

## 中中新世以来南海南部前隆的迁移: 来自北康盆地的证据

王龙樟<sup>1</sup>,姚永坚<sup>2</sup>,张莉<sup>2</sup>,周江羽<sup>1</sup>,徐行<sup>2</sup>,肖娇静<sup>1</sup>,沈奥<sup>1</sup>,徐乔<sup>1</sup>

(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. 广州海洋地质调查局,广东 广州 510760)

**摘要:**利用二维地震资料探讨南海南部北康前隆的迁移现象及其对形成油气圈闭的影响。在南沙海域,早中新世不整合(EMU)是一个区域性不整合面,EMU之上的地层可以简单归结为披覆层系和水平层系。披覆层系直接覆盖在EMU上,具有连续薄层的平行地震反射特征,向东南方向加厚,属于悬浮沉积;而水平层系同期充填在低凹处,不断上超和覆盖早期的披覆层系,厚层状,呈不连续或弱反射特征,属于浊积物与悬浮物的混合沉积。通过上超反射终止的迁移和披覆层系的加厚两个特征判断,中中新世以来北康前隆在向上隆升的同时不断向东南方向迁移,反映了南沙海域减薄的陆壳有一个强烈挠曲和均衡反弹过程。前隆的迁移留下了一系列的古潜山,披覆层系和水平层系是很好的盖层,有利于圈闭的形成。

**关键词:**前隆迁移;披覆层系;水平层系;古潜山圈闭;晚新生代;前陆盆地;北康盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

## Forebulge migration since the Mid-Miocene in the southern South China Sea: evidences from the Beikang Basin

Wang Longzhang<sup>1</sup>, Yao Yongjian<sup>2</sup>, Zhang Li<sup>2</sup>, Zhou Jiangyu<sup>1</sup>, Xu Xing<sup>2</sup>, Xiao Jiaojing<sup>1</sup>, Shen Ao<sup>1</sup>, Xu Qiao<sup>1</sup>

[1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 510760, China]

**Abstract:** The 2D seismic data were used to discuss the migration of the Beikang forebulge in the southern South China Sea and its impact on trap formation. The strata overlying the Early Miocene Unconformity (EMU), a regional unconformity, could be simply categorized as draping and horizontal layer series in the Nansha sea area. The draping layer series overlie the EMU directly, show parallel seismic reflection characters of continuous thin layers and thicken southeastward, suggesting suspended sediments. While the horizontal layer series were deposited synchronously in structural lows and continuously onlapped and overlay the draping strata formed early. They are mixed thick sedimentary layers of turbidites and suspended sediments featuring discontinuous or weak seismic reflection. Judged by the migration of onlap reflection termination and thickening of the draping strata, the forebulge has migrated southeastward during its uplifting since the Mid-Miocene, indicating a process of intense flexure and equilibrium rebound occurring at the thinned continental crust in the Nansha sea area. The forebulge migration has caused the formation of a host of buried hills, with the draping and horizontal series of strata serving as favorable seals, which in turn will be conducive to the formation of traps.

**Key words:** forebulge migration, draping layer series, horizontal layer series, buried-hill trap, Late Cenozoic, foreland basin, Beikang Basin

南海南部海域富集大量油气资源,主要来自前陆盆地系统<sup>[1-5]</sup>。前人的研究尤其关注早中新世不整合面(EMU),该界面分隔了两期前陆盆地系统:早期

属于周缘前陆盆地,直接覆盖在消减的古南海之上<sup>[1,6-7]</sup>;晚期属于陆内前陆盆地,发育在婆罗洲西北缘<sup>[8]</sup>南沙海槽之上<sup>[9-10]</sup>(图1)。

收稿日期:2018-09-13;修订日期:2018-10-08。

第一作者简介:王龙樟(1966—),男,博士、教授,石油地质与海洋地质学。E-mail:longz\_wang@cug.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41576068,91428205)。

