



**孟加拉深海扇大洋钻探研究：科学问题与钻探前景**

胡 刚, 杜学鑫, 祝文君, 尚鲁宁, 李攀峰, 尉 佳, 孟元库, 雷宝华, 虞义勇, 王小杰

**Progresses of ocean drilling in Bengal Fan: Scientific issues and drilling prospect**

HU Gang, DU Xuexin, ZHU Wenjun, SHANG Luning, LI Panfeng, WEI Jia, MENG Yuanku, LEI Baohua, YU Yiyong, and WANG Xiaojie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022061402>

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**



关注微信公众号，获得更多资讯信息

胡刚, 杜学鑫, 祝文君, 等. 孟加拉深海扇大洋钻探研究: 科学问题与钻探前景 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 1-15.  
HU Gang, DU Xuexin, ZHU Wenjun, et al. Progresses of ocean drilling in Bengal Fan: Scientific issues and drilling prospect [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 1-15.

# 孟加拉深海扇大洋钻探研究: 科学问题与钻探前景

胡刚<sup>1,2</sup>, 杜学鑫<sup>1,3</sup>, 祝文君<sup>1,3</sup>, 尚鲁宁<sup>1</sup>, 李攀峰<sup>1</sup>, 尉佳<sup>1</sup>, 孟元库<sup>3</sup>, 雷宝华<sup>1</sup>,  
虞义勇<sup>1</sup>, 王小杰<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
2. 自然资源部海岸带科学与综合管理重点实验室, 青岛 266061
3. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590

**摘要:** 孟加拉深海扇是连接高原与深海“源-汇”过程的转换带, 不仅是板块漂移与碰撞过程的重要产物, 而且其巨厚的沉积层是研究构造隆升与沉积演化等相关核心科学问题的天然“档案室”。前人基于钻探样品及地球物理资料, 获取了孟加拉扇早渐新世以来沉积演化过程、90°E 海岭性质与演化、南亚季风形成与变化等科学问题的重要认识。但埋藏于海底的大型线性基底性质的争议和扇体对隆升过程全时序沉积揭示的不足, 直接制约了南亚季风形成时限、板块碰撞过程的构造特征和扇体物源时空转换等关键科学问题的揭示。因此, 在存在构造隆升过程完整沉积记录并同时兼顾特殊构造地区开展大洋钻探, 有利于上述科学问题的揭示。依据在扇体下游合理位置新近获取的高质量多道地震数据, 查明了孟加拉深海扇下游地区的基底起伏、完整沉积层结构和构造发育特征, 并在此基础上针对孟加拉深海扇全时序地层序揭露不完整、玄武岩洋壳年龄和特殊构造性质等钻探科学目标, 选取了该地区未来 3 个科学钻探井位, 并分别对其开展了井位标定与岩性预测, 钻探实施不仅对解决以青藏高原为核心的地球系统科学前沿具有重要科学意义, 而且对服务我国自有大洋钻探船钻探井位储备具有现实意义。

**关键词:** 源汇过程; 深海钻探; 构造演化; 高原隆升; 孟加拉深海扇

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022061402

## Progresses of ocean drilling in Bengal Fan: Scientific issues and drilling prospect

HU Gang<sup>1,2</sup>, DU Xuexin<sup>1,3</sup>, ZHU Wenjun<sup>1,3</sup>, SHANG Luning<sup>1</sup>, LI Panfeng<sup>1</sup>, WEI Jia<sup>1</sup>, MENG Yuanku<sup>3</sup>, LEI Baohua<sup>1</sup>,  
YU Yiyong<sup>1</sup>, WANG Xiaojie<sup>1</sup>

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao, 266237, China
2. Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management, Ministry of Natural Resources, Qingdao, 266061, China
3. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, 266590, China

**Abstract:** The Bengal Fan is not only a source-sink transition zone connecting the plateau and the deep sea, but also an important product of plates drift and collision. Its deep sedimentary records are the natural archives of the India-Eurasia plate collision, the uplift and erosion process of the Qinghai Tibet Plateau and the evolution of climate and environment. We summarized the drilling expeditions and the latest research progress focusing on the sedimentary process and climate evolution since the late Miocene, the nature and evolution of the 90°E Ridge, and the formation of the South Asian monsoon in the Bengal Fan. However, constrained by drilling capacity and scientific targets, the full time sedimentary strata, the age and structural characteristics of the underlying oceanic crust in the Bengal Fan have not been effectively revealed which hinders the research on the long-time scale source to sink transition, the South Asia Mosoon formation and plate reconstruction. Based on the recently acquired high-quality multi-channel seismic data, the basement fluctuation, sedimentary structure and tectonic development characteristics of the Bengal Fan downstream are interpreted. Furthermore, we proposed three future scientific drilling locations which aim at the scientific drilling objectives including the complete sedimentary strata, age of oceanic crust basalt, and special structure characteristics. Well calibration and lithology prediction are carried out for these proposed drillings respectively. These proposed drillings are not only contributed to the reserve of scientific drilling for Chinese Ocean

资助项目: 中国地质调查局海洋地质调查项目 (DD20190236, DD20221710, DD20221720); 自然资源部海岸带科学与综合管理重点实验室开放基金 (2021COSIMZ003)

作者简介: 胡刚 (1979—), 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: hugang@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 胡刚 (1979—), 男, 正高级工程师, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: hugang@mail.cgs.gov.cn

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

收稿日期: 2022-06-14; 改回日期: 2022-07-27. 张现荣编辑

Drilling Vessel, but also significant for solving the frontier scientific issues of the Qinghai Tibet Plateau.

**Key words:** process of source to sink; deep-sea drilling; tectonic evolution; uplift; Bengal Fan

孟加拉湾位于东北印度洋,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>[1]</sup>,其洋壳由白垩纪期间东冈瓦纳大陆裂解过程中大印度板块和澳大利亚-南极板块之间的海底扩张形成<sup>[2-5]</sup>。孟加拉深海扇是全球最大的海底沉积体之一,形成了覆盖在孟加拉湾洋壳之上的巨厚沉积层,并向南延伸至赤道附近的中印度洋海盆<sup>[6-8]</sup>,其物源主要来自喜马拉雅山和青藏高原隆升剥蚀产生的碎屑物质<sup>[9]</sup>。从最高的青藏高原到最大的深海扇,喜马拉雅山及青藏高原物质经侵蚀并经河流输运至孟加拉扇沉积是一个典型的“源-汇”过程,孟加拉扇成为多圈层地球系统科学研究的重点区域,是构造地质学、沉积学、古海洋学以及全球变化研究的热点地区。迄今为止,DSDP-ODP-IODP在孟加拉湾及邻区共完成了5个航次31个站位的钻探工作(图1),其中最大钻进深度为1181.3 m(IODP354航次U1451站位)。该地区深海钻探的实施为“青藏高原抬升剥蚀过程”、“高原新生代构造隆升对气候变化的驱动效应”、“90°E海岭的年龄和成因机制”以及“中生代东冈瓦纳大陆破裂和东北印度洋海底扩张过程”等重大科学问题的研究提供了基础,但研究时限与隐伏线性构造属性认识的不足制约着上述科学问题的进一步发展。

现在是认识过去的钥匙,洋底连续稳定的沉积记录是地质时期气候环境、构造演化的真实记录,是可供研究的天然“档案室”。印度板块-欧亚板块碰撞和喜马拉雅山、青藏高原的隆升剥蚀过程在孟加拉深海扇留下了完整沉积记录。同时,这一新生代期间全球最重要的构造地质事件导致的区域性和全球性的气候、环境变迁,也通过沉积速率、矿物组合特征、微体古生物类型以及同位素组成的变化等多种形式,在沉积层中得以完整保留。孟加拉湾洋底构造和洋底年龄分布特征复杂,是揭示白垩纪以来东冈瓦纳大陆裂解、印度板块北漂和东北印度洋海底扩张过程并开展板块重建的重要窗口,有助于深入理解热点活动、热点-扩张中心相互作用、扩张中心跃迁等复杂地球动力过程的成因机制。

## 1 区域地质背景

孟加拉扇在1953年首次由Dietz发现,1971年由Curry和Moore组织进行了第一次系统调查和

研究<sup>[10]</sup>,正式命名为孟加拉扇。严格意义上的孟加拉扇位于90°E海岭以西,90°E海岭以东的扇体被称为尼科巴扇(图1)。

孟加拉扇的面积约为 $(2.8\sim 3.0)\times 10^6$  km<sup>2</sup>,长度为2 800~3 000 km,从20°N向南延伸至7°S左右;宽度为830~1 400 km,最大宽度约1 400 km,位于15°N附近,最狭窄处位于6°N附近的斯里兰卡和90°E海岭之间,宽约830 km。孟加拉湾表层环流受印度季风控制,呈现明显的季节变化:冬季盛行东北风,表层环流呈逆时针方向;夏季盛行西南风,表层环流呈顺时针方向。

孟加拉湾地貌主要是90°E海岭和85°E海脊两条近N-S向线性基底隆起分隔形成的隆-拗相间的分布格局。90°E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>[11-13]</sup>,东西两侧分别为沃顿海盆和中央海盆。85°E海脊大部分深埋于孟加拉深海扇沉积层之下,最早由Curry和Moore(1971)识别和标定,表现为一条显著的低自由空间重力异常带<sup>[10,14-15]</sup>。海脊西侧的西部海盆沉积物厚度约为6~8 km,东侧的中央海盆沉积物厚度约为8~10 km,海脊顶部的沉积物厚度约为2~3 km<sup>[16]</sup>。

