

doi:10.3799/dqkx.2014.123

孟加拉湾盆地构造特征与动力学演化： 来自卫星重力与地震资料的新认识

张朋¹, 梅廉夫^{1*}, 马一行¹, 李任远², 尹宜鹏³

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中海油研究总院, 北京 100027

3. 辽河油田勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010

摘要: 为了揭示孟加拉湾盆地的构造特征和中生代以来的动力学演化, 对研究区卫星重力数据进行滤波、梯度和延拓等深度处理, 对相关地震剖面进行标准化处理, 在研究区建立了8条主干剖面. 自由空气重力异常及其深度处理结果显示在盆地西部、海岭内部及盆地东部分别发育北西向破碎带、近东西向断裂和北东向线性构造, 分别反映了海底北西向扩张、海岭侵位及印度洋洋壳北东向俯冲的影响. 主干剖面经标准化处理后划分出上白垩统一第四系5套层系, 结合重力异常与地层厚度, 将孟加拉湾盆地划分为西部拗陷、85°E海岭隆起、中央拗陷、90°E海岭隆起和若开拗陷5个构造单元. 85°E海岭隆起内发育的多个孤立高隆起是热点幕式喷发的响应, 控制着碰撞前盆地“西厚东薄”的沉积格局, 而碰撞后孟加拉扇体系在始新世至中新世期间一直向南迁移, 未受到海岭的明显影响. 90°E海岭南段(7°~14°N)的俯冲消减促进了安达曼增生楔的向西生长, 北段(14°~20°N)的俯冲作用则控制着若开拗陷、印缅增生楔和孟加拉湾盆地沉积中心的演化. 构造特征和动力学演化分析表明盆地经历了原始大洋盆地(晚白垩世—早渐新世)和残留洋盆地(晚渐新世—)2个主要演化阶段.

关键词: 孟加拉湾盆地; 构造; 沉积; 动力学演化; 卫星重力; 90°E海岭.

中图分类号: P541; P622.2

文章编号: 1000-2383(2014)10-1307-15

收稿日期: 2014-02-13

Tectonic Features and Dynamic Evolution of Bay of Bengal Basin: New Insights into Satellite-Gravity and Seismic Data

Zhang Peng¹, Mei Lianfu^{1*}, Ma Yixing¹, Li Renyuan², Yin Yipeng³

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China

3. Exploration and Development Research Institute of Liaohe Oilfield, Panjin 124010, China

Abstract: Based on the satellite-derived gravity data processed by applying various image enhancement methods (including filter, gradient and continuation) and processing of the standardized seismic profiles, plus the establishment of 8 major seismic cross sections, the tectonic features and dynamic evolution of the bay of Bengal basin are explored in this study. Free-air gravity anomalies and their results of enhanced processing indicate that there are NW-trending fracture zones in the west, EW-trending faults in the 90°E ridge, and NE-trending linear structures in the east of the basin, which suggest the influence of sea floor spreading, ridge emplacement and Indian Ocean crust subduction. According to the standardized seismic reflection profiling results, gravity anomalies and stratum thickness, the basin is divided into the following five tectonic units: west depression, 85°E ridge, central depression, 90°E ridge and Rakhine depression. Prior to the collision, the sedimentary framework was controlled by multiple isolated rises developed in 85°E ridge, which was the response of episodic eruption processes of the hotspot. Whereas, the post collisional sediments known as the Bengal fan sediments were not prominently affected by the ridge and the sediments kept on migrating southward during the Eocene to Miocene. The subduction of the 90°E ridge promoted the west-

基金项目: “十二五”国家科技重大专项(No.2011ZX05030-002-003).

作者简介: 张朋(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事盆地构造分析与石油勘探构造分析研究. E-mail: sdzhangpeng2008@163.com

* **通讯作者:** 梅廉夫, E-mail: lfmei@cug.edu.cn

ward growth of Andaman accretionary in the south ($7^{\circ}-14^{\circ}\text{N}$) and controlled the evolution of Rakhine depression, Indo-Burmese wedge and the depocenter of the bay of Bengal basin in the north ($14^{\circ}-20^{\circ}\text{N}$). It is found that the protooceanic basin stage (Late Cretaceous to Early Oligocene) and the remnant ocean basin stage (Late Oligocene to present) are two main episodes in the bay of Bengal basin.

Key words: the bay of Bengal basin; tectonics; sedimentation; dynamic evolution; satellite-gravity; 90°E ridge.

孟加拉湾盆地位于东北印度洋,是以孟加拉湾为主体的现代残留洋盆地(Bruno *et al.*, 1992; Ingersoll *et al.*, 1995; Allen and Allen, 2005).盆地东西两侧分别与安达曼—苏门答腊沟—弧—盆体系和印度东部大陆边缘相邻,北靠孟加拉陆架,南部与中印度洋盆地和沃顿盆地相邻(图 1),基底为早白垩世东北印度洋扩张形成的洋壳(Curray *et al.*, 1982;

Powell *et al.*, 1988).始新世之前盆地物源主要来自西侧印度大陆,始新世开始喜马拉雅造山带物源占优势并形成了世界上规模最大的深海扇系统——孟加拉扇(Curray *et al.*, 1982),该系统构成了盆地沉积盖层的主体.孟加拉湾盆地及邻区包含的主、被动大陆边缘与深海扇系统,是研究板块构造、大陆边缘演化及深海沉积的典型实例区,为众多研究者所关

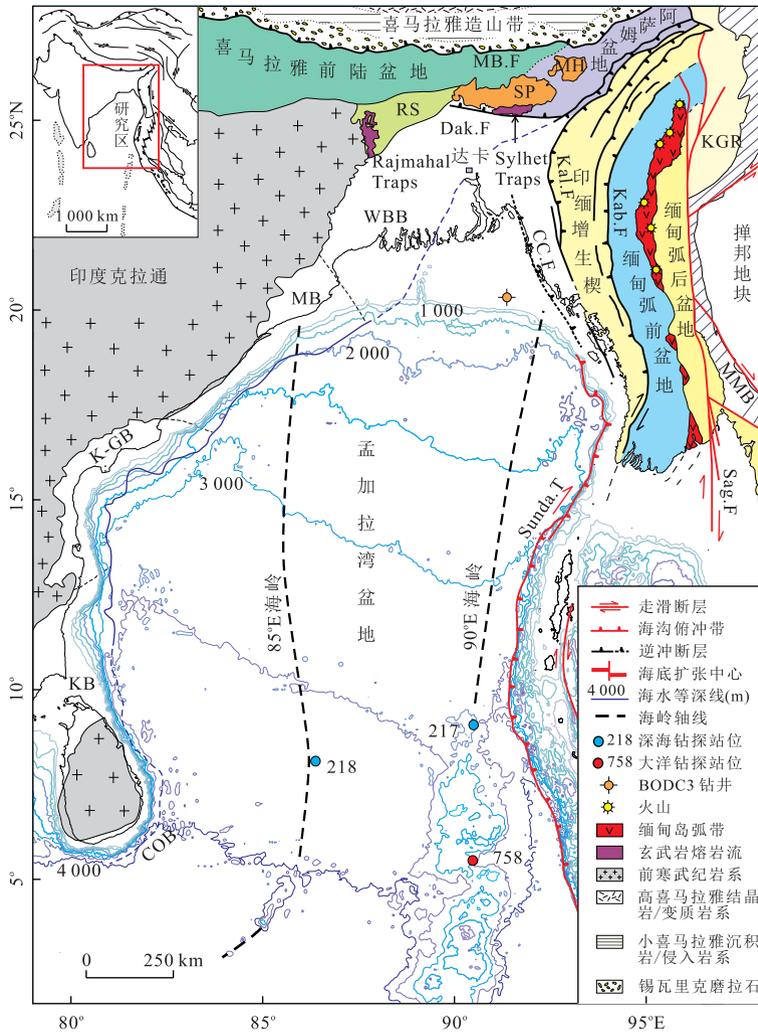


图 1 孟加拉湾盆地及邻区大地构造纲要

Fig.1 Tectonic outline map of the bay of Bengal basin and adjacent region

KB.科佛里盆地;K-GB.克里斯蒂娜—戈达瓦里盆地;MB.默哈纳迪盆地;WBB.西孟加拉盆地;COB.洋—陆壳界线;SP.西隆地块;MH.米尔山;CC.F.吉大港海岸断裂;Kal.F.卡拉丹断裂;Kab.F.卡巴斯断裂;Sag.F.实皆走滑断裂;MB.F.主边界断裂;Dak.F.达卡断裂;Sunda.T.巽他海沟;MMB.抹谷变质带;RS.朗布勒鞍部;KGR.卡萨—甘高蛇绿岩带;Rajmahal Traps.拉杰马哈暗色岩;Sylhet Traps.锡尔赫特暗色岩;据 Maurin and Rangin, 2009;Radhakrishna *et al.*, 2012 修改

注.孟加拉湾盆地与邻近陆缘的构造—地层及海洋地球物理调查研究初步揭示了早期大陆裂谷—漂移史、印度—欧亚板块碰撞、孟加拉扇生长及 85°E 海岭和 90°E 海岭的形成演化(Perice, 1978; Curray *et al.*, 1982; Curray and Munasinghe, 1991; Krishna *et al.*, 1995, 2001; Gopala Rao *et al.*, 1997). 前人对孟加拉湾盆地构造特征与演化研究集中在基底洋壳性质与破碎带特征、85°E 海岭和 90°E 海岭及邻近陆缘的结构与演化(Liu *et al.*, 1982; Gopala Rao *et al.*, 1997; Krishna, 2003; Krishna *et al.*, 2009, 2012)等方面,许多假设与推断是依据板块重建与少量船载重、磁二维剖面建立的,可靠性和精度有限,更缺乏基于全区地震资料和高精度卫星重力资料对盆地构造特征与动力学演化过程的研究.而基于高精度卫星重力数据与地震资料, Bastia *et al.* (2010c)揭示了印度东部陆缘堑—垒结构特征.