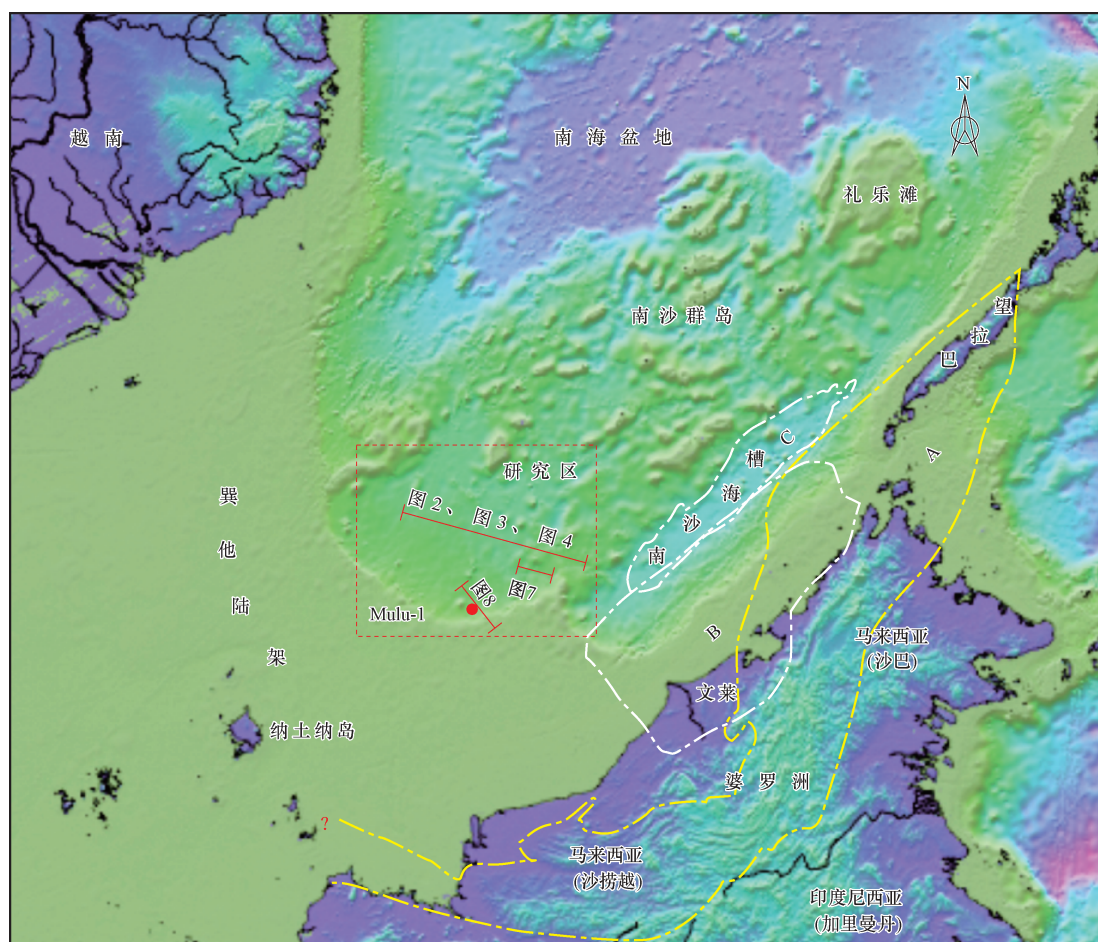


图1 中国南海南部研究区位置、测线以及前陆盆地位置(A:  $K_1-E^{[11]}$ ; B+C:  $N-Q^{[12]}$ )

Fig. 1 Locations of the research area, seismic lines and the foreland basin in southern South China Sea (A:  $K_1-E^{[11]}$ ; B+C:  $N-Q^{[12]}$ )

早期前陆盆地的形成可能与沙捞越运动有关,该次运动在婆罗洲逆时针旋转过程中沙巴—巴拉望南部与南沙—礼乐滩地块碰撞,导致古南海闭合<sup>[8,13-14]</sup>;拉让(Rajang)褶皱逆冲带横穿沙捞越马蹄形山<sup>[15]</sup>,再叠置在晚白垩世—始新世古南海或“拉让海”形成的造山后期前陆盆地之上<sup>[1]</sup>;至早中新世末期,前渊已经推进到南沙海槽,但它位于南沙海槽的确切位置尚不清楚,推定为南沙东南侧的巴拉望盆地地区<sup>[16]</sup>。

前隆在晚渐新世—早中新世南海扩张期挤压作用开始发育,从中中新世开始,褶皱逆冲带向北西方向迁移到婆罗洲—巴拉望一带沉没,这一过程被记录在碳酸盐岩沉积体系之中<sup>[17]</sup>。随后,婆罗洲—巴拉望逆冲前缘楔向北西掩<sup>[4,18]</sup>,前渊和前陆位置也向北西方向迁移<sup>[18]</sup>,前隆在中中新世已经移至南沙位置,正值裂后热收缩沉降期。南沙地块从华南板块裂离,其深部构造与周边具有显著区别<sup>[19]</sup>。中中新世之后,南沙地块持续向婆罗洲增生楔俯冲,并一直持续至今<sup>[18,20-21]</sup>。

本文聚焦于南海扩张期后阶段,重点关注位于

EMU之上的披覆层系(draping strata)和水平层系(horizontal strata或ponded sediments)成因特征,试图通过地震反射特征和EMU之上的地层构型,解析南海扩张期后阶段前隆是否延续了与扩张期一样继续向北西方向迁移的问题,探索与岩石圈挠曲可能机制,最后聚焦于圈闭的形成、演化与预测,以推进油气勘探进程。

## 1 地质背景

南海南部边缘是欧亚板块的一部分,位于板块的最南部,中生代向南面对特提斯洋,后者与太平洋连通<sup>[22]</sup>。从晚白垩世到早新生代,南海所在陆块持续裂陷,至渐新世开始海底扩张<sup>[23-25]</sup>并伴有古南海洋壳的俯冲消减;期间,与婆罗洲西北部发生碰撞<sup>[26]</sup>,克罗克(Crocker)—巴拉望增生楔逆掩推覆在减薄的陆壳之上<sup>[27-31]</sup>,在褶皱逆冲带的负荷作用下,前隆和前渊也向西北方向迁移<sup>[17,32]</sup>,逐渐形成具有挠曲前陆盆地性质的南沙海槽盆地<sup>[33]</sup>。因此,南沙海槽

前隆的隆升、形成,逐渐为生物礁生长发育提供了前提条件<sup>[17]</sup>。

根据露头剖面与井震资料<sup>[25,34-40]</sup>,早中新世以来南海洋壳部分俯冲到太平洋板块之下<sup>[28]</sup>,直到早中新世末期沙巴(Sabah)运动开始<sup>[41]</sup>和卡加延(Cagayan)岛弧碰撞没入菲律宾海板块西部<sup>[42]</sup>以后,那里的海底扩张才结束。中中新世以来南海南部的前陆盆地虽然变化不大,但是褶皱逆冲带却出现了不同的褶皱系<sup>[3]</sup>,且婆罗洲-巴拉望逆冲楔还不断向北西方向推进<sup>[4,18]</sup>。由于发生剪刀式碰撞,前陆盆地也不断向北东方向延展<sup>[43-44]</sup>。

## 2 地震数据与解释

地震数据资料是来自广州海洋地质调查局 95 航次的偏移剖面,于 2016 年重新处理后分辨率有显著提高。通过地震相分析,建立了地震地层格架;利用同相轴追踪刻画地震相地层构型。

在地震解释过程中,有一个非常清晰的区域不整合面将裂后地层与下覆裂陷地层分隔,这个不整合面的形成与南海海底扩张有密切关系,也标志着区域性沉降(热收缩沉降)的开始。这个区域不整合面与前人报导的中中新世不整合面(MMU)<sup>[10,14,45]</sup>是同一个面,且与沙巴陆缘地区<sup>[46-48]</sup>和婆罗洲增生楔造山带<sup>[21]</sup>的深部区域不整合面(DRU,中中新世)可比。正如 Hutchison<sup>[16]</sup>所述:MMU 面实际上是早中新世至中中新世多个构造事件复合界面;通过整个陆缘 70 多口井生物地层对比,确定不整合面准确年龄是早中新世晚期(约 19~17 Ma)<sup>[49]</sup>。地震资料解释的不整合面是一个区域性不整合面,在整个南海南部海域都可以对比<sup>[11,32,50]</sup>,文献中常用“南海不整合面”命名<sup>[51]</sup>,本文认为沿用“EMU”较为合适。

