

巴兰三角洲地区构造特征及其成因机制

马良涛^{1,2}, 范廷恩¹, 潘海鹏³, 李世雄⁴

(1 中海油研究总院; 2 中国地质大学(北京)博士后流动站)

(3 中国石化河南石油工程有限公司地质录井公司; 4 长江大学)

摘要 处于主动大陆边缘的巴兰三角洲地区, 在构造格局上具有南北分带的特征, 其北部发育挤压应力作用下的NE—SW向叠瓦状逆冲推覆构造, 中部发育拉张应力作用下的NE向生长断层及其控制下的滚动背斜, 南部为压扭作用下早期生长断层发生反转而形成的反转构造。针对北部挤压应力区收缩量大于中部拉张应力区伸展量这一现象无法用理想的被动大陆边缘三角洲体模型来解释的情况, 现结合区域构造背景、研究区应力特征及构造恢复结果的分析认为, 巽他古陆、菲律宾板块、印澳板块及欧亚板块推挤作用产生的区域压应力的远距离效应与三角洲发育过程中重力驱动的综合作用, 是产生该现象的主要原因。

关键词 晚第三纪; 巴兰三角洲; 构造特征; 构造分析; 构造成因

中图分类号: TE121.2; P618.130.2 **文献标识码**: A

关于巴兰三角洲(Baram Delta)地区的构造特征, 已有不同学者从地震剖面、现今构造及构造应力的角度对其开展过研究^[1-6], 有部分学者应用经典三角洲体模型来解释形成该地区构造特征的成因。他们认为, 巴兰三角洲与位于被动大陆边缘之上的密西西比三角洲、尼日尔三角洲、墨西哥湾三角洲等相似, 三角洲前端形成的褶皱逆冲带是因三角洲末端伸展作用产生的重力驱动而引起三角洲前端挤压响应的结果。然而, Morley等^[3]和Mark等^[4]的研究表明, 巴兰三角洲前端的收缩量大于其末端伸展量的1.8%, 这与理想三角洲体模型所提出的三角洲末端伸展量与三角洲前端收缩量相当的观点或伸展量略大于收缩量的观点相矛盾, 显然, 经典三角洲体模型无法很好地解释形成该地区构造特征的成因。本文结合前人的研究成果, 在研究区构造特征、构造应力、区域构造背景及构造恢复结果分析的基础上, 进一步分析了产生这一现象的原因, 认为导致该地区三角洲前端收缩量大于三角洲末端伸展量的原因是三角洲发育过程中的重力驱动与区域压应力远距离效应综合作用的结果。

1 地质背景

巴兰三角洲位于加里曼丹岛北部(加里曼丹岛亦有称为婆罗洲), 文莱的西北方。三角洲的南部在陆上, 北部位于海域, 三角洲总面积为73 776 km², 其中, 陆上面积11 250 km², 海域面积62 526 km²。本文研究区为向南部陆上边界变窄的三角形, 整体呈NNW—SSE向展布(图1)。

与古南海的演化相似, 巴兰三角洲的形成演化经历了早期的伸展作用和晚期的挤压作用。白垩纪末期, 受古太平洋板块和古澳大利亚板块分别向西、向北俯冲作用的影响, 古南海地区的“联合古陆”发生肢解, 北侧的南沙地块发生区域性裂陷, 形成NE—NEE向裂谷带。古南海于古新世开始裂陷, 始新世达到裂陷高峰, 渐新世之后逐渐萎缩。始新世以后, 印度板块与欧亚板块的碰撞作用, 以及东南方向太平洋板块俯冲引起的地幔柱底辟作用, 使南沙地块与华南地块分离, 从而形成了新南海。随着新南海的不断扩张, 分离出来的南沙地块不断向南漂移, 并促使古南海壳沿西南方向不断向婆罗洲地块之下

收稿日期: 2014-03-07; 改回日期: 2014-07-17

本文受国家重大专项 30-1 课题“亚洲海域盆地发育及油气地质研究”(编号: 2008ZX05030-001-04)资助

马良涛: 1984年生, 在站博士后。方向为石油天然气地质综合研究、沉积及高分辨率层序地层分析。通讯地址: 100028 北京市朝阳区太阳宫南街6号院; E-mail: maliangtao123@163.com

