

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020042201

# 东北印度洋 85°E 海脊的性质和起源: 综述和新认识

尚鲁宁<sup>1,2</sup>, 胡刚<sup>1,2</sup>, 袁忠鹏<sup>1,2,3</sup>, 祁江豪<sup>1,2</sup>, 潘军<sup>1,2</sup>

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海底矿产资源与探测技术功能实验室, 青岛 266237
3. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

**摘要:** 85°E 海脊是东北印度洋一条重要的线性基底隆起, 形成于中生代印度板块北漂过程中的构造和岩浆活动。海脊的结构、性质和起源蕴含了东印度洋扩张和印度板块北漂过程的关键信息, 然而目前对其构造属性和形成演化的认识存在较大争议。分析了 85°E 海脊及邻区的重磁异常特征, 结合前人对海脊外部形貌、内部结构、深部构造以及东印度洋板块重建的研究成果, 探讨了海脊的性质和起源。结果表明, 85°E 海脊的形成是热点活动、洋脊扩张、转换断层、扩张中心跃迁以及板块汇聚远程效应等多种地质过程综合作用的结果。海脊呈现明显的构造分段性, 不同分段的结构、性质和成因机制不同。12°N 以北的海脊形成于板内热点型岩浆作用; 2°~12°N 的海脊与 NW-SE 向和 N-S 向两期海底扩张的边界高度吻合, 是白垩纪东印度洋扩张中心调整和板块重组的产物; 2°N 以南的阿法纳西-尼基廷海山是随着海底扩张逐渐侵位的热点型海脊, 可能与 2°N 以北的海脊不存在成因上的关联。分析认为, 2°~12°N 的海脊中段是未来部署地球物理测量、进一步确认海脊性质和成因的关键区域。通过深海钻探揭示海脊不同分段的物质组成和形成时代, 是破解 85°E 海脊的性质和起源、白垩纪印度洋板块重建事件以及热点-洋中脊相互作用机制等重大地质问题的关键途径。

**关键词:** 85°E 海脊; 东北印度洋; 重磁异常; 构造分段; 热点活动; 板块调整

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

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

SHANG Luning<sup>1,2</sup>, HU Gang<sup>1,2</sup>, YUAN Zhongpeng<sup>1,2,3</sup>, QI Jianghao<sup>1,2</sup>, PAN Jun<sup>1,2</sup>

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
3. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

**Abstract:** The 85°E ridge in the Northeast Indian Ocean is a prominent linear basement uplift, formed by the tectonic and magmatic activities during the Mesozoic northward drift of the Indian plate. This ridge is a key unit for understanding the East Indian Ocean spreading and the northward drifting of the Indian Plate. However, its structural characteristics and formation and evolution process are controversial. In this paper, gravity and magnetic anomalies around the 85°E ridge are mapped and analyzed. We discussed the nature and origin of the ridge upon integration of previous works on morphology and deep structure of the crust under the ridge and the reconstruction models of the East Indian Ocean plate. The results show that the 85°E ridge is generated by the integrated multiple processes including hot spot activity, spreading, transform fault, transition of spreading center and long-distance effect of plate convergence. Different segments are dominated by different structures, natures and genetic mechanisms. The segment north of 12°N was formed by intraplate hot spot magmatism. Between 2°N and 12°N the ridge is highly consistent with the boundary of NW-SE and N-S seafloor spreading, resulted from the Cretaceous plate reorganization. The Afanasy-Nikitin seamount to the south of 2°N is a near-axis hot spot trail emplaced along with the seafloor spreading, and may not be genetically related to the ridge to the north of 2°N. We suggest, therefore, that the middle part of the ridge between 2°N and 12°N is a critical area for further confirmation of the nature and origin of the ridge. Geophysical surveys are required and scientific drilling will help solve major geological problems, such as the nature and origin of the 85°E ridge, the reorganization of the Indian Ocean Plate in Cretaceous, and the interaction mechanism between hot spot and mid-ocean ridge.

**Key words:** 85°E ridge; Northeastern Indian Ocean; gravity and magnetic anomalies; structural segmentation; hot spot; plate reorganization

**资助项目:** 中国地质调查局地质调查项目“深海科学钻探井位选址调查”(DD20190236); 国家自然科学基金重点项目“冲绳海槽海底冷泉-热液系统相互作用及资源效应”(91858208)

**作者简介:** 尚鲁宁(1986—), 男, 副研究员, 海洋地质与构造地质专业, E-mail: sluning@mail.cgs.gov.cn

**通讯作者:** 胡刚(1979—), 男, 正高级工程师, 海洋沉积学专业, E-mail: hugang@mail.cgs.gov.cn

**收稿日期:** 2020-04-22; **改回日期:** 2020-05-16. 周立君编辑

85°E 海脊是一条纵贯孟加拉湾的线性基底隆起,自孟加拉大陆架的西缘向南延伸至中印度洋海盆的阿法纳西-尼基廷海山(图 1),将孟加拉湾分隔为西部盆地和中央盆地。海脊的大部分被孟加拉深海扇沉积物掩埋<sup>[1-2]</sup>,仅南段局部出露海底。目前,主要通过地球物理资料解译,对 85°E 海脊的结构和性质进行了研究,尚未通过钻探获取其物质组成和形成时代的信息,因而对其结构、性质和起源的认识存在较大争议。

关于 85°E 海脊的性质和起源,存在废弃的扩张中心<sup>[3]</sup>、溢流型幔源岩浆岩带<sup>[4]</sup>、热点型海脊<sup>[5-6]</sup>、转换断层<sup>[7]</sup>以及板块俯冲碰撞导致的板内挤压构造变形带<sup>[8]</sup>等多种不同观点。海脊北段发育典型的火山机构<sup>[9]</sup>,为其热点成因提供了有力证据,但海脊的“S”形走向与板块重建结果不一致<sup>[10-11]</sup>。海脊中段与近 N-S 向的转换断层延长线重合,在地球物理剖面上呈现明显的非对称性<sup>[4]</sup>,表明断裂活动在其形成过程中起主要作用。此外,有证据表明阿法纳西-尼基廷海山与 85°E 海脊的结构存在显著差异,二者可能不存在成因上的关联<sup>[11]</sup>。因此,85°E 海脊的不同分段可能具有不同的构造属性和成因机制,然而目前对这一问题缺乏全面的论述。

本文通过归纳总结前人研究成果,并结合孟加拉湾重磁资料的分析,对 85°E 海脊的结构、性质和起源进行论述,探讨 85°E 海脊的分段特征及不同分段的构造属性和成因机制,目的在于为进一步理解中生代冈瓦纳大陆裂解和印度板块向北漂移过程中的构造活动和岩浆作用奠定基础。

## 1 构造地质背景

孟加拉湾位于印度洋东北部(图 1),被斯里兰卡、印度、孟加拉国、缅甸、安达曼-尼科巴群岛和苏门答腊包围,是印度板块与欧亚板块碰撞拼合过程中形成的残留洋盆<sup>[12]</sup>。两板块的碰撞始于中古新世并持续至今,经历了 59~43 Ma 的“软碰撞”(大陆边缘陆隆-岛弧碰撞)阶段和 43 Ma 以来的“硬碰撞”(大陆-大陆碰撞)阶段<sup>[13]</sup>。碰撞导致喜马拉雅山和青藏高原的隆升剥蚀<sup>[14]</sup>,产生的大量碎屑物质向南输送并堆积于印度大陆和巽他俯冲带之间,形成了包括陆域孟加拉盆地和海域孟加拉深海扇在内的孟加拉沉积体系<sup>[1-2,15]</sup>。部分孟加拉深海扇沉积物随印度板块的俯冲加积到东侧的印-缅增生楔和安达曼-尼科巴增生楔之上<sup>[12,16-18]</sup>。

孟加拉湾大部分地区的洋底年龄为早白垩世,

由冈瓦纳大陆东部的大印度板块和澳大利亚-南极板块之间的海底扩张形成<sup>[19-24]</sup>。东经九十度海岭和 85°E 海脊两条近 N-S 向的线性基底隆起将孟加拉湾分隔成隆-坳相间的构造格局(图 2)。东经九十度海岭自 30°S 向北延伸至 17°N,是全球最长的海底线性构造之一,形成于 82~38 Ma,与凯尔盖朗热点的活动有关<sup>[25-27]</sup>。85°E 海脊大部分深埋于孟加拉深海扇沉积层之下,最早由 Curray 和 Moore<sup>[28]</sup>识别和标定,表现为一条显著的低自由空间重力异常带<sup>[28-30]</sup>。海脊西侧的沉积物厚度约为 6~8 km,东侧的沉积物厚度约为 8~10 km,海脊顶部的沉积物厚度约为 2~3 km<sup>[31]</sup>。

## 2 85°E 海脊的重力异常特征和地壳厚度

### 2.1 重力异常特征

重力异常数据来源于全球重力异常图 WGM2012 (World Gravity Map 2012, 文献 [32]) 网格数据 (<http://bgi.omp.obs-mip.fr/data>),包含分辨率为 2'×2' 的空间重力异常数据和布格重力异常数据(布格改正方法和相关参数见文献 [32-33])。孟加拉湾的自由空间重力异常以近 N-S 向的负异常和正低异常为主,总体呈自西向东升高的趋势(图 3)。西侧和西北侧的印度大陆东缘发育平行于岸线分布的正高重力异常,而陆坡外侧发育宽约 100~200 km 的负异常。北侧的孟加拉大陆架以正高重力异常为主,陆域则为宽缓的正低异常区。东侧的巽他海沟表现为负异常带,安达曼-尼科巴弧前盆地发育本区最低的负异常。与东经九十度海岭相对应的正高重力异常向北延伸至 19°N 附近。布格重力异常图上,印度和孟加拉国陆域以 0~100 mGal 的正低异常为主(图 4)。印度东缘洋陆过渡带、斯里兰卡、孟加拉陆架以及安达曼-尼科巴岛弧区以 100~200 mGal 的正异常为主,形成陡峭的重力异常梯度带。孟加拉湾的布格重力异常总体呈现自北向南逐渐升高的趋势,大致以 15°N 和 3°N 为界,15°N 以北为 200~300 mGal,3°~15°N 为 300~400 mGal,3°N 以南为大于 400 mGal 的正高异常区。与东经九十度海岭相对应的低异常向北延伸至 10°N 附近。

85°E 海脊在空间重力异常图和布格重力异常图上均表现为低异常带,被两侧重力异常相对高值区所限(图 3,图 4)。重力异常的幅值和宽度沿海脊走向存在显著变化,尤其在空间重力异常图上,表现为明显的分段性。85°E 海脊负异常在 15°N 附