EMU 不整合面上下的构造样式截然不同,其下,发育大量正断层,它们大部分未断穿 EMU,表明 EMU 形成之前盆地具有伸展性质;当沙巴-南沙地块碰撞,在褶皱逆冲带负荷作用下前隆和前渊不断向西北方向迁移<sup>[17,32]</sup>,形成新一期前陆盆地<sup>[13,16,51-52]</sup>。因此,我们在地震解释剖面发现的 EMU 不整合,是前隆和前渊迁移留下的形迹。

通过 NW-SE 向剖面解释 EMU 面之上发育披覆层系(draping strata)和水平层系(horizontal strata)两套地层(图 2a,b)。披覆层系直接覆盖在 EMU 不整合面之上,薄层状,所有沉积层系与不整合面几近完全平行,整个层系向南东方向加厚(图 2c),具体高频、中等

振幅、高连续性特征,横向厚度均一,纵向上也基本一致。

水平层系发育在低洼处,逐渐超覆并覆盖在早期的披覆层系之上(图 2c)。水平层系可以进一步区分为厚层与薄层两类,二者交互成层:厚层层系是水平层系中的主要沉积层,横向上变化大,薄层夹杂其中;地震反射呈空白、杂乱反射特征,连续性差,底部反射强;薄层层系的层厚较小但连续,向北西方向薄层增多,地震反射呈高频、中振幅和高连续特征。总体上讲,水平层系向北西方向(远离隆起的低洼处)加厚。

## 3 结果与讨论

### 3.1 披覆层系形成机制

在多条地震测线上都可以看到,披覆层系与 EMU 不整合面平行披覆状(图 2,图 3),形成机制如下。

1) 披覆层系的形成机制。披覆层系是均一、薄层状、密集多层的沉积层系;横向上高连续,每一细层都可追踪很远距离,且厚度几乎不变,表明沉积环境稳定,沉积条件非常一致;其次,每一细层都与 EMU 不整合面平行,呈相似褶皱特征;结合上下地层在区域上的环境特点可以推断,这些披覆层系形成于平静的深海环境,鲜有浊流活动。因此,沉积区推测为深海隆起区,沉积物披覆在隆起上,地形起伏比较平缓,极少发生同沉积期重力滑动变形。由此推定,披覆层系是沉积在前陆盆地隆升的前隆构造上。

2) 披覆层系的横向变化。披覆层系向海底隆起区方向(SE)厚度加大,表明披覆层系在隆起区方向具有更长期的沉积作用。这种情况有两种解释:一种情况是 EMU 形成以来的前隆宽度不断缩小,北西方向的前隆不断沉没,导致南东方向隆起区始终处于披覆沉积状态;另一种情况是前隆向南东方向迁移一定的距离,而南东方向的隆起区由于濒临前渊,所以始终保持披盖型沉积。由此认为,披覆层系覆盖在前隆,沉积越厚,前隆隆起的时间越长,披覆层系的加厚意味着前隆向南东方向迁移,隆后盆地随之迁移。

### 3.2 水平层系形成机制

水平层系覆盖在早期的披覆层系之上,且向南东方向上超,具体分析如下(图 2,图 4)。

1) 水平层系的形成机制。根据地震地层分析,水平层系是以厚层沉积物为主夹薄层沉积物。厚层沉积物一般呈不连续、杂乱状地震反射特征,表明内部成层性差,快速沉积的特点;底部一般有一个强反射界面,

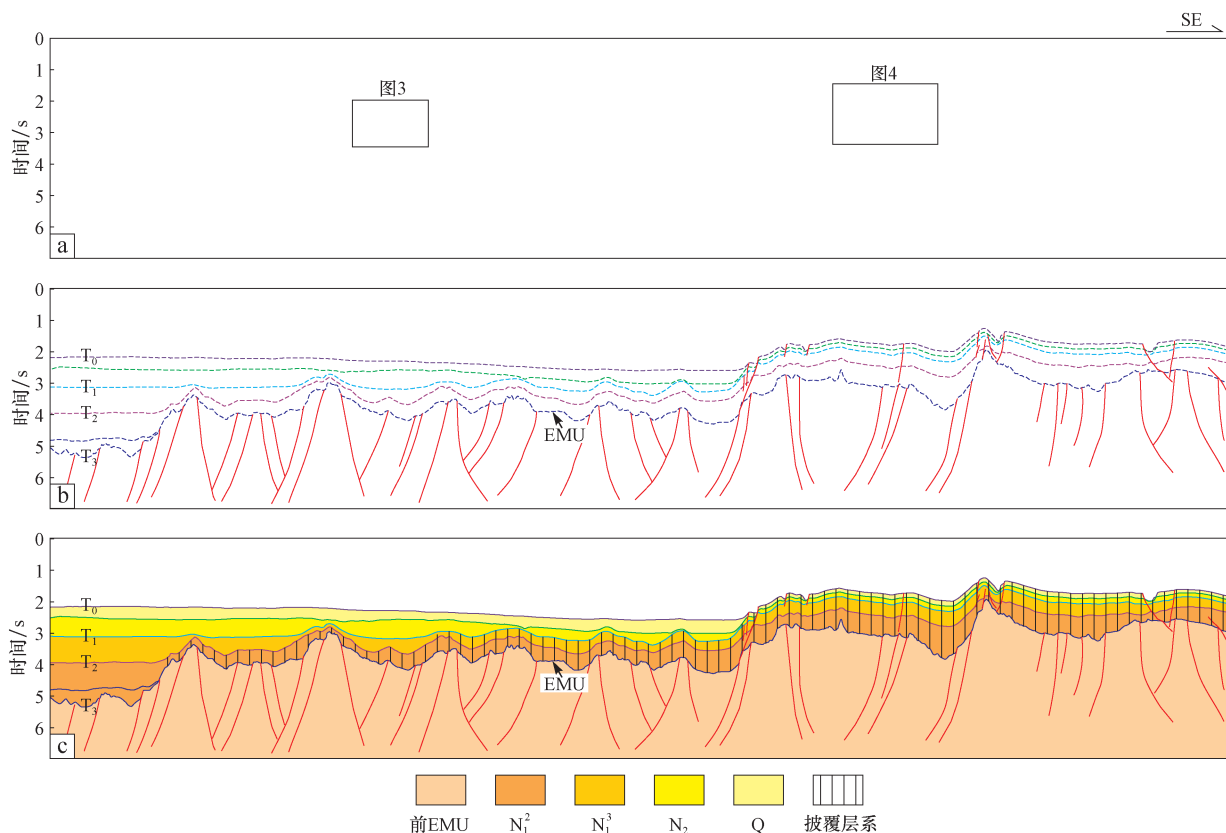


图2 地震资料解释

Fig. 2 Interpretation of seismic data

a. 地震反射剖面; b. 地层对比和构造解释; c. 地震剖面上的披覆层系

前 EMU. 始新统~下中新统;  $N_1^2$ . 中中新统;  $N_1^3$ . 上中新统;  $N_2$ . 上新统; Q. 第四系; 披覆层系. 用竖条纹表示。界面:  $T_0$ . 海底;  $T_1$ . 中新统顶界面;  $T_2$ . 中中新统顶界面;  $T_3$ . EMU。