最近 30 年,随着油气勘探向深海推进,在墨西哥湾、几内亚湾等地区发现了一系列赋存于深海扇或与之相关的低位体系的大型油气田(Stow and Mayall, 2000).孟加拉扇作为世界上规模最大的深海扇系统,具有良好的油气勘探前景.本文基于对孟加拉湾盆地及邻区重力数据和地震资料的处理、分析与解释,在盆地构造单元划分的基础上,讨论了各构造单元的构造特征与地层充填框架,明确了盆地的隆坳格局,并探讨了盆地的动力学演化过程.本研究有助于进一步理解孟加拉湾盆地构造—沉积体系,对孟加拉深海扇油气勘探潜力的评价有一定的实际价值.

1 区域地质背景

孟加拉湾盆地演化始于早白垩世东冈瓦纳大陆的裂解和东北印度洋的扩张.板块重建模型(图 2)表明东北印度洋经历了 3 期重要的海底扩张:白垩纪中期以前的北西—南东向扩张、白垩纪中期至古近纪的南北向扩张以及之后的北东—南西向持续扩张,这些海底扩张事件得到了海洋磁异常条带和洋壳破碎带研究的证实(Ramana *et al.*, 1994; Gopala Rao *et al.*, 1997; Desa *et al.*, 2006; Krishna *et al.*, 2009; Radhakrishna *et al.*, 2012).孟加拉湾盆地基底洋壳大部分是在前两个阶段形成的(Royer and Sandwell, 1989),此时东北印度洋洋壳整体处在白垩纪磁平静期(Gopala Rao *et al.*, 1997; Krishna *et al.*, 2009).基底洋壳在其演化过程中受到 Crozet 和 Kerguelen 热点的侵位改造,分别形成了 85°E 海

岭和 90°E 海岭,这两条海岭将孟加拉湾盆地分割为两个次盆(Curray *et al.*, 1982; Gopala Rao *et al.*, 1997)并控制了晚白垩世以来盆地的隆坳格局与沉积充填演化.印度板块与欧亚板块的初始碰撞(59 Ma)及新特提斯洋的闭合,标志着孟加拉湾原型盆地开始形成(Lee and Lawver, 1995; Alam *et al.*, 2003; Curray *et al.*, 2002).中始新世(45 Ma)开始,印度板块与欧亚板块由软接触转变为硬碰撞,孟加拉湾粗碎屑沉积物迅速增加,孟加拉扇开始发育(Alam *et al.*, 2003).随着印度板块与欧亚板块碰撞的持续进行,喜马拉雅与印缅造山带快速隆升,为孟加拉湾盆地的沉积充填提供了稳定的物源.中新世期间,孟加拉湾盆地转变为残留洋盆地(Gani and Alam, 1999; Alam *et al.*, 2003).

孟加拉湾盆地最大沉积厚度位于北部孟加拉陆架,超过 22 km(Curray, 1991),向南逐渐减薄.深海钻探(DSDP)217 站位证实最古老的沉积单元为坎帕阶白云岩—燧石复合岩系.孟加拉湾盆地以古新世—始新世区域不整合面为标志,可划分为碰撞前和碰撞后两套层系.碰撞前层系在 85°E 海岭西侧以来自印度大陆的陆源碎屑为主,东侧以远洋钙质沉积为主(Curray *et al.*, 1982; Maurin and Rangin, 2009);碰撞后层系主要指孟加拉扇系统,为典型的泥流—斜坡—水道堤岸垂向沉积建造(Bastia *et al.*, 2010a).除古新世—始新世不整合面外,大洋钻探(ODP)与 DSDP 证实盆地中还存在多个不整合界面, Gopala Rao *et al.* (1997)据此将孟加拉湾盆地中部地层(8~15°N)划分为 H1-H8 共 8 套地震层序,初步建立了该地区的地震地层格架.

2 数据来源

孟加拉湾盆地高分辨率海洋测深数据与重力数据来自美国加利福尼亚大学(UC)和美国国家海洋与大气管理局(NOAA)国家地球物理数据中心(Smith and Sandwell, 1997, 2009).海洋测深数据和卫星重力数据分辨率为 1'×1'.海洋测深数据主要用于描绘孟加拉湾盆地现今海底地貌形态与大陆边缘特征.卫星重力数据刻画了孟加拉湾盆地不同构造带的重力异常属性及构造带边界、盆地基底性质与深部构造特征.

为了揭示孟加拉湾残留洋盆地的结构、构造特征与基底形态,建立孟加拉湾盆地的构造格架,笔者收集利用了前人公开出版的地震剖面:GeoB97-

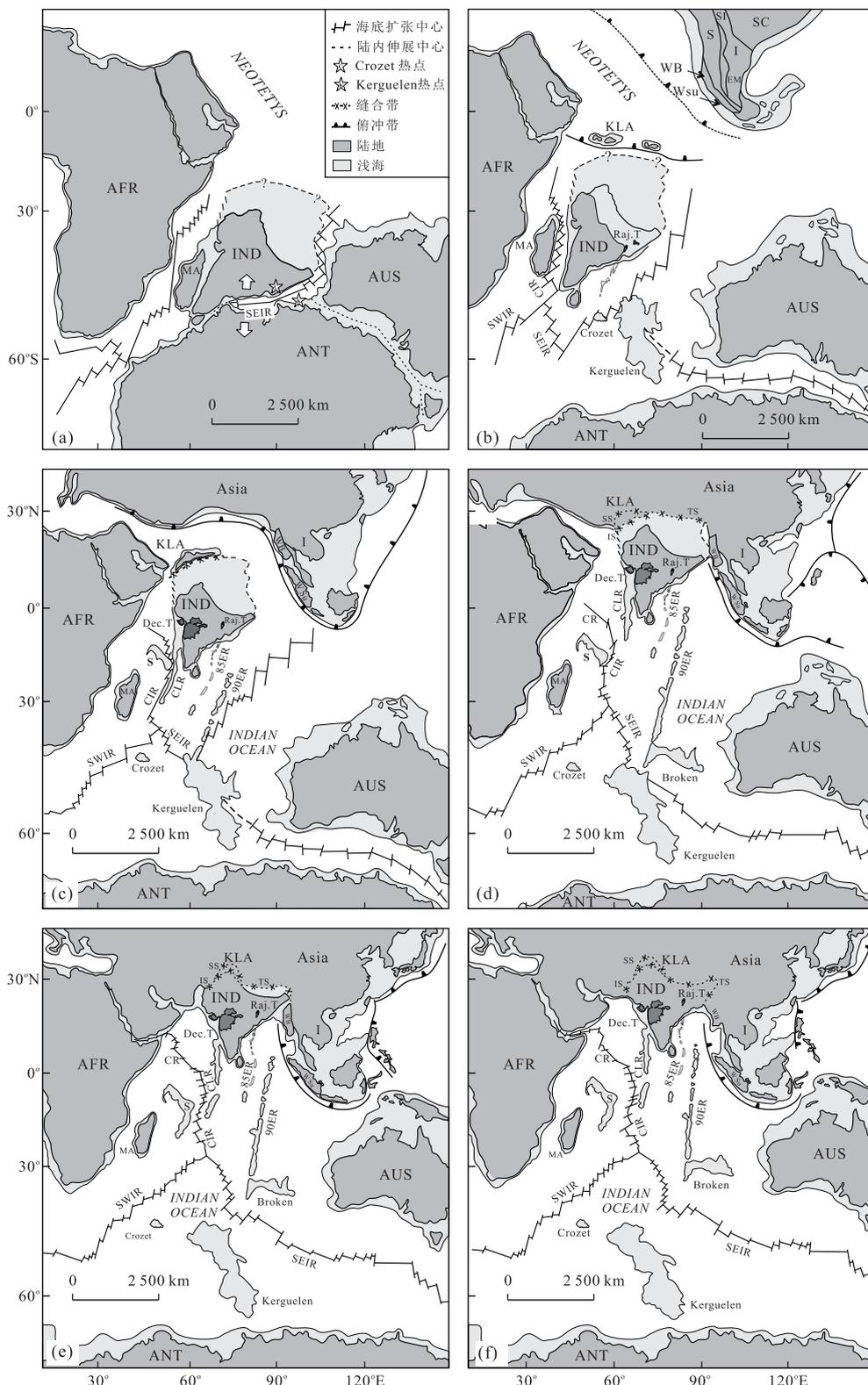


图 2 晚中生代以来印度及邻区板块重建

Fig.2 Plate reconstructions of India and the adjacent region since Late Mesozoic

AFR.非洲; ANT.南极洲; AUS.澳洲; IND.印度; MA.马达加斯加; S.中缅甸苏; SI.思茅; I.印支; EM.东马来亚; SC.南中国; WB.西缅甸; WSu.西苏门答腊; S.塞舌尔; CIR.中印度洋洋中脊; SEIR.东南印度洋洋中脊; SWIR.西南印度洋洋中脊; Raj. T.拉杰马哈暗色岩; Dec. T.德干暗色岩; 85ER.85°E 海岭; 90ER.90°E 海岭; SS.约什克缝合带; IS.印度河缝合带; TS.雅鲁藏布缝合带; CR.卡尔斯伯格洋中脊; CLR.查戈斯-拉克代夫海岭; KLA.科希斯坦-拉达克岛弧; a.早白垩世(120 Ma); b.晚白垩世(80 Ma); c.早始新世(55 Ma); d.晚渐新世(28 Ma); e.晚中新世(10 Ma); f.现今(0 Ma); 据 Curray and Munasinghe, 1991; Royer *et al.*, 1992; Hall, 2012 修改

020/027、GeoB97-028、GeoB97-059/069 (Schwenk, 2003), MAN-01、MAN-03、Profile98791 (Sreejith *et al.*, 2011), T5-7、M3-4、AND-1、Roy. S. K、T57-58、T26-27、E19-20 (Curry, 2005), M-01、M-02、M-05、M-06、M-09、M-15、B3-02 (Maurin and Rangin, 2009), A-A'、B-B' (Radhakrishna *et al.*, 2012)、C-C' (Bastia *et al.*, 2010c), 中海石油(CNO-OC)地震反射资料: Sb209、Sb211A1、A23、A4171. 这些地震资料不仅给出了孟加拉湾盆地的基底形态、85°E 海岭和 90°E 海岭的结构、构造特征, 还揭示了孟加拉湾盆地沉积充填特征.