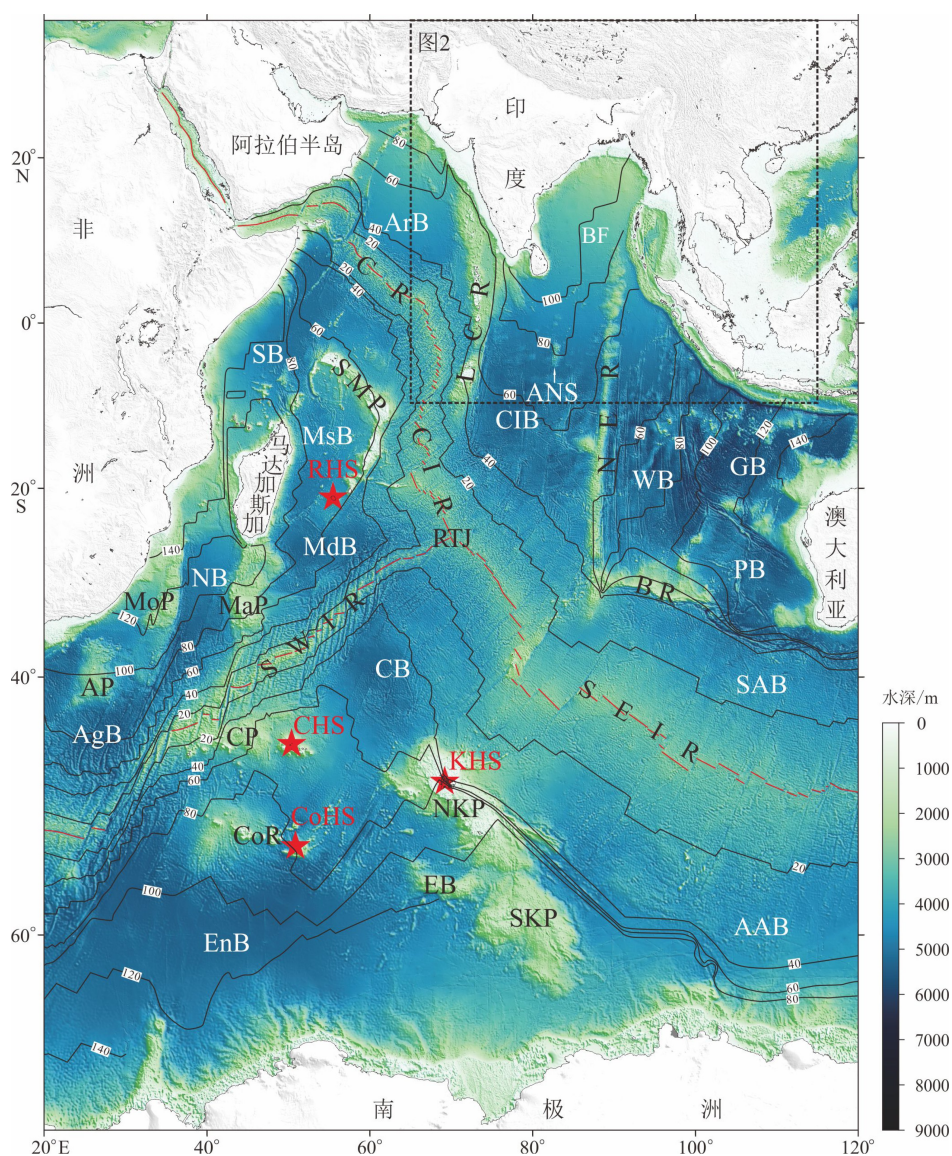


图 1 印度洋海底地形和构造单元简图

(地貌/构造单元名称据文献 [34-35], 水深数据来源 <https://www.gebco.net/>)

红色五星为热点, 黑色实线为洋底年龄等值线(单位 Ma), 红色实线为扩张中心。地貌和构造单元缩写: AAB. 澳大利亚-南极海盆, ArB. 阿拉伯海盆, AgB. 厄加勒斯海盆, ANS. 阿法纳西-尼基廷海山, AP. 厄加勒斯海底高原, BF. 孟加拉扇, BR. 布罗肯海脊, CB. 克罗泽海盆, CHS. 克罗泽热点, CIB. 中印度洋盆地, CIR. 中印度洋中脊, CoHS. 康拉德热点, CoR. 康拉德海脊, CP. 克罗泽海底高原, CR. 卡尔斯伯格海岭, EB. 艾朗浅滩, EnB. 恩德比海盆, GB. 加斯科因海盆, KHS. 凯尔盖朗热点, LCR. 拉克代夫-查戈斯海岭, MaP. 马达加斯加海底高原, MdB. 马达加斯加海盆, MoP. 莫桑比克海底高原, MsB. 马斯克林海盆, NB. 纳塔尔海盆, NER. 东经九十度海岭, NKP. 北凯尔盖朗海底高原, PB. 珀斯海盆, RHS. 留尼汪热点, RTJ. 罗德里格斯三联点, SAB. 南澳大利亚海盆, SB. 索马里海盆, SKP. 南凯尔盖朗海底高原, SMP. 塞舌尔-马斯克林海底高原, SEIR. 东南印度洋中脊, SWIR. 西南印度洋中脊, WB. 沃顿海盆。

Fig.1 Bathymetry of Indian Ocean and major topographic/tectonic features

(Names of the features after references [34-35], bathymetric data from <https://www.gebco.net/>)

The red stars are hotspots. The black lines are isochrones of the seafloor (Unit: Ma). The red lines are spreading centers. The black dashed rectangle outlines the area of Fig. 2. Abbreviations of topographic/ tectonic features are: AAB. Australian-Antarctic Basin, ArB. Arabian Basin, AgB. Agulhas basin, ANS. Afanasy-Nikitin Seamount, AP. Agulhas Plateau, BF. Bengal Fan, BR. Broken Ridge, CB. Crozet Basin, CHS. Crozet Hotspot, CIB. Central Indian Basin, CIR. Central Indian Ridge, CoHS. Conrad Hotspot, CoR. Conrad Ridge, CP. Crozet Plateau, CR. Carlsberg Ridge, EB. Elan Bank, EnB. Enderby Basin, GB. Gascoyne Basin, KHS. Kerguelen Hotspot, LCR. Laccadive-Chagos Ridge, MaP. Madagascar Plateau, MdB. Madagascar Basin, MoP. Mozambique Plateau, MsB. Mascarene Basin, NB. Natal Basin, NER. Ninety East Ridge, NKP. North Kerguelen Plateau, PB. Perth Basin, RHS. Reunion Hotspot, RTJ. Rodrigues Triple Junction, SAB. South Australian Basin, SB. Somalian Basin, SKP. South Kerguelen Plateau, SMP. Seychelles-Mascarene Plateau, SEIR. Southeast Indian Ridge, SWIR. Southwest Indian Ridge, WB. Wharton Basin.



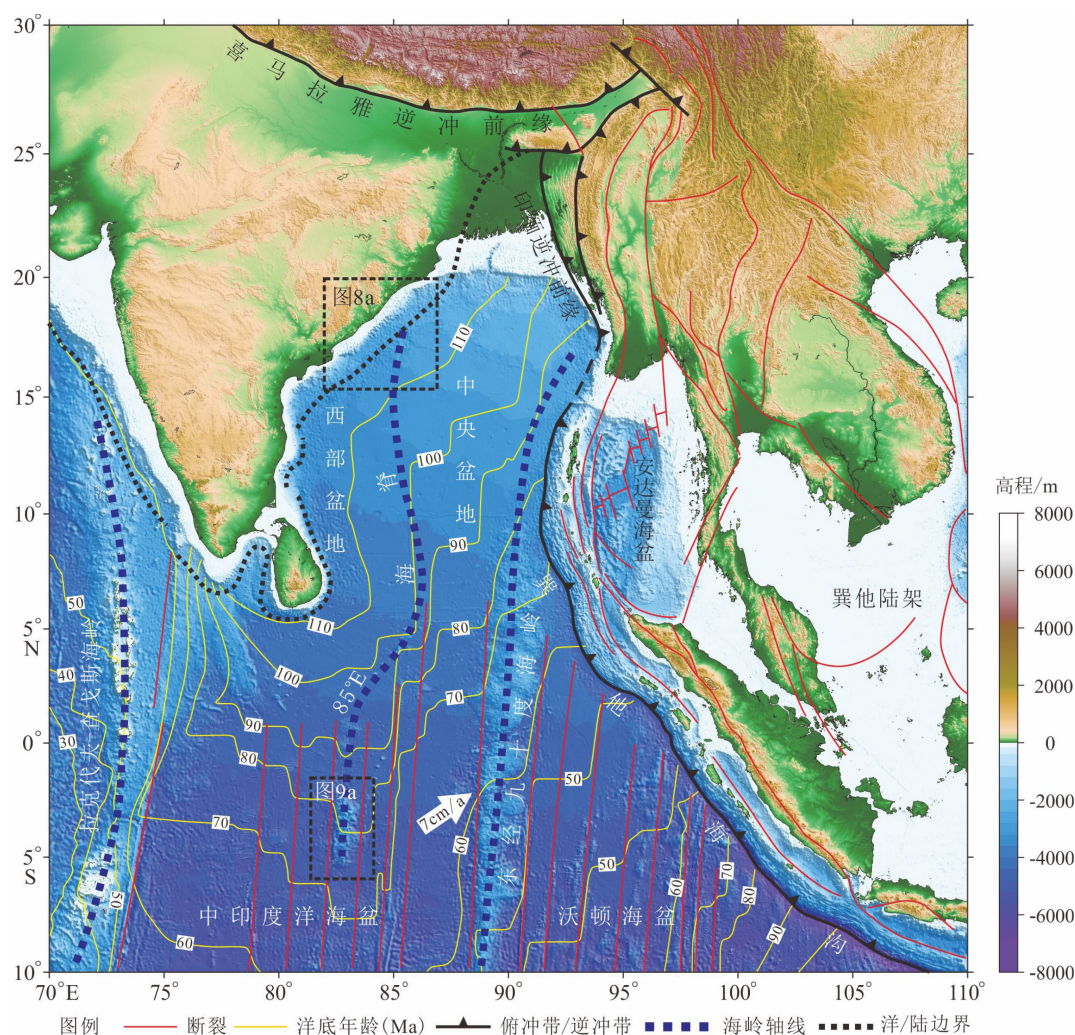


图2 孟加拉湾及邻区构造纲要图 (据文献[2, 34]修改, 水深数据来源 <https://www.gebco.net/>)

Fig.2 Tectonic map of the Bay of Bengal and adjacent regions (modified from references [2, 34], bathymetric data from <https://www.gebco.net/>)

近发生中断, 以北的 S1 段呈近 N-S 向, 与印度大陆边缘负异常交汇, 并可能经孟加拉陆架西缘继续向北延伸至锡隆高原的西南缘<sup>[8]</sup>; 10°~15°N 的 S2 段走向近 NNW-SSE 向, 异常宽度和幅值具有西北向南降低的趋势, 异常最宽处位于 13.5°N 附近; 4.5°~10°N 的 S3 段为近 N-S 向延伸的弱异常, 异常幅值较低; 1.5°~4.5°N 的 S4 段向西发生偏转, 总体呈现以斯里兰卡为圆心的弧形展布, 除了 4.5°N、85°E 附近与海山相对应的高异常外, 异常宽度和幅值变化不大。1.5°N 以南的 S5 段主要为多个团块状异常组成的近 N-S 向高异常带, 被 1°S 附近的低异常分隔为南北两部分, 北部高异常与 NNW-SSE 向的海山和埋藏海山相对应, 南部高异常与 N-S 向的阿法纳西-尼基廷海山相对应。赤道以南发育多条近 N-S 向的线性重力异常, 可能与古转换断层相对应。其中, 85°E 附近的两条线性异常自南向北延伸并与 85°E 海脊重叠。