表明底部可能存在冲刷面。因此厚层沉积物很可能是一种高能的事件沉积过程,一般为浊流沉积。薄层沉积物以连续、平行反射为特征,反映一种静水的远洋沉积环境,这种环境常常因浊流活动中断。

2) 水平层系的横向变化。在南东方向上超于海底隆起区(前隆)之上,反映隆后盆地(低地)朝南东方向(前隆方向)范围扩大或迁移。这种隆后盆地的扩张或迁移与前隆的后退或迁移同步进行,直接结果是前隆在南东方向保持隆升状态。

### 3.3 前陆盆地隆升和迁移过程

根据南沙海槽西北边缘诸多岛屿沉积物分析,Steuer 等<sup>[17]</sup>认为,EMU 不整合面的强烈隆升和暴露源自前隆形成及随后的强烈隆升。相关研究提出了早中新世—中中新世的迁移模式:在西北婆罗洲褶皱逆冲带负荷作用下,前隆跨越 EMU 不整合面,向北西方向迁移<sup>[19,32]</sup>。随着古南海洋壳逐步消减和新南海洋壳逐步扩张,南沙地块减薄的陆壳不断向南东方向迁移并最终下插到西北婆罗洲陆壳之下,前渊也从西北婆

罗洲跃迁到南沙海槽。本文的研究恰好补充了中中新世之后的这段历史,可以反映大洋扩张结束以后,南海南部大陆岩石圈的挠曲和反弹过程,该过程具有挠曲反弹与斜向碰撞特征。

1) 挠曲反弹过程。古地磁资料表明中生代以来婆罗洲地块纬度几乎没有变化<sup>[53]</sup>。显而易见,南海扩张会导致古南海洋壳向南消减;而南海停止扩张以后,南海南部如何消减成了未解之迷。根据笔者推断,前隆隆升和迁移应该是岩石圈挠曲反弹的结果:超负荷引起的前隆北西向迁移<sup>[17]</sup>到此结束;中中新世一晚中新世南康台地发育了超过 200 个碳酸盐岩隆,北康盆地在早中新世也广泛发育了生物礁<sup>[54]</sup>,都说明这个地区挠曲隆升事实的存在,而不是构造沉静期(tectonical quiescence<sup>[55]</sup>)。

2) 几乎所有的古地磁数据都证明了早中新世—中中新世(25 ~ 10 Ma)婆罗洲地块发生了逆时针旋转<sup>[27-28,53]</sup>。这种旋转可能导致南沙地块与西北婆罗洲发生剪刀式碰撞,并且是沿南沙海槽东南侧由南西向北东方向依次碰撞。因此,最强烈的碰撞发生在南



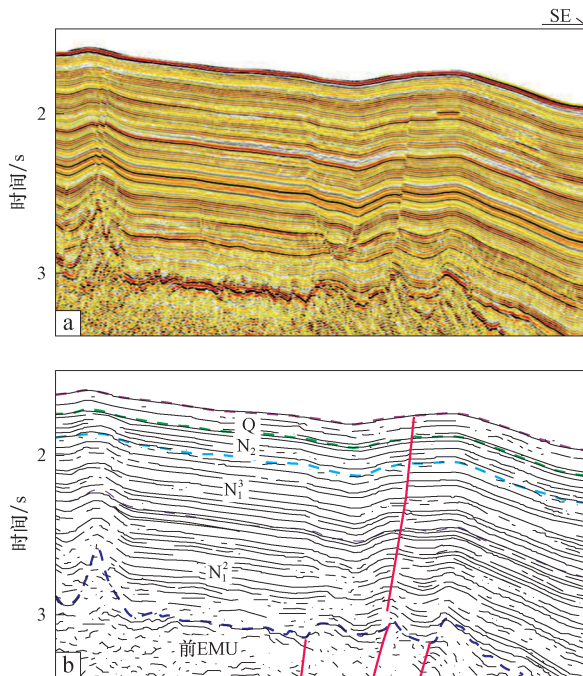


图3 披覆层系地震反射特征

Fig. 3 Seismic reflection characteristics of draping layer series

a. 地震反射剖面; b. 强反射波峰的线性追踪

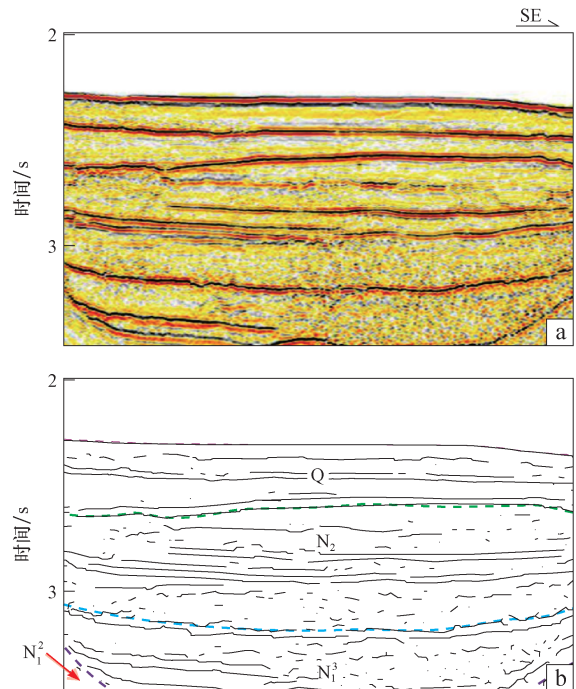


图4 水平层系地震反射特征

Fig. 4 Seismic reflection characteristics of horizontal layer series

a. 地震反射剖面; b. 强反射波峰的线性追踪

沙海槽西南端,这里也正是与廷贾—西巴兰姆线(the Tinjar-West Baram Line)<sup>[56-57]</sup>的交汇处,也是南康碳酸盐台地的北部边缘<sup>[55]</sup>;强烈碰撞之后的岩石圈反弹会引起南沙地块东南边缘强烈隆升和在北西方向的快速沉降(图5)。