孟加拉深海扇海底地形极为平坦,是全球最平坦的地区之一。纵向上,水深由扇顶附近约1 400 m,向南逐渐增加,扇体远端的水深超过5 000 m。横向上,中—上游地区扇体轴部高于扇体边缘,而中下游地区变化不大。孟加拉深海扇可以分为上、中、下3部分,上部、中部和下部扇区的界限分别与约2 250和2 900 m等深线相对应。

## 2 孟加拉深海扇钻探航次目标与初步认识

### 2.1 DSDP22航次

DSDP22航次利用Glomar Challenger号于1972年完成8个站位(211—218)的钻探工作,总进尺4 663 m,取芯段长度2 543 m,成功取芯1 380 m,取芯率54%。DSDP22航次主要聚焦4个科学目标:①查明沃顿盆地的年龄和成因模式;②获取90°E海岭及其两侧详细的岩性地层和生物地层层序;③确定90°E海岭的成因模式;④厘定孟加拉深

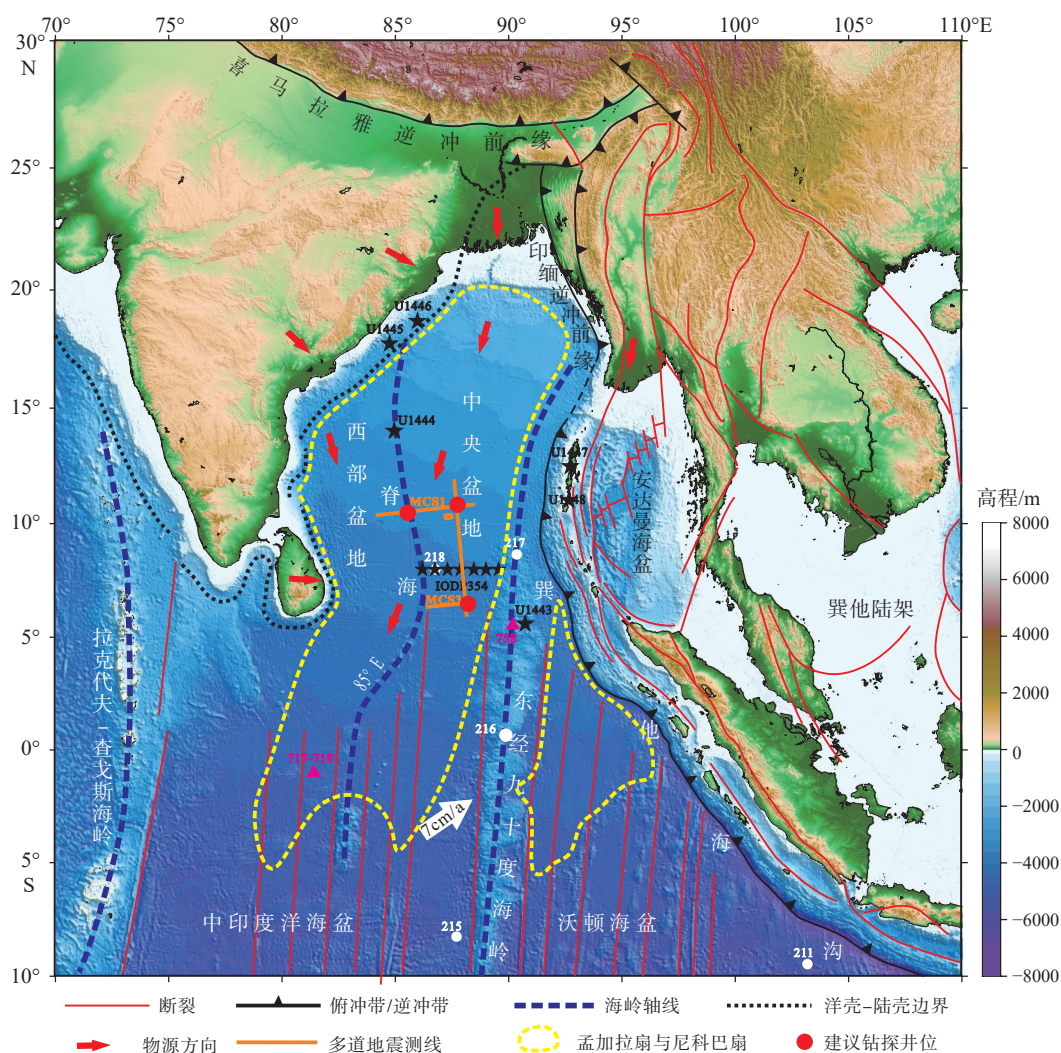


图 1 孟加拉扇区域地质概况与测线分布图<sup>[6-7, 17]</sup>

Fig.1 Sketch map of topography and tectonics in Bengal Fan

海扇两个不整合面的年代<sup>[18]</sup>。

DSDP22 航次取得的成果主要包括 3 个方面<sup>[18]</sup>:  
 ① 获得了洋底年龄和板块重建新证据。在 213、214 和 215 站位获得的洋壳年龄分别为 56~58 Ma、57~61 Ma 和 59~60 Ma。其中 215 站位的年龄(59~60 Ma)比先前认为的年龄(65 Ma)要年轻。  
 ② 揭示了 90°E 海岭的形成过程。钻探结果显示海岭的形成时代自北向南逐渐变新,表明 90°E 海岭可能是板块向北运动过程中,由热点岩浆作用形成。  
 ③ 揭露了孟加拉深海扇的沉积层序和远端扇体演变过程。218 站位确定了上部不整合面的时代为晚中新世,是欧亚和印澳两板块“硬碰撞”引起的板内变形起始时间。

## 2.2 ODP116

1987 年利用 JOIDES Resolution 号钻探船实施了 ODP116 航次,共完成 3 个站位(717—719)的钻

探工作,总进尺 3 326.2 m,取芯段长度 2 299.4 m,成功取芯 991.4 m,取芯率 43%。ODP116 航次致力于解决①确定东北印度洋板内变形起始时间和之后的断块活动史;②描述孟加拉深海扇远端的岩性特征和沉积过程,确定孟加拉深海扇物源及对喜马拉雅山的构造抬升响应;③通过获取板内变形之前的沉积断面,研究沉积作用、沉积速率以及孟加拉扇的生长过程<sup>[19]</sup>。

ODP116 航次取得的成果主要包括 2 个方面:  
 ① 揭示了孟加拉深海扇远端 17 Ma 来的地层结构和沉积过程。ODP116 航次 3 个站位获得的最老沉积物年龄为 17 Ma,时代为早中新世。  
 ② 揭示了喜马拉雅山隆升、板内变形和气候变化的沉积记录。钻探结果显示,本区的扇体开始形成于早中新世,板内变形开始于 7.5~8.0 Ma,可能与板块边界挤压应力的远程效应有关。晚更新世 800 ka 开始,沉积物粒度和沉积速率突然增加,可能与上新世—更新

世冰期开始相对应<sup>[19]</sup>。

### 2.3 ODP121

1988年利用JOIDES Resolution号完成的ODP121航次,在Broken海脊和90°E海岭共完成7个站位(752—758)的钻探工作。ODP121航次针对90°E海岭的钻探聚集3个科学目标:①在ODP116航次的基础上,进一步理解海岭的起源及其与凯尔盖朗海底高原的关系;②通过研究基底岩石和沉积物样品的古地磁特征,获得印度板块北漂过程的高分辨率时间信息,重建地区构造演化史;③获取东印度洋纵向长岩心断面,为古生物和古气候演变提供证据<sup>[20]</sup>。

ODP121航次推动了科学界对90°E海岭的认识,丰富了构造演变活动的沉积记录:①进一步确认了90°E海岭的起源和演化。通过生物地层特征及海岭岩浆岩的定性,认为年龄自北向南逐渐变新的90°E海岭是年轻的印度洋板块经过凯尔盖朗热点时形成。②进一步揭示了喜马拉雅山隆升和古气候演变的沉积记录。南北向的沉积断面揭示了从晚白垩世坎帕尼亚期到中新世,古气候由温带向热带的转变。晚中新世气候发生季风增强显著变化的转变,轨道尺度的印度季风变化主要受米兰科维奇周期控制<sup>[20]</sup>。

### 2.4 IODP353

进入新世纪以来,2014年利用JOIDES Resolution号钻探船在孟加拉湾及邻区完成了6个站位主题为“环流核心区域印度季风降水”的IODP353航次<sup>[21]</sup>,其中2个站(U1447、1448)位于安达曼-尼科巴海脊,2个站(U1445、1446)位于孟加拉湾西北缘的印度岸外,1个站(U1444)位于孟加拉湾中央偏西,1个站(U1443)位于90°E海岭北部。IODP353航次的目的在于通过对沉积记录的研究,进一步了解地球外部营力(如太阳辐射量)和内部营力(如大陆冰盖体积、温室气体浓度、海平面及海-气能量和水分交换的变化等)之间的耦合关系<sup>[21]</sup>。