## 2.2 地壳厚度和结构

目前主要通过三维重力计算以及重力、重-震、重-磁-震剖面联合反演等方法, 对 85°E 海脊的地壳厚度和结构进行了反演计算<sup>[8, 22, 30, 36-37]</sup>。结果表明, 85°E 海脊的地壳厚度与两侧盆地相比明显增厚(图 5)。10°~15°N 的海脊增厚作用最为显著, 结晶地壳厚度大于 8 km, 最厚可达 12~14 km, 比两侧厚约 4~6 km。2°~10°N 的海脊地壳增厚不明显, 海脊东侧的地壳与西侧相比略厚。2°N 以南的地壳增厚程度不同, 赤道附近的海山地壳略微增厚, 而阿法纳西-尼基廷海山的地壳显著增厚<sup>[11, 38]</sup>。

85°E 海脊自北向南的地壳结构和增厚方式存在差异(图 5)。北段(13°N 以北)主要表现为岩浆岩加积于洋壳之上, 导致主结晶地壳层的弹性下弯。中段(5°~13°N)以地壳底部的增厚作用为主, 且东、西两侧不对称, 西侧地壳顶、底厚度梯度较



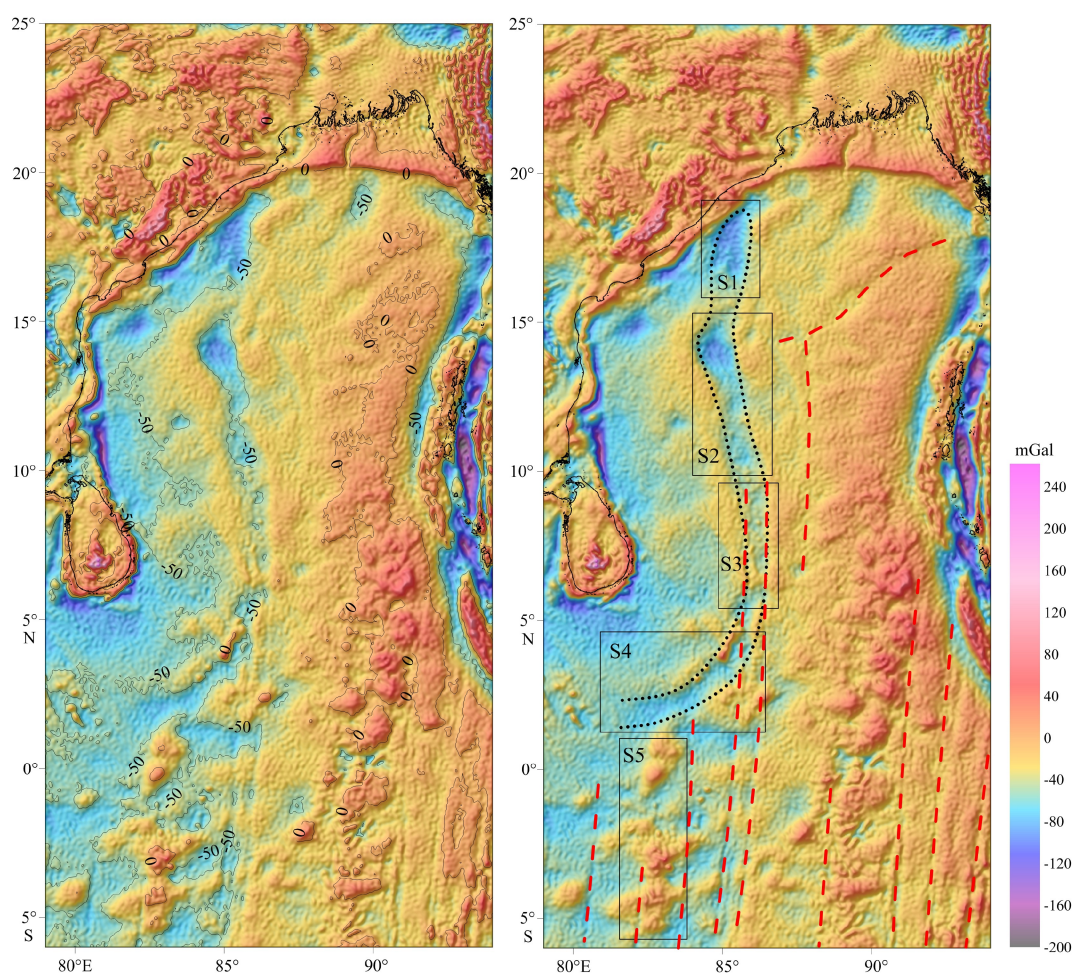


图 3 孟加拉湾空间重力异常图及解释 (数据来源 <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data>)

S1-S5 为海脊不同分段编号, 红色虚线为转换断层, 黑色点线圈定了 85°E 海脊的范围。

Fig.3 Free-air gravity anomaly map of the Bay of Bengal and some interpretations (gravity data from <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data>)

S1 to S5 indicate the segments of the ridge. The red dashed lines are the transform faults. The black dotted line delineates the 85°E Ridge.

大。南段 (5°S~2°N) 阿法纳西-尼基廷海山之下的地壳底部存在低密度物质形成的“山根”。

### 3 磁异常特征和洋底年龄

#### 3.1 磁异常特征

磁异常数据来源于全球磁异常网格 EMAG2 (Earth Magnetic Anomaly Grid, <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/emag2.html>), 由卫星、船载和航空磁测数据整合和统改后形成, 磁异常网格分辨率为  $2' \times 2'$ <sup>[39]</sup>。孟加拉湾及以南的中印度洋盆地和沃顿盆地均发育海底扩张成因的正、负交替磁异常条带, 磁异常条带被转换断层切割和错移 (图 6)。根据磁异常展布特征, 本区可以划分为两个磁异常分区: 西北部的磁异常条带大致平行于斯里兰卡和印度大陆东缘展布, 发育垂直于磁条带走向的 NW-

NWW 向转换断层; 东南部的磁异常条带呈近 E-W 向展布, 古转换断层走向为近 N-S 向。两个分区的洋壳均形成于东冈瓦纳大陆裂解过程中印度板块与南极板块之间的海底扩张<sup>[40-41]</sup>。西北部分区宽度约 500~700 km, 形成于晚侏罗世—早白垩世。早白垩世末发生板块重组和调整, 晚白垩世—始新世期间的海底扩张方向由早期的 NW-SE 向转变为 N-S 向<sup>[40-41]</sup>。

空间重力异常圈定的 85°E 海脊展布范围在磁异常图上具有分段性特点 (图 6)。12°N 以北的海脊位于西北部磁异常分区内, 对磁异常条带的展布产生了一定程度的干扰, 导致 12.5°~17°N 的 NE-SW 向磁异常条带发生顺时针偏转, 形成近 E-W 向的磁异常条带。2°~12°N 的海脊大致沿两个磁异常分区的边界延伸, 在 4°~12°N 为 N-S 向, 由 3~4 列串珠状分布的正/负磁异常组成, 2°~4°N 表现为一组以斯里兰卡为圆心的弧形正、负异常组合。2°N 以



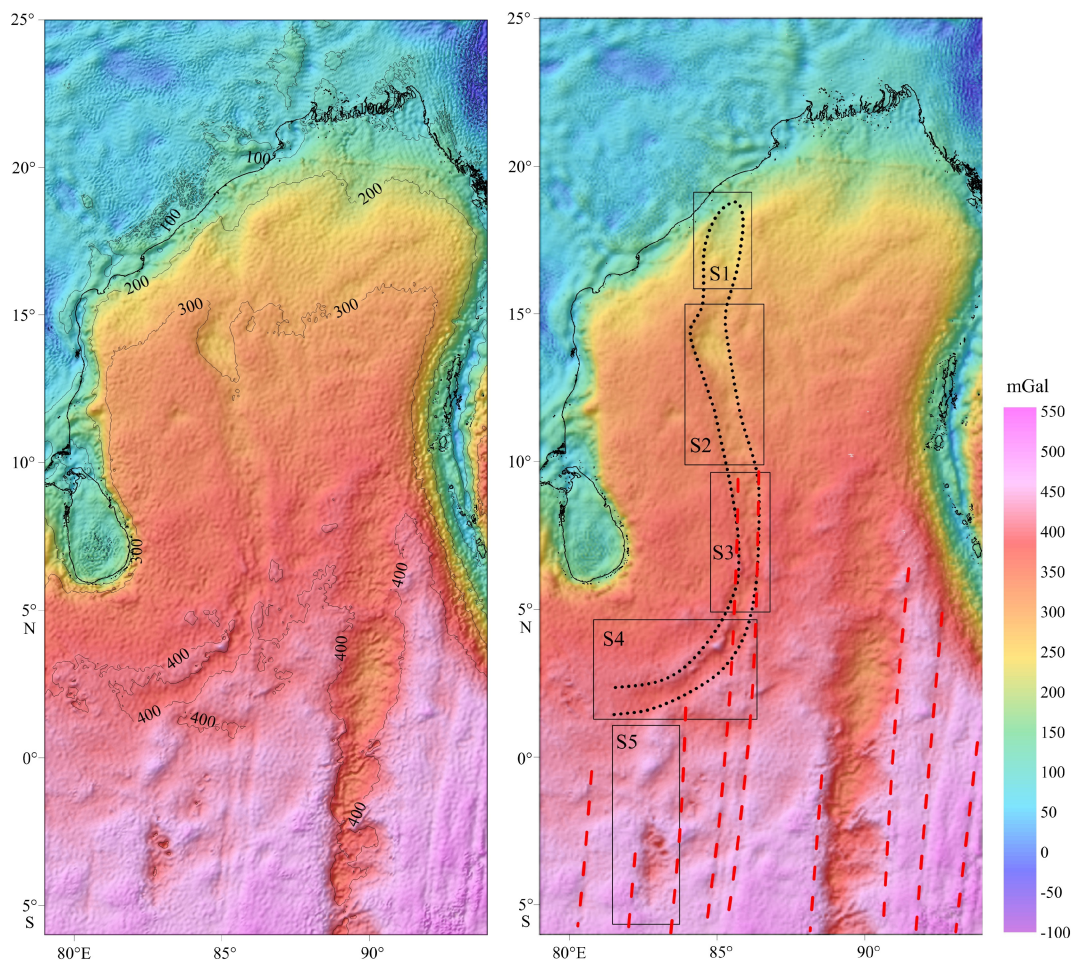


图4 孟加拉湾布格重力异常图及解释 (数据来源 <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data>)

S1-S5 为海脊不同分段编号, 红色虚线为转换断层, 黑色点线圈定了 85°E 海脊的范围。

Fig.4 Bouguer gravity anomaly map of the Bay of Bengal and some interpretations (gravity data from <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data>)

S1 to S5 indicate the segments of the ridge. The red dashed lines are the transform faults. The black dotted line delineates the 85°E Ridge.