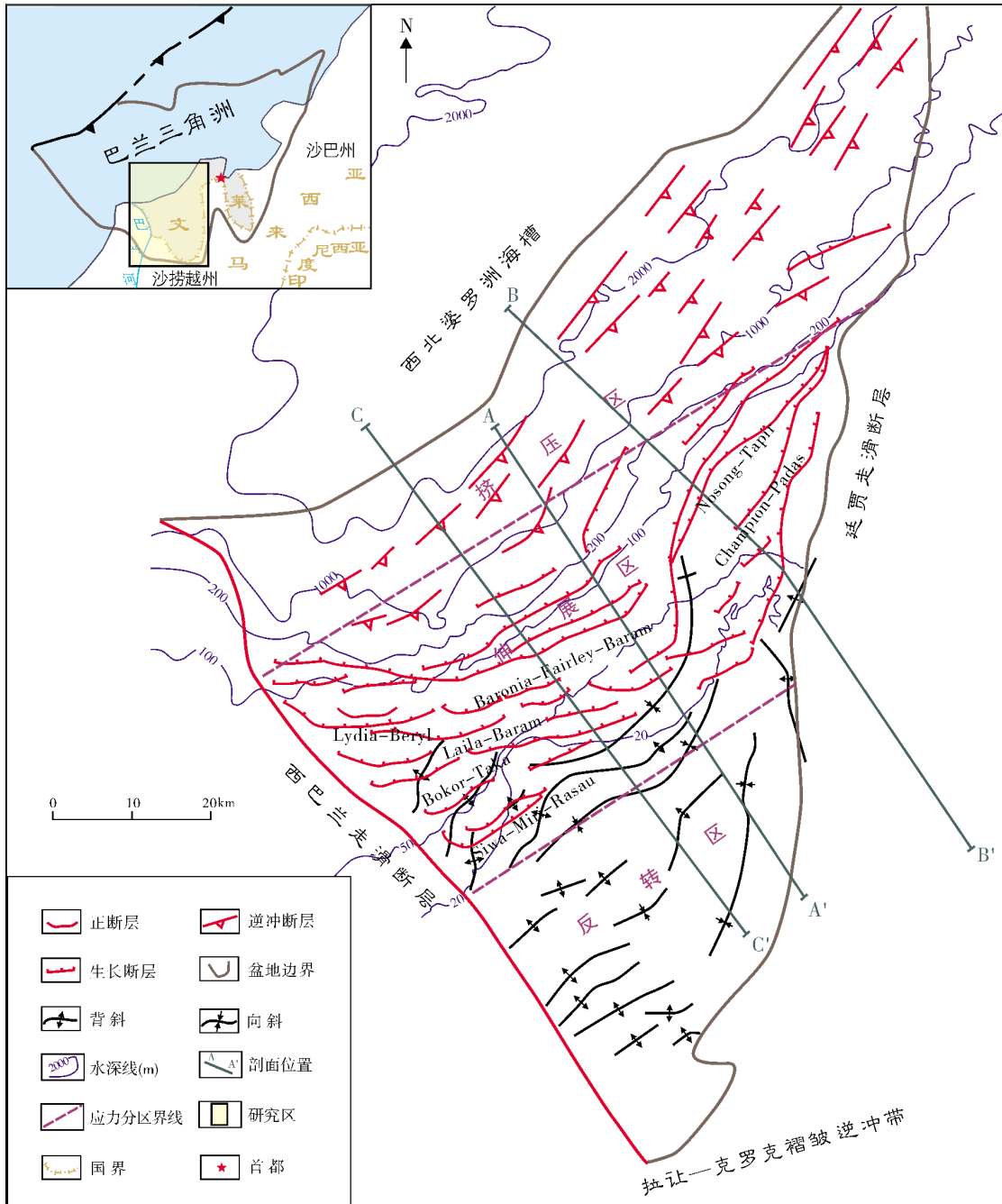


图1 巴兰三角洲构造位置、构造分布及应力特征图

俯冲消减。此外,该时期婆罗洲的逆时针旋转也加速了古南海洋壳向婆罗洲地块的俯冲消减。早一中中新世,古南海洋壳俯冲作用结束,期间南沙地块于早中新世末开始先后与婆罗洲北部的沙巴以及菲律宾西部的巴拉望岛发生碰撞,进而形成一系列的逆冲推覆构造。中中新世—现今,新南海海底南北向的扩

张处于停滞状态,其西侧边缘和北侧边缘处于快速热沉降状态。中新世晚期,班达岛弧与澳大利亚板块北部的碰撞作用以及菲律宾岛弧沿西北方向向澳大利亚板块东南边缘的移动,使得该地区早期生长断层发生倒转^[6-8]。