3 数据处理与分析

3.1 重力异常及其深度处理

重力异常数据处理与应用的目的是提取和分析

孟加拉湾盆地不同构造带的异常特征, 确定其展布方向与范围. Bastia *et al.* (2010c) 对印度东部陆缘及孟加拉湾盆地西部重力异常进行剔除海水布格校正与深度处理, 讨论了印度陆缘线性构造的走向, 但布格异常对研究区构造带刻画并不理想, 图 3 中几乎区分不出明显的异常带 (图 3a), 这可能与其低频、低幅异常属性有关. 本次研究尝试使用自由空气重力异常数据. 孟加拉湾盆地自由空气重力异常图清晰地显示了印度东部大陆边缘重力异常两极分异的特征, 这种变化与海洋测深显示的由印度陆架向深海过渡的趋势高度吻合 (图 1, 图 3b), 说明这一区域重力异常的转变与海水深度增大及陆壳减薄有关. 自由空气重力异常图显示盆地内存在两条近南北向延伸的重力负异常与重力正异常带, 分别对应着 85°E 海岭和 90°E 海岭. 85°E 海岭重力负异常带向北延伸与印度陆缘负异常带合并, 向南在 5°N 附近

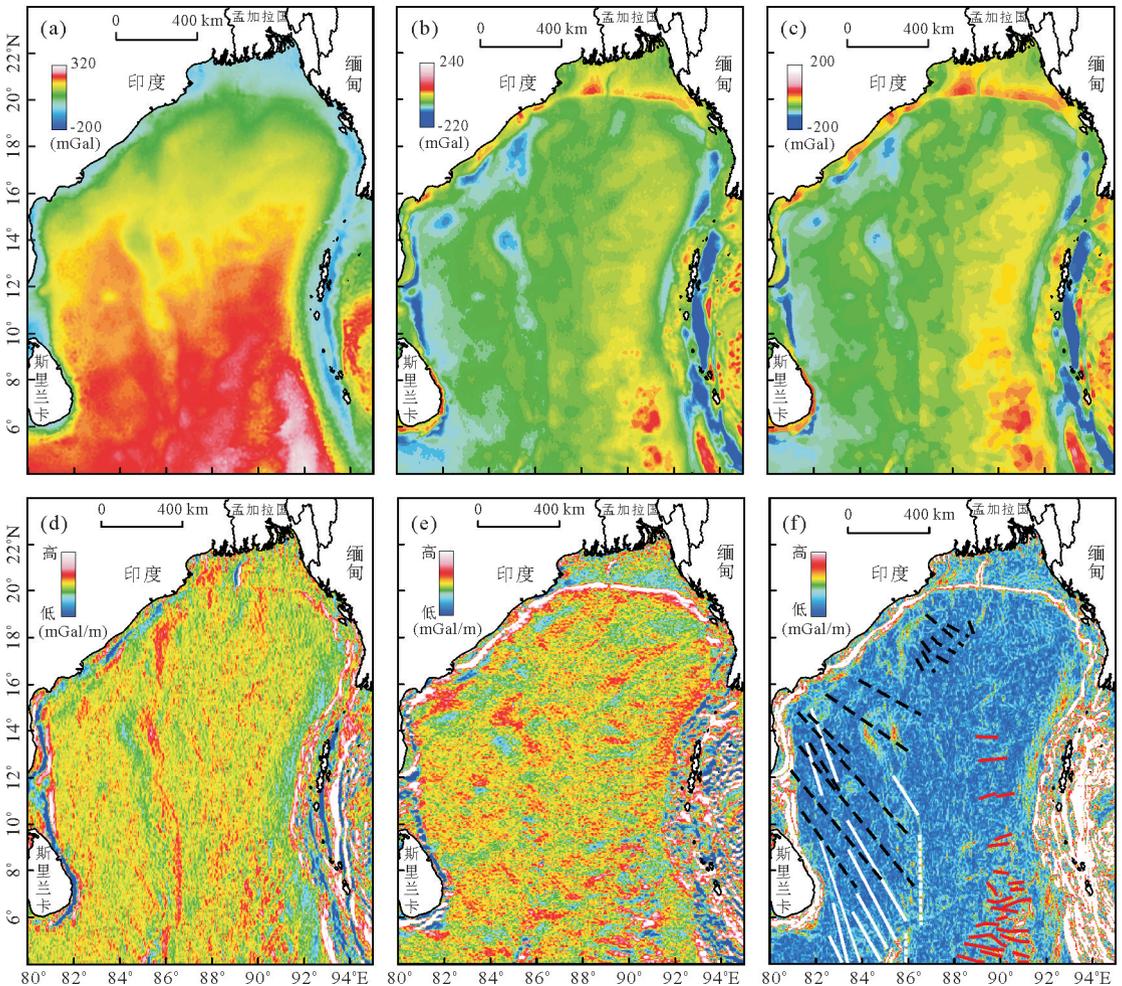


图 3 孟加拉湾盆地重力异常与深度处理

Fig.3 Gravity anomaly and enhanced processing maps of the bay of Bengal basin

图 f 黑色虚线为前人解释破碎带, 白色和红色为本次解释

变为正异常。90°E 海岭重力正异常带东西展布较宽,在 10°N 以南显示为高重力正异常。此外,在盆地东北部靠近缅甸—安达曼群岛存在多个明显的重力负异常带,这些负异常带的展布与巽他海沟俯冲带的延伸方位一致,说明负异常带的产生可能与孟加拉湾洋壳斜向俯冲导致的挤压变形有关。

自由空气重力异常初步揭示了孟加拉湾盆地主要构造带的异常特征及其展布,但是对局部构造的刻画有限,需要进一步对自由空气重力异常数据进

行滤波、梯度、延拓等深度处理。孟加拉湾盆地小子域滤波(窗口 7×7,半径 20 km)图显示了更加清晰的构造带边界(图 3c),对不同构造带的刻画更逼近其真实形态。垂向梯度图(图 4d)显示,在 85°E 海岭西侧发育数条北西向线性构造,可能是与印度洋早期北西向扩张有关的基底破碎带(Krishna *et al.*, 2009),这些破碎带得到了地震资料的证实(Radhakrishna *et al.*, 2012)。而在水平梯度图中,90°E 海岭内部显示存在一系列近东西向断裂(图

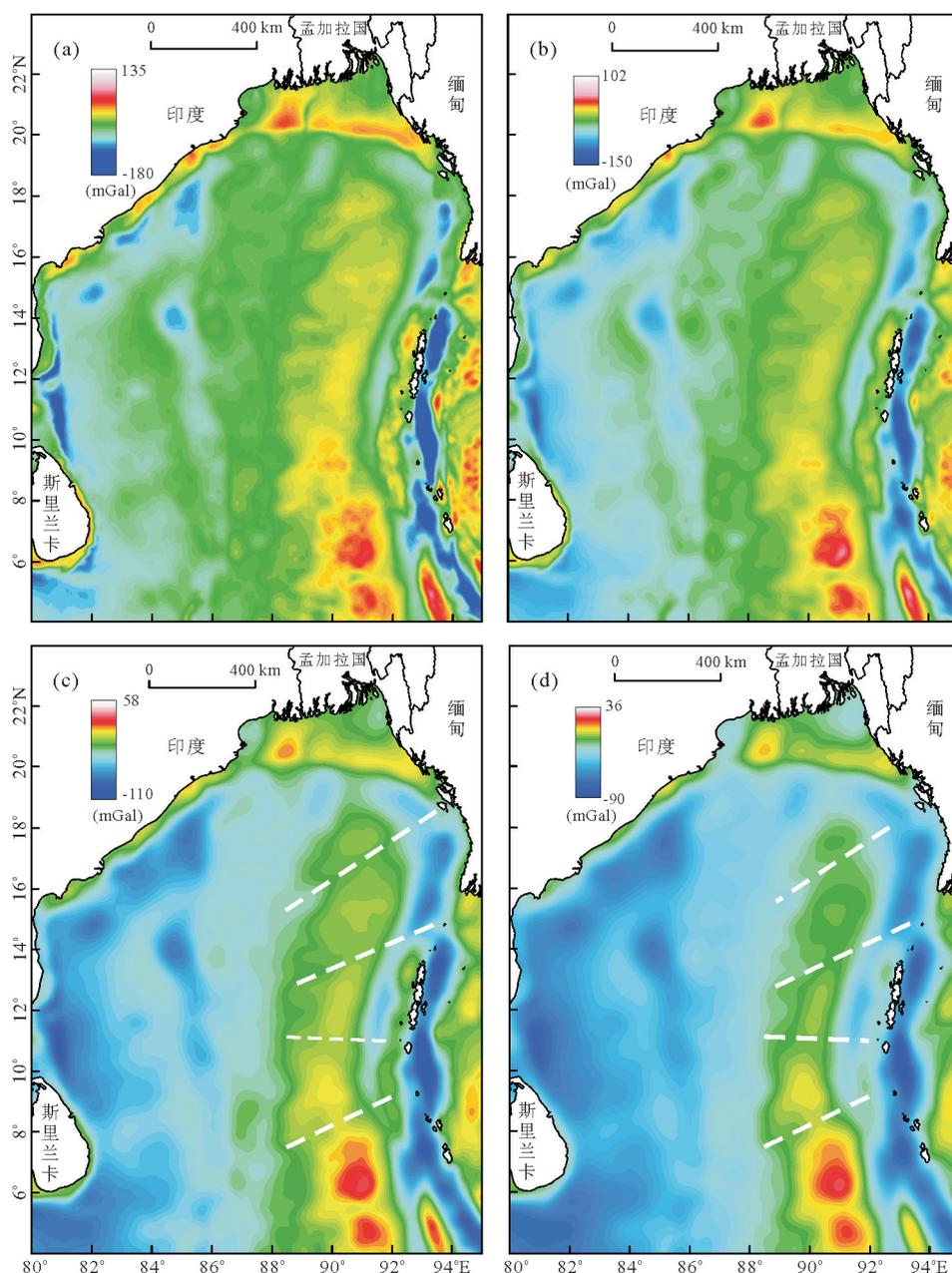


图 4 孟加拉湾盆地自由空气重力异常延拓处理

Fig.4 Free-air gravity anomaly processed with methods of upward continuation in the bay of Bengal basin

a.向上延拓 10 km;b.向上延拓 15 km;c.向上延拓 20 km;d.向上延拓 30 km

3e), 这些断裂可能是与海岭同期形成的正断裂, 与 90°E 海岭南段存在的正断裂具有相似的特征。上述北西向破碎带和东西向断裂在梯度模图上的显示也非常清晰(图 3f, 白色和红色线条表示)。