IODP353主要的初步成果为:①在90°E海岭北部的钻探首次在东北印度洋获得了早中新世和渐新世古地磁反转的记录,从而为更长尺度的高分辨率气候变化重建提供了更为确凿的年代学约束;②成功确认了中—晚更新世和中上新世两个不整合面的年龄,为前期的钻探揭示的不整合面提供了年代学对比;③首次获取了印度东北岸外马哈纳迪

盆地南部的下更新统和上中新统沉积物岩心,在部分层段发现了天然气水合物赋存的证据<sup>[22-23]</sup>。

### 2.5 IODP354

IODP353结束之后紧接着沿孟加拉湾内8°N实施了IODP354航次7个站位的钻探工作。本航次以揭露孟加拉深海扇沉积层为目标,最东侧的U1451站位最大进尺1181.3 m,是东北印度洋唯一一口超千米的钻孔。IODP354航次科学目标突破表现为:①通过孟加拉深海扇地层多参数指标信息,标定7~8 Ma以来的构造和气候变化;②获取深海扇最老沉积物样品并横向揭示扇水道摆动导致的沉积中心迁移;③实现孟加拉深海扇和印度深海扇的对比研究<sup>[24]</sup>。

IODP354航次的重要成果:①钻探得到孟加拉深海扇最老沉积物样品,将孟加拉扇体沉积记录的时间尺度由中新世扩展到了早渐新世;②揭示了90°E海岭西缘扇体和早期深海沉积物的界面,为了解新生代喜马拉雅侵蚀记录与亚洲季风演化等全球气候变化提供了更长时间尺度可能;③获得的长剖面及其时空变化包含源区风化、剥蚀及对全球碳循环的影响等丰富信息,为重建中新世以来全球气候与季风演化、陆地植被演化、沉积物通量变化及沉积物输运模式奠定了基础<sup>[25-26]</sup>。

综上,在孟加拉湾及邻区实施的深海科学钻探科学目标的设置及实现,均丰富了该地区在构造、沉积和环境演化的科学认识,对后续研究具有重要意义。

## 3 孟加拉深海扇重要科学问题进展

### 3.1 孟加拉深海扇沉积记录与动力过程

喜马拉雅山及青藏高原物质受风化作用侵蚀,经大型河流输运至孟加拉扇沉积,是一个典型的“源-汇”过程(图2),孟加拉扇的沉积物主要是河流输运而来的陆源碎屑物质,包括喜马拉雅山及青藏高原、印度、东南亚等区域的侵蚀产物<sup>[27-28]</sup>,另外还有生物沉积(主要为钙质和硅质沉积)、火山物质等<sup>[29-31]</sup>。

不同物质来源的沉积物在孟加拉扇分布具有空间差异性,孟加拉湾西部主要物源区是喜马拉雅山和印度半岛,且喜马拉雅山和印度半岛的河流对站位海域的平均沉积物供应分别为66%±13%和34%±13%<sup>[32]</sup>;来自喜马拉雅山的富伊利石和绿泥石

的沉积物在孟加拉扇占优势地位,并能追溯到赤道以南,但其中小部分沉积物来源于印度南部与斯里兰卡<sup>[33]</sup>,东部沉积物则是来自伊洛瓦底江和缅甸西部海岸带沉积物的混合物<sup>[34]</sup>,而东部海脊及扇体的末端则有证据显示有海山火山活动带来的物质<sup>[31,35]</sup>。从时间分布上来说则是受到了不同时间尺度环境变化影响,带来了物源转换和组成变化,如在孟加拉湾西部钻探结果显示 7 Ma 左右发生了明显浊流与半远洋物质来源转换<sup>[36]</sup>,末次冰盛期喜马拉雅山河流沉积物对孟加拉扇西部研究站位处的贡献减少了 30%,其原因是西南季风的减弱和冰川覆盖扩展导致暴露区域减少,故风化作用减弱<sup>[32]</sup>,但在全新世时期暖湿气候和加强的印度季风控制下,来源于中央平原和印度半岛的碎屑沉积物会有所增加,而东北季风的减弱会导致伊洛瓦底江和印缅山脉剥蚀沉积物进入孟加拉湾的减少<sup>[37]</sup>,主扇水道在孟加拉扇沉积物时空分布特征中扮演了非常关键的角色<sup>[38]</sup>。

陆源碎屑沉积物进入海洋之后,在各种动力综合作用下,实现了物质输运及空间分布。孟加拉湾表层环流受印度季风控制,呈现明显的季节变化:冬季盛行东北风,表层环流呈逆时针方向;夏季盛行西南风,表层环流呈顺时针方向(图 2),洋流体系控制下的等深流沉积在一定程度上影响着进入孟

加拉扇悬浮体颗粒的分布和物质组成差异<sup>[39-41]</sup>。而由重力滑塌作用引起的浊流沉积活动是影响该地区沉积物运移的主要动力,孟加拉湾浊流活动是世界海洋浊流活动最为显著的区域,浊流的发育常将陆源碎屑沉积物搬运至数千千米之外,随之带来的就是浊流作用下扇水道的形成、袭夺、废弃、回春等沉积-搬运过程<sup>[42]</sup>,IODP354 航次在 8°N 的断面钻探揭示了更新世以来扇体下游沉积构造及浊流沉积物在水道横向上的演替规律<sup>[43]</sup>。

### 3.2 南亚季风的形成演变及古气候变迁

青藏高原隆升是新生代地质历史的重大事件之一,对亚洲乃至全球气候形成具有举足轻重的作用<sup>[46]</sup>,由此带来的南亚季风的形成及其强度引起的降水变化,会影响到陆源物质剥蚀强度和沉积物组成的变化,在孟加拉扇沉积过程中作用尤为明显。

高原构造隆升导致气候变化的假说认为,构造隆升通过风化和侵蚀等作用消耗大气中的 CO<sub>2</sub>,使其浓度降低,造成全球变冷,并认为青藏高原是主要的驱动力<sup>[47]</sup>。而在高原隆升过程中改变了原有的地貌格局,并且青藏高原的隆升不是一个均匀的过程,而是包含若干次一级隆升时期,虽然对隆升期次的时间框架不同研究成果之间存在差异,但有 4~5 次隆升期,基本上是可以相信的<sup>[48-50]</sup>,在青

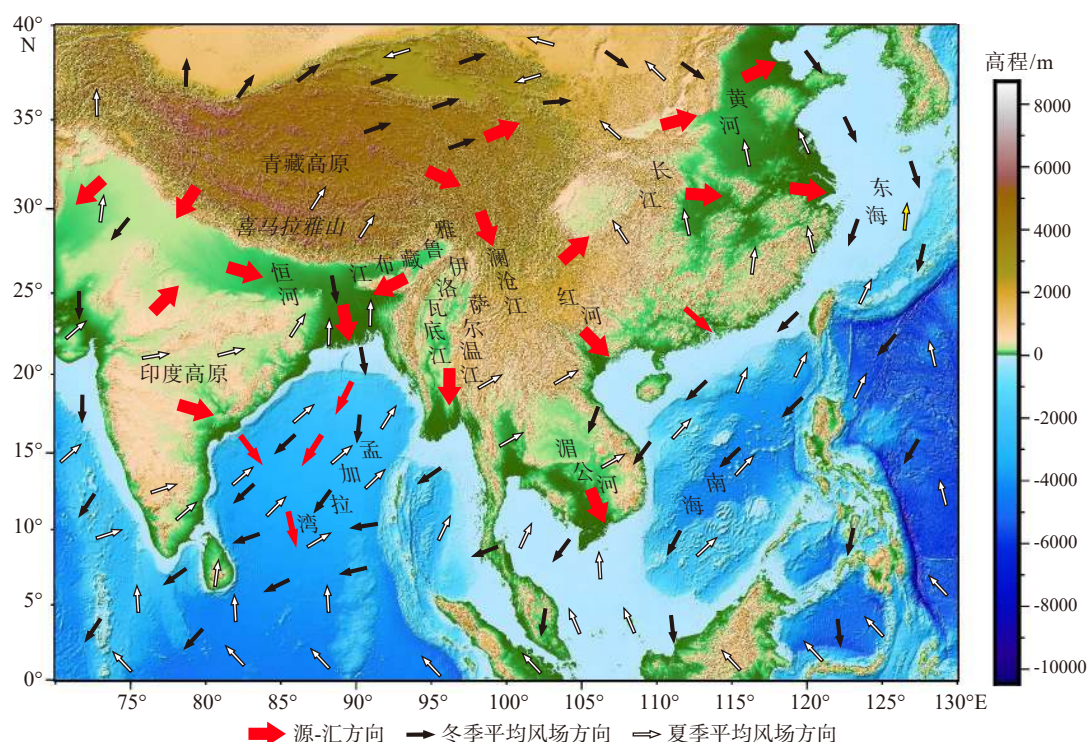


图 2 青藏高原及周边地区源-汇过程和季风图<sup>[44-45]</sup>

Fig.2 Monsoon and source to sink process in the Tibet plateau and adjacent area<sup>[44-45]</sup>

藏高原隆升到现在一半的高度的时候,季风作用开始形成<sup>[51]</sup>,12~8 Ma 高原达到最大高度,季风显著<sup>[46,52-53]</sup>。