受晚白垩纪—早中新世的裂谷作用以及中中新

世以后的挤压作用,研究区沉积了近万米厚的晚第三纪地层,其岩性主要为受波浪作用影响的三角洲环境下沉积的砂岩和页岩。受海侵—海退交替作用的影响,海退进积楔状砂体与海侵页岩在垂向上常

构成规模不等的海侵—海退旋回。据此,可将巴兰三角洲上第三系划分为8个海侵—海退沉积旋回,每个旋回内的海退砂体向西北方向逐渐过渡为浅海页岩(图2)^[9-12]。

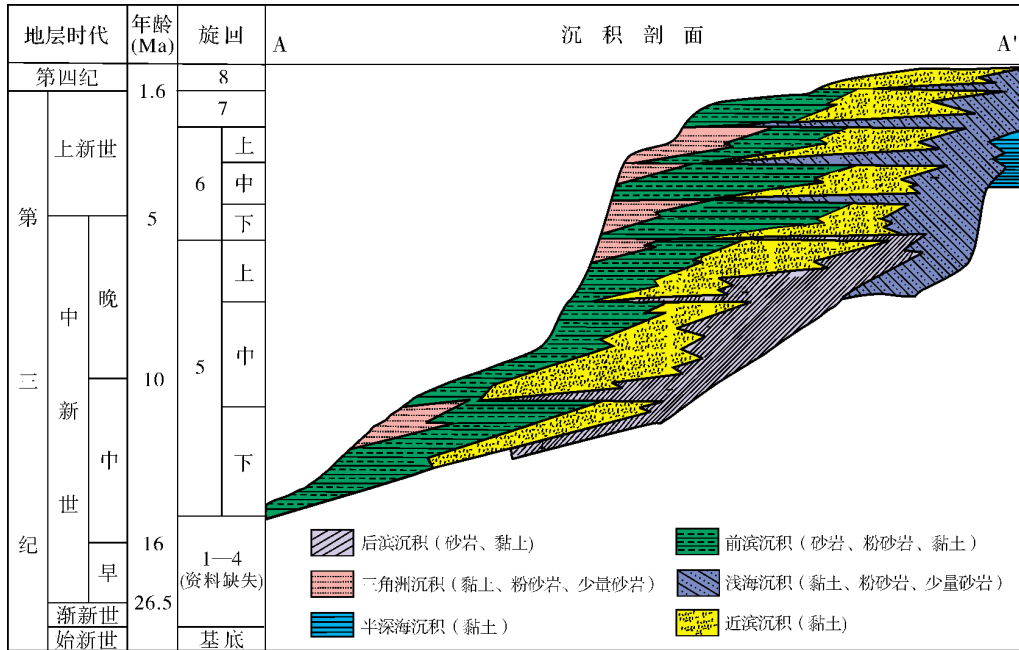


图2 巴兰三角洲上第三系沉积旋回剖面图

2 构造特征及应力分析

研究区东部和西部分别以NE—SW向的廷贾走滑断层和NW—SE向的西巴兰走滑断层为边界;近东西向的拉让—克罗克(Rajang—Crocker)褶皱逆冲带为其南部边界,北部与西北婆罗洲海槽相邻。根据研究区发育的构造特征及其主应力特征,可将其划分为北部挤压逆冲推覆带、中部拉张伸展沉降带、南部挤压反转带三个构造带(图1),各构造带具有不同的特征^[13-17]。

北部挤压逆冲推覆带(挤压区) 位于由陆地向海域延伸约90~120 km的范围内,处于研究区北部海槽一带的深水环境(图1)。其最大水平主应力(δ_H)为NW—SE向,与陆地延伸方向垂直(图3a)。发育了一系列NE—SW向的与断层传播褶皱伴生的叠瓦状逆冲推覆体(图1,图4),该构造向研究区中心方向逐渐收缩。

中部拉张伸展沉降带(伸展区) 位于由陆地向海域延伸约60~90 km的范围内,处于西北婆罗洲外陆架到陆架边缘之上(图1)。其最大水平主应力方向

与大陆边缘延伸方向平行,为NE—SW向(图3b)。南缘以Siwa—Miri—Rasau构造为界,北缘与逆冲推覆带(图1中的挤压区)相邻。内部发育Siwa—Miri—Rasau、Bokor—Taka、Laila—Baram、Lydia—Beryl、Baronia—Fairley—Baram、Champion—Padas、Nosong—Tapir等七个大型构造。以中部的Baronia—Fairley—Baram为界,西部发育EW向铲式生长断层及其控制的宽缓滚动背斜(由地层密度差异和重力滑脱作用引起),东部发育NE向生长断层(由泥底辟作用引起),其倾向与三角洲沉积方向相反(图1,图4)。