为了了解孟加拉湾盆地基底结构与深部构造, 对自由空气重力异常进行向上延拓处理。该方法可削弱盆地浅层异常, 突出深部异常, 进而揭示深部构造的特征。Rajesh and Majumdar(2009)对 90°E 海岭北段(7°~18°N)进行过向上 50 km、200 km 和 300 km 延拓处理, 探讨了海岭南北段地壳均衡补偿的差异, 但未考虑和讨论 < 50 km 内延拓结果及随着延拓高度增加 85°E 海岭和 90°E 海岭的差异变化。对孟加拉湾盆地自由空气重力异常数据向上 10 km、15 km、20 km 和 30 km 延拓处理的结果表明, 随着延拓高度的增加, 盆地浅层异常被压制, 深部地质构造异常特征得到加强(图 4)。自由空气重力异常值变化范围由 10 km 处的 -180~90 mGal 减小至 30 km 处的 -90~30 mGal。85°E 海岭和 90°E 海岭异常特征也随延拓高度的增加显示了明显的差异变化: 延拓至 15 km 时, 85°E 海岭异常开始与周围洋壳逐渐融合, 并在 30 km 时完全融合, 显示为负异常; 而 90°E 海岭一直为正异常, 但范围逐渐缩小, 海岭内部逐渐显示了南北分段特征, 段与段之间表现为北东向构造线(图 4c, 4d), 这种分段性及北东向构造除了与海岭南、北段补偿深度有关外, 还与后期印度板块向西缅甸地块斜向俯冲导致的差异变形有关。85°E 海岭和 90°E 海岭向上延拓的差异表明后者比前者具有更大的侵位深度。

3.2 主干剖面建立

过去几十年, 对孟加拉湾盆地及邻区的地球物理研究, 大多依靠重力和磁力开展, 基于地震资料的研究非常少。一方面是因为穿过孟加拉湾盆地的地震剖面少且零散; 另一方面, 研究区缺少地层划分标志与方案, 地层界面属性认识混乱, 尚未建立全区的地质格架。多种研究方法和手段的结合有利于促进认识的深入和结论的相互约束支撑。为此, 本研究进一步选取孟加拉湾盆地及邻区大致位于同一纬度的零散地震剖面进行连接, 自北向南建立了横切印度东部陆缘、孟加拉湾盆地、缅甸—安达曼主动陆缘的 8 条近东西向的主干剖面, 对孟加拉湾盆地自北向南进行了详细地切片式解剖。此外, 基于对 DS-DP218、BODC3 钻井分层数据对比分析和标准化处理及 Gopala Rao *et al.*(1997)在孟加拉湾盆地中部建立的地震层序格架, 结合区域构造—沉积特点, 笔

者将孟加拉湾盆地划分出上白垩统一古新统、始新统一渐新统、中新统、上新统和第四系 5 套层系。

主干剖面显示, 盆地北部沉积厚度大于南部, 自北向南呈逐渐减小的趋势。盆地内最古老的沉积单元为白垩系—古新统(Curray *et al.*, 1982), 与孟加拉扇系统以区域性不整合面“P”界面(Gopala Rao *et al.*, 1997)为界, 该界面为钻井和地震解释所证实, 全区可追索。“P”界面之下为碰撞前沉积, 之上为碰撞后沉积。碰撞前层系在 85°E 海岭西侧厚度大, 自北向南分布稳定, 在海岭东侧较薄(图 5), 表明孟加拉湾盆地早期物源主要来自印度大陆方向。而始新统一渐新统在 85°E 海岭两侧分布没有明显差异, 反映了此时物源供给方向发生改变。中新统是整个孟加拉湾盆地中最重要、沉积厚度最大的一套地层, 改变了之前沉积体系分布受 85°E 海岭和 90°E 海岭分割控制的格局, 2 条海岭在中新统沉积之后被完全掩埋。中新统沉积反映了印度—欧亚板块硬碰撞导致喜马拉雅造山带快速隆升、剥蚀后, 陆源碎屑快速卸载、孟加拉扇快速推进的过程。中新统顶部的“A”不整合面(Gopala Rao *et al.*, 1997)将其与上新统及第四系分开, 后者在盆地东北部沉积厚度较大, 而其他地区较薄, 甚至缺失。

孟加拉湾盆地西邻印度东部被动大陆边缘, 其底部发育一系列堑—垒构造, 充填中生代碎屑岩系与火成岩侵入体(Murthy *et al.*, 1993)。盆地中发育 2 条近南北向延伸的海岭: 85°E 海岭和 90°E 海岭。85°E 海岭近北北东向延伸至印度默哈纳迪海岸, 在主干剖面中可以清楚地看到其分为东西两条山脉, 其间为小型次级盆地; 南北方向, 海岭由多个相间的高凸起和低隆起构成, 高凸起隆起幅度大, 相对孤立(图 5)。85°E 海岭将盆地分为东西 2 个次盆(Gopala Rao *et al.*, 1997), 西部次盆向北收敛于印度陆缘, 向南开阔, 碰撞前地层厚度大; 东部次盆南部相对收敛, 北部开阔, 以孟加拉扇沉积为主。次盆内构造平缓, 下部地层向海岭明显上超。90°E 海岭呈北北东向延伸至缅甸近海, 南部隆起幅度较高, 北部低。南部与安达曼增生楔直接接触, 局部俯冲于增生楔之下, 导致增生楔内地层发生强烈变形, 发育叠瓦状逆冲推覆构造; 北部与印缅增生楔之间以次级拗陷相隔, 拗陷内新近系和第四系占绝对优势, 可能反映了其接受喜马拉雅造山带与印缅增生楔双重物源供给的影响。

3.3 地层厚度反演

地层厚度反演不仅可以得到现今盆地地层分布

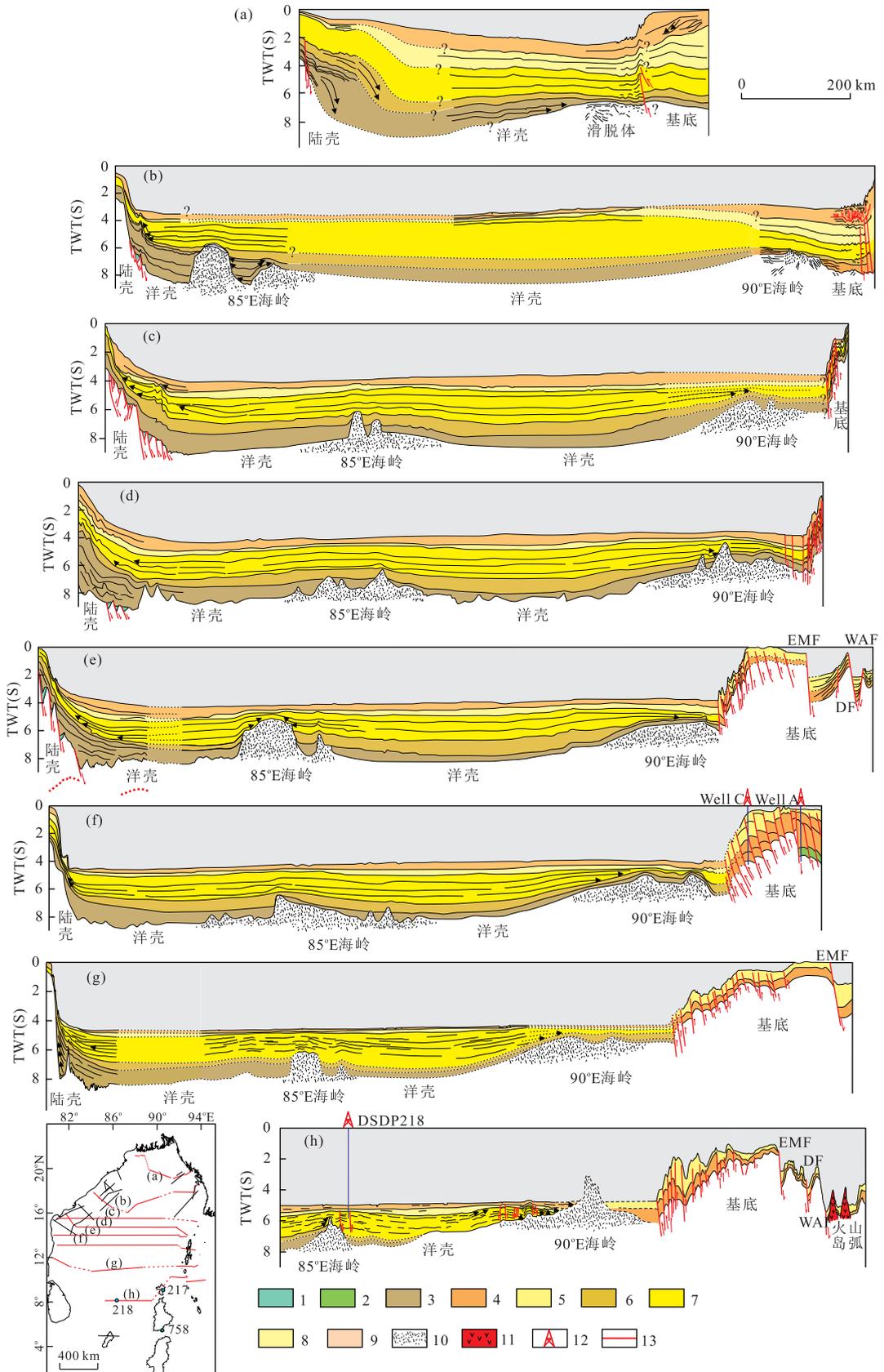


图 5 孟加拉湾盆地主干剖面

Fig.5 Cross sections of standardized seismic reflection profiling of the bay of Bengal basin