相比构造尺度上的短时间尺度研究,孟加拉湾地处印度季风气候控制区,其沉积物必然包含季风演化的信息,近年来研究者对第四纪以来的沉积记录反映的不同尺度的季风演化历史进行了大量研究。轨道尺度上,主要受太阳辐射量变化的米兰科维奇周期影响,沉积周期影响是由地球的轨道偏心率(100 ka)、黄赤交角(40 ka)、岁差(21 ka)控制的气候变化造成的<sup>[31]</sup>,而且印度季风在2.6、1.7和1.2~0.6 Ma 经历了重要的主导周期转型事件,即其驱动因素具有阶段性转变的特征<sup>[54-55]</sup>。而在千年时间尺度上,印度季风受高纬过程影响明显,千年尺度的 Dansgaard-Oeschger(D-O)事件在印度季风区被广泛记录,印度夏季季风转弱的时期大致分布于氧同位素 8.02(250~247 ka)、6.42(167~164 ka)、6.2(136~132 ka)、4(65~62 ka)、3(55~52 ka 及 41~29 ka)、2(21~12 ka)等几个时期<sup>[56-57]</sup>,而早全新世气候适宜期(10.5~6 ka)发现的最大沉积物输入量与印度夏季季风的增强有很大关系<sup>[34,58]</sup>。

### 3.3 洋底年龄和中生代东北印度洋海底扩张过程重建

孟加拉湾构造基底洋壳广泛分布,其洋底年龄大部分为白垩纪,由古老的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>[2,5,59]</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,并刻画了构造发育和演变特征<sup>[60]</sup>(图3)。东冈瓦纳大陆的裂解始于约140 Ma,破裂过程呈现穿时性<sup>[61]</sup>,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。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,大部分磁力测线并未沿垂直于磁异常条带走向的方向进行布设,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。

### 3.4 85°E 海脊的结构、性质和起源

东北印度洋存在90°E和85°E两条纵向基底隆起,与90°E海岭显著的正向海底地形不同,85°E海

脊的大部分被孟加拉深海扇沉积物掩埋,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。

85°E海脊的性质和起源,存在废弃的扩张中心、溢流型幔源岩浆岩带、热点型海脊、转换断层以及板块俯冲碰撞导致的板内挤压构造变形带等多种不同观点。Mishra<sup>[63]</sup>认为85°E海脊是一个废弃的扩张中心,认为它是短期内岩浆沿着地壳薄弱带溢流形成。Mukhopadhyay和Krishna<sup>[64]</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>[65]</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,而Muller等<sup>[66]</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。Kent等<sup>[67]</sup>认为85°E海脊是86°E断裂带向北的延伸。根据海脊的地球物理场特征及其深埋性质,Ramana等<sup>[68]</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>[69]</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。通过对地形地貌<sup>[69]</sup>、重磁异常<sup>[62]</sup>(图4)、多道地震剖面<sup>[70-71]</sup>和相关计算结果的对比发现,85°E海脊具有明显的分段性特征,不同分段成因机制迥异。

### 3.5 孟加拉扇大洋钻探存在问题

#### (1) 孟加拉深海扇地层层序揭露不完整

由于孟加拉深海扇的物源主要来自北方,扇体的发育过程自北向南逐渐前积,因此,扇体底界的年龄自北向南逐渐变新,最老的深海扇沉积物埋藏于北部的扇根之下。深海扇上游和中游的沉积层厚度较大,扇体底界埋深普遍大于10 km,难以通过钻探取得。深海扇远端沉积厚度较薄,但沉积记录不完整,如ODP718站位揭露的深海扇最老沉积物年龄仅为早中新世,最新的IODP钻探也仅将时间延伸到早渐新世。迄今为止,尚未在孟加拉湾中南部地区钻穿深海扇全套地层层序,从而未能为青藏高原抬升剥蚀和全球古气候、古海洋环境变化提供长时间尺度的约束。

#### (2) 对玄武岩洋壳年龄和特殊构造的关注不足

孟加拉湾洋底是白垩纪东冈瓦纳大陆裂解过程中经两期海底扩张作用形成。已有的研究成果表明,晚白垩世海底扩张过程中发生了多次扩张中

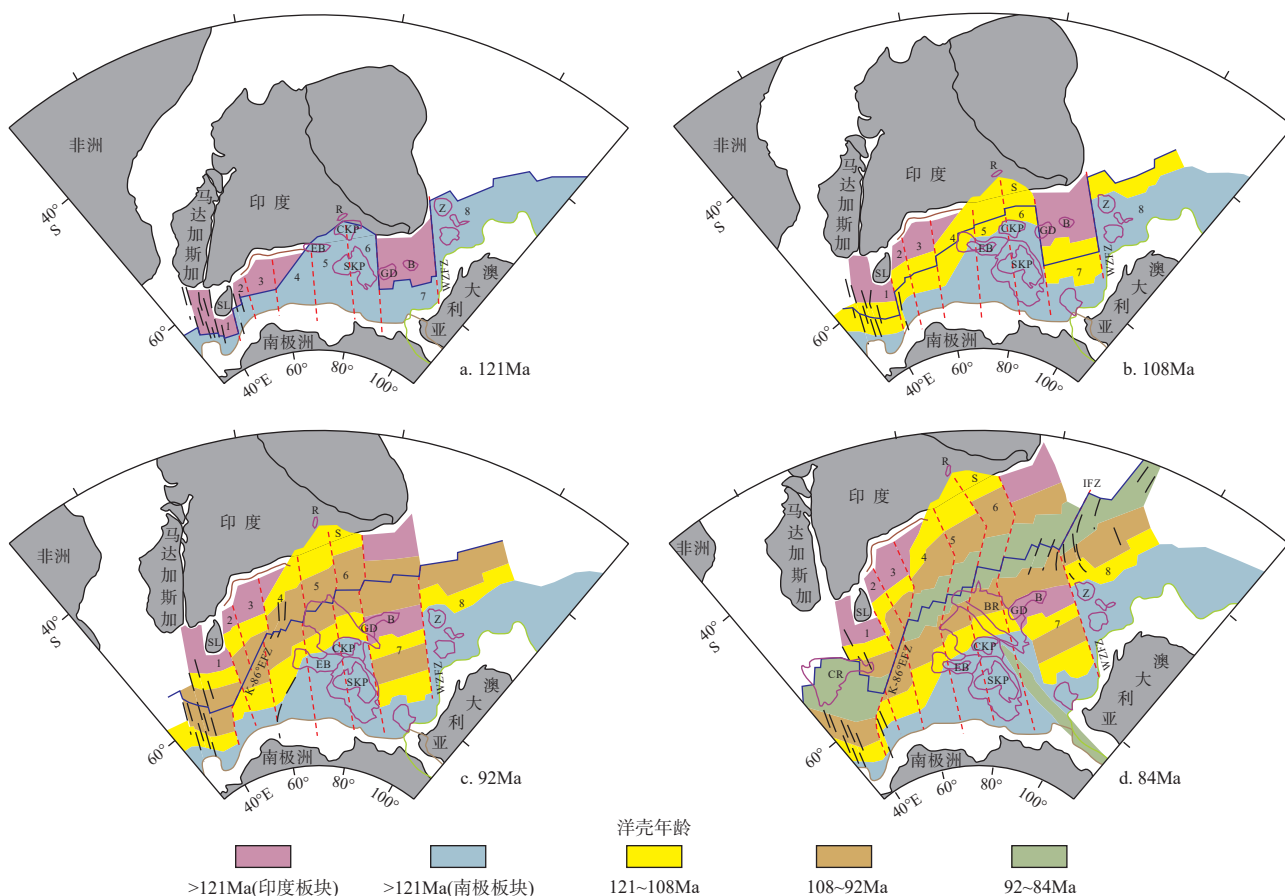


图 3 白垩纪东印度洋形成演化过程重建<sup>[60, 62]</sup>

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, WZ FZ. 瓦拉比—泽尼斯断裂带, Z. 泽尼斯海底高原。

Fig.3 Plate reconstruction models for Eastern Indian Ocean during Cretaceous

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. SriLanka, WZ FZ. Wallaby-Zenith Fracture Zone, Z. Zenith Plateau.

心的跃迁, 发育密集转换断层, 现今洋底磁异常条带的对比存在较大的多解性。印度板块向北漂移的过程中, 地幔热点的活动形成了 90°E 海岭和 85°E 海脊。迄今为止, 仅针对 90°E 海岭开展了深入玄武岩基底的钻探, 尚未通过海底钻探揭露 85°E 海脊、残留古扩张中心以及正常洋壳的岩石组成和年龄, 制约了中生代以来东冈瓦纳大陆裂解和印度板块向北漂移过程中的板块重建。