3) 自始新世以来沿廷贾—巴兰姆线发生了交替进行的右旋和左旋的走滑断裂<sup>[57-59]</sup>,表现为断裂两侧应力条件的不同<sup>[21,57,60]</sup>。中中新世—晚中新世期间,主要以左行走滑断裂为主<sup>[59]</sup>。因此,断裂东侧(研究区所在)的挤压应力较小,前隆隆升比较缓慢;而上新世以来主要以右行走滑断裂为主<sup>[59]</sup>,导致南沙地块与西北婆罗洲碰撞加剧,西北婆罗洲褶皱逆冲带的负荷作用以及南沙海槽的挤压应力加剧,前隆隆升速度加快,且会因岩石圈的挠曲作用,导致在隆升的同时前隆向南东方向迁移。

前隆的迁移是由于西北婆罗洲负荷以及南沙海槽前渊盆地充填等超负荷重力作用结果,岩石圈挠曲形变加大,前隆在强烈隆升的同时也向前渊方向迁移;而隆后盆地也加剧沉降并向前隆方向迁移,最终结果造成前隆逐渐加高和变窄,并向南东方向迁移到前渊附近,而隆后盆地逐渐沉降和变宽(图6)。

### 3.4 披覆层系发育时间

披覆层系在南沙地块普遍发育,由于前人并未意

识到其存在的意义,因此没有针对这套地层做针对性的研究。这套地层的发育时间可以从一些图件中看到,发现前人对其年龄的判断总体而言具有争议,有人把披覆层系划入中中新统<sup>[61]</sup>,也有人认为披覆层系从中中新世开始发育,至今一直没有间断过<sup>[62]</sup>。

披覆层系的极薄层特征表明,它们是在远洋静水环境下沉积形成的,而这种环境的沉积速率特别缓慢,且区域上有恒定的沉积速率,因此才会具有厚度变化极小,地震反射平行而连续的特征。由此推断,披覆层的厚度与披覆沉积的时间成正比。在研究区,披覆层系向南东方向海底隆起区增厚,表明南东方向的隆起区作为正地形持续时间更长;南东方向隆起区也完全未被水平层系覆盖,说明自早中新世末期隆升以来,该区域一直处于隆升状态;而在低洼的北西方向一侧,披覆层系很薄,上面覆盖着水平层系,说明自中中新世隆升以后,该区隆升快速停止乃至沉降,被沉积物(主要是浊积物)充填。

综合隆升和沉积过程的分析,发现前隆自形成以后并没有继续向北西方向推进,而是松弛回返,或在西北婆罗洲褶皱逆冲带负荷作用下继续挠曲变形,形成更大曲率的前隆并向南东方向小幅迁移(图5)。因此,披覆层系的发育时间是从中中新世开始的,一直持续到现在。





