2015. Volcanic Passive Margins: Another Way to Break Up Continents. *Scientific reports*, 5 <http://doi.org/10.1038/srep14828>
- Georgen, J., Lin, J., Dick, H., 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 [http://doi.org/10.1016/s0012-821x\(01\)00293-x](http://doi.org/10.1016/s0012-821x(01)00293-x)
- Goslin, J., Segoufin, J., Schlich, R., et al., 1980. Submarine Topography and Shallow Structure of the Madagascar Ridge, Western Indian-Ocean. *GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA BULLETIN*,

- 91 [http://doi.org/10.1130/0016-7606\(1980\)91<741:stasso>2.0.co;2](http://doi.org/10.1130/0016-7606(1980)91<741:stasso>2.0.co;2)
- Leinweber, V. T., Jokat, W., 2011. Is There Continental Crust Underneath the Northern Natal Valley and the Mozambique Coastal Plains? *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 38 <http://doi.org/10.1029/2011gl047659>
- Leinweber, V. T., Jokat, W., 2012. The Jurassic history of the Africa - Antarctica corridor — new constraints from magnetic data on the conjugate continental margins. *Tectonophysics*, 530 87-101. <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.11.008>
- Meyer, B., Chulliat, A., Saltus, R., 2017. Derivation and Error Analysis of the Earth Magnetic Anomaly Grid at 2 Arc Min Resolution Version 3 (Emag2v3). *Geochemistry, geophysics, geosystems*, 18 4522-4537. <http://doi.org/10.1002/2017gc007280>
- 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 1409-1436. <http://doi.org/10.1093/petrology/egw045>
- Morgan, W. J., 1978. Rodriguez, Darwin, Amsterdam, ..., A Second Type of Hotspot Island. *Journal of geophysical research*, 83 5355-5360. <http://doi.org/10.1029/jb083ib11p05355>
- Recq, M., Goslin, J., 1981. Etude de l'équilibre isostatique dans le sud-ouest de l'océan Indien à l'aide des résultats de réfraction sismique. *Marine Geology*, 41 M1-M10. [http://doi.org/10.1016/0025-3227\(81\)90101-8](http://doi.org/10.1016/0025-3227(81)90101-8)
- Reeves, C. V., 2017. The Development of the East African Margin During Jurassic and Lower Cretaceous Times: a Perspective from Global Tectonics. *Petroleum geoscience*, 24 41-56. <http://doi.org/10.1144/petgeo2017-021>
- Reeves, C. V., Teasdale, J. P., Mahanjane, E. S., 2016. Insight into the Eastern Margin of Africa from a New Tectonic Model of the Indian Ocean. *Geological Society, London, Special Publications*, 431 299-322. <http://doi.org/10.1144/sp431.12>
- Reeves, C., 2014. The position of Madagascar within Gondwana and its movements during Gondwana dispersal. *Journal of African Earth Sciences*, 94 45-57. <http://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.07.011>
- Reeves, C., de Wit, M., 2000. Making ends meet in Gondwana: retracing the transforms of the Indian Ocean and reconnecting continental shear zones. *TERRA NOVA*, 12 272-280. <http://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2000.00309.x>
- Salman, G., Abdula, I., 1995. Development of the Mozambique and Ruvuma sedimentary basins, offshore Mozambique. *SEDIMENTARY GEOLOGY*, 96 7-41. [http://doi.org/10.1016/0037-0738\(95\)00125-R](http://doi.org/10.1016/0037-0738(95)00125-R)
- 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. <http://doi.org/doi:10.1126/science.1258213>
- Schlich, R., Simpson, E. S. W., Gieskes, J., et al., 1974. Sites 246 and 247. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project* *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 25. <http://doi.org/10.2973/dsdp.proc.25.108.1974>
- Sinha, S. T., Saha, S., Longacre, M., et al., 2019. Crustal Architecture and Nature of Continental Breakup along a Transform Margin: New Insights from Tanzania - Mozambique Margin. *Tectonics*, 38: 1273-1291. <http://doi.org/10.1029/2018tc005221>
- Small, C., 1996. Observations of Ridge - hotspot Interactions in the Southern Ocean. *Oceanographic literature review*, 4 382-383. <http://doi.org/10.1029/95jb01377>

- Storey, M., Mahoney, J. J., Saunders, A. D., et al., 1995. Timing of hot spot--related volcanism and the breakup of Madagascar and India.
- Tuck-Martin, A., Adam, J., Eagles, G., 2018. New Plate Kinematic Model and Tectono - stratigraphic History of the East African and West Madagascan Margins. *Basin research*, 30 1118-1140. <http://doi.org/10.1111/bre.12294>
- Yang, S., Wu, Z., Fang, Y., et al., 2024. Three-dimensional Constrained Gravity Inversion of Moho Depth and Crustal Structural Characteristics at Mozambique Continental Margin. *Acta Oceanologica Sinica*, 1-10. <http://doi.org/10.1007/s13131-023-2220-8>
- 曹, 李, 2024. U-Pb, Hf, 49(11): 3971-3994. doi: 10.3799/dqkx.2024.116
- Cao, L., Hu, P., Jiang, J, S., et al., 2024. Zircon and Cassiterite U-Pb Geochronology and Hf Isotopes of Kama Li-Nb-Ta Pegmatite Deposit and Its Geological Significance in Nasarawa, Central Nigeria. *Earth Science*, 49(11): 3971-3994 (in Chinese with English Abstract). doi: 10.3799/dqkx.2024.116
- 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(07): 2859-2870. doi: 10.6038/cjg2018L0395
- Liu, C, H., Li, H, J., Zhang, H, T., et al., 2018. Magma supply of the southwest Indian Ocean:evidence from crustal thickness anomalies. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(07): 2859-2870 (in Chinese with English Abstract). doi: 10.6038/cjg2018L0395
- 曹, 李, 2024. CO₂ Palogue, 49(10):3488-3498. doi: 10.3799/dqkx.2023.133
- Li, W., Dou, L, R., Wen, Z, G, et al., 2024. Effect of Mantle-Derived CO₂ on Hydrocarbon Accumulation in Central African Rift System:A Case Study of Palogue Oilfield. *Earth Science*, 49(10):3488-3498 (in Chinese with English Abstract). doi: 10.3799/dqkx.2023.133
- 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 Journal of Geophysics*, 63(10): 3585-3603 (in Chinese with English Abstract). doi: 10.6038/cjg2020N0230
- 臧晓琳, 逢建东, 王震, 等, 2023. 东非大陆边缘穆伦达瓦盆地成藏模式及在油气勘探中的应用. *中外能源*, 28(10): 37-44.
- Zang, X, L., Pang, J, D., Wang, Z., et al., 2023. Reservoir-forming model and its application in oil and gas exploration of Mulondawa Basin, continental margin of East Africa. *Chinese and Foreign Energy*, 28(10): 37-44 (in Chinese).
- 张涛, LIN Jian, 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. doi: 10.1007/s11430-013-4630-5
- Zhang, T., Lin, J., Gao, J, Y., 2013. Magmatism and tectonic processes in Area A hydrothermal vent on the Southwest India Ridge. *Science China: Earth Sciences*, 43(11): 1834-1846 (in Chinese with English Abstract). doi: 10.1007/s11430-013-4630-5
- 张涛, 林间, 高金耀, 2011. 90Ma 以来热点与西南印度洋中脊的交互作用:海台与板内海山的形成. *中国科学:地球科学*, 41(06): 760-772. doi: 10.1007/s11430-011-4219-9
- 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 Science*, 41(06): 760-772 (in Chinese with English Abstract). doi: 10.1007/s11430-011-4219-9