## 4 未来钻探井位选取与层序地层格架

### 4.1 孟加拉深海扇钻探科学目标

(1) 获取孟加拉深海扇全时序沉积地层, 厘定喜马拉雅隆升剥蚀的长时间尺度沉积记录与演化过程。

由于孟加拉深海扇扇体自北向南逐渐前积, 扇



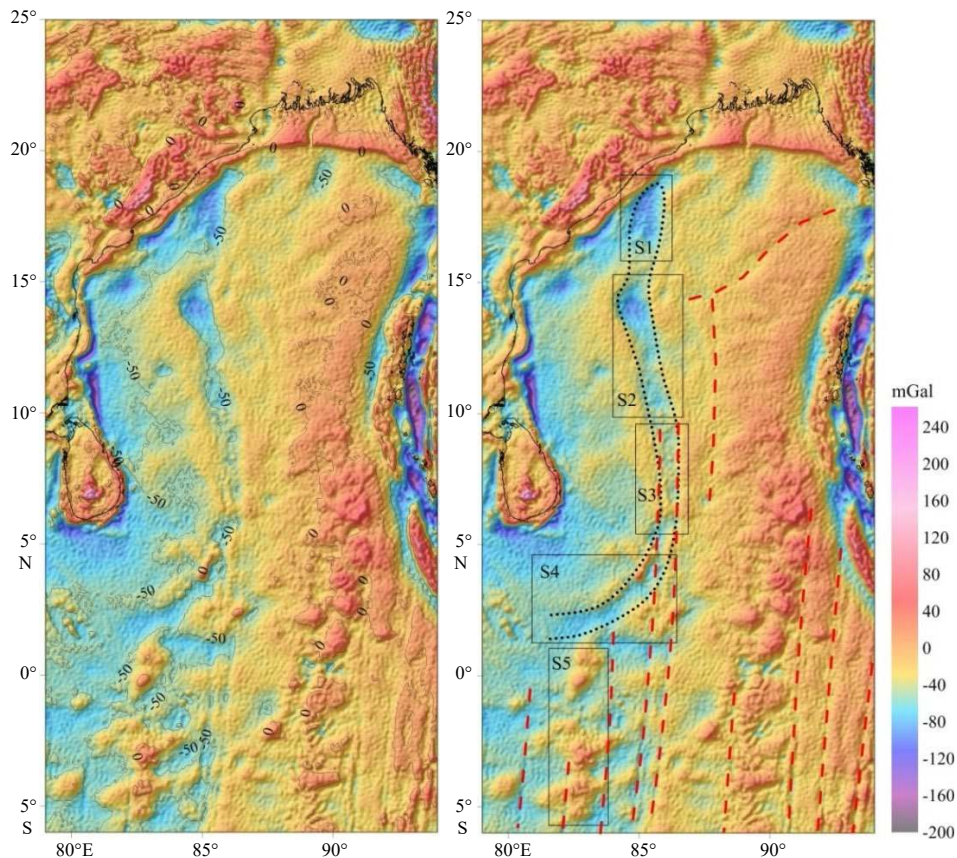


图4 孟加拉湾空间重力异常图及解释<sup>[62]</sup>

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 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

体顶端保留了最为完整的沉积记录,但深度较大,钻探难以到达。目前,ODP718 站位在距离扇体顶端 2 500 km 的远端揭露的时间界限为 17 Ma,IODP354 航次 U1451 站位在 8°N 的 90°E 海岭上揭露的时限为 27 Ma,但由于位置特殊,均不具有代表性,且与碰撞隆升的时间相去甚远。因此,在孟加拉深海扇中下游既包含全时序沉积地层且沉积厚度适中的合理位置开展钻探,有望揭示更长时间尺度的沉积记录。

(2) 标定古近纪以来古环境变化,开展不同时间尺度的古环境重建。

虽然孟加拉深海扇的沉积记录主要反映了喜马拉雅山的抬升剥蚀过程,但构造和气候变化也同时对深海扇的沉积过程产生了显著影响。孟加拉扇的沉积物记录了气候变化引起的剥蚀-沉积速率、陆地植被和风化强度的变化。以往的研究主要聚焦于新近纪的气候变化事件及变化过程,包括 7~8 Ma 的季风增强事件,约 2.7~3 Ma 全球变冷和

北半球冰期开始时气候变化与沉积作用的关系,以及 0.8~1 Ma 岁差和倾角变化主导的气候变化等。如果通过增加钻孔的深度,可将全球变化研究的时间尺度延长至古近纪,从而探索全球变化的未知领域。

(3) 揭示 85°E 海脊的结构、性质和起源,重建晚白垩世东北印度洋海底扩张过程。

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。通过开展大洋钻探,在孟加拉湾中南部地区获取基底洋壳岩石样品,能够获取关于东冈瓦纳大陆裂解时代、白垩纪东印度洋板块调整重组时代和深部动力机制的关键信息。

#### 4.2 孟加拉深海扇中下部层序地层格架

根据上述需要解决的科学问题,选择合适的位

置布置地球物理调查和未来钻探位地点尤为重要。孟加拉深海扇包含了板块碰撞与高原隆升的沉积记录<sup>[48]</sup>,且板块碰撞的开始时间为 34~70 Ma 的多种观点<sup>[49]</sup>,但其碰撞时间并不是某一刻,而是持续了 10~15 Ma。因此,在孟加拉扇最早的高原隆升造成的碎屑沉积物也要 55~60 Ma 发生,即晚古新世—早始新世。Curry<sup>[6]</sup>根据多来源地球物理数据,分别绘制了孟加拉扇总沉积物厚度、晚古新世沉积厚度和早始新世沉积物厚度。毫无疑问,扇根地区是沉积厚度最大最完整的地方,然而沉积厚度超过 1 000 m,使得钻穿完整地层变为不可能。但同时我们发现沉积厚度沿主扇水道向两边递减且成舌状向南延伸。根据其南北断面揭示的地层,早始新世沉积最南可到 5°S,考虑一定的地层厚度可以提高时间分辨率,因此,我们的多道地震剖面布设在孟加拉扇下游至 5°N 位置,同时跨越 85°E 海脊,实现纵向和横向上地层记录的揭示。

本文所用多道地震资料取自 2019 年 12 月“深海科学钻探井位选址调查”项目孟加拉深海扇调查航次,测量船舶为青岛海洋地质研究所“海洋地质九号”,共计采集 3 条测线 1 200 km 地震剖面,分别为 MCS1、MCS2 和 MCS3 线(图 1)。本次多道地震探测具有能量大、覆盖次数多和分辨率高等特点,对孟加拉深海扇下游地区的基底起伏、沉积层结构和构造发育特征均具有良好的揭示。以 IODP354 航次 U1450 井位的钻探成果为约束,通过横向对比和追踪,厘定了 MCS2 多道地震测线的地震地层格架(图 5)。研究区内孟加拉深海扇的沉积层厚度具有自北向南逐渐减薄的趋势。MCS2 线位于 9°N 附近的基底隆起构成沉积层突变的界限,以北的扇体沉积层厚度远大于南侧,一方面表现为水深自北向南均匀增大,另一方面,与扇体底部沉积层向隆起之上的超覆减薄有关。

IODP354 航次成果能够为 10 Ma 以来的地层格

架提供较为准确的约束。10 Ma 以来的沉积层在近 N-S 向的 MCS2 剖面南部厚度约为 1 000 m,在北部厚度约为 2 000~2 500 m。扇体底界时代具有自北向南逐渐变新的穿时性,调查区北部沉积层发育完整,沉积连续,构造变形微弱,是揭示扇体沉积层序和发育过程的理想地区。本区 10 Ma 界面之下,发育厚度超过 2 000 m 的深海扇沉积物,推测扇体底界的时代为早渐新世—始新世。总体来说,3 条剖面在基底之上的沉积层包含两部分:下部主要由扇体发育之前的深远海沉积和洋壳扩张期形成的熔岩和火山碎屑岩组成,表现为透明反射或杂乱反射,厚度较薄;上部为陆源碎屑沉积物组成的孟加拉深海扇扇体,表现为连续性较好的平行-亚平行层状反射,发育多个强反射界面。孟加拉深海扇沉积基底起伏较大,发育包括 85°E 海脊在内的多个规模不等的基底隆起。沉积层总体构造变形微弱,局部发育正、逆断层及伴生的褶皱,由东侧和北侧板块边界构造挤压向板内传播的远程效应有关。

### 4.3 未来钻探井位标定与层序预测

以孟加拉湾前沿科学问题为导向,为实现预定的钻探目标和科学目标,基于调查成果的分析解译,对钻探井位进行了选择和标定。井位的选取坚持 3 个方面的原则:第一,钻探目标可行性,充分考虑钻探船的钻探能力,终孔深度在钻探船力所能及的范围之内,同时能够满足验证钻探船极限参数的需求;第二,成果效益最大化,选择最具代表性的井位,争取以最少的钻孔数量、最低的钻探进尺,实现最多的科学目标;第三,最新资料覆盖程度高,质量优良。地震资料覆盖程度高,选取的钻探井位全部位于新采集的地震测线之上,优选测线交点位置。

根据上述目标和原则,选取 3 个钻探站位(BF-1—BF-3),井位位置见表 1。BF-1 孔水深约 3 330 m,钻进沉积层厚度约 4 090 m,基底硬岩计划钻进