南部挤压反转带(反转区) 位于由陆地向海域延伸约60 km的范围内,处于内陆架和文莱陆地之上,北缘以Siwa—Miri—Rasau构造为界(图1),南缘为陆地。其最大水平主应力方向与大陆边缘延伸方向垂直,为NW—SE向(图3c)。该区域以NE—SW向和NS向早期基底沉降引起的向斜和晚期反转断层控制的背斜为特征,其成因为早期基底正断层在后期压扭作用下发生反转,并使浅部地层发生褶皱、断裂而形成(图1,图4)。

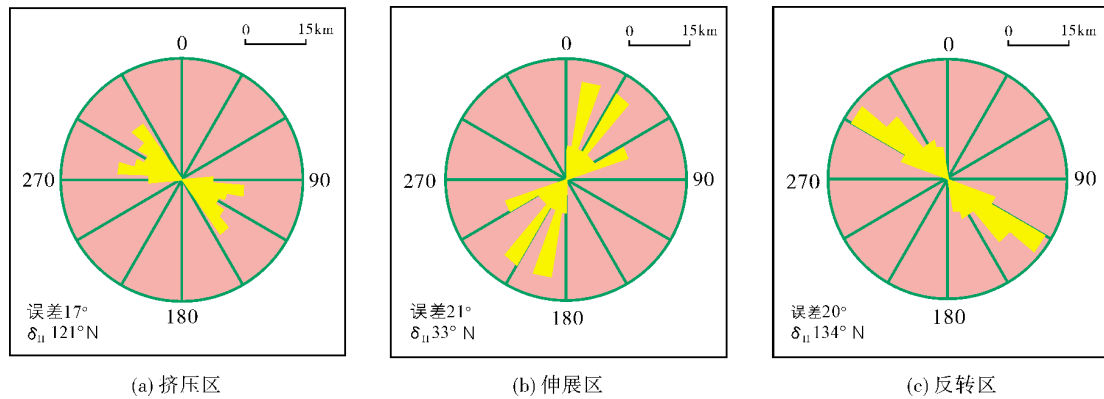


图3 巴兰三角洲研究区构造应力分析图^[14-16]
 δ_H 最大水平主应力

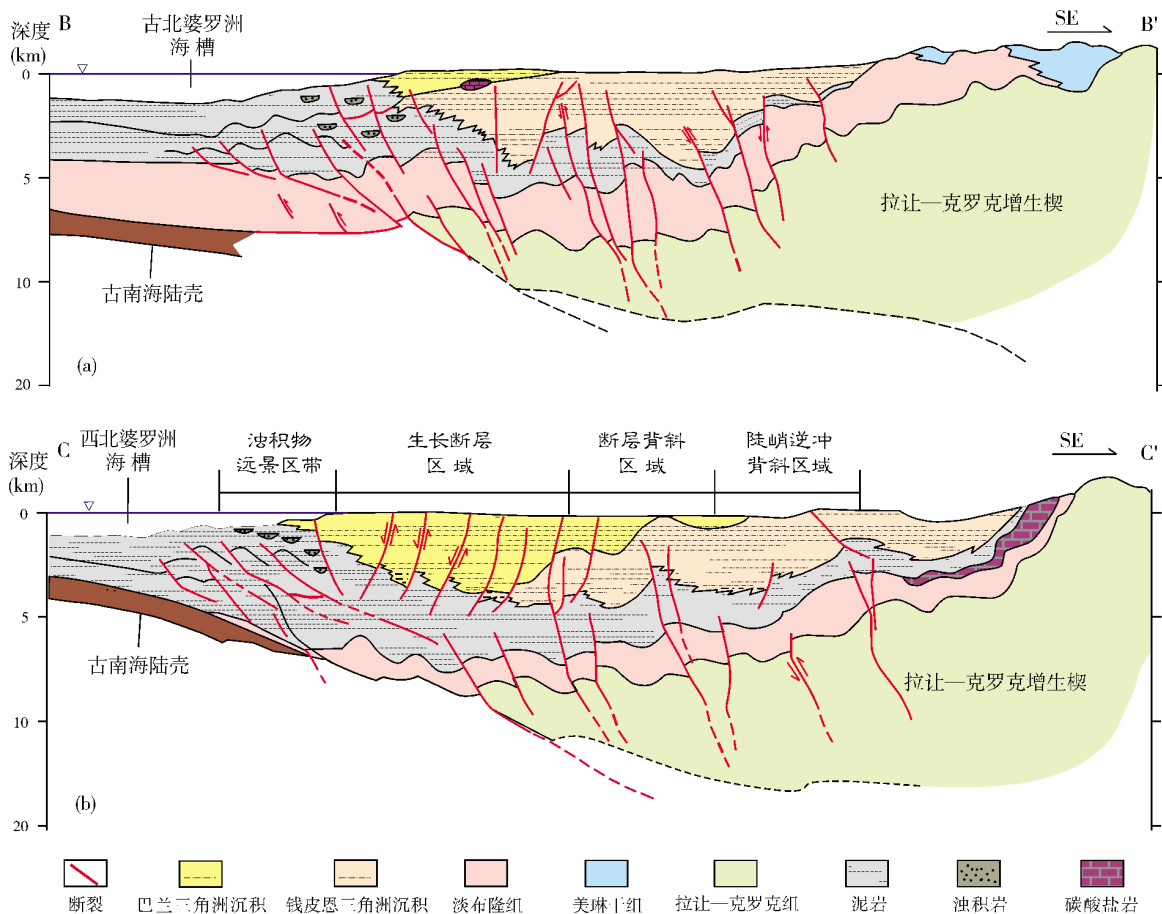