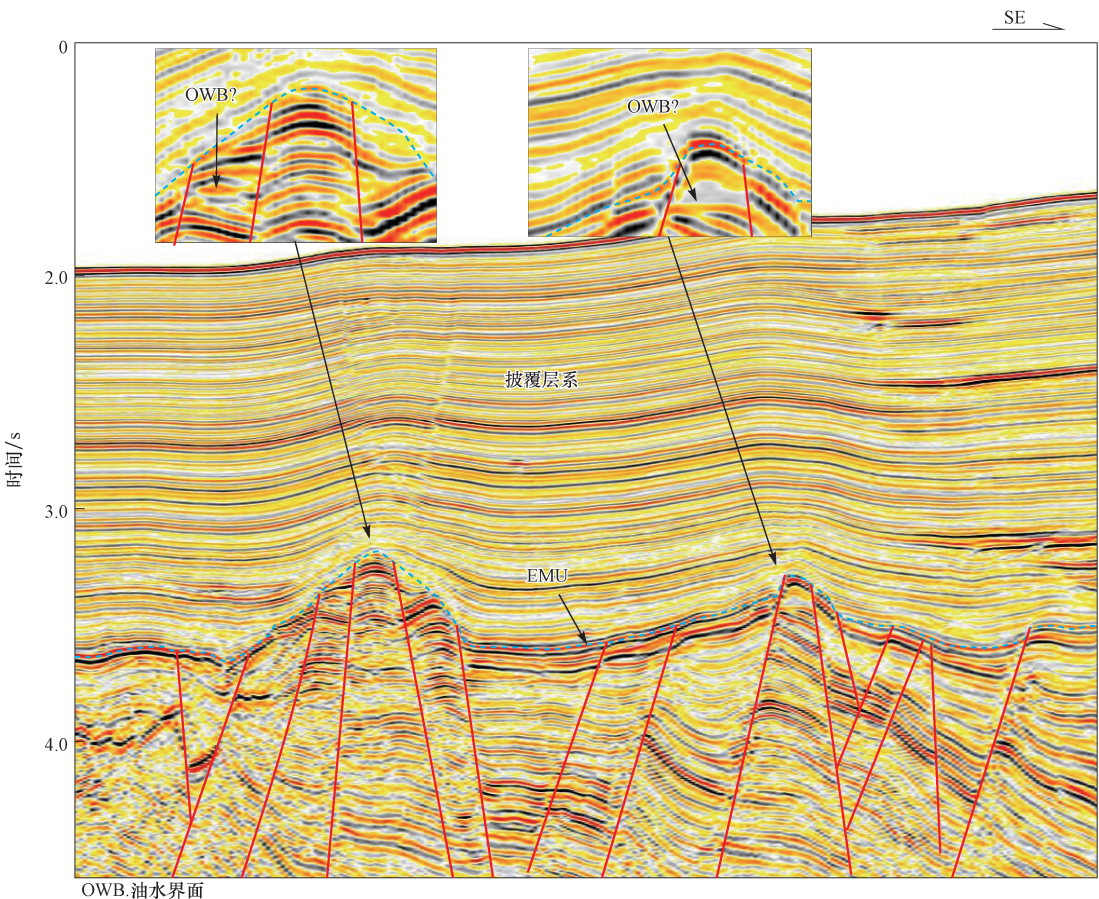


图 7 古潜山圈闭和有利储集层  
Fig. 7 Buried-hill traps and favorable reservoirs

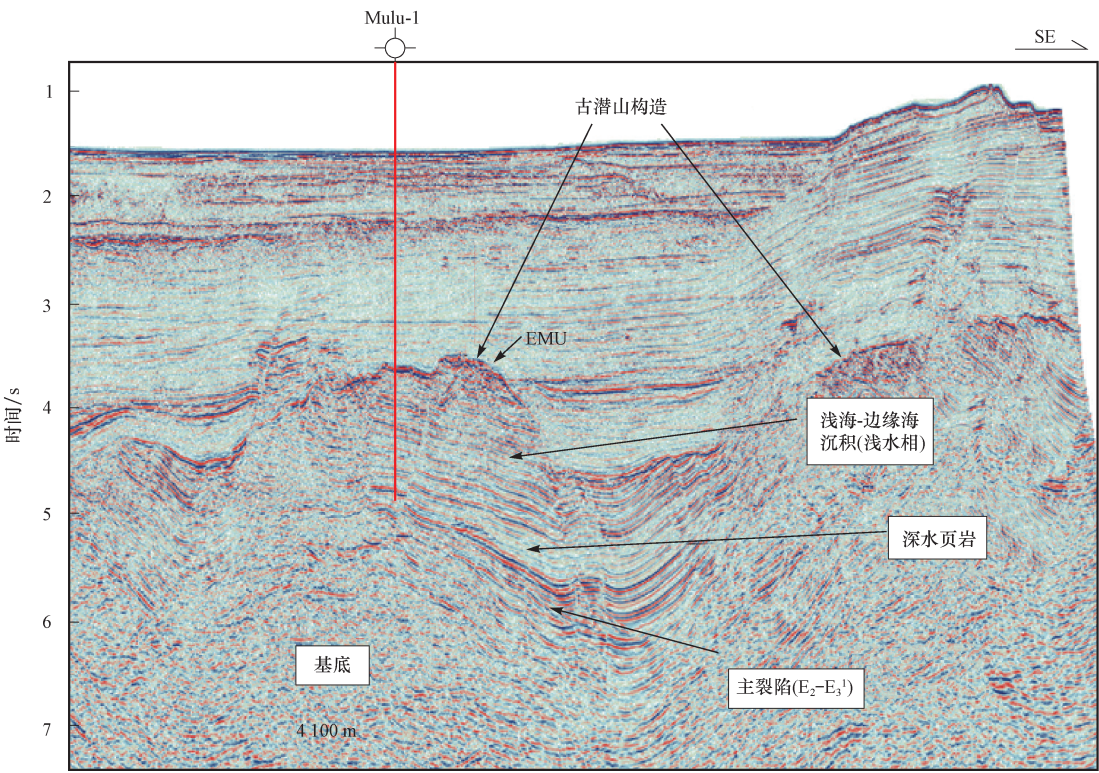


图 8 古潜山构造圈闭(据文献[32]修改)  
Fig. 8 Structural traps of buried hills (modified from reference[32] )

### 3.5 披覆层系在圈闭形成过程中的作用

EMU 是南沙海域的区域性不整合面,是重要转折关键作用界面,其上下地层的构造环境发生了重大转变。在不整合面之下,伸展性的断层特别发育,形成了大量的箕状断陷盆地<sup>[62]</sup>;在不整合面形成以后,构造环境发生了重大转变,处于缓慢的整体隆升和沉降阶段,断层不发育,以披覆沉积层和盆地充填为主,形成了披覆层系和水平层系。因此,这种构造环境的变化有利于潜山构造的形成,同时,披覆沉积作用也有利于圈闭的形成。

根据前人区域古地理研究,EMU 不整合面上下是沉积环境的重大转折期<sup>[63]</sup>。EMU 之下,在南沙海域主要是海陆交互环境,有利于粗碎屑沉积和生物礁滩的形成,是储集层的重要形成时期(图7);EMU 形成之后,南沙地块大幅度沉陷,以远洋泥质沉积为主,是封盖层的重要形成时期。因此,从岩性的角度分析,也有利于古潜山构造圈闭和岩性圈闭的形成与保存,特别是碳酸盐岩-生物礁类型的圈闭发育,已经得到了钻井的佐证<sup>[32]</sup>(图8)。

## 4 结论

1) 随着早中新世末期 EMU 不整合面的形成,一个新的前陆盆地系统形成了,这个盆地系统是在原前陆盆地系统的北西方向。前人的模式只总结了新前陆盆地系统的形成,形成以后的历史未予以总结,本文补充了这段历史:通过北康盆地的地震反射特征和地震相分析,将 EMU 以上地层归纳为两种特征截然不同的地震反射类型,即披覆层系和水平层系,前者源自盆地披覆沉积作用,后者形成于盆地充填沉积作用。

2) 披覆层系向南东方向加厚,表明岩石圈挠曲和均衡反弹作用导致了前陆盆地前隆(南沙地块)的持续隆升和向南东方向迁移。这种岩石圈形变是西北婆罗洲作为褶皱逆冲带自中中新世以来不断增加负荷作用的结果,无论是俯冲-碰撞模式<sup>[64]</sup>或是碰撞-逃逸模式<sup>[23,65-66]</sup>,前陆盆地的基本格局都没有改变。

3) EMU 不整合面形成前后,构造、沉积环境先后发生重大转变,构造环境从伸展环境转变为整体升降环境,沉积环境从海陆交互环境转变为深海-半深海环境,这种变化有利于古潜山圈闭和岩性圈闭(包括生物礁-碳酸盐岩台地或碎屑岩储层)的形成,有利于生

储盖层的匹配成藏。

致谢:特别感谢广州海洋地质调查局为本研究提供地震反射资料,感谢国家自然科学基金(项目编号:41576068,91428205)经费支持,非常感谢审阅人提出的建设性建议。

