

北部湾盆地演化及局部构造成因机制研究

李才, 杨希冰, 范彩伟, 胡林, 代龙, 赵顺兰

中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江, 524057

内容提要:为解决北部湾盆地区域构造演化及成因机制研究不足,局部构造认识存在差异等问题。文中利用二维、三维地震,结合重力、钻井等资料,阐明了北部湾盆地构造演化过程,明确了典型构造发育的成因机制。结果表明:①北部湾盆地具有两坳一隆的构造格局,即北部坳陷带、南部坳陷带和中部隆起带。控凹边界断层为大型低角度拆离正断层,分割变质核杂岩与上盘岩石,其中下盘穹隆状变质核杂岩由地壳中一高级古老变质岩及晚期岩浆岩组成(包括被拆离断层切割的含糜棱状岩石的剪切带,如碎裂岩、角砾岩、糜棱岩和片麻岩等);②受断裂伸展拆离,同时叠加晚期伸展应力旋转,乌石凹陷东区发育大型断层掀斜反转构造;③新提出“三明治”式地层充填模式下发育的顺层剪切走滑构造的形成机理。“三明治”式刚柔性岩石呈层状分布,在反转掀斜及后期应力场旋转叠加力的作用下,地层非常容易失衡,特别是在其界面处(刚柔界面、柔性界面内部)存在明显的物理力学差异性,二维层状滑动面摩擦阻力非常小,极易造成岩石的顺层剪切走滑。

关键词:北部湾盆地;变质核杂岩;拆离;构造反转;成因机制

北部湾盆地是南海北部重要的油气探区之一。近年来盆地北部坳陷带勘探进入瓶颈期,特别对于涠西南凹陷,随着勘探程度的提高,目标越来越小,油气储量发现越来越少。而南部坳陷带(如乌石凹陷、迈陈凹陷)近年取得一系列的发现,钻探资料证实南部坳陷古近系流沙港组烃源岩有机地化指标非常好、模拟生烃资源潜力巨大,同时发育多套储盖组合,为本区油气勘探重要的接替领域。

目前,南部坳陷乌石凹陷东区反转构造带、迈陈凹陷东区(陆上中石化矿区)已经发现多个商业性大中型油田,并且经过多年的研究,在地球物理、烃源、层序地层及沉积充填等方面取得了较多的新成果认识(Yuan Bing, 2014; Wang Peng et al., 2011; Hu Aiyu et al., 2015; Chen Jianjun et al., 2015),但是构造地质认识相对薄弱,区域构造地质研究成果比较少,缺少南部坳陷整体的构造演化认识及成因机制研究成果(包括区域构造格架、边界断层的性质及成因等认识)。在局部构造的认识上也存在明显差异,部分学者认为南部坳陷乌石凹陷东区反转构造带是受到区域挤压,局部抬升形成的构造反转(Yang Haichang et al., 2011),但有人认为是为区域拉张应力下重力滑动的产物(Yuan Bing et al.,

2012)。前者强调了挤压应力反转,后者从断裂、沉积地层的特点入手分析,认为非挤压成因机制,强调了重力滑动的概念。国内对于反转构造带的样式、成因有较多研究(Zhang Guohua et al., 2015; Tang Daqing et al., 2013; He Wenyuan et al., 2001; He Jiankun et al., 1999; Tong Dianjun et al., 2010; Wang Yitian et al., 1999),目前研究的成果表明,引起构造反转的成因是多样的,包括主压应力对断陷盆地的正向、斜向挤压产生的压扭性断层上隆,拉张断陷向挤压转换形成的隆起,及区域拉伸应力作用下重力活动引起的块体旋转等均可导致盆地局部出现反转构造。而造成上述观点认识存在差异及成果少的主要原因就是勘探程度存在不均一性,同时地层构造层的划分认识不一、断裂系统多样、岩浆活动强烈、构造运动复杂,造成对构造特征和构造演化的观点不尽相同。

本文利用最新的二维、三维地震和钻井资料等,通过对控制北部湾盆地发育的构造演化及形成机制进行深入分析,阐明各构造带发育的特点及成因机制。新提出了控制坳陷带边界断层为铲式拆离正断层及变质核杂岩的新认识;古近系“三明治”式地层充填,刚柔性岩石层状分布,受反转掀斜及后期应力