图4 巴兰三角洲构造剖面特征图

3 成因机制分析

前人的研究表明,位于被动大陆边缘盆地的构造特征可以用理想的三角洲体模型来解释。在该模型中,三角洲体是由三角洲末端的伸展区和三角洲前端

的挤压区两部分所构成,由三角洲末端伸展区伸展作用所产生的重力驱动将引起三角洲前端挤压区的挤压响应,从而形成逆冲推覆构造,并且,伸展区的伸展量与挤压区的收缩量是相当的或是前者略大于后者(如西非的尼罗河三角洲)(图 5a, 5b)^[18-20]。

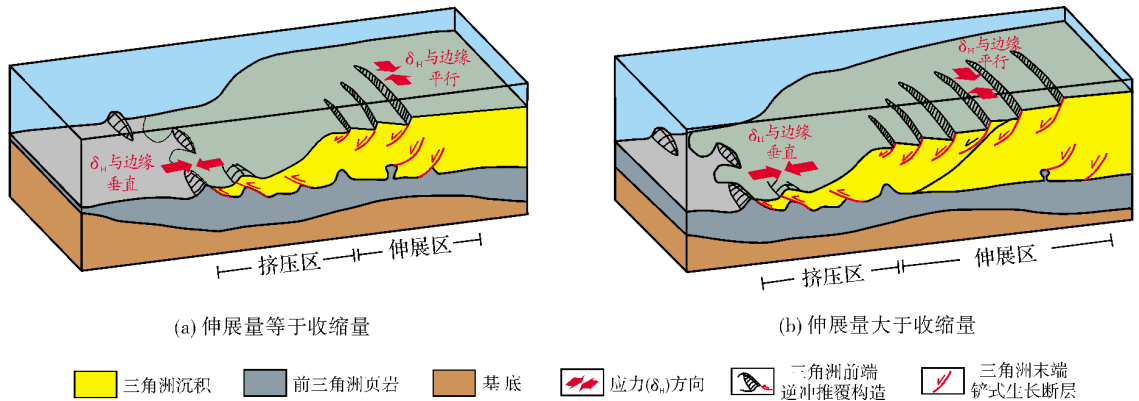
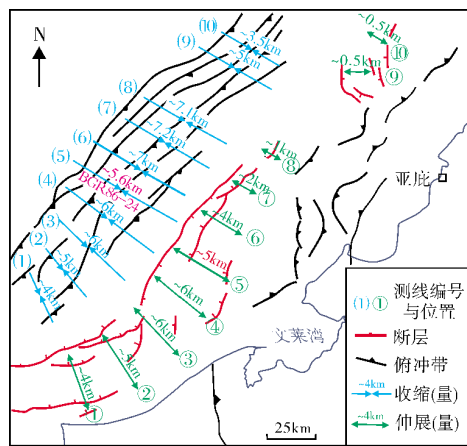