### 参考文献

- [1] Madon M, Abdul Hadi A R. Penecontemporaneous deformation in the Nyalau Formation (Oligo-Miocene) Central Sarawak [J]. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 2007, 53: 67-73.
- [2] Madon M. Basin types, tectono-stratigraphic provinces, and structural styles [C] // The petroleum geology and resources of Malaysia. Kuala Lumpur: PETRONAS, 1999: 77-112.
- [3] 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.
- [4] Hesse S, Back S, Franke D. The structural evolution of folds in a deepwater fold and thrust belt—a case study from the Sabah continental margin offshore NW Borneo, SE Asia [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27: 442-454.
- [5] King R C, Backe G, Morley C K, 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.
- [6] James D M D (ed). The geology and hydrocarbon resources of Negara Brunei Darussalam [M]. Brunei: Muzium Brunei, 1984: 169.
- [7] Koopman A. Regional geologic setting [C] // Sandal, T. (ed), The geology and hydrocarbon resources of Negara Brunei Darussalam. Bandar Seri Begawan: Brunei Shell Petroleum Company, 1996: 49-60.
- [8] Cullen A B. Transverse segmentation of the Baram-Balabac Basin, NW Borneo: refining the model of Borneo's tectonic evolution [J]. Petroleum Geoscience, 2017, 16: 3-29.
- [9] Franke D, Barckhausen U, Heyde I, et al. Seismic images of a collision zone offshore NW Sabah/Borneo [J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25: 606-624.
- [10] Hutchison C S, Vijayan V R. What are the Spratly Islands? [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 39 (5): 371-385.
- [11] Hutchison C S. Marginal basin evolution: the southern South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21: 1129-1148.
- [12] 张翀, 吴世敏, 丘学林. 南海南部海区前陆盆地形成与演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27 (1): 61-70.  
Zhang C, Wu S M, Qiu X L. Formation of foreland basins in the south of the South China Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27 (1): 61-70.
- [13] Hutchison C S. The 'Rajang accretionary prism' and 'Lupar Line' problem of Borneo [C] // Hall, R., Blundell, D. J. (Eds.). Tectonic evolution of Southeast Asia. London: Geological Society of London Special Publication, 1996, 106 (1): 247-261.



- [14] Hall R. Contraction and extension in northern Borneo driven by subduction rollback [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 76: 399–411.
- [15] Hutchison C S. The North-West Borneo trough [J]. *Marine Geology*, 2010, 271: 32–43.
- [16] Hutchison C S. Oroclines and paleomagnetism in Borneo and South-East Asia [J]. *Tectono-physics*, 2010, 496: 53–67.
- [17] Steuer S, Franke D, Meresse F, et al. Oligocene-Miocene carbonates and their role for constraining the rifting and collision history of the Dangerous Grounds, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 5: 644–657.
- [18] Morley C K, Back S, van Rensbergen P, et al. Characteristics of repeated, detached, Miocene-Pliocene tectonic inversion events, in a large delta province on an active margin, Brunei Darussalam, Borneo [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(7): 1147–1169.
- [19] Dong M, Wu S G, Zhang J. Thinned crustal structure and tectonic boundary of the Nansha Block, southern South China Sea [J]. *Marine Geophysical Research*, 2016, 37: 281–296.
- [20] Cottam M, Hall R, Sperber C, et al. Pulsed emplacement of the Mount Kinabalu granite, northern Borneo [J]. *Journal of Geological Society of London*, 2010, 167: 49–60.
- [21] Wang P C, Li S Z, Guo L L, et al. Mesozoic and Cenozoic accretionary orogenic processes in Borneo and their mechanisms [J]. *Geological Journal*, 2016, 51 (S1): 464–489.
- [22] 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1999, 24(1): 1–12.
- Yin H F, Wu S B, Du Y S, et al. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system [J]. *Earth Science*, 1999, 24(1): 1–12.
- [23] Briaies A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and sea floor spreading stages in the South China Sea; implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1993, 98 (B4): 6299–6328.
- [24] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Basin [C] // Hayes, D. E. (ed.). *The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 1, Geophysical Monographs Series, vol. 23*. Washington D C: American Geophysical Union, 1980: 89–104.
- [25] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea Basin [C] // Hayes, D. E. (ed.). *The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 2, Geophysical Monographs Series, Washington D C: American Geophysical Union*, 1983: 23–56.
- [26] Hutchison C S, Bergman S C, Swauger D, et al. A Miocene collisional belt in north Borneo, uplift mechanism and isostatic adjustment quantified by thermochronology [J]. *Journal of the Geological Society*, 2000, 157(4): 783–793.
- [27] Hall R. Reconstructing Cenozoic SE Asia [C] // Hall, R., Blundell, D. J. (Eds.). *Tectonic evolution of SE Asia*. London: Geological Society London Special Publication, 1996, 106: 153–184.
- [28] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific; computer-based reconstructions, model and animations [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20: 353–434.
- [29] Longley I M. The tectonostratigraphic evolution of SE Asia [C] // Murphy, R W (ed.). *Petroleum geology of Southeast Asia*. London: Geological Society of London Special Publication, 1997, 126 (1): 311–339.
- [30] Murphy R W. SE Asia reconstruction with a non-rotating Borneo [J]. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 1998, 42: 85–94.
- [31] Morley C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia [J]. *Tectonophysics*, 2002, 347(4): 189–215.
- [32] Madon M, Ly K C, Wong R. The structure and stratigraphy of deep-water Sarawak, Malaysia; Implications for tectonic evolution [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 76(2): 312–333.
- [33] Milsom J, Holt R, Bin Ayub D, et al. Gravity anomalies and deep structural controls at the Sabah-Palawan margin, South China Sea [C] // Frazer A J, Matthews S J, Murphy R W (Eds.). *Petroleum geology of Southeast Asia*. London: Geological Society of London Special Publication, 1997: 417–427.
- [34] Holloway N H. The north Palawan block, Philippines; its relation to the Asian mainland and its role in the evolution of the South China Sea [J]. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 1981, 14: 19–58.
- [35] Mitchell A H G, Hernandez F, Cruz A P D. Cenozoic evolution of the Philippine archipelago [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 1986, 1(1): 3–22.
- [36] Wolfart R, Cepek P, Graman F, et al. Stratigraphy of Palawan island, Philippines [J]. *Newsletter of Stratigraphy*, 1986, 16(1): 19–48.
- [37] Rangin C, Jolivet L, Pubellier M, et al. A simple model for the tectonic evolution of Southeast Asia and Indonesian region for the past 43 My [J]. *Bulletin of the Geological Society of France*, 1990, 6 (6): 889–905.
- [38] Yumul Jr G P, Dimalanta C B, Maglambayan V B, et al. Tectonic setting of a composite terrane: a review of the Philippine island arc system [J]. *Geosciences Journal*, 2008, 12 (1): 7–17.
- [39] Aurelio M A, Pe? a R E, Taguibao K J L. Sculpting the Philippine archipelago since the Cretaceous through rifting, oceanic spreading, subduction, obduction, collision and strike-slip faulting; contribution to IGMA5000 [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 72 (4): 102–107.
- [40] Aurelio M A, Forbes M T, Taguibao K J L, et al. Middle to Late Cenozoic tectonic events in south and central Palawan (Philippines) and their implications to the evolution of the southeastern margin of South China Sea; Evidence from onshore structural and offshore seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 658–673.
- [41] Balaguru A. Orogeny in action: Tectonic evolution and stratigraphy of Sabah, seismic and outcrop evidence [C] // Malaysia: the Geological Society of Malaysia Petroleum Geology Conference, 2004: 36.
- [42] Encarnacion J, Mucasa S B. Age and geochemistry of an anorogenic crustal melt and implications for I-type granite petrogenesis [J]. *Lithos*, 1997, 42: 1–13.