南的埋藏海山和阿法纳西-尼基廷海山并没有表现出与海底地形和重力异常相对应的显著磁异常特征。

### 3.2 85°E 海脊两侧的洋底年龄

前人对孟加拉湾洋底年龄的研究, 主要通过识别船载磁测剖面上与洋底磁条带对应的异常信号, 并与标准地磁转向年代表及合成磁异常模型的对比来完成(图 7)。Ramana 等<sup>[40]</sup>在孟加拉湾中部识别出了中生代 M11-M0 磁异常条带, 认为其属于早白垩世东冈瓦纳大陆裂解形成洋壳的一部分。Banerjee 等<sup>[45]</sup>和 Rao 等<sup>[36]</sup>认为整个孟加拉湾地区的洋壳都是形成于白垩世中期。斯里兰卡以南的磁异常呈弧形, 并被 NNW-SSE 向的断裂带错断, 发育 M11-M0<sup>[41]</sup>或 M9-M0<sup>[21]</sup>磁异常条带。通过与南极洲北侧恩德比盆地的磁异常条带对比, Radhakrishna 等<sup>[46]</sup>、Gibbons<sup>[10]</sup>、Desa 等<sup>[44]</sup>认为, 白垩纪东印度洋 NW-SE 向的海底扩张一直持续至 102 Ma, 板块和

扩张体系的重组发生于 100 Ma 左右, 扩张方向变为近 N-S 向。因此, 孟加拉湾西北部及斯里兰卡外围磁异常区的洋底年龄为早白垩世, 约 136~102 Ma, 而孟加拉湾东南部磁异常区发育晚白垩世至古近纪洋壳, 洋底年龄小于 100 Ma。

## 4 形貌特征和内部结构

### 4.1 形貌特征

反射地震资料揭示的基底形态显示, 85°E 海脊的顶面形貌特征沿其走向方向存在显著变化。10°N 附近的 T6-11 剖面显示<sup>[29]</sup>, 海脊的尖峰位于其主体结构西侧 30~40 km, 峰顶深度约 4.5 km, 海脊主体深度约 6 km, 沉积层向海脊顶部缓慢上倾。13°N 附近的地震剖面显示<sup>[4, 47-48]</sup>, 海脊顶面具有非对称性, 西缘为陡坡, 向东缓倾, 总宽度超过 100 km,



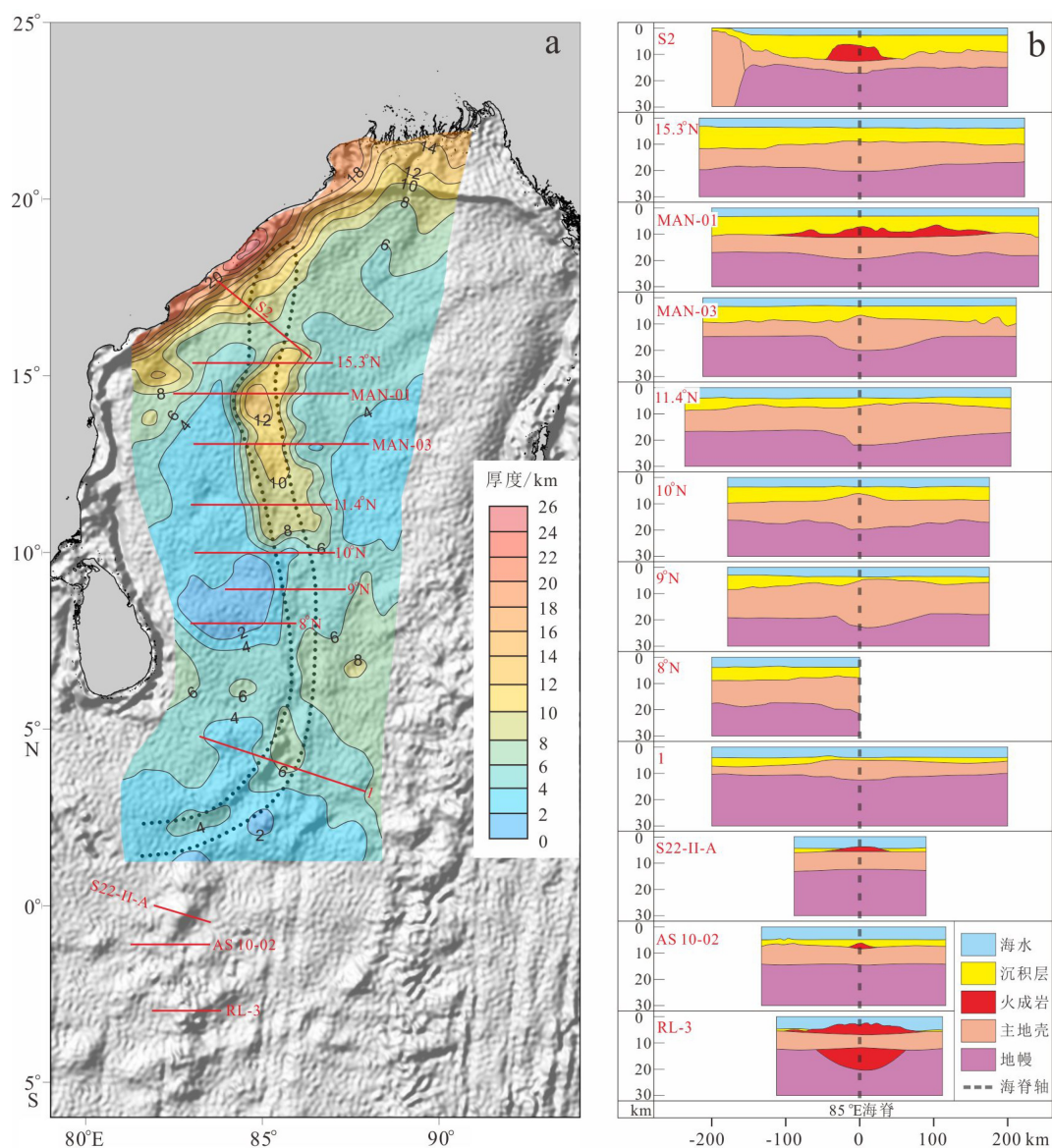


图 5 85°E 海脊及邻区结晶地壳厚度图 (a) 及地壳结构剖面 (b)

a. 底图为空间重力异常阴影图, 红色实线为剖面位置, 黑色点线为 85°E 海脊对应重力异常范围, 地壳厚度据文献 [30]; b. 黑色虚线为 85°E 海脊中轴。剖面来源: S2 来源于文献 [37], 15.3°N、11.4°N、10°N、9°N、8°N 来源于文献 [8], MAN-01 来源于文献 [22], MAN-03 来源于文献 [36], 1 来源于文献 [30], S22-II-A、AS 10-02、RL-3 来源于文献 [38]。

Fig.5 3-D crustal thickness (from acoustic basement to the Moho) of the 85°E ridge (a) and crustal structure profiles (b)

(a) The underlying map of the 3-D crustal thickness is the shaded free-air gravity map. The red solid lines show the locations of the profiles. The black dotted line delineates the 85°E Ridge. The 3-D crustal thickness is after reference [30]. (b) The black dashed line indicates the axis of the ridge.

Profiles are from: S2 from reference [37], 15.3°N、11.4°N、10°N、9°N、8°N from reference [8], MAN-01 from reference [22],

MAN-03 from reference [36], 1 from reference [30], S22-II-A、AS 10-02、RL-3 from reference [38].

晚白垩世—始新世沉积层向海脊逐渐超覆, 始新世之后海脊完全被沉积层覆盖。

85°E 海脊北段具有典型的火山机构形貌特征 [9, 37, 49-51], 顶部呈宽缓平滑的穹窿状, 两侧坡度较陡, 局部发育尖峰 (图 8)。晚始新世及更老地层终止于海脊边缘, 晚始新世至早渐新世地层逐渐向海脊顶部超覆。海脊北段在 18°N 附近分裂为东、西

两部分, 在地震剖面上表现为同一个丘状隆起的东、西两座山峰, 向北逐渐合并并隐没于印度东部大陆边缘之下。西侧海脊在 17°N 附近发生中断, 在其间隙和东、西两海脊之间的次级槽状盆地中充填了水平沉积层。

阿法纳西-尼基廷海山位于 1°45'~5°50'S、82°05'~83°30'E 之间, 南北长约 450 km, 东西宽约

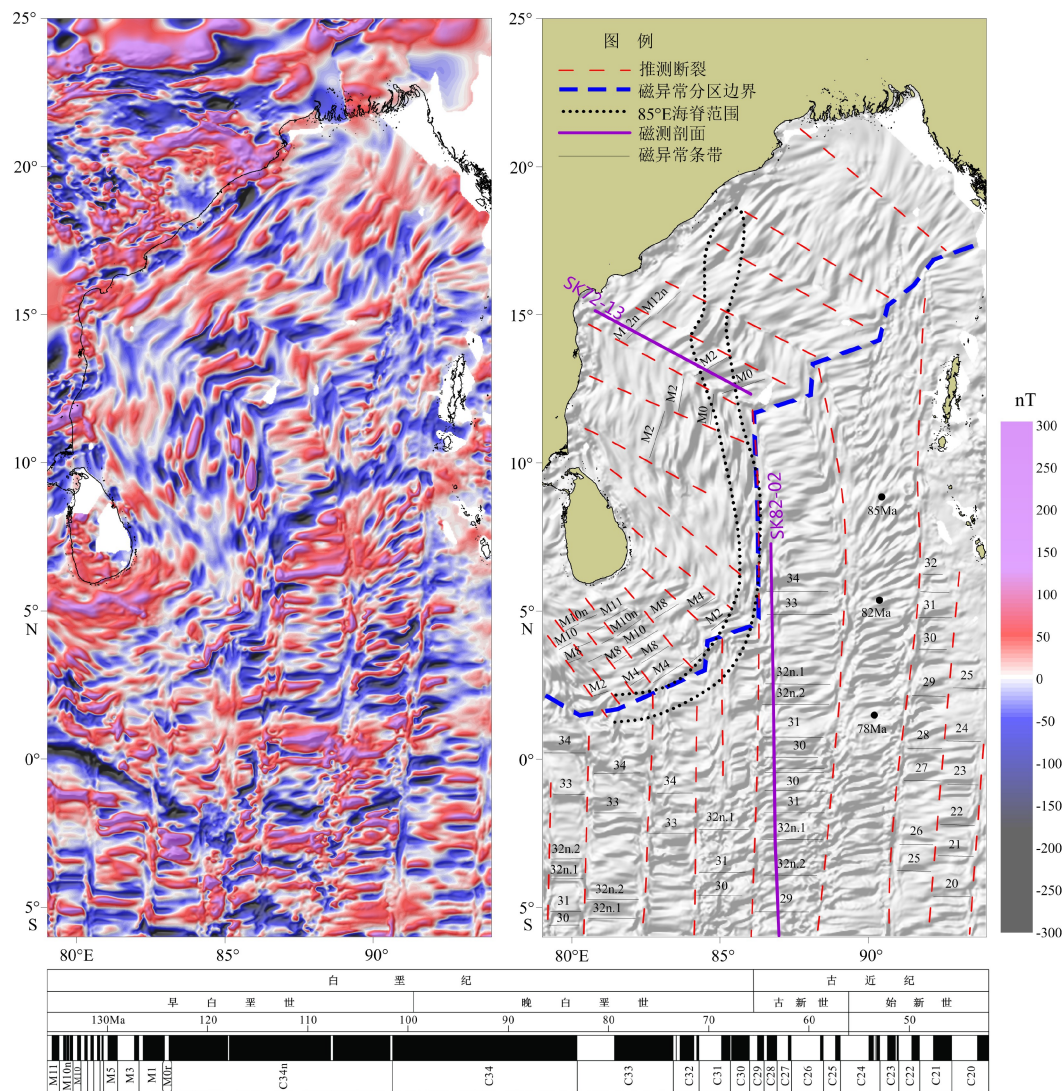


图 6 孟加拉湾磁力异常图及解释 (磁异常条带据文献 [24, 41-44], 地磁极性年代表据文献 [34])

Fig.6 Magnetic anomaly map of the Bay of Bengal and some interpretations (Magnetic lineation after references [24, 41-44].