图5 被动大陆边缘三角洲体理想模型图^[18-20]

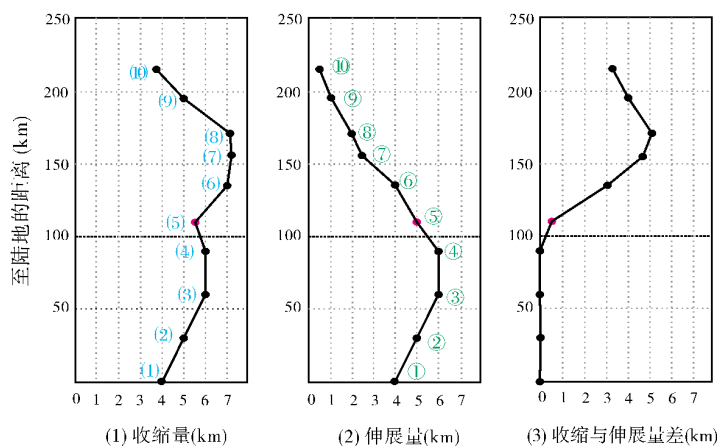
分析表明,巴兰三角洲地区位于主动大陆边缘,可划分为三角洲前端挤压区、三角洲末端伸展区和陆架反转区三部分,它与位于被动大陆边缘之上发育的三角洲地区相比,具有与理想三角洲体模型明显不同的特征。此外,根据Rosalind等^[21]所建立的构造演化模型,巴兰三角洲前端收缩量大于其末端伸展量的1.8%,显然这不能用理想的三角洲体模型来进行解释。根据前人对该地区深水褶皱逆冲带的研究和现今围绕婆罗洲板块及其自身的运动方向、速率的观测数据推测,这种现象可能是外部区域压应力远距离效应引起的。

3.1 来自构造恢复的证据

目前,不同学者在研究区的不同部位选择了剖面进行构造恢复工作。从已公开发表的构造恢复数据^[20]看,从上新世至今,研究区呈现这样一个变化趋势,即在BGR86-24测线(测线编号(5))(图6)以南,挤压区的收缩量与伸展区的伸展量相当(图6a, 6b),说明该地区的挤压收缩主要是由三角洲发育过程中的重力驱动所引起;而从该测线向北,伸展量急剧减小,收缩量明显增大(图6a和6b),从而引起收缩量与伸展量之间的不平衡。分析认为,这可能是区域远距离效应导致基底驱动挤压力向北逐渐增加的结果。



(a) 地震测线位置与构造伸缩量分布



(b) 构造伸缩量与距离陆地远近的关系

图6 研究区地震剖面构造恢复结果图^[20]

3.2 区域压应力远距离效应的来源

西北婆罗洲为巽他古陆的一部分,该古陆被东部的菲律宾俯冲带以及南部—西部的印度尼西亚

俯冲带所围绕,北部以古南海板块为界。研究资料表明,位于巽他古陆东部的菲律宾板块以60 mm/a的速率沿NWW方向向巽他古陆俯冲,位于巽他古陆西部和南部的印澳板块则以58 mm/a的速率沿NE

方向向巽他古陆俯冲(图7a), 而巽他古陆则以 30mm/a 的速率沿SEE方向运动。显然, 前两者相对于巽他古陆的运动速度大于巽他古陆相对于它们的运动速度, 这就使得在菲律宾板块和印澳板块周缘将产生较大的挤压应力, 这些挤压应力将会传递到巽他古陆并作用于西北婆罗洲地区。此外, 位于巽他古陆北缘的逃逸构造向南的运动也将产生一个向南的作用于巽他古陆的挤压应力, 该挤压应力也可能成为作用于西北婆罗洲地区压应力远距离效应的来源之一^[21-25]。

从位于西北婆罗洲北部基纳巴卢(Kinabalu)、纳闽(Labuan)和米里(Miri)三个观测点近十年的GPS观测数据^[21]表明, 有区域挤压应力以约 $4\sim 6\text{mm/a}$ 的移动速率远距离作用于西北婆罗洲地区, 该应力的方向与反转区的最大水平应力方向相近, 由此证明了二者之间存在一定的相关性(图7b)。

综合以上分析结果认为, 导致巴兰三角洲地区伸展区的伸展量与挤压区的收缩量不平衡的原因, 是菲律宾板块、印澳板块以及欧亚板块的推挤作用在西北婆罗洲地区产生的区域压应力远距离效应。