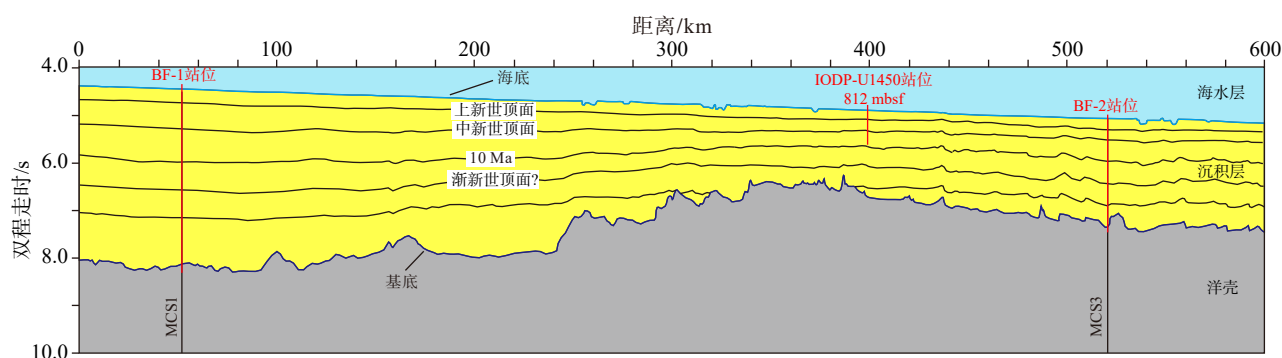


图 5 MCS2 多道地震测线地层结构解释

Fig.5 Interpretation of sequence structure for multichannel seismic profile MCS2

110 m, 采用全取芯钻探; BF-2 孔水深深度约为 3 800 m, 沉积层厚度约 2 090 m, 基底硬岩计划钻进

110 m, 采用全取芯钻探; BF-3 孔水深深度 3 420 m, 沉积层厚度约 1 530 m, 计划基底硬岩钻进 170 m,

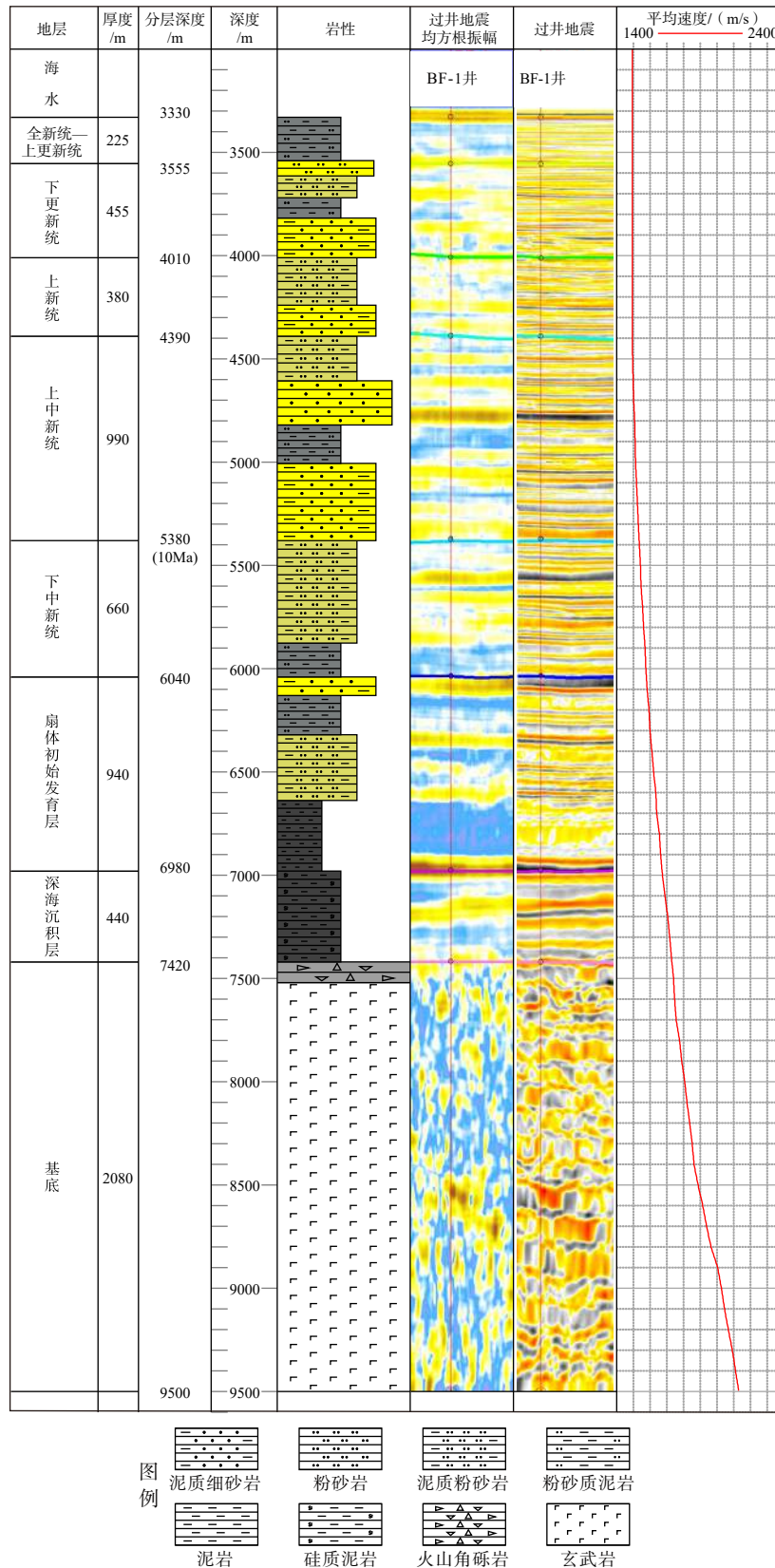


图 6 BF-1 孔综合岩心柱状图

Fig.6 Sequence calibration and lithology for BF-1 core

表 1 孟加拉湾深海科学钻探建议井位位置  
Table 1 Location of proposed drilling sites in Bay of Bengal

序号	站位编号	井位坐标	站位水深/m	地球物理测线控制	穿透深度/m			科学目标
					沉积层厚	基岩	总进尺	
1	BF-1	11.08220504°N, 87.42903420°E	3 330	MCS1与MCS2交点	4 090	110	4 200	全时序完整沉积地层
2	BF-2	06.80141790°N, 87.80300863°E	3 800	MCS2与MCS3交点	2 090	110	2 200	BF-1备选站位
3	BF-3	10.90204841°N, 85.46556972°E	3 420	MCS1	1 530	170	1 700	85°海脊结构、性质和起源

沉积层仅关键界面附近取芯, 硬岩全取芯。

(1)BF-1 井层位标定与岩性预测

BF-1 井以钻穿沉积层并获取基底玄武岩为目标, 根据地震剖面标定的总进尺深度 7 530 m, 其中水深约 3 330 m, 沉积层和基底硬岩钻进 4 200 m (图 6)。深海扇扇体内部界面较为清晰, 预计将在 4 010 m 深度钻遇更新统/上新统界面, 上覆第四系和更新统总厚度约为 680 m, 以未固结—半固结浊积岩为主。预计将在 4 390 m 深度钻遇上新统/中新统界面, 上覆上新统总厚度约为 380 m, 以半固结—固结浊积岩为主。预计将在 5 380 m 深度钻遇 10 Ma

中新世内部等时界面。预计将在 6 040 m 深度钻遇中新统底界面, 上覆中新统总厚度约为 1 650 m, 以浊积岩为主。前中新世扇体总沉积厚度约为 940 m, 以压实固结程度较高的浊积岩为主。

6 980~7 420 m 之间为深海扇发育之前的半深海、深海沉积, 以钙质、硅质泥岩为主, 底部包含部分同扩张期火山碎屑岩。7 420 m 以深为海底扩张形成的枕状熔岩, 局部可能发育辉长岩岩脉。

(2)BF-2 井层位标定与岩性预测

BF-2 井以钻穿沉积层并获取基底玄武岩为目标, 根据多道地震标定的钻井进尺为 6 000 m, 其中

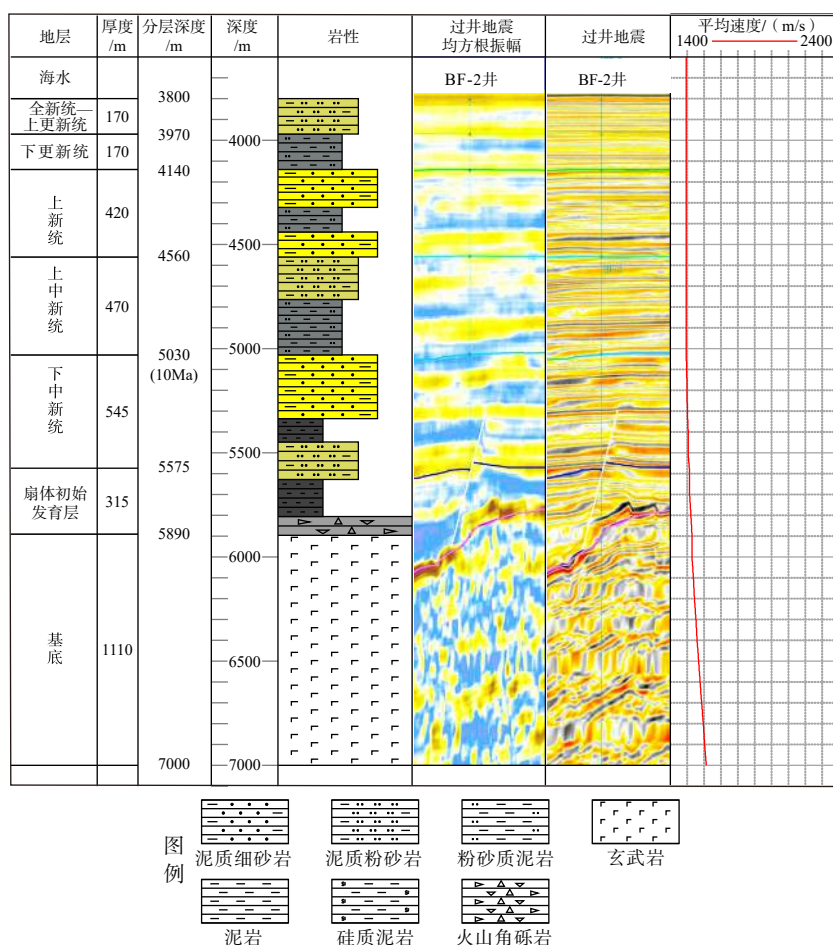


图 7 BF-2 孔综合岩心柱状图

Fig.7 Sequence calibration and lithology for BF-2 core

水深约 3 800 m, 沉积层和基底硬岩钻进 2 200 m (图 7)。预计将在 5 575 m 深度钻遇深海扇沉积体底界, 扇体总厚度约 1 775 m, 深海扇扇体内部界面较为清晰, 预计将在 4 140 m 深度钻遇更新统/上新统界面, 上覆第四系和更新统总厚度约为 340 m, 以未固结—半固结浊积岩为主。预计将在 4 560 m 深度钻遇上新统/中新统界面, 上覆上新统总厚度约为 420 m, 以半固结—固结浊积岩为主。预计将在 5 030 m 深度钻遇 10 Ma 中新世内部等时界面。预计将在 5 575 m 深度钻遇中新统底界面, 上覆中新统总厚度约为 1 015 m, 以浊积岩为主。