The geomagnetic polarity scale is from reference [34])

150 km(图 9)。海山由下部的台基和台基之上的次级海丘组成。台基水深约 3600 m, 高出周围海底约 1200 m, 顶面较为平坦, 被中间宽约 50 km 的狭窄鞍部分为南、北两部分。西侧被 N-S 向的英迪拉断裂带所限, 坡度较陡, 15 km 宽度范围内的落差达 1000 m, 而东侧坡度较缓。北部台基之上发育多座圆锥形海山, 总体呈 N100°E 方向排列, 与周围海底古扩张中心方向平行, 表明岩浆作用可能沿着先存洋壳的薄弱带发生。其中两座为平顶海山, 顶部水深分别为 1600 和 2050 m, 在没入水下之前可能暴露于海面并遭受侵蚀作用。

## 4.2 内部地震反射结构

迄今为止, 能够较为清楚地揭示 85°E 海脊内部结构的多道地震剖面主要集中于印度东部岸外的

海脊北段[9, 37, 49-51]。北段的海脊内部地震反射结构具有海底火山机构的典型特征, 支持其火山成因[9]。海脊由火山通道喷出的溢流岩浆构筑而成, 形成于多期岩浆作用, 最多包含 5 个岩浆层序(图 8)。85°E 海脊内部识别出的进积斜层及其侵蚀顶面和海脊侧面滑塌的火山碎屑沉积物表明, 海脊经历了最初的水下基性火山喷发和后续的地表多期火山作用。火山作用停止后, 暴露于地表的海脊(表现为岛屿)发生沉降。但是总体上, 在火山活动停止后的 2~3 Ma 之内, 海脊仍然位于浅水环境, 在海脊顶部发育了透镜状的碳酸盐层序。至渐新世—中新世(约 23 Ma), 沉积物逐渐堆积并完全覆盖了海脊, 自此之后, 海脊被埋藏于孟加拉深海扇之下[9]。岩浆作用的加载导致周围岩石圈的下弯, 在海脊两侧形成线性凹陷, 凹陷中的先存地层向海脊倾斜, 同沉降期层序



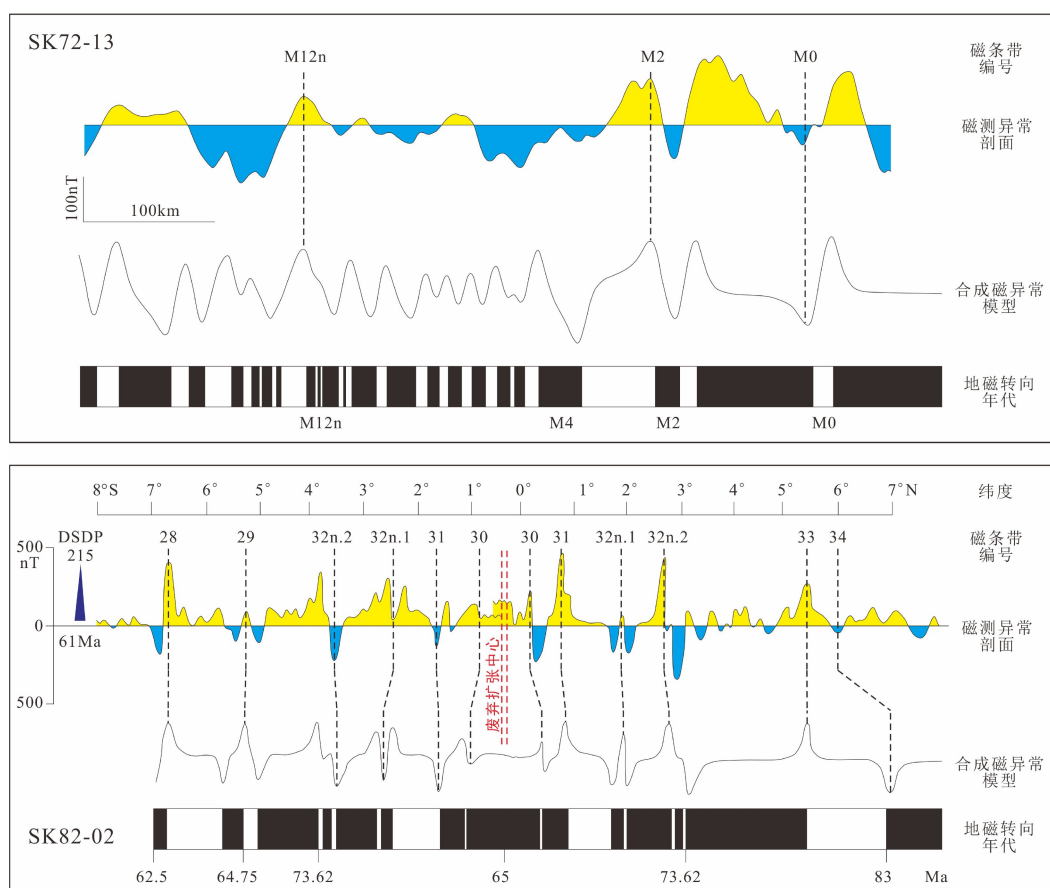


图 7 SK72-13 磁测剖面 (据文献 [24] 修改) 和 SK82-02 磁测剖面 (据文献 [43] 修改) 磁异常条带对比结果  
剖面位置见图 6; 注意: SK72-13 剖面高值区和低值区的界线不是 0 nT。

Fig. 7 Comparison of SK72-13 and SK82-02 magnetic profiles with the synthetic models  
(SK72-13 after reference [24], SK82-02 after reference [43])

Locations of the profiles are shown in Fig. 6. Note that the boundary of the high (yellow) and low (blue) anomalies on profile SK72-13 is not 0 nT.

填平补齐, 沉降期后无变形层序的整合覆盖, 共同记录了海脊的侵位过程<sup>[51]</sup>。

## 5 中生代东印度洋的海底扩张和板块重建结果

孟加拉湾大部分地区的洋底年龄为白垩纪, 由东冈瓦纳大陆的大印度板块和澳大利亚-南极板块两个大陆之间的海底扩张形成, 其共轭部分存在于南极洲东部大陆边缘的西恩德比盆地之下<sup>[19-24]</sup>。前人基于孟加拉湾及其共轭边缘磁异常条带识别和对比结果, 重建了中生代东印度洋的海底扩张过程<sup>[10, 22, 24, 35-36, 41, 43-44, 46]</sup>, 并刻画了构造发育和演变特征(图 10)。

东冈瓦纳大陆的裂解始于约 140 Ma, 破裂过程呈现穿时性<sup>[35]</sup>。分隔澳大利亚-南极洲板块和大印度板块的洋中脊形成于约 136 Ma, 自澳大利亚西北侧向南逐渐前展, 至 126 Ma 延伸至印度南端。两

板块之间的初始海底扩张方向为 NW-SE 向, 并一直延续至约 100 Ma。在约 115 Ma 发生了一次小规模板块重组, 扩张中心的中段向东北跃迁, 导致恩德比盆地东部地区洋中脊的消亡和洋壳的固化整合。这次跃迁同时导致艾朗浅滩从印度大陆东缘裂离, 形成孤立的微陆块, 并将南凯尔盖朗海底高原完全归并于澳大利亚-南极洲板块, 凯尔盖朗热点在扩张中心生成。随着凯尔盖朗热点的活动以及扩张作用的持续, 北凯尔盖朗海底高原逐渐增生并向南远离扩张中心。

东印度洋主要的板块重组和板块边界调整发生于 100 Ma 左右。扩张方向由 NW-SE 向转变为近 N-S 向, 扩张系统的基本格局以密集的长转换断层分割的短扩张中心为主。近 N-S 向的海底扩张形成了孟加拉湾东南部近 E-W 向的磁异常条带。92 Ma 的板块重建结果表明, 沿凯尔盖朗—86°E 断裂带的洋底转换活动已经开始。在凯尔盖朗地幔柱的影响下, 珀斯盆地停止了扩张, 扩张中心向北跃迁, 并将

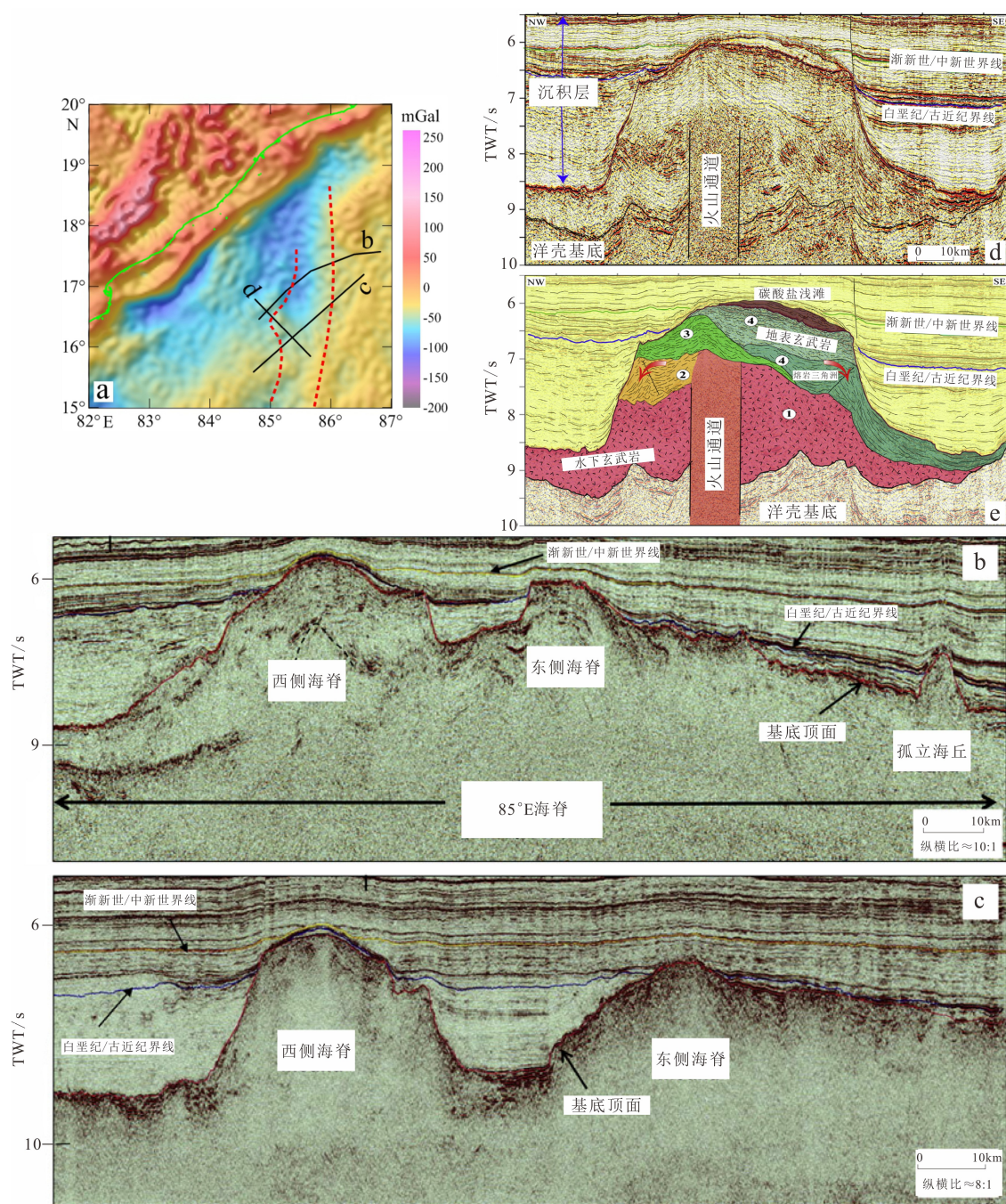


图 8 85°E 海脊北段的地震反射特征

a. 地震剖面位置, 底图为空间重力异常; b, c. 地震剖面及解释(据文献 [49]);

d, e. 海脊内部反射结构及火山机构特征(据文献 [9])。

Fig.8 Seismic reflection profiles showing the basement morphology and internal structures of the 85°E Ridge

a. profile locations overlying on the free-air gravity anomaly map; b and c. seismic reflection profiles and some interpretations(after reference [49]);

d and e. internal structure of the volcanic edifice ( after reference [9]).