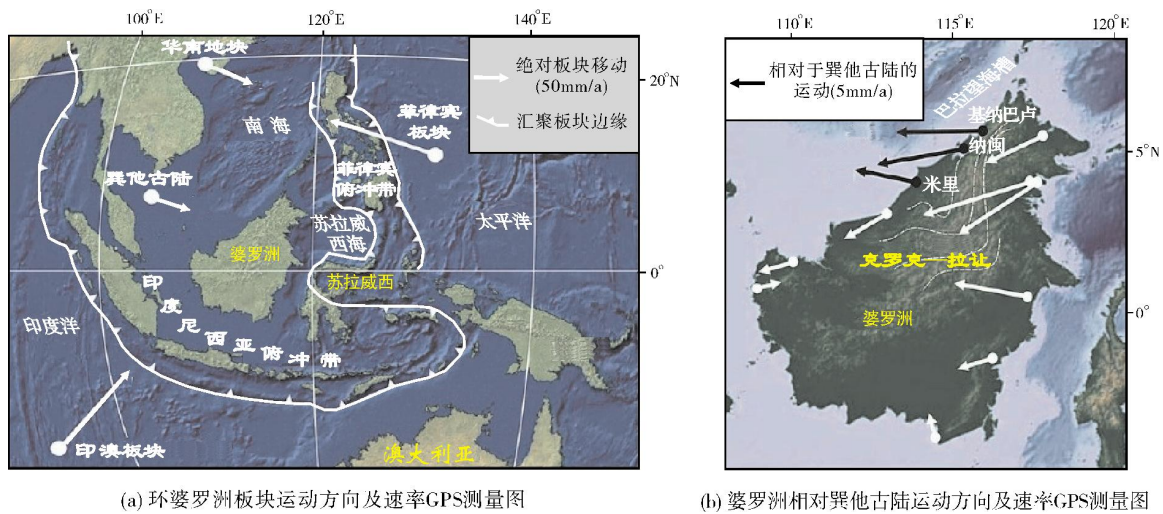


图7 环婆罗洲板块运动与婆罗洲相对巽他古陆运动的方向及速率GPS测量图^[21]

4 结论

(1) 巴兰三角洲地区在构造格局上具有南北分带的特征。根据构造及应力特征, 可分为北部挤压逆冲推覆带、中部拉张伸展沉降带和南部挤压反转带三个构造带。

(2) 巴兰三角洲前端挤压收缩量与三角洲末端拉张伸展量之间的不协调现象, 是三角洲发育过程中的重力驱动与婆罗洲周缘板块推挤作用产生的区域压应力远距离效应共同作用的结果。

参考文献

- [1] Dieter F, Udo B, Ingo H, et al. Seismic images of a collision zone offshore NW Sabah/Borneo[J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(7):606-624.
- [2] Charles S H. Marginal basin evolution: The southern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(9): 1129-1148.
- [3] Morley C K, King R, Hills R, et al. Deepwater fold and thrust belt classification, tectonics, structure and hydrocarbon prospectivity: A view[J]. Earth Science Reviews, 2011, 104(1):41-91.
- [4] Mark R P T, Richard R H, Chris K M, et al. Present-day stress orientation in Brunei: A snapshot of "prograding tectonics" in a Tertiary delta[J]. Journal of the Geological Society, 2005, 162(1): 39-49.
- [5] Mark R P T, Richard R H, Morley C K, et al. Variation in vertical stress in the Baram Basin, Brunei: Tectonic and geomechanical implications[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20(10): 1201-1212.
- [6] Mark R P T, Birgit M, John R, et al. Understanding tectonic stress in the oil patch: The world stress map project[J]. The Leading Edge, 2005, 24(12): 1276-1282.
- [7] 张功成, 米立军, 屈红军, 等. 中国海域深水油气地质[J]. 石油学报, 2013, 34(增刊2): 1-14.
- [8] 张功成, 谢晓军, 王万银, 等. 中国南海含油气盆地构造类型及勘探潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 611-627.
- [9] John H D, 梁世容. 婆罗洲西北部沙捞越近海巴兰三角洲地区Betty油田的沉积学和油层地质学特征[J]. 海洋地质, 1992, 2(1): 85-107.