- [43] Zhou D, Ru K, Chen H Z. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region [J]. *Tectonophysics*, 1995, 251: 161 – 177.
- [44] Sun Z, Zhong Z H, Keep M, et al. 3D analogue modeling of the South China Sea; a discussion on breakup pattern [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34: 544 – 556.
- [45] Schuller H U, Hinz K, Block M. Tectono-stratigraphic terranes and detachment faulting of the South China Sea and Sulu Sea [J]. *Marine Geology*, 1996, 130(1–2): 39 – 78.
- [46] Levell B K. The nature and significance of regional unconformities in the hydrocarbon-bearing Neogene sequences offshore West Sabah [J]. *Bulletin of the Geology Society of Malaysia*, 1987, 21: 55 – 90.
- [47] Tan D N K, Lamy J M. Tectonic evolution of the NW Sabah continental margin since the Late Eocene [J]. *Bulletin of the Geology Society of Malaysia*, 1990, 27: 241 – 260.
- [48] Hazebroek H P, Tan D N K. Tertiary tectonic evolution of the NW Sabah Continental Margin [J]. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 1993, 33: 195 – 210.
- [49] Krebs W N. Upper Tertiary chronosequence stratigraphy of offshore Sabah and Sarawak, NW Borneo, Malaysia; a unified scheme based on graphic correlation [J]. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 2011, 57: 39 – 46.
- [50] 姚永坚, 杨楚鹏, 李学杰, 等. 南海南部海域中中新世 (T3 界面) 构造变革界面地震反射特征及构造含义 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1274 – 1286.
- Yao Y J, Yang C P, Li X J, et al. The seismic reflection characteristics and tectonic significance of the tectonic revolutionary surface of mid-Miocene (T3 seismic interface) in the southern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1274 – 1286.
- [51] Cullen A B. Transverse segmentation of the Baram-Balabac Basin, NW Borneo; refining the model of Borneo's tectonic evolution [J]. *Petroleum Geoscience*, 2010, 16: 3 – 29.
- [52] Madon M. Geological setting of Sarawak [C] // *The petroleum geology and resources of Malaysia*. Kuala Lumpur: PETRONAS, 1999: 275 – 290.
- [53] Fuller M, Ali J R, Moss S J, et al. Paleomagnetism of Borneo [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1999, 17: 3 – 24.
- [54] 许红, 陆永潮, 施和生, 等. 南沙群岛海域北康盆地生物礁高精度层序地层学及其新近纪生物礁层序演化模式 [J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(2): 48 – 54.
- Xu H, Lu Y C, Shi H S, et al. High-precision organic reef sequence stratigraphy of Beikang Basin and sequence evolution model of Neogene organic reefs in Nansha Islands Sea Area [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(2): 48 – 54.
- [55] Ali M Y B, Abolins P. Central Luconia Province [C] // *The petroleum geology and resources of Malaysia*. Kuala Lumpur: PETRONAS, 1999: 369 – 392.
- [56] Cullen A, Macpherson C, Taib N I, et al. Age and petrology of the Usun Apau and Linau Balui volcanics; windows to central Borneo's interior [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 76: 372 – 388.
- [57] Cullen A. Reprint of: Nature and significance of the West Baram and Tinjar Lines, NW Borneo [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 674 – 686.
- [58] Ingram G M, Chisholm T J, Grant C J, et al. Deepwater North West Borneo: hydrocarbon accumulation in an active fold and thrust belt [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(7): 879 – 887.
- [59] 杨木壮, 吴进民. 南海南部新生代构造应力场特征与构造演化 [J]. *热带海洋*, 1996, 15(2): 45 – 52.
- Yang M Z, Wu J M. Tectonic stress field and tectonic evolution in the south of South China Sea [J]. *Tropic Oceanology*, 1996, 15(2): 45 – 52.
- [60] Zheng Q L, Li S Z, Suo Y H, et al. Structures around the Tinjar-West Baram Line in northern Kalimantan and seafloor spreading in the proto-South China Sea [J]. *Geological Journal*, 2016, 51 (S1): 513 – 523.
- [61] Savva D, Pubellier M, Franke D, et al. Different expressions of rifting on the South China Sea margins [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 579 – 598.
- [62] Ding W W, Franke D, Li J B, et al. Seismic stratigraphy and tectonic structure from a composite multi-channel seismic profile across the entire Dangerous Grounds, South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2013, 582: 162 – 176.
- [63] 谢锦龙, 黄冲, 向峰云. 南海西部海域新生代构造古地理演化及其对油气勘探的意义 [J]. *地质科学*, 2008, 43(1): 133 – 153.
- Xie J L, Huang C, Xiang F Y. Evolution of Cenozoic tectono-paleogeography and its petroleum significance in the western South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2008, 43(1): 133 – 153.
- [64] Hall R, van Hattum M, Spakman W. Impact of India-Asia collision on SE Asia; the record in Borneo [J]. *Tectonophysics*, 2008, 451(1–4): 366 – 369.
- [65] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia; new insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 1982, 10(10): 611 – 616.
- [66] Replumaz A, Tapponier P. Reconstruction of the deformed collision zone between India and Asia by backward motion of lithospheric blocks [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2003, 108(B6): 2285.

(编辑 董立)