部分印度板块的洋壳归并至南极-澳大利亚板块之上。84 Ma 的板块重建结果表明, 随着印度板块向北快速运动, 沿凯尔盖朗—86°E 断裂带发生了大规模转换运动, 澳大利亚板块与南极洲板块开始裂离, 在凯尔盖朗热点形成了一个三联点。此外, 康拉

德隆起以南的磁异常条带对比结果表明, 南极洲板块存在扩张中心向北跃迁形成的多余洋壳。

综上所述, 孟加拉湾主要由三期海底扩张作用形成 [22, 24, 37]。136~126 Ma 印度板块和澳大利亚-南极洲板块之间的初始张裂作用形成了印度大陆



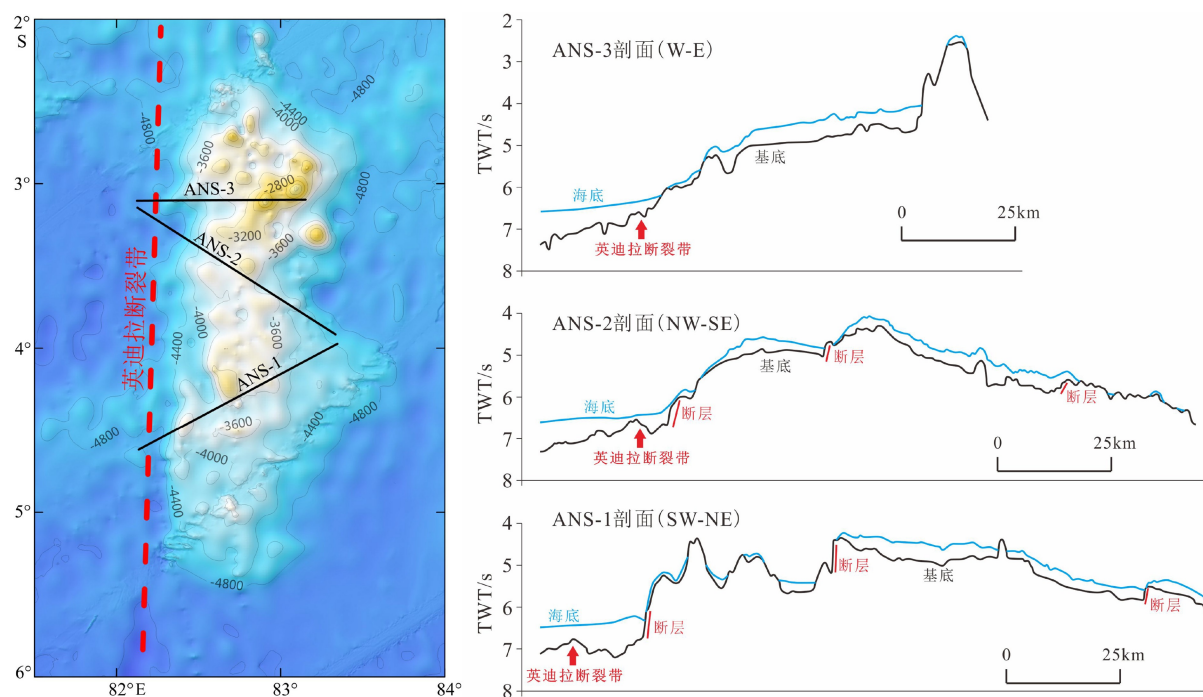


图9 阿法纳西-尼基廷海山海底地形(a)及基底形貌(b)(水深数据来源于 <https://www.gebco.net/>, 剖面据文献[11]修改)

Fig.9 Submarine topography of the Afanasy-Nikitin Seamount(a) and its basement morphology(b) (Bathymetric data from <https://www.gebco.net/>. Profiles are modified from reference [11])

东缘的过渡地壳和初生洋壳。126~100 Ma 的 NW-SE 向海底扩张形成孟加拉湾西北部平行于印度岸线的洋壳。100 Ma 以后,近 N-S 向的海底扩张形成孟加拉湾东南部和湾区以南的近 E-W 向洋壳。

## 6 讨论: 85°E 海脊的构造属性和成因机制

### 6.1 85°E 海脊低重力异常的成因

由于洋壳玄武岩的密度高于沉积物和海水,因此,由玄武岩组成的海脊或基底隆起会引起浅表层局部质量剩余,产生较高的重力异常,但 85°E 海脊却表现为显著的低重力异常。分析认为,85°E 海脊与其他无震海岭(如东经九十度海岭)的最大区别在于海脊北段完全被孟加拉深海扇厚层沉积物掩埋,沉积载荷的差异可能是导致 85°E 海脊重力负异常的主要原因。地壳均衡状态下的岩浆成因海脊,其重力异常主要包含由浅表层剩余质量形成的相对高重力异常和由深部低密度山根形成的相对低重力异常。沉积物埋藏作用对海脊重力效应的影响表现在两个方面:①包围浅部基底隆起的沉积物遭受压实,密度增大,降低了与海脊玄武岩之间的密度差,削弱了浅部质量剩余引起的高重力异常;②埋藏作用无法改变地壳整体结构,因而对深部山

根引起的低重力异常影响微弱。这两方面因素的叠加,会引起海脊的原有重力异常发生不同程度的降低。

前人针对 85°E 海脊低重力异常的成因开展了定性分析和定量计算。如 Liu 等<sup>[29]</sup>基于岩石圈弹性板模型,计算了沉积载荷对 85°E 海脊重力异常的影响,将海脊的形成过程分为 5~15 Ma 年轻大洋岩石圈之上的侵位过程和 40~80 Ma 较老大洋岩石圈的埋藏过程两阶段。海脊在接近均衡状态下侵位于抗弯强度较低的年轻岩石圈,其重力异常是正向地形产生的正异常和软流圈下凹产生的负异常的叠加。后期随着岩石圈冷却,抗弯强度增大,沉积物的加载堆积对山根重力效应的影响微弱,但是在浅部,由于沉积物的密度大于海水,减弱了海脊岩石与周围物质的密度差,从而整体上削弱了海脊的重力异常。与此相似,Krishna<sup>[38]</sup>、Radhakrishna 等<sup>[30]</sup>认为 85°E 海脊低重力异常产生的原因在于海脊两侧沉积物对其重力效应的削弱作用。已有折射地震和反射地震资料<sup>[2,31]</sup>表明,由于孟加拉深海扇巨厚沉积层对底层沉积物的压实作用,导致洋壳之上包围海脊的沉积物密度显著增大,在孟加拉湾中—北部甚至发生了绿片岩相变质作用。孟加拉湾北部深海扇的最大沉积厚度超过 20 km,向南逐渐减薄,这与 85°E 海脊负异常幅值自北向南减弱趋势一致。

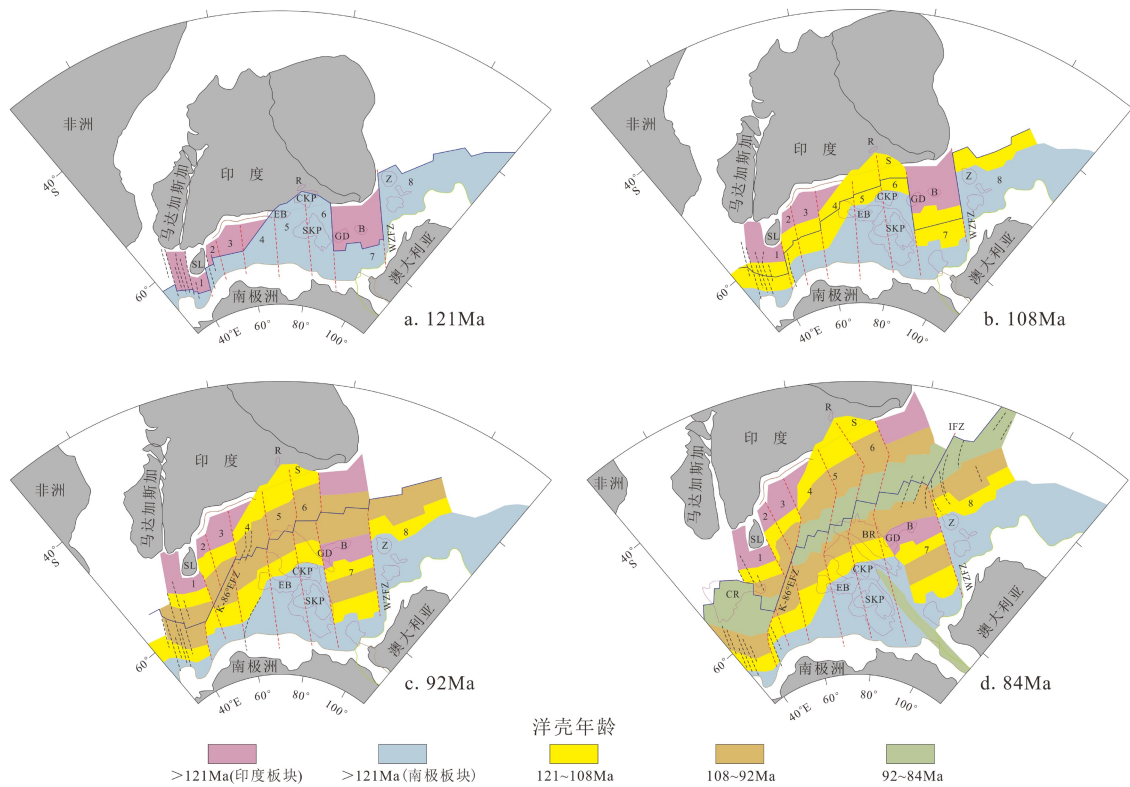


图 10 白垩纪东印度洋形成演化过程重建 (据文献 [44])