- [10] Johnson H D, Kuud T, Dundang A. Sedimentology and reservoir geology of the Betty field, Baram Delta Province, off-shore Sarawak[J]. *Geology Society Malaysia Bulletin*, 1989, 25(2): 119-161.
- [11] Joseph J L, 张闻林, 沈人焯. 现代巴拉姆三角洲沉积相展布及沉积作用: 婆罗洲北西储集砂体研究[J]. *天然气勘探与开发*, 2003, 26(3): 55-64.
- [12] Joseph J L, Abdul A B, Abdul R, et al. Facies distribution and sedimentary processes on the modern Baram Delta: Implications for the reservoir sandstones of NW Borneo[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19(1): 69-78.
- [13] Mark R P T, Richard R H, Richard E S. Origin of overpressure and pore-pressure prediction in the Baram province, Brunei[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(1): 51-74.
- [14] Rosalind C K, Richard R H, Mark R P T, et al. Present-day stress and neotectonic provinces of the Baram Delta and deep-water fold-thrust belt[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 2009, 166(2): 197-200.
- [15] Mark R P T, Richard R H, Chris K M. Present-day stress and neotectonics of Brunei: Implications for petroleum exploration and production[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(1): 75-100.
- [16] Rosalind C K, Richard R H, Tingay M R P, et al. Present-day stresses in Brunei, NW Borneo: Superposition of deltaic and active margin tectonics[J]. *Basin Research*, 2010, 22(2): 236-247.
- [17] 施秋华, 万志峰, 夏斌. 婆罗洲地质构造特征及其对南海南部盆地的影响[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(1): 11-16.
- [18] Hiscott R N. Depositional sequences controlled by high rates of sediment supply, sea-level variations, and growth faulting—The Quaternary Baram Delta of northwestern Borneo[J]. *Marine Geology*, 2001, 175(1): 67-102.
- [19] Rouby D, Nalpas T, Jermannaud P, et al. Gravity driven deformation controlled by the migration of the delta front: The Plio-Pleistocene of the Eastern Niger Delta[J]. *Tectonophysics*, 2011, 513(1): 54-67.
- [20] Hesse S, Back S, Franke D. The deep-water fold-and-thrust belt offshore NW Borneo: Gravity-driven versus basement-driven shortening[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, 121(5/6): 939-953.
- [21] Rosalind C K, Guillaume B, Christopher K M, et al. Balancing deformation in NW Borneo: Quantifying plate-scale vs. gravitational tectonics in a delta and deepwater fold-thrust belt system[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(1): 238-246.
- [22] Francois S, Iwan H, Manuel P. The recent convergence on the NW Borneo Wedge—A crustal-scale gravity gliding evidenced from GPS[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 193(2): 549-556.
- [23] Honzaa E, Fujiokab K. Formation of arcs and back arc basins inferred from the tectonic evolution of Southeast Asia since the Late Cretaceous[J]. *Tectonophysics*, 2004, 384(1): 23-53.
- [24] 姚伯初, 万玲, 刘振湖. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J]. *地球科学 中国地质大学学报*, 2004, 29(5): 543-549.
- [25] Mark T, Chris M, Rosalind K, et al. Present-day stress field of Southeast Asia[J]. *Tectonophysics*, 2010, 482(1): 92-104.

编辑:赵国宪

Structure Feature and Formation Mechanism in Baram Delta, NW Borneo

Ma Liangtao, Fan Ting'en, Pan Haipeng, Li Shixiong

Abstract: Neogene Baram Delta is located in the northwest Borneo, which is characterized by different structural styles in the northern, the middle and the southern parts respectively, owing to being on the active continental margin. Affected on compression stress, NE-SW striking imbricate thrusts develop in the northern part. Influenced by extension stress, NE striking growth faults and associated rollover anticlines develop in the middle part while the inversion structures generated by compresso-shearing develop in the southern part. It has been confused by the fact why the total shortening amount in the compression area (i.e. the northern part) is greater than the total stretching amount in extension area (i.e. the middle part), which has been unable to be explained by the ideal model of delta system in the passive margin. Based on the regional tectonic setting and basin stress analysis and the structural restoration, it is shown that accompanied with far-field regional compression that rises from pushing by Philippine Plate, Indo-Australian Plate and Eurasia Plate, the gravitational drive during delta growing has resulted in the comprehensive process, which is regarded as the reason.

Key words: Neogene; Structure feature; Structure analysis; Structure genesis; Baram Delta

Ma Liangtao; Postdoctor. Add: CNOOC Research Institute, 6 Taiyanggong Nan Jie, Beijing, 100028, China