1. 侏罗系—下白垩统; 2. 白垩系; 3. 上白垩统—古新统; 4. 古近系; 5. 新近系; 6. 始新统—渐新统; 7. 中新统; 8. 上新统; 9. 第四系; 10. 海岭; 11. 火山岛弧; 12. 钻井及编号; 13. 断裂

状态,还可以清楚地反映盆地基底起伏形态。Curry(1991)和 Radhakrishna *et al.*(2012)曾先后给出了孟加拉湾盆地地层厚度图。但是前者仅反映了地层厚度的总体变化趋势,后者在前者的基础上进一步精细化,但对两条海岭的刻画明显不足。Subrahmanyam and Singh(1992)提出孟加拉湾盆地南部(0~10°N)沉积物速度在 2.0~5.7 km/s 之间,洋壳速度为 6.1~7.7 km/s,与 Naini and Leyden(1973)推荐的孟加拉湾盆地北部地层速度基本一致。笔者在 Maurin and Rangin(2009)提供的盆地北部 BODC3 井分层数据基础上,利用 8 条主干剖面和其它地震测线建立了盆地白垩纪以来完整的地震分层与层速度划分方案(图 6a),并反演了盆地地层厚度(图 6b)。孟加拉湾盆地地层厚度反演结果表明,盆地北部最大沉积厚度超过 19 km,向南逐渐减薄,在 85°E 海岭和 90°E 海岭顶部以及印度东部陆缘沉积厚度 < 5 km,拗陷内沉积厚度大部分 > 8 km。Curry(1991)认为盆地北部的最大沉积厚度超过 22 km,略大于反演厚度,沉积中心也稍偏东,基于地震约束的厚度反演可能更贴近盆地沉积盖层厚度。地层厚度的精细变化刻画了 85°E 海岭和 90°E 海岭的形态。85°E 海岭在 13°~16°N 之间发育两个被多条地震测线所证实的孤立高凸起。这些高凸起与 Bastia *et al.*(2010b)研究的印度默哈纳迪海岸 85°E 海岭高凸起类似,可能是热点幕式活动引起,而非数据畸变引起(南部 3 个孤立点由数据畸变引起)。由于缺

少数数据,90°E 海岭南部形态可靠性较差,但位置、延伸趋势等与重力异常结果相吻合。90°E 海岭向北延伸至 20°N 附近,明显支持 Maurin and Rangin(2009)的结论,而非 Curry *et al.*(1982)等认为的仅延伸至 18°N。海岭北段与缅甸海岸之间形成了具有较大沉积厚度的拗陷。

4 讨论

4.1 孟加拉湾盆地构造格局

印度板块向北漂移过程中经过不同地幔柱时在印度地盾和洋壳上分别产生了规模巨大的火成岩省和洋壳遗迹(Curay and Munasinghe, 1991; Storey, 1995; Müller *et al.*, 1997)。85°E 海岭和 90°E 海岭被认为是由地幔柱在东北印度洋壳上产生的遗迹之一,它们作为孟加拉湾盆地中的基底隆起,对盆地构造格局和沉积体系分布产生了重要影响。基于重力异常和主干剖面的分析,将孟加拉湾盆地划分出西部拗陷、85°E 海岭隆起、中央拗陷、90°E 海岭隆起和若开拗陷 5 个构造单元(图 7)。

4.1.1 85°E 海岭重力异常与结构特征 在东北印度洋,85°E 海岭是一条重要的无震脊(Radhakrishna *et al.*, 2012),分割了孟加拉湾盆地的西部拗陷和中央拗陷。尽管对 85°E 海岭的成因存在多种理论解释模型(Curay and Munasinghe, 1991; Kent *et al.*, 1992; Ramana *et al.*, 1997),但是基于详细的

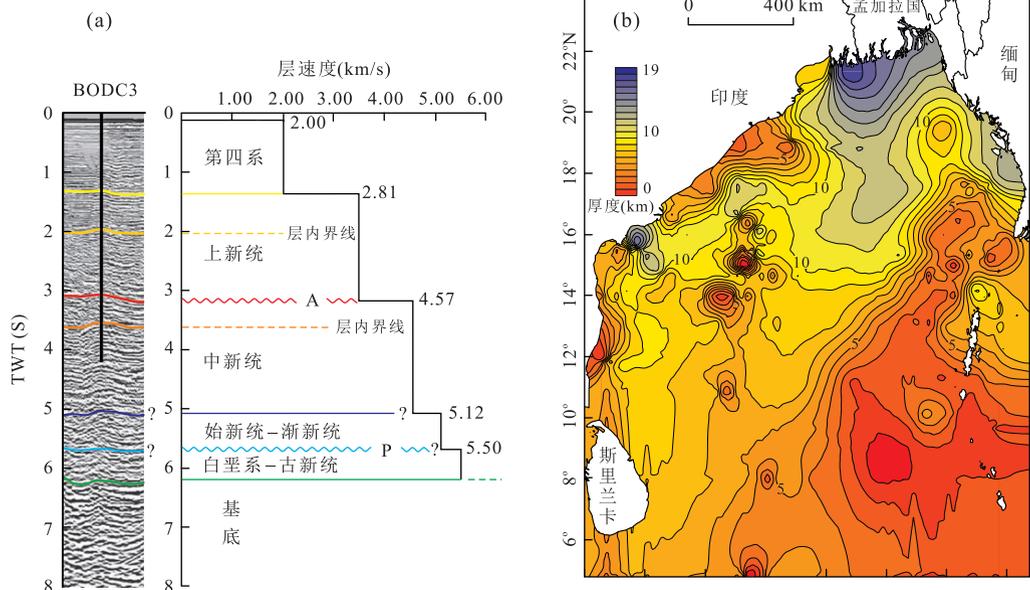


图 6 孟加拉湾盆地 BODC3 井地震层速度及地层厚度反演

Fig.6 Seismic interval velocity of well BODC3 and residual stratum thickness inversion of the bay of Bengal basin

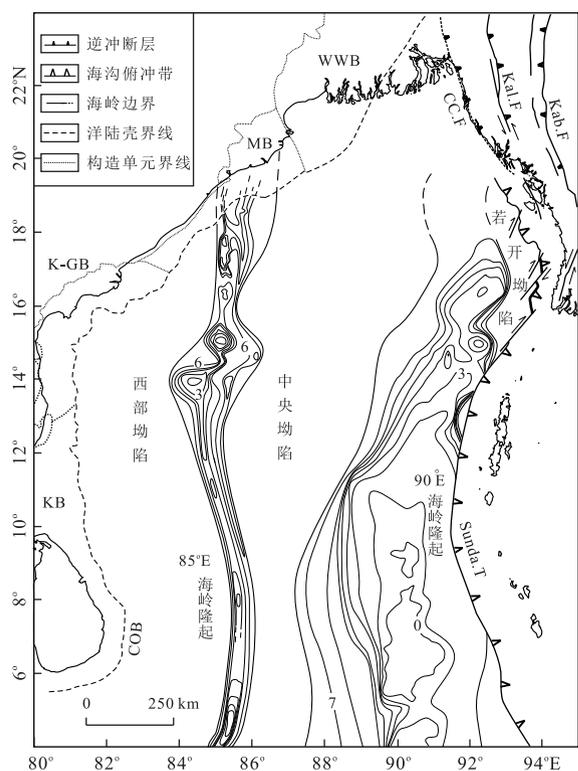


图 7 孟加拉湾盆地构造单元划分

Fig. 7 Tectonic units division of the bay of Bengal basin
海岭内部线条和数字显示的是埋藏深度,间隔 1 km

地球物理资料,大多数学者认为热点理论更能合理地解释其成因及复杂的重、磁异常特征 (Müller *et al.*, 1993; Gopala Rao *et al.*, 1997; Subrahmanyam *et al.*, 1999, 2008; Krishna, 2003; Krishna *et al.*, 2009; Bastia *et al.*, 2010b). 在自由空气重力异常图中 85°E 海岭显示为明显的负异常带 (图 3b), Liu *et al.* (1982) 认为这种负异常特征与海岭侵位和上覆沉积物前后叠加造成的岩石圈负载有关; Krishna *et al.* (2003) 则认为负异常是低密度海岭物质与上覆变质沉积岩之间的密度差及海岭之下莫霍面大范围沉降的结果. 最近, Sreejith *et al.* (2011) 提出 85°E 海岭在晚白垩世时为重力正异常, 由于上覆沉积物沉积速率和性质的变化最终导致 85°E 海岭在中新世早期转变为负异常. 笔者基于重力延拓结果认为 90°E 海岭比 85°E 海岭具有更深的侵位深度, 是导致两者重力异常极性相反的原因之一. 此外, 85°E 海岭南北上覆地层厚度与重力正负异常之间具明显的对应关系. 可见, 85°E 海岭重力负异常是由海岭侵位深度、上覆沉积物厚度及莫霍面沉降等多种因素影响下联合产生的, 可能存在极性的反转.

主干地震剖面显示 85°E 海岭由东、西 2 条山脉构成, 上白垩统一渐新统在东、西两翼上超于海岭之上. 山脉之间发育小型次级盆地, 内部充填来自盆地西侧印度大陆中部的戈达瓦里分散体系 (Bastia *et al.*, 2010b), 说明海岭形成初期隆起幅度低于现今, 能够允许部分印度大陆物源跨越西侧山脉进入次盆地, 之后随着海岭的多期隆升才形成现今的格局. 这一推测与 Bastia *et al.* (2010b) 对默哈纳迪海岸 85°E 海岭内部地震反射特征的研究结果相吻合. 孟加拉湾盆地地层厚度反演结果表明, 85°E 海岭是由相对孤立的高凸起和相对连续的低隆起构成. 海岭西侧山脉断续分布, 反映了海岭侵位时热点的强-弱变化规律, 具有幕式活动特征, 这也是造成海岭两侧上白垩统一古新统西厚东薄的重要原因.