黑色虚线表示断裂带;蓝色粗实线代表活动的扩张中心;黑色粗虚线表示消亡的扩张中心;灰色阴影部分代表 85°E 海脊对应的重力低异常;红色虚线代表白垩纪早期—中期海底扩张方向的趋势线;粉色线圈定的区域代表大火成岩省或微陆块;红色点代表凯尔盖朗热点的可能位置;数字表示文中的共轭海底扩张区域;绿色虚线代表 M2 时期洋中脊向北跃迁后残留的转换断层。B. 巴塔维亚海山, BR. 布罗肯海岭, CKP. 中凯尔盖朗海底高原, CR. 康拉德隆起, EB. 艾朗海底高原, K-86°FZ. 凯尔盖朗—86°E 断裂带, R. 拉贾马尔块体, S. 锡尔赫特块体, SKP. 南凯尔盖朗海底高原, SL. 斯里兰卡, WZFZ. 瓦拉比—泽尼斯断裂带, Z. 泽尼斯海底高原。

Fig.10 Plate reconstruction models for Eastern Indian Ocean during Cretaceous (after reference [44])

Fracture zones are shown as thin black dashed lines. The active spreading ridge is shown as a thick blue line. Thick black dashed lines denote the extinct spreading ridges. The gravity low of the subsurface 85°E Ridge is shown in gray shade. Color shades as per legend denotes the ages of the underlying oceanic crust. The dashed red lines denote synthetic flow lines that border the inferred spreading corridors/zones and are drawn to understand the evolution of the Early to Middle Cretaceous crust. Large Igneous Provinces and inferred continental slivers are outlined in pink. Red circle denotes the probable location of the Kerguelen hotspot. The numbers represent conjugate spreading corridors. Green dashed lines mark the remnants of the transform fault along which the northward ridge jump took place at around M2 time. B. Batavia knoll, BR. Broken Ridge, CKP. Central Kerguelen Plateau, CR. Conrad Rise, EB. Elan Bank, K-86° FZ. Kerguelen-86°E Fracture Zone, R. Rajmahal Traps, S. Sylhet Traps, SKP. Southern Kerguelen Plateau, SL. Sri Lanka, WZFZ. Wallaby-Zenith Fracture Zone, Z. Zenith Plateau.

## 6.2 85°E 海脊的构造属性和成因机制

东北印度洋两条纵向基底隆起中,东经九十度海岭是印度板块北漂过程中经过凯尔盖朗地幔柱时形成的热点型海岭, DSDP、ODP 钻探结果也表明其年龄自北向南逐渐变新<sup>[52-56]</sup>。与东经九十度海岭显著的正向海底地形不同, 85°E 海脊深埋于孟加拉深海扇沉积物之下, 无法对其进行直接观测和取样, 导致目前对其结构构造、形成过程和成因机制等方面的认识仍然存在较大争议。

Mishra<sup>[3]</sup>认为 85°E 海脊是一个废弃的扩张中

心, 而 Chaubey 等<sup>[57]</sup>认为它是短期内岩浆沿着地壳薄弱带溢流形成。Mukhopadhyay 和 Krishna<sup>[52]</sup>认为海脊之下具有较厚的洋壳, 并且深部发育山根。Curry 和 Munasinghe<sup>[5]</sup>提出拉贾马尔地块、85°E 海脊和阿法纳西-尼基廷海山的形成与现今南印度洋克罗赛特热点的活动有关。Kent 等<sup>[7]</sup>认为 85°E 海脊是 86°E 断裂带向北的延伸, 而 Muller 等<sup>[6]</sup>提出 85°E 海脊和阿法纳西-尼基廷海山的形成与南极板块康拉德热点有关。根据海脊的地球物理场特征及其深埋性质, Ramana 等<sup>[4]</sup>认为, 海脊可能不是热点成因, 而是岩浆通过白垩纪中期板块重组期间形成的



线性裂缝/裂缝喷发所致。Ismail 等<sup>[9]</sup>利用多道地震资料对 85°E 海脊北段开展了火山地层学研究, 提出了海脊形成演化的六阶段模型。

在关于海脊成因的诸多假说中, 岩浆源(地幔热点、扩张中心)是最被广泛认可的一个, 能够合理解释海脊的结构和与之相关的异常地球物理特征, 并且在北段有确凿的地震剖面证据清晰地揭示了火山机构<sup>[9, 37, 49-51]</sup>。但是, 通过对地形地貌、重磁异常、多道地震剖面和相关计算结果的对比可见, 85°E 海脊具有明显的分段性特征, 不同分段成因机制迥异。

12.5°N 以北的 85°E 海脊北段具有典型的火山型外部形态和内部反射结构, 总体走向为近 N-S 向。海脊产生的磁异常呈近 E-W 向, 对原有洋壳 NE-SW 向的磁异常条带产生了干扰, 表明海脊北段是在 100 Ma 板块调整和重组以后的印度板块北漂过程中, 由热点型岩浆作用形成。在 5°~12°N, 与 85°E 海脊对应的重磁异常呈近 N-S 向延伸, 位于已经确认存在的 N-S 向转换断层的延长线上, 基底形态和地壳结构具有明显的非对称性。海脊在 5°N 附近向西南偏转, 在 2°~5°N 呈以斯里兰卡为圆心的弧形展布。总的来看, 2°~12°N 的 85°E 海脊与磁异常分区边界高度吻合, 代表了 100 Ma 前、后两种不同扩张体制的边界。据此推测, 本段的 85°E 海脊以构造成为主, 最初可能是板块重组过程中的废弃扩张中心或转换断层。作为构造薄弱带, 后期印度板块北缘和东缘俯冲碰撞的远程效应, 也导致了其构造活化并产生轻微的构造变形, 局部可能遭受了岩浆侵入。

6°S~2°N 分布着近 N-S 向的阿法纳西-尼基廷海山及其北侧的小型孤立海山和埋藏海山。虽然大部分研究认为阿法纳西-尼基廷海山是 85°E 海脊的一部分, 但是地球物理和地球化学资料提供的海脊侵位背景和时间序列等证据表明, 二者之间可能不存在成因上的直接联系<sup>[11]</sup>。热点型海岭侵位时的洋底构造环境对其最终地壳结构具有显著影响<sup>[51, 58]</sup>。侵位于较老大洋岩石圈之上的板内热点型海脊, 主要由离散的海山链组成, 其加载效应主要表现为大洋岩石圈的弹性下弯, 岩石圈有效弹性厚度较大; 侵位于扩张中心年轻大洋岩石圈之上的海脊, 主要表现为连续的海脊, 其加载效应符合艾利均衡模式, 深部发育低密度“山根”, 岩石圈有效弹性厚度较小。

根据地形和重力数据计算的阿法纳西-尼基廷海山地壳有效弹性厚度为 2~5 km<sup>[59-60]</sup>, 壳下存在厚

度约 8 km 的低密度“山根”(图 5)。而 85°E 海脊北段的地壳有效弹性厚度为 10~15 km, 侵位时洋壳年龄约为 25~35 Ma<sup>[38, 61]</sup>, 且洋壳存在显著的弹性下弯(图 8)。32n.1 号等磁异常条带几乎无间断穿过阿法纳西-尼基廷海山, 表明海山主体部分的年龄与周围洋壳一致, 海山顶部 OIB 型玄武岩 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 测年结果为 67 Ma, 可能叠加了后期岩浆作用<sup>[11]</sup>。如果 85°E 海脊和阿法纳西-尼基廷海山形成于同一个地幔热点, 考虑其超过 2600 km 的总长度以及洋底半扩张速率, 则海脊北段的形成时代可能超过 110 Ma, 与板块重建结果不符。因此, 85°E 海脊形成于板内热点活动, 而阿法纳西-尼基廷海山主要形成于洋中脊附近的热点活动, 是随着海底扩张逐渐侵位的热点型岩浆作用产物, 二者分别形成于两个不同的热点, 可能不存在成因上的关联。

## 7 小结和展望

综上所述, 85°E 海脊是一个不寻常的无震海脊, 其地球物理特征与世界上其他许多研究程度较高的无震海脊截然不同。海脊的形成可能与板内热点活动、热点-洋中脊相互作用、转换断层以及 100 Ma 左右东印度洋板块重组和扩张中心跃迁有关。海脊沿走向存在显著的分段性, 不同分段的结构、性质和成因机制不同。12°N 以北的海脊形成于印度板块北漂过程中的板内热点型岩浆作用。2°~12°N 的海脊与 NW-SE 向和 N-S 向两期海底扩张的边界高度吻合, 是白垩纪印度洋板块调整和重组的产物, 构造成因占主导地位。2°N 以南的阿法纳西-尼基廷海山是随着海底扩张逐渐侵位的热点型海脊, 与 2°N 以北的海脊不存在成因上的关联。

前人在东北印度洋海底年龄、扩张过程以及 85°E 海脊的性质和侵位过程研究中的不足之处, 主要在于构造单元的形成和构造地质事件的发生缺少准确的年代学约束。针对孟加拉湾洋底年龄的研究, 主要通过识别船载磁测剖面上与洋底磁条带对应的异常信号, 并与标准地磁剖面 and 地磁转向年代代表对比来完成。然而, 由于早期对孟加拉湾地区磁异常条带的分区特征和总体走向缺乏全面认识, 大部分磁力测线并没有沿垂直于磁异常条带走向的方向进行布设, 部分测线甚至穿越了两个不同的磁异常分区, 从而导致实测磁异常剖面与标准地磁转向年代代表对比的失真。目前, 虽然 DSDP-ODP-IODP 在孟加拉湾地区完成多个站位的钻探工作, 但是仅有为数不多的站位能够为洋底年龄提供有效约

束。在 85°E 及广阔的盆地区, 缺少来自基底洋壳岩石的准确年代学约束, 导致孟加拉湾地区磁异常条带的年龄存在多解性。

由于海脊被深埋在孟加拉深海扇沉积层之下, 对其内部结构的认识存在不足。通过本文的综述和分析, 我们认为, 2°~12°N 的海脊中段是深入认识海脊成因的关键区域, 但是目前针对该地区开展的调查研究工作较少。在本段部署和开展多道地震测量, 查明海脊内部结构, 进而优选站位, 开展钻探工作, 获取海脊岩石组成的信息, 并与阿法纳西-尼基廷海山、克罗赛特群岛、凯尔盖朗海底高原、康拉德隆起等地区的岩石进行对比, 将有助于破解 85°E 海脊的性质和起源、100 Ma 左右东印度洋板块重建过程以及地幔热点-洋中脊相互作用过程等重大构造地质问题。