5 575~5 890 m 深度之下为扇体初始发育、半深海、深海沉积, 沉积厚度较薄, 前中新世深海扇总沉积厚度约为 315 m。5 890 m 以下为海底扩张形成的枕状熔岩, 局部可能发育辉长岩岩脉, 以压实固结程度较高的浊积岩为主。

**(3)BF-3 井层位标定与岩性预测**

BF-3 井以获取 85°E 海脊岩石样品为目标, 根

据多道地震标定钻孔进尺深度约 5 120 m, 其中水深约 3 420 m, 沉积层和基底硬岩钻进 1 700 m。预计将在 4 950 m 深度钻遇深海扇沉积体底界, 扇体总厚度约 1 530 m, 深海扇扇体内部界面较为清晰, 预计将在 3 725 m 深度钻遇更新统/上新统界面, 第四系总厚度为 305 m, 在 3 910 m 深度钻遇上新统/中新统界面, 在 4 615 m 深度钻遇 10 Ma 中新世内部等时界面(图 8)。

通过与前人研究成果的对比<sup>[69]</sup>, 深海扇发育之前的半深海、深海沉积不发育, 下伏海脊具有火山成因, 其岩石组成可能为: 5 000~5 120 m 之间可能为水下喷发形成的枕状玄武岩、溢流玄武岩等。BF-3 井在沉积层内以非取芯钻探为主, 仅在关键界面附近取芯。

**5 结论**

(1)DSDP-ODP-IODP 在孟加拉湾及邻区共完成

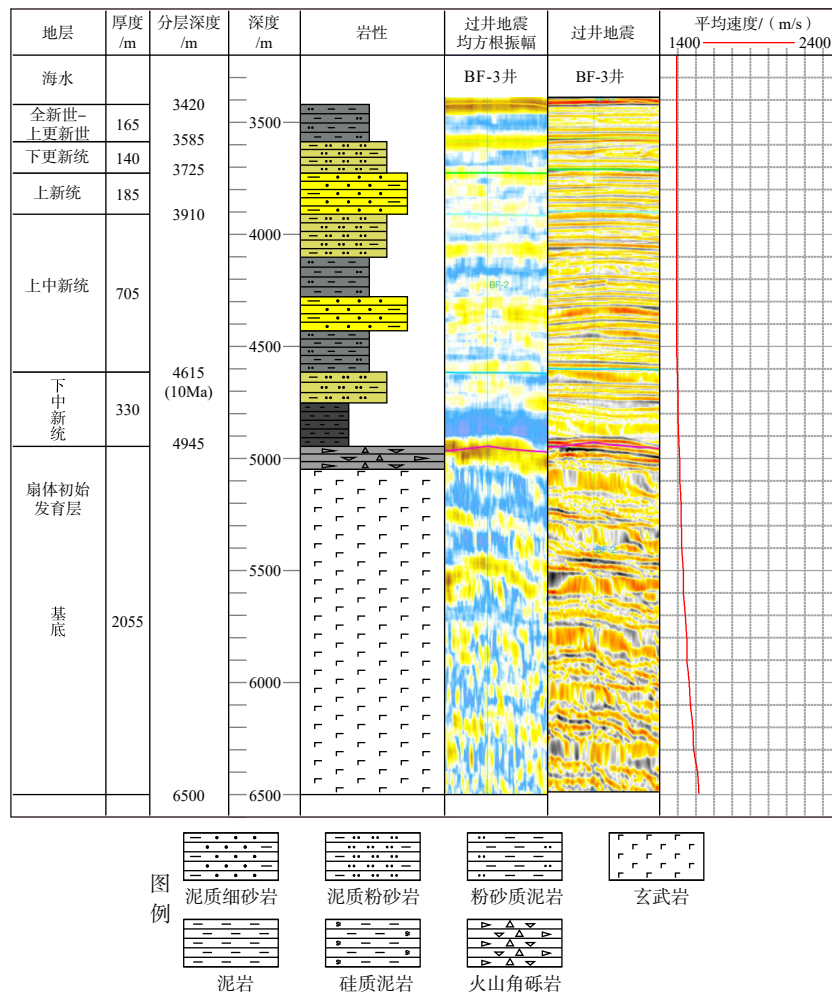


图 8 BF-3 孔综合岩性柱状图

Fig.8 Sequence calibration and lithology for BF-3 core

了 5 个航次 31 个站位的钻探工作,揭示了早渐新世以来沉积记录演化,表明了南亚季风在高原隆升到一定高度的 12~8 Ma 期间显著,但对南亚季风形成时限和长时间尺度孟加拉湾物质来源的时空转换过程仍有待深入。

(2)受洋壳年龄准确控制和 85°E 海脊线性基底性质多解的制约,具有多解性的磁异常条带揭示的板块碰撞形成青藏高原隆升的开始时间仍有争议,从 40~70 Ma 开始碰撞的不同观点,需大洋钻探进一步揭示基底性质与年龄。

(3)在孟加拉扇中下部获取的能量大、覆盖次数多和分辨率高的多道地震数据,基本揭示了扇体的完整沉积地层、基底起伏和构造发育特征。下部主要表现为透明反射或杂乱反射且厚度较薄的扇体发育之前的熔岩或火山碎屑岩;上部表现为连续性较好的平行—亚平行层状反射且发育多个强反射界面的陆源碎屑沉积物。

(4)选择 3 个科学钻探井位并对其开展了井位标定与岩性预测,BF-1 孔水深约 3 330 m,钻进沉积层厚度约 4 090 m,基底硬岩计划钻进 110 m,采用全取芯钻探;BF-2 孔水深深度约为 3 800 m,沉积层厚度约 2 090 m,基底硬岩计划钻进 110 m,采用全取芯钻探;BF-3 孔水深深度 3 420 m,沉积层厚度约 1 530 m,计划基底硬岩钻进 170 m,沉积层仅关键界面附近取芯,硬岩全取芯。

**致谢:**在论文评审过程中,审稿专家提出了专业细致的评审意见,使得文稿质量大幅提升,在此表示感谢;一并感谢 2019 年“海洋地质九号”孟加拉扇航次调查全体船员及工作人员。

### 参考文献 (References)

- [1] 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].*地学前缘*,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.]
- [2] Curry J R,Emmel F J,Moore D G,et al.Structure,tectonics,and geological history of the Northeastern Indian Ocean[M]//Nairn A E M,Stehli F G.The Ocean Basins and Margins.Boston,MA:Springer,1982:399-450.
- [3] 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.
- [4] Lee T Y,Lawver L A.Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia[J].*Tectonophysics*,1995,251(1-4):85-138.
- [5] Talwani M,Desa M A,Ismail 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.
- [6] Curry 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.
- [7] Curry J R.The Bengal depositional system:from rift to orogeny[J].*Marine Geology*,2014,352:59-69.
- [8] Alam M,Alam M M,Curry 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.
- [9] 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.
- [10] Curry J R,Moore D G.Growth of the Bengal deep-sea fan and denudation in the Himalayas[J].*GSA Bulletin*,1971,82(3):563-572.
- [11] Peirce J W.The northward motion of India since the Late Cretaceous[J].*Geophysical Journal International*,1978,52(2):277-311.
- [12] Duncan R A,Richards M A.Hotspots,mantle plumes,flood basalts,and true polar wander[J].*Reviews of Geophysics*,1991,29(1):31-50.
- [13] 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.
- [14] Liu C S,Curry J R,McDonald J M.New constraints on the tectonic evolution of the eastern Indian Ocean[J].*Earth and Planetary Science Letters*,1983,65(2):331-342.
- [15] 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.
- [16] Curry J R.Sediment volume and mass beneath the Bay of Bengal[J].*Earth and Planetary Science Letters*,1994,125(1-4):371-383.
- [17] 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 India Ocean[M].Beijing:Geology Press,2015.]
- [18] Von Der Borch C C,Sclater J G,Gartner Jr S,et al.Initial reports of the deep sea drilling project,Volume 22[R].Washington:U.S.Government Printing Office,1974.
- [19] Cochran J R,Stow D A V.Proceedings of the ocean drilling program,initial report 116:Dital Bengal Fan[R].College Station,TX,1989.
- [20] Peirce J,Weissel J,Taylor E,et al.Proceedings of the ocean drilling program,initial report 121:Broken Ridge and NinetyEast Ridge[R].College Station,TX:National Science Foundation,1989.
- [21] Clemens S C,Kuhnt W,LeVay L J.Expedition 353 Scientific Prospectus:iMonsoon[R].International Ocean Discovery Program,2014.
- [22] Clemens S C,Kuhnt W,LeVay L J.Expedition 353 preliminary report:Indian monsoon rainfall[R].International Ocean Discovery Program,2015.
- [23] Clemens S C,Kuhnt W,LeVay L J.Proceedings of the international ocean discovery Program 353:Indian monsoon rainfall[R].College