4.1.2 90°E 海岭展布特征及其俯冲作用 90°E 海岭自南部 Broken 脊向北沿径向延伸至缅甸近海, 总长约 5 600 km, 是地球上最长的线性火山岩构造之一 (Krishna *et al.*, 2012). 海岭在 10°N 以南出露于海底之上, 以北掩埋于孟加拉扇之下 (Curry *et al.*, 1982; Gopala Rao *et al.*, 1997), 在自由空气重力异常图上表现为正异常—高正异常. 大多数学者认为 90°E 海岭是由白垩纪晚期—新生代早期印度板块底部 Kerguelen 热点形成的 (Peirce, 1978; Royer *et al.*, 1991), 这一理论得到了 DSDP26 航次和 ODP121 航次获取的基底火山岩岩心地质年代学证据的支持 (Pringle *et al.*, 2008).

Royer *et al.* (1991) 认为 Kerguelen 热点与 Wharton 扩张中心的相对位置、破碎带走向、板块运动方向、热点漂移、热点岩浆溢流量变化以及与构造变形相关的断裂共同影响了 90°E 海岭的结构和形态. 在孟加拉湾盆地中, 90°E 海岭径向上呈现复杂多变的状态 (Fisher *et al.*, 1982; Krishna *et al.*, 2001; Sager *et al.*, 2010). 主干地震剖面上, 90°E 海岭南北向由低幅—高幅海山和线性脊构成, 东西向不对称状展布, 西翼为缓坡, 东翼为阶梯状陡坡. 在 10°~5°S 之间, 海岭被众多近东西向正断层切割 (Sager *et al.*, 2010). 自由空气重力异常水平梯度图显示, 在 90°E 海岭内部发育许多近东西向断层 (图 3e), 这些正断层的产生可能与海岭侵位时邻近 Wharton 扩张脊有关.

自由空气重力异常及其延拓结果表明, 90°E 海岭与缅甸海岸之间存在多个重力负异常区, 这些负异常区是由孟加拉湾盆地洋壳及 90°E 海岭向缅甸—安达曼主动陆缘的斜向俯冲、挤压产生的, 这些

负异常区在地质单元上位于若开拗陷。主干剖面显示,90°E 海岭南段(7°~14°N)被安达曼增生楔叠瓦状逆冲推覆体掩盖,说明该段海岭已经部分俯冲于主动陆缘之下。而海岭北端的地震剖面和重力负异常特征表明 90°E 海岭延伸至 20°N 之后也发生了向缅甸主动陆缘的俯冲作用。孟加拉湾盆地地层等厚图揭示的盆地北部巨厚沉积中心的形成除了受孟加拉陆架前积层的生长、沉积负载及东西向挤压等因素影响外,还与 90°E 海岭的存在密切相关。正是由于 90°E 海岭(南北向的刚性体)阻挡,印度板块与欧亚板块南北向碰撞产生的巨大挤压应力只能在 90°E 海岭与东喜马拉雅造山带之间的区域释放,从而促进了北部孟加拉湾洋壳南北向的挠曲沉降和西隆高原的隆升。喜马拉雅前陆盆地的展布、西隆高原隆升史(Johnson and Nur Alam, 1991; Clark and Bilham, 2008)与孟加拉湾北部沉积充填特征佐证了这一点。90°E 海岭与印缅增生楔的相互作用导致了增生楔南北向的差异演化,控制着增生楔内走滑断层与褶皱的发育。

4.1.3 拗陷发育特征 85°E 海岭和 90°E 海岭将孟加拉湾盆地分割成 3 个次级拗陷,即西部拗陷、中央拗陷和若开拗陷,它们具有“隆拗相间、东西分带”的构造格局。西部拗陷向北在印度默哈纳迪海岸收敛,向南开阔。拗陷基底为白垩纪洋壳,垂向梯度图揭示的北西—南东向线性构造,是与东北印度洋北西—南东向扩张有关的破碎带(Krishna *et al.*, 2009),早期来自印度陆缘方向的物源主要沉积在该拗陷中。中央拗陷在南部相对收敛,在北部撒开,地层平缓,构造变形弱,上白垩统一中新统向两侧海岭上超。若开拗陷位于盆地东北部,呈北西向延伸,西侧以 90°E 海岭为界,东侧以巽他海沟为界。若开拗陷底部上白垩统一渐新统相对不发育,而以新近系—第四系占绝对优势,反映了喜马拉雅造山带与印缅增生楔方向物源供给持续快速增加的影响。若开拗陷东侧的印缅增生楔发育一系列叠瓦状逆冲褶皱构造,向西延伸至若开拗陷新近系中,在第四系中发育深水重力滑脱构造,受到很多学者的关注(Maurin and Rangin, 2009; Morley *et al.*, 2011)。

4.2 孟加拉湾盆地动力学演化

孟加拉湾盆地及邻区的构造演化始于中生代东冈瓦纳大陆裂谷作用及之后晚白垩世印度板块与南极洲板块的裂离。前人研究证实东北印度洋经历的北西—南东向、南北向和北东—南西向 3 期重要的海底扩张事件,分别发生在白垩纪中期以前、白垩纪

中期—古近纪及古近纪之后(Ramana *et al.*, 1994; Gopala Rao *et al.*, 1997; Desa *et al.*, 2006; Krishna *et al.*, 2009; Radhakrishna *et al.*, 2012),孟加拉湾盆地基底洋壳大部分是在古近纪之前形成的(Royer and Sandwell, 1989),表明孟加拉湾盆地北西向破碎带和 90°E 海岭内东西向断裂与前两期海底扩张密切相关。基底洋壳上覆上白垩统一新生界巨厚沉积。孟加拉湾洋壳的早期扩张受到 Crozet 和 Kerguelen 热点改造,85°E 海岭磁异常研究表明其在默哈纳迪海岸开始形成的时间为 80 Ma,在 Afanasy Nikitin 海山的终止时间为 55 Ma(Michael and Krishna, 2011),自北向南变年轻;90°E 海岭北部 ODP758 站位火山岩岩心地质年龄为 77 Ma,南部 DSDP254 站位火山岩地质年龄为 43 Ma(Krishna *et al.*, 2012),也呈现自北向南变年轻的趋势。海洋磁异常、ODP 与 DSDP 获取的地质年龄不仅支持 85°E 海岭和 90°E 海岭的热点成因模型,还证实两条海岭在白垩纪末期已经完成了在孟加拉湾盆地的侵位,进而开始影响盆地沉积体系的分布格局。

板块重建模型认为东冈瓦纳大陆初始裂谷作用发生在早侏罗世期间(180 Ma),之后是早白垩世(120 Ma)开始印度板块与南极洲板块的裂解(Storey, 1995)及东印度洋的海底扩张(图 2a; 图 8e, 8f),印度东部大陆边缘和孟加拉湾盆地基底洋壳均是在这一阶段形成(Royer and Sandwell, 1989; Krishna *et al.*, 2009)。裂谷作用和海底扩张在印度东部大陆边缘产生了一系列与此相关的堑—垒构造、火山岩侵入体和楔形体沉积(图 8e)。晚白垩世—新生代早期开始的海岭侵位导致孟加拉湾盆地的构造—沉积格局发生改变,来自印度大陆方向的陆源碎屑被限制在西部拗陷中,中央拗陷积厚度较小(图 2b, 2c; 图 8d);随着新特提斯洋的关闭以及印度板块与欧亚板块的俯冲碰撞,喜马拉雅造山带开始隆升并向孟加拉湾盆地提供南北向物源。印度板块与欧亚板块的初始接触(55 Ma)在孟加拉湾盆地内产生了区域性的不整合面(“P”界面),反映了构造背景转变条件下的沉积响应特征(Curray *et al.*, 2002)。始新世(Schwenk *et al.*, 2003)开始,由恒河—布拉马普特拉河提供物源形成的孟加拉扇系统成为孟加拉湾盆地的主体,其沉积中心在始新世至中新世期间存在一直向南迁移的过程。新生代期间印度板块向西缅甸地下的斜向俯冲活动控制了孟加拉湾盆地东部深层与浅层北东向构造变形。同时,90°E 海岭的存在及其北端的俯冲作用增强了这一区域东西向挤