### 参考文献 (References)

- [1] Curray J R, Emmel F J, Moore D G. The Bengal Fan: morphology, geometry, stratigraphy, history and processes [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19(10): 1191-1223.
- [2] Curray J R. The Bengal Depositional System: From rift to orogeny [J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 59-69.
- [3] Mishra D C. Magnetic crust in the Bay of Bengal [J]. *Marine Geology*, 1991, 99(1-2): 257-261.
- [4] Ramana M V, Subrahmanyam V, Chaubey A K, et al. Structure and origin of the 85°E ridge [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B8): 17995-18012.
- [5] Curray J R, Munasinghe T. Origin of the Rajmahal Traps and the 85°E Ridge: Preliminary reconstructions of the trace of the Crozet hotspot [J]. *Geology*, 1991, 19(12): 1237-1240.
- [6] Müller D, Royer J Y, Lawver L A. Revised plate motions relative to the hotspots from combined Atlantic and Indian Ocean hotspot tracks [J]. *Geology*, 1993, 21(3): 275-278.
- [7] Kent K W, Storey M, Saunders A D, et al. Comment and reply on "Origin of the Rajmahal Traps and the 85°E Ridge: Preliminary reconstructions of the trace of the Crozet hotspot" [J]. *Geology*, 1992, 20(10): 957-959.
- [8] Anand S P, Rajaram M, Majumdar T J, et al. Structure and tectonics of 85°E Ridge from analysis of Geopotential data [J]. *Tectonophysics*, 2009, 478(1-2): 100-110.
- [9] Ismaiel M, Krishna K S, Srinivas K, et al. Internal structure of the 85°E ridge, Bay of Bengal: Evidence for multiphase volcanism [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 80: 254-264.
- [10] Gibbons A D, Whittaker J M, Müller R D. The breakup of East Gondwana: Assimilating constraints from Cretaceous ocean basins around India into a best-fit tectonic model [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(3): 808-822.
- [11] Krishna K S, Bull J M, Ishizuka O, et al. Growth of the Afanasy Nikitin seamount and its relationship with the 85°E ridge, northeastern Indian Ocean [J]. *Journal of Earth System Science*, 2014, 123(1): 33-47.
- [12] 李江海, 程海艳, 赵星, 等. 残余洋盆的大地构造演化及其油气意义 [J]. *地质前缘*, 2009, 16(4): 40-51. [LI Jianghai, CHENG Haiyan, ZHAO Xing, et al. Tectonic evolution of remnant oceanic basin and its implication for hydrocarbon [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 40-51.]
- [13] Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia [J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1-4): 85-138.
- [14] Rowley D B, Currie B S. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet [J]. *Nature*, 2006, 439(7077): 677-681.
- [15] Alam M, Alam M M, Curray J R, et al. An overview of the sedimentary geology of the Bengal Basin in relation to the regional tectonic framework and basin-fill history [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 155(3-4): 179-208.
- [16] Curray J R. Tectonics and history of the Andaman Sea region [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 25(1): 187-232.
- [17] Steckler M S, Akhter S H, Seeber L. Collision of the Ganges-Brahmaputra Delta with the Burma Arc: Implications for earthquake hazard [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 273(3-4): 367-378.
- [18] Maurin T, Rangin C. Impact of the 90°E ridge at the Indo-Burmese subduction zone imaged from deep seismic reflection data [J]. *Marine Geology*, 2009, 266(1-4): 143-155.
- [19] Curray J R, Emmel F J, Moore D G, et al. Structure, tectonics, and geological history of the northeastern Indian ocean [M]//The Ocean Basins and Margins. Boston, MA: Springer, 1982: 399-450.
- [20] Royer J Y, Sandwell D T. Evolution of the eastern Indian Ocean since the Late Cretaceous: Constraints from Geosat altimetry [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B10): 13755-13782.
- [21] Gaina C, Müller R D, Brown B, et al. Breakup and early seafloor spreading between India and Antarctica [J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 170(1): 151-169.
- [22] Krishna K S, Michael L, Bhattacharyya R, et al. Geoid and gravity anomaly data of conjugate regions of Bay of Bengal and Enderby Basin: New constraints on breakup and early spreading history between India and Antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114: B03102.
- [23] Veevers J J. Change of tectono-stratigraphic regime in the Australian plate during the 99 Ma (mid-cretaceous) and 43 Ma (mid-Eocene) swerves of the Pacific [J]. *Geology*, 2000, 28(1): 47-50.
- [24] Talwani M, Desa M A, Ismaiel M, et al. The Tectonic origin of the Bay of Bengal and Bangladesh [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(7): 4836-4851.
- [25] Peirce J W. The northward motion of India since the Late Cretaceous [J]. *Geophysical Journal International*, 1978, 52(2): 277-311.
- [26] Duncan R A, Richards M A. Hotspots, mantle plumes, flood basalts, and true polar wander [J]. *Reviews of Geophysics*, 1991, 29(1): 31-50.



- [27] Coffin M F, Pringle M S, Duncan R A, et al. Kerguelen hotspot magma output since 130 Ma [J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43 (7): 1121-1137.
- [28] Curray J R, Moore D G. Growth of the Bengal deep-sea fan and denudation in the Himalayas [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1971, 82 (3): 563-572.
- [29] Liu C S, Sandwell D T, Curray J R. The negative gravity field over the 85°E ridge [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1982, 87 (B9): 7673-7686.
- [30] Radhakrishna M, Subrahmanyam C, Damodharan T. Thin oceanic crust below Bay of Bengal inferred from 3-D gravity interpretation [J]. *Tectonophysics*, 2010, 493 (1-2): 93-105.
- [31] Curray J R. Sediment volume and mass beneath the Bay of Bengal [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 125 (1-4): 371-383.
- [32] Bonvalot S, Balmino G, Briais A, et al. World Gravity Map[M]. Commission for the Geological Map of the World. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD, Paris, 2012.
- [33] Balmino G, Vales N, Bonvalot S, et al. Spherical harmonic modelling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86 (7): 499-520.
- [34] 李江海, 李洪林, 韩喜球. 印度洋底大地构造图[M]. 北京: 地质出版社, 2015. [LI Jianghai, LI Honglin, HAN Xiqiu. Tectonic Map of the Indian Ocean[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.]
- [35] Yatheesh V, Dymert J, Bhattacharya G C, et al. Detailed structure and plate reconstructions of the Central Indian Ocean between 83.0 and 42.5 Ma (Chronos 34 and 20) [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124 (5): 4305-4322.
- [36] Rao D G, Krishna K S, Sar D. Crustal evolution and sedimentation history of the Bay of Bengal since the Cretaceous [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102 (B8): 17747-17768.
- [37] Desa M A, Ramana M V, Ramprasad T, et al. Geophysical signatures over and around the northern segment of the 85°E Ridge, Mahanadi offshore, Eastern Continental Margin of India: Tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 73: 460-472.
- [38] Krishna K S. Structure and evolution of the Afanasy Nikitin seamount, buried hills and 85°E Ridge in the northeastern Indian Ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 209 (3-4): 379-394.
- [39] Maus S, Barckhausen U, Berkenbosch H, et al. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, 10 (8): Q08005.
- [40] Ramana M V, Nair R R, Sarma K V L N S, et al. Mesozoic anomalies in the Bay of Bengal [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 121 (3-4): 469-475.
- [41] Desa M, Ramana M V, Ramprasad T. Seafloor spreading magnetic anomalies south off Sri Lanka [J]. *Marine Geology*, 2006, 229 (3-4): 227-240.
- [42] Krishna K S, Rao D G, Ramana M V, et al. Tectonic model for the evolution of oceanic crust in the northeastern Indian Ocean from the Late Cretaceous to the Early Tertiary [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100 (B10): 20011-20024.
- [43] Krishna K S, Rao D G. Abandoned Paleocene spreading center in the northeastern Indian Ocean: evidence from magnetic and seismic reflection data [J]. *Marine Geology*, 2000, 162 (2-4): 215-224.
- [44] Desa M A, Ramana M V. Middle cretaceous geomagnetic field anomalies in the eastern Indian Ocean and their implication to the tectonic evolution of the bay of Bengal [J]. *Marine Geology*, 2016, 382: 111-121.
- [45] Banerjee B, Sengupta B J, Banerjee P K. Signals of Barremian (116 Ma) or younger oceanic crust beneath the Bay of Bengal along 14 °N latitude between 81 °E and 93 °E [J]. *Marine Geology*, 1995, 128 (1-2): 17-23.
- [46] Radhakrishna M, Srinivasa R G, Nayak S, et al. Early Cretaceous fracture zones in the Bay of Bengal and their tectonic implications: Constraints from multi-channel seismic reflection and potential field data [J]. *Tectonophysics*, 2012, 522-523: 187-197.
- [47] Subrahmanyam C, Thakur N K, Rao T G, et al. Tectonics of the Bay of Bengal: new insights from satellite-gravity and ship-borne geophysical data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171 (2): 237-251.
- [48] Subrahmanyam V, Krishna K S, Murthy I V R, et al. Gravity anomalies and crustal structure of the Bay of Bengal [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192 (3): 447-456.
- [49] Bastia R, Radhakrishna M, Das S, et al. Delineation of the 85°E ridge and its structure in the Mahanadi Offshore Basin, Eastern Continental Margin of India (ECMI), from seismic reflection imaging [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27 (9): 1841-1848.
- [50] Bastia R, Radhakrishna M, Srinivas T, et al. Structural and tectonic interpretation of geophysical data along the Eastern Continental Margin of India with special reference to the deep water petroliferous basins [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39 (6): 608-619.
- [51] Choudhuri M, Nemčok M, Melichar R, et al. Propagation of hotspot volcanism driven flexure in oceanic crust -85°E Ridge case study [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 82: 134-153.
- [52] Mukhopadhyay M, Krishna M B R. Gravity anomalies and deep structure of the Ninetyeast Ridge north of the equator, eastern Indian Ocean-a hot spot trace model [J]. *Marine Geophysical Researches*, 1995, 17 (2): 201-216.
- [53] Krishna K S, Neprochnov Y P, Rao D G, et al. Crustal structure and tectonics of the Ninetyeast Ridge from seismic and gravity studies [J]. *Tectonics*, 2001, 20 (3): 416-433.
- [54] Krishna K S, Abraham H, Sager W W, et al. Tectonics of the Ninetyeast Ridge derived from spreading records in adjacent oceanic basins and age constraints of the ridge [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117 (B4): B04101.
- [55] Sreejith K M, Krishna K S. Spatial variations in isostatic compensation mechanisms of the Ninetyeast Ridge and their tectonic significance [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118 (10): 5165-5184.
- [56] Kumar R T R, Windley B F. Spatial variations of effective elastic thickness over the Ninetyeast Ridge and implications for its structure and tectonic evolution [J]. *Tectonophysics*, 2013, 608: 847-856.
- [57] Chaubey A K, Ramana M V, Sarma K V L N S, et al. Marine geophysical studies over the 85°E Ridge[M]//First Int. Sem. Exhbn. on Exploration Geophysics in Nineteen Nineties. AEG Pub In., Vol. 2,

- 1991: 508-515.
- [58] Honsho C, Tamaki K. Differences in morphology and Structure between hotspot tracks: Effects of the lithospheric age at the time of formation [M]//Yukutake T. The Earth's Central Part: its Structure and Dynamics. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1995: 331-342.
- [59] Karner G D, Weissel J K. Compressional deformation of oceanic lithosphere in the central Indian Ocean: Why it is, where it is [M]//Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. College Station, Texas: Ocean Drilling Program, 1990, 116: 279-289.
- [60] Paul J, Singh R N, Subrahmanyam C, et al. Emplacement of Afanasy-Nikitin seamount based on transfer function analysis of gravity and bathymetry data [J]. [Earth and Planetary Science Letters](#), 1990, 96 (3-4): 419-426.
- [61] Sreejith K M, Radhakrishna M, Krishna K S, et al. Development of the negative gravity anomaly of the 85°E Ridge, northeastern Indian Ocean-a process oriented modeling approach [J]. [Journal of Earth System Science](#), 2011, 120 (4): 605-615.