- Station, TX: International Ocean Discovery Program, 2016.
- [24] France-Lanord C, Schwenk T, Klaus A. Expedition 354 scientific prospectus: Bengal fan [R]. International Ocean Discovery Program, 2014.
- [25] France-Lanord C, Spiess V, Klaus A. Expedition 354 preliminary report: Bengal fan [R]. International Ocean Discovery Program, 2015.
- [26] France-Lanord C, Spiess V, Klaus A, et al. Proceedings of the international ocean discovery program 354: Bengal Fan [R]. College Station, 2016.
- [27] Sarin M M, Krishnaswami S, Dilli K, et al. Major ion chemistry of the Ganga-Brahmaputra river system: Weathering processes and fluxes to the Bay of Bengal [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(5): 997-1009.
- [28] Phillips S C, Johnson J E, Underwood M B, et al. Long-timescale variation in bulk and clay mineral composition of Indian continental margin sediments in the Bay of Bengal, Arabian Sea, and Andaman Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 117-138.
- [29] Venkatarathnam K, Biscay P E. Clay mineralogy and sedimentation in the eastern Indian Ocean [J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1973, 20(8): 729-738.
- [30] Pattan J N, Shane P, Banakar V K. New occurrence of Youngest Toba Tuff in abyssal sediments of the Central Indian Basin [J]. *Marine Geology*, 1999, 155(3-4): 243-248.
- [31] Weber M E, Wiedicke-Hombach M, Kudrass H R, et al. Bengal Fan sediment transport activity and response to climate forcing inferred from sediment physical properties [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 155(3-4): 361-381.
- [32] Tripathy G R, Singh S K, Ramaswamy V. Major and trace element geochemistry of Bay of Bengal sediments: Implications to provenances and their controlling factors [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 397: 20-30.
- [33] Ramaswamy V, Kumar B V, Parthiban G, et al. Lithogenic fluxes in the Bay of Bengal measured by sediment traps [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1997, 44(5): 793-810.
- [34] Colin C, Turpin L, Bertaux J, et al. Erosional history of the Himalayan and Burman ranges during the last two glacial-interglacial cycles [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171(4): 647-660.
- [35] Kessarkar P M, Rao V P, Ahmad S M, et al. Changing sedimentary environment during the Late Quaternary: Sedimentological and isotopic evidence from the distal Bengal Fan [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2005, 52(9): 1591-1615.
- [36] Chang Z H, Zhou L P. Evidence for provenance change in deep sea sediments of the Bengal Fan: A 7 million year record from IODP U1444A [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 186: 104008.
- [37] Li J R, Liu S F, Shi X F, et al. Clay minerals and Sr-Nd isotopic composition of the Bay of Bengal sediments: implications for sediment provenance and climate control since 40 ka [J]. *Quaternary International*, 2018, 493: 50-58.
- [38] Xue P F, Chang L, Wang S S, et al. Magnetic mineral tracing of sediment provenance in the central Bengal Fan [J]. *Marine Geology*, 2019, 415: 105955.
- [39] 方念乔, 陈学方, 胡超涌, 等. 东北印度洋深海记录基本特征及其对青藏高原隆升的响应 [J]. *第四纪研究*, 2001, 21(6): 490-499. [FANG Nianqiao, CHEN Xuefang, HU Chaoyong, et al. Deep sea sedimentary records in the Northeastern Indian Ocean and their response to the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(6): 490-499.]
- [40] 方念乔, 陈萍, 吴琳, 等. 孟加拉湾深海记录中的等深流活动特征及其环境意义初探 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2002, 27(5): 570-575. [FANG Nianqiao, CHEN Ping, WU Lin, et al. Contour currents in deep-water records from Bay of Bengal and its environmental implication [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(5): 570-575.]
- [41] Lee J, Kim S, Lee J I, et al. Monsoon-influenced variation of clay mineral compositions and detrital Nd-Sr isotopes in the western Andaman Sea (IODP Site U1447) since the late Miocene [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 538: 109339.
- [42] Bergmann F, Schwenk T, Spiess V, et al. Middle to late Pleistocene architecture and stratigraphy of the lower Bengal fan—integrating multichannel seismic data and IODP expedition 354 results [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2020, 21(1): e2019GC008702.
- [43] Weber M E, Reilly B T. Hemipelagic and turbiditic deposits constrain lower Bengal Fan depositional history through Pleistocene climate, monsoon, and sea level transitions [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 199: 159-173.
- [44] Xie P P, Arkin P A. Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(11): 2539-2558.
- [45] Li J R, Liu S F, Shi X F, et al. Sedimentary responses to the sea level and Indian summer monsoon changes in the central Bay of Bengal since 40 ka [J]. *Marine Geology*, 2019, 415: 105947.
- [46] 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 1-11. [LI Jijun. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Asian Monsoon [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 1-11.]
- [47] Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate [J]. *Nature*, 1992, 359(6391): 117-122.
- [48] Wang G C, Cao K, Zhang K X, et al. Spatio-temporal framework of tectonic uplift stages of the Tibetan Plateau in Cenozoic [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(1): 29-44.
- [49] 张克信, 王国灿, 洪汉烈, 等. 青藏高原新生代隆升研究现状 [J]. *地质通报*, 2013, 32(1): 1-18. [ZHANG Kexin, WANG Guocan, HONG Hanlie, et al. The study of the Cenozoic uplift in the Tibetan Plateau: a review [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(1): 1-18.]
- [50] Tada R, Zheng H B, Clift P D. Evolution and variability of the Asian monsoon and its potential linkage with uplift of the Himalaya and Tibetan Plateau [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2016, 3(1): 4.
- [51] Prell W L, Kutzbach J E. Sensitivity of the Indian monsoon to forcing parameters and implications for its evolution [J]. *Nature*, 1992, 360(6405): 647-652.

- [52] Burbank D W, Derry L A, France-Lanord C. Reduced Himalayan sediment production 8 Myr ago despite an intensified monsoon [J]. *Nature*, 1993, 364 (6432): 48-50.
- [53] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times [J]. *Nature*, 2001, 411 (6833): 62-66.
- [54] Clemens S, Prell W, Murray D, et al. Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon [J]. *Nature*, 1991, 353 (6346): 720-725.
- [55] Weber M E, Lantzosch H, Dekens P, et al. 200, 000 years of monsoonal history recorded on the lower Bengal Fan - strong response to insolation forcing [J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 166: 107-119.
- [56] 方念乔, 丁旋, 陈学方, 等. 孟加拉湾MD77190柱状样第3期的韵律沉积记录及快速气候变化[J]. *第四纪研究*, 1999 (6): 511-517. [FANG Nianqiao, DING Xuan, CHEN Xuefang, et al. Rapid climatic change in oxygen isotope stage 3: evidence from the rhythmic sedimentary record in core MD77190, Bengal Bay [J]. *Quaternary Sciences*, 1999 (6): 511-517.]
- [57] 方念乔, 陈学方, 丁旋, 等. 孟加拉湾和东经90°海岭260ka以来的古海洋学记录与印度季风的影响[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31 (S1): 280-286. [FANG Nianqiao, CHEN Xuefang, DING Xuan, et al. Paleooceanographic records of Bengal Bay and Ninety East Ridge since the last 260 ka and its response to Indian Monsoon [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31 (S1): 280-286.]
- [58] Contreras-Rosales L A, Jennerjahn T, Tharammal T, et al. Evolution of the Indian summer monsoon and terrestrial vegetation in the Bengal region during the past 18 ka [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 102: 133-148.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Yatheesh V, Dymant 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.
- [62] 尚鲁宁, 胡刚, 袁忠鹏, 等. 东北印度洋85°E海脊的性质和起源: 综述和新认识[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40 (4): 1-16. [SHANG Luning, HU Gang, YUAN Zhongpeng, et al. Tectonic structure and origin of the 85°E ridge, Northeastern Indian Ocean: A review and new observations [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40 (4): 1-16.]
- [63] Mishra D C. Magnetic crust in the Bay of Bengal [J]. *Marine Geology*, 1991, 99 (1-2): 257-261.
- [64] 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.
- [65] Curry 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.
- [66] Müller R 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.
- [67] Kent R 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.
- [68] 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.
- [69] Ismael 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.
- [70] 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.
- [71] Shang L N, Hu G, Pan J, et al. Hotspot volcanism along a leaky fracture zone contributes the formation of the 85°E Ridge at 11°N latitude, Bay of Bengal [J]. *Tectonophysics*, 2022, 837: 229453.