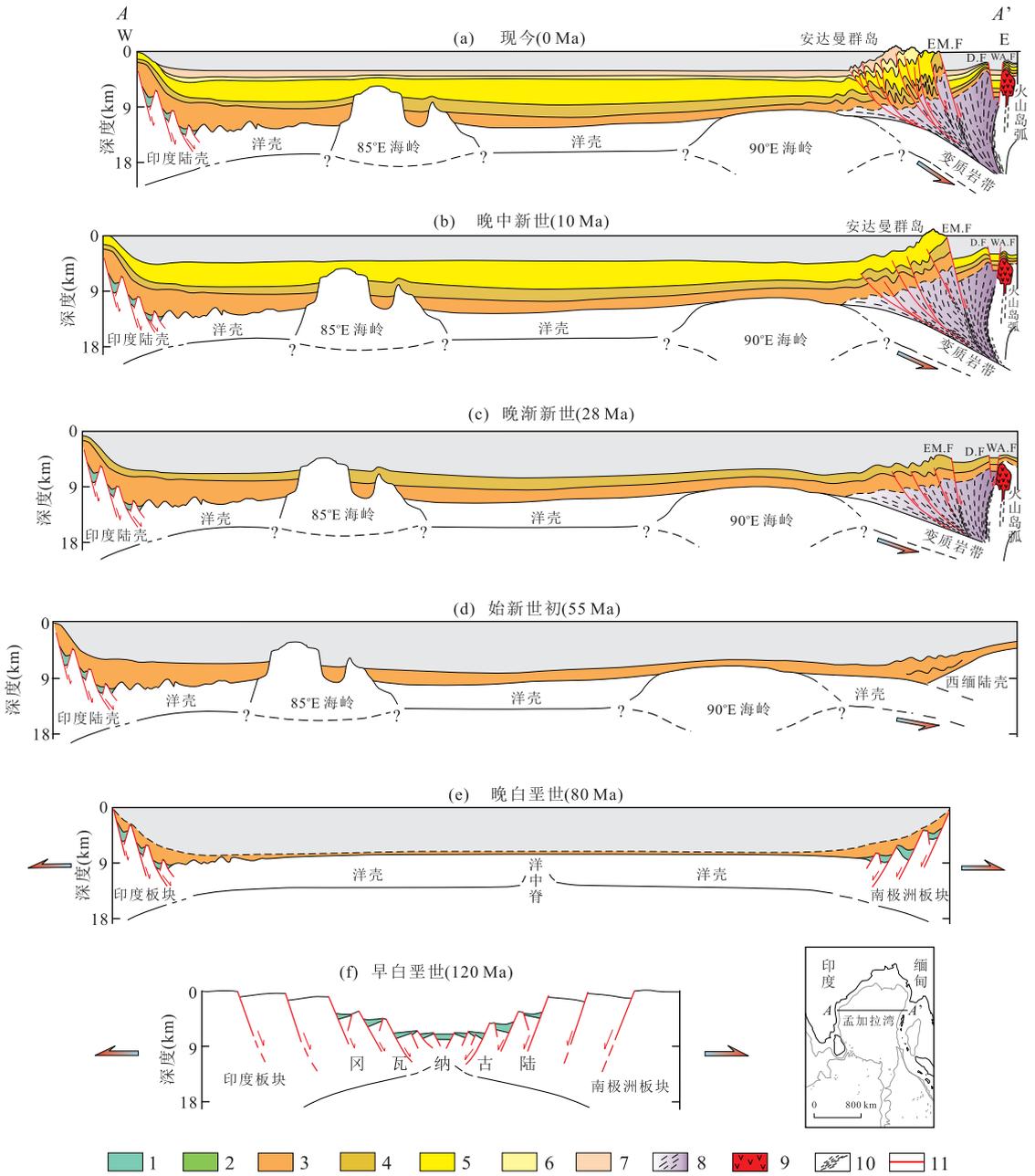


图 8 孟加拉湾盆地构造演化模式

Fig.8 Tectonic evolution model of the bay of Bengal basin

1. 侏罗系一下白垩统; 2. 上白垩统; 3. 上白垩统一古新统; 4. 始新统一渐新统; 5. 中新统; 6. 上新统; 7. 第四系; 8. 变质带; 9. 火山岛弧; 10. 主剪切带; 11. 断裂; EM.F. 东部陆缘断裂; D.F. 迪利让断裂; WA.F. 西安达曼断裂

压与南北向的剪切活动。随着洋壳俯冲作用的进行, 印度板块与欧亚板块在西缅甸地块西缘自北向南逐渐收敛, 孟加拉湾盆地由原始大洋盆地到残留洋盆地转变。Gani and Alam(1999)及 Alam *et al.*(2003)认为这一时期为中新世早期, 而 Lee and Lawver(1995)及 Hall(2012)板块模型推崇者则认为这一事件应该发生在渐新世期间。笔者的磷灰石裂变径迹实验结果表明, 印缅增生楔在晚渐新世至晚上新

世期间($28 \pm 1.5 \text{ Ma} \sim 2.5 \pm 0.5 \text{ Ma}$)一直处于隆升剥蚀状态, 期间存在晚渐新世($28 \pm 1.5 \text{ Ma} \sim 25 \pm 1.5 \text{ Ma}$)和晚中新世—晚上新世($10 \pm 1.1 \text{ Ma} \sim 2.5 \pm 0.5 \text{ Ma}$)两期快速隆升事件, 响应于孟加拉湾盆地洋壳向印缅增生楔的 2 次快速俯冲过程, 而晚渐新世期间的快速俯冲可能暗示孟加拉湾盆地开始转化为残留洋盆地(图 2d, 2e; 图 8a, 8b, 8c)。

不同演化阶段的孟加拉湾盆地有不同的盆地原

型。自晚中生代以来东北印度洋的扩张和俯冲消减,伴随着印度板块的裂离、漂移及拼贴过程,孟加拉湾盆地属性发生了 2 次转变。侏罗纪—早白垩世期间,东冈瓦纳大陆各板块间发生广泛的裂谷作用,伴有岩浆侵入和火山活动,这一时期为孟加拉湾盆地发育前的孕育期。早白垩世晚期(120 Ma),随着印度板块与南极洲板块的分离及东北印度洋的张开,孟加拉湾盆地基底洋壳开始发育,盆地雏形开始形成,为原始大洋盆地阶段(图 2a, 2b);除印度东部陆缘外,盆地主体发育薄层的白垩系远洋沉积(图 8e)。始新世以来(图 2c),特别是渐新世期间印度板块与西缅甸地块北部发生硬碰撞,洋壳在此俯冲消亡,孟加拉湾盆地演化为“剪刀型”残留洋盆地(图 2d, 2e; 图 8a, 8b, 8c)。孟加拉湾盆地演化过程中,早期物源主要来自西侧印度大陆,晚期(45 Ma 以来)转变为北部的喜马拉雅造山带。

5 结论

(1) 孟加拉湾盆地西部北西向破碎带、海岭内部近东西向断裂、东部北东向线性构造分别与印度洋北西—南东向海底扩张、海岭侵位、印度板块向西缅甸地块斜向俯冲等因素有关。侵位深度较浅可能是造成 85°E 海岭呈现重力负异常的原因之一。

(2) 孟加拉湾盆地具有明显的“隆拗相间、东西分带”的构造格局,盆地自西向东依次有西部拗陷、85°E 海岭隆起、中央拗陷、90°E 海岭隆起和若开拗陷 5 个构造单元。85°E 海岭发育多个孤立的高隆起,反映海岭侵位的幕式活动特征,是控制上白垩统一古新统差异分布的主要原因。90°E 海岭南段(7°~14°N)的局部俯冲消减增强了安达曼增生楔的逆冲推覆活动,北段(14°~20°N)的斜向俯冲控制了盆地沉积中心与若开拗陷的形成。

(3) 孟加拉湾盆地主要经历了晚白垩世—早渐新世原始大洋盆地和晚渐新世至今残留洋盆地 2 个演化阶段。晚白垩世—古新统期间 85°E 海岭的幕式侵位活动控制了这一时期“西厚东薄”的沉积格局,之后印度—欧亚板块的俯冲碰撞导致孟加拉扇系统的形成,该系统在始新世—中新世期间一直向南迁移。盆地基底洋壳的北东向俯冲导致了印缅增生楔晚渐新世、晚中新世—晚上新世的两期快速隆升过程。

References

Alam, M., Alam, M. M., Curray, J. R., et al., 2003. An Over-

- view of the Sedimentary Geology of the Bengal Basin in Relation to the Regional Tectonic Framework and Basin-Fill History. *Sedimentary Geology*, 55 (3-4): 179-208. doi:10.1016/S0037-0738(02)00180-X
- Allen, P. A., Allen, J. R., 2005. Basin Analysis: Principles and Applications. Blackwell, Malden, 3-12.
- Bastia, R., Das, S., Radhakrishna, M., 2010a. Pre- and Post-Collisional Depositional History in the Upper and Middle Bengal Fan and Evaluation of Deepwater Reservoir Potential along the Northeast Continental Margin of India. *Marine and Petroleum Geology*, 27 (9): 2051-2061. doi:10.1016/j.marpetgeo.2010.04.007
- Bastia, R., Radhakrishna, M., Das, S., 2010b. Delineation of 85°E Ridge and Its Structure in Mahanadi Offshore Basin, Eastern Continental Margin of India (ECMI) from Seismic Reflection Imaging. *Marine and Petroleum Geology*, 27 (9): 1841-1848. doi:10.1016/j.marpetgeo.2010.08.003
- Bastia, R., Radhakrishna, M., Srinivas, T., et al., 2010c. Structural and Tectonic Interpretation of Geophysical Data along the Eastern Continental Margin of India with Special Reference to the Deep Water Petroliferous Basins. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(6): 608-619. doi:10.1016/j.jseaes.2010.04.031
- Brune, J. N., Curray, J. R., Dorman, L., et al., 1992. A Proposed Super-Thick Sedimentary Basin, Bay of Bengal. *Geophysical Research Letters*, 19(6): 565-568. doi:10.1029/91GL03134
- Clark, M. K., Bilham, R., 2008. Miocene Rise of the Shillong Plateau and the Beginning of the End for the Eastern Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters*, 269 (3-4): 337-351. doi:10.1016/j.epsl.2008.01.045
- Curray, J. R., 1991. Possible Greenschist Metamorphism at the Base of a 22 km Sedimentary Section, Bay of Bengal. *Geology*, 19 (11): 1097-1100. doi:10.1130/0091-7613(1991)019<1097:PGMATB>2.3.CO;2
- Curray, J. R., 2005. Tectonics and History of the Andaman Sea Region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(1): 187-232. doi:10.1016/j.jseaes.2004.09.001
- Curray, J. R., Emmel, F. J., Moore, D. G., 2002. The Bengal Fan: Morphology, Geometry, Stratigraphy, History and Processes. *Marine and Petroleum Geology*, 9 (10): 1191-1223. doi:10.1016/S0264-8172(03)00035-7
- Curray, J. R., Emmel, F. J., Moore, D. G., et al., 1982. Structure, Tectonics and Geological History of the Northeastern Indian Ocean. In: Nairn, A. E. M., Stehli, F. G., eds., *The Ocean Basins and Margins; The Indian Ocean*, 6. Plenum Press, New York, 399-450.