注:本文为国家科技重大专项(2016ZX05024-002-009)及(2016ZX05024-006)资助的成果。

收稿日期:2017-11-22;改回日期:2018-01-30;责任编辑:黄敏。

作者简介:李才,男,1981年生,高级工程师,从事南海北部盆地油气勘探研究工作。Email:licaic@cnoc.com.cn。

场旋转叠加,摩阻力变小,形成顺层剪切走滑构造。研究成果为本区高效油气勘探提供必要的技术储备。

1 区域地质背景

北部湾盆地位于欧亚板块、印度板块及太平洋板块汇聚中心的南海北部边缘(图 1),是新生代以来陆壳边缘上形成的断陷盆地(Xu Zhiqin et al., 2016; Yang Wencai et al., 2015; Gong Zaisheng., 2004; Xie Xinong et al., 2015; Chen Jianjun et al., 2015; Deng Jinfu et al., 2016; Hu Aiyu, 2016; Li Jianghai et al., 2015; Pei Jianxiang et al., 2016; Ren Jishun et al., 2016; Sun Yanyun et al., 2015; Tan Zhuo et al., 2015),其主体位于北部湾海域,北与粤桂隆起相接,东、南均与海南隆起区相邻,西与莺歌海盆地相接,总面积约 22000km²。北东向企西隆起、流沙凸起、徐闻凸起将北部湾盆地分割凹凸相间的格局。其中北部拗陷带受涠西南断裂控制,主要发育涠西南、海中等凹陷,南部拗陷带主要凹陷包括乌石、迈陈、福山、雷东等。北部湾盆地主要经历了古近纪的张裂和新近纪的裂后热沉降两大阶段,由以“先断后拗”为典型特征的两类原型盆地叠加而成。其构造演化格局控制并形成了区域内“先陆后海”的沉积充填序列特征,表现在古近纪断陷期北部湾盆地为陆相断陷湖盆,形成以滨浅湖为主要沉积背景、辫状河三角洲、扇三角洲、滩坝砂等沉积相广泛发育的沉积特征;进入新近纪以来,北部湾盆地整体发生热沉降,随着区域性海侵形成滨浅海沉积背景,形成了古近系多套物源复杂、相变快的区域及局部分布的储盖组合,以及新近系相对稳定发育的区域性储盖组合。

2 构造格局及演化

2.1 构造格架与拗陷边界断层的性质归属

北部湾盆地在构造上属于华南地块,为典型的大陆型地壳。中生代以前,华南块体主要为海相沉积,随着白垩纪以来南海扩张和局部受到红河走滑断裂拖曳的影响,挤压应力减弱,拉张应力增强,地壳减薄,北部湾盆地开始裂陷并发育多条 NE 或 NEE 向断层,形成坳垒相间的脊状断陷结构。1:50 万布格重力异常显示北部湾盆地两拗一隆(北部拗陷带、南部拗陷带和中部隆起带)的构造格局及各构造带次级单元凹凸相间的分布特征清楚,整体走向为 NEE 向。布格重力异常分区以异常值的幅

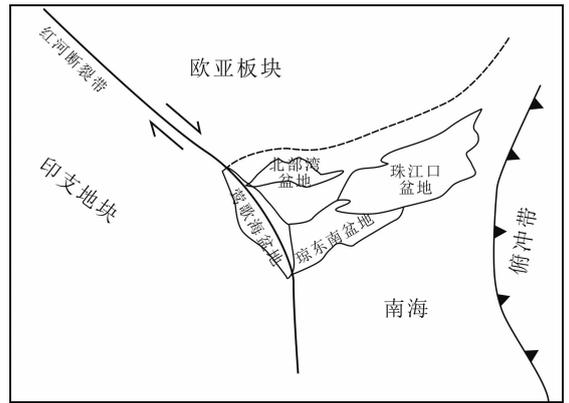


图 1 北部湾盆地地质位置简图

Fig. 1 Simplified geological map for the Beibu Gulf Basin

度大小及异常走向特征的差异为划分原则,南部拗陷主要受 NE 向企西隆起、流沙凸起、徐闻凸起控制,拗陷区布格重力异常值相对较高为 -37.5mGal,隆起区布格重力异常值相对较低,最低为 -12.5mGal,发育 NE 向、NEE 向及 NW 向几组重力异常边界,反映了现今基底控凹断裂带展布方向,重点包括控制涠西南凹陷的涠西南断裂、乌石凹陷的⑦号与⑥号二级断裂、迈陈凹陷的灯楼角断裂与⑨号断裂等。

涠西南断裂、灯楼角断裂和⑦号断裂分别为控制涠西南凹陷、迈陈凹陷和乌石凹陷东区南边界的控凹断裂,总体走向为 NE 向。剖面上,灯楼角断裂为典型的“脊状拗陷”伸展型边界正断层,表现为铲式与断阶式断裂伸入基底。⑦号断裂整体为一种低角度铲式正断裂,沿走向方向断面分段表现为铲式、犁式。在伸展性裂陷盆地内,本人认为,涠西南断裂、灯楼角断裂或⑦号断裂这种低角度铲式正断裂可能为大型的拆离断层。1980 年 Davis 将拆离断层应用于伸展构造,定义为“结晶变质基底杂岩与上覆沉积盖层之间的大型低角度正断层或伸展断层”,即分割变质核杂岩与上盘岩石的并将这两种构造层次相差很大的岩石单元叠置在一起的大规模低角度正断层。其中,变质核杂岩的特征就是孤立穹隆状地质体,由中下地壳中一高级古老变质岩及晚期的岩浆岩组成,其顶部为拆离断层。首先从发育位置看,本区主要为华南地块的裂陷型盆地,板内伸展区具备发育大型拆离断层的可能。从钻井揭示来看,北部湾盆地基底岩性比较复杂,既有中生界碎屑岩基底(白垩系红层沉积:紫红色泥岩、砂砾岩、安山玢岩)、上古