- Curry, J. R., Munasinghe, T., 1991. Origin of the Rajmahal Traps and the 85°E Ridge: Preliminary Reconstructions of the Trace of the Crozet Hotspot. *Geology*, 19(12): 1237–1240. doi: 10.1130/0091-7613(1991)019<1237:OOTRTA>2.3.CO;2
- Desa, M., Ramana, M. V., Ramprasad, T., 2006. Seafloor Spreading Magnetic Anomalies South off Sri Lanka. *Marine Geology*, 229(3–4): 227–240. doi: 10.1016/j.margeo.2006.03.006
- Fisher, R. L., Jantsch, M. J., Comer, R. L., 1982. General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO). Can. Hydrogr. Serv., Ottawa.
- Gani, M. R., Alam, M. M., 1999. Trench-Slope Controlled Deep-Sea Clastics in the Exposed Lower Surma Group in the Southeastern Fold Belt of the Bengal Basin, Bangladesh. *Sedimentary Geology*, 127(3–4): 221–236. doi: 10.1016/S0037-0738(99)00050-0
- Gopala Rao, D., Krishna, K. S., Sar, D., 1997. Crustal Evolution and Sedimentation History of the Bay of Bengal since the Cretaceous. *Journal of Geophysical Research*, 102(B8): 17747–17768. doi: 10.1029/96JB01339
- Hall, R., 2012. Late Jurassic-Cenozoic Reconstructions of the Indonesian Region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570–571: 1–41. doi: 10.1016/j.tecto.2012.04.021
- Ingersoll, R. V., Graham, S. A., Dickinson, W. R., 1995. Remnant Ocean Basins. In: Busby, C. J., Ingersoll, R. V., eds., *Tectonics of Sedimentary Basins*. Blackwell Science, Cambridge, MA, 362–391.
- Johnson, S. Y., Nur Alam, A. M., 1991. Sedimentation and Tectonics of the Sylhet Trough, Bangladesh. *Geological Society of America Bulletin*, 103(11): 1513–1527. doi: 10.1130/0016-7606(1991)103<1513:SATOTS>2.3.CO;2
- Kent, R. W., Storey, M., Saunders, A. D., et al., 1992. Comment and Reply on “Origin of the Rajmahal Traps and the 85°E Ridge: Preliminary Reconstructions of the Trace of the Crozet Hotspot”. *Geology*, 20(10): 957–958. doi: 10.1130/0091-7613(1992)020<0957:CA-ROOO>2.3.CO;2
- Krishna, K. S., 2003. Structure and Evolution of the Afanasy Nikitin Seamount, Buried Hills and 85°E Ridge in the Northern Indian Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 209(3–4): 379–394. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00081-5
- Krishna, K. S., Abraham, H., Sager, W. W., et al., 2012. Tectonics of the Ninetyeast Ridge Derived from Spreading Records in Adjacent Oceanic Basins and Age Constraints of the Ridge. *Journal of Geophysical Research*, 117(B04101): 1–19. doi: 10.1029/2011JB008805
- Krishna, K. S., Gopala Rao, D., Ramana, M. V., 1995. Tectonic Model for the Evolution of Oceanic Crust in the Northeastern Indian Ocean from the Late Cretaceous to the Early Tertiary. *Journal of Geophysical Research*, 100(B10): 20011–20024. doi: 10.1029/94JB02464
- Krishna, K. S., Michael, L., Bhattacharyya, R., et al., 2009. 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. *Journal of Geophysical Research*, 114(B03102): 1–21. doi: 10.1029/2008JB005808
- Krishna, K. S., Neprochnov, Y. P., Gopala Rao, D., et al., 2001. Crustal Structure and Tectonics of the Ninetyeast Ridge from Seismic and Gravity Studies. *Tectonics*, 20(3): 416–433. doi: 10.1029/2001TC900004
- Lee, T. Y., Lawver, L. A., 1995. Cenozoic Plate Reconstruction of Southeast Asia. *Tectonophysics*, 251(1–4): 85–138. doi: 10.1016/0040-1951(95)00023-2
- Liu, C. S., Sandwell, D. T., Curry, J. R., 1982. The Negative Gravity Field over the 85°E Ridge. *Journal of Geophysical Research*, 87(B9): 7673–7686. doi: 10.1029/JB087iB09p07673
- Maurin, T., Rangin, C., 2009. Impact of the 90°E Ridge at the Indo-Burmese Subduction Zone Imaged from Deep Seismic Reflection Data. *Marine Geology*, 266(1–4): 143–155. doi: 10.1016/j.margeo.2009.07.015
- Michael, L., Krishna, K. S., 2011. Dating of the 85°E Ridge (Northeastern Indian Ocean) Using Marine Magnetic Anomalies. *Current Science*, 100(9): 1314–1322. doi: 10.1007/s12046-011-0385-3
- Morley, C. K., King, R., Hillis, R., et al., 2011. Deepwater Fold and Thrust Belt Classification, Tectonics, Structure and Hydrocarbon Prospectivity: A Review. *Earth-Science Reviews*, 104(1–3): 41–91. doi: 10.1016/j.earscirev.2010.09.010
- Murthy, K. S. R., Rao, T. C. S., Subrahmanyam, A. S., et al., 1993. Structural Lineaments from the Magnetic Anomaly Maps of the Eastern Continental Margin (ECMI) and NW Bengal Fan. *Marine Geology*, 114(1–2): 171–183. doi: 10.1016/0025-3227(93)90046-X
- Müller, R. D., Roest, W. R., Royer, J. Y., et al., 1997. Digital Isochrons of the World's Ocean Floor. *Journal of Geophysical Research*, 102(B2): 3211–3214. doi: 10.1029/96JB01781
- Müller, R. D., Royer, J. Y., Lawver, L. A., 1993. Revised Plate Motions Relative to the Hotspots from Combined Atlantic and Indian Ocean Hotspot Tracks. *Geology*, 21

- (2): 275—278. doi: 10.1130/0091-7613(1993)021<0275:RPMRTT>2.3.CO;2
- Naini, B. R., Leyden, R., 1973. Ganges Cone: A Wide Angle Seismic Reflection and Refraction Study. *Journal of Geophysical Research*, 78(35): 8711—8720. doi: 10.1029/JB078i035p08711
- Peirce, J. W., 1978. The Northward Motion of India since the Late Cretaceous. *Geophysical Journal International*, 52(2): 277—311. doi: 10.1111/j.1365-246X.1978.tb04234.x
- Powell, C. M., Roots, S. R., Veevers, J. J., 1988. Pre-Breakup Continental Extension in East Gondwanaland and the Early Opening of the Eastern Indian Ocean. *Tectonophysics*, 155(1-4): 261—283. doi: 10.1016/0040-1951(88)90269-7
- Pringle, M. S., Frey, F. A., Mervine, E. E., 2008. A Simple Linear Age Progression for the Ninetyeast Ridge, Indian Ocean: New Constraints on Indian Plate Tectonics and Hotspot Dynamics. American Geophysical Union, San Francisco.
- Radhakrishna, M., Srinivasa, R. G., Satyabrata, N., et al., 2012. Early Cretaceous Fracture Zones in the Bay of Bengal and Their Tectonic Implications: Constraints from Multi-channel Seismic Reflection and Potential Field Data. *Tectonophysics*, 522—523: 187—197. doi: 10.1016/j.tecto.2011.11.026
- Rajesh, S., Majumdar, T. J., 2009. Geoid Height versus Topography of the Northern Ninetyeast Ridge: Implications on Crustal Compensation. *Marine Geophysical Researches*, 30(4): 251—264. doi: 10.1007/s11001-010-9088-7
- Ramana, M. V., Nair, R. R., Sarma, K. V. L. N. S., et al., 1994. Mesozoic Anomalies in the Bay of Bengal. *Earth and Planetary Science Letters*, 121(3-4): 469—475. doi: 10.1016/0012-821X(94)90084-1
- Ramana, M. V., Subrahmanyam, V., Chaubey, A. K., et al., 1997. Structure and Origin of the 85° E Ridge. *Journal of Geophysical Research*, 102(B8): 17995—18012. doi: 10.1029/97JB00624
- Royer, J. Y., Peirce, J. W., Weissel, J. K., 1991. Tectonic Constraints on the Hot-Spot Formation of Ninetyeast Ridge. *Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results*, 121: 763—776.
- Royer, J. Y., Sandwell, D. T., 1989. Evolution of the Eastern Indian Ocean since the Late Cretaceous: Constraints from GEOSAT Altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 94(B10): 13755—13782. doi: 10.1029/JB094iB10p13755
- Royer, J. Y., Sclater, J. G., Sandwell, D. T., et al., 1992. India Ocean Plate Reconstructions since the Late Jurassic. In: Duncan, R. A., Rea, D. K., Kidd, R. B., et al., eds., *Synthesis of Results from Scientific Drilling in the India Ocean*. American Geophysical Union, San Francisco, 70: 741—475. doi: 10.1029/GM070p0471
- Sager, W. W., Paul, C. F., Krishna, K. S., et al., 2010. Large Fault Fabric of the Ninetyeast Ridge Implies Near-Spreading Ridge Formation. *Geophys. Research Letters*, 37(L17304): 1—5. doi: 10.1029/2010GL044347
- Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., 2009. Global Marine Gravity from Retracted Geosat and ERS-1 Altimetry: Ridge Segmentation versus Spreading Rate. *Journal of Geophysical Research*, 114(B01411): 1—18. doi: 10.1029/2008JB006008
- Schwenk, T., 2003. The Bengal Fan: Architecture, Morphology and Depositional Processes at Different Scales Revealed from High-Resolution Seismic and Hydroacoustic Data. Universität Bremen, Bremen, 7—15.
- Smith, W. H. F., Sandwell, D. T., 1997. Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science*, 277(5334): 1956—1962. doi: 10.1126/science.277.5334.1956
- Sreejith, K. M., Radhakrishna, M., Krishna, K. S., et al., 2011. Development of the Negative Gravity Anomaly of the 85° E Ridge, Northeastern Indian Ocean—A Process Oriented Modelling Approach. *Journal of Earth System Science*, 120(4): 605—615. doi: 10.1007/s12040-011-0099-9
- Storey, B. C., 1995. The Role of Mantle Plumes in Continental Breakup: Case Histories from Gondwanaland. *Nature*, 377(6547): 301—308. doi: 10.1038/377301a0
- Stow, D. A. V., Mayall, M., 2000. Deep-Water Sedimentary Systems: New Models for the 21st Century. *Marine and Petroleum Geology*, 17(2): 125—135. doi: 10.1016/S0264-8172(99)00064-1
- Subrahmanyam, C., Singh, R. N., 1992. Geotectonics of the Bay of Bengal. *Indian Journal of Petroleum Geology*, 1: 161—180.
- Subrahmanyam, C., Thakur, N. K., Gangadhara Rao, T., et al., 1999. Tectonics of the Bay of Bengal: New Insights from Satellite-Gravity and Ship-Borne Geophysical Data. *Earth and Planetary Science Letters*, 171(2): 237—251. doi: 10.1016/S0012-821X(99)00148-X
- Subrahmanyam, V., Subrahmanyam, V. S., Murthy, G. P. S., et al., 2008. Morphology and Tectonics of Mahanadi Basin, Northeastern Continental Margin of India from Geophysical Studies. *Marine Geology*, 253(1-2): 63—72. doi: 10.1016/j.margeo.2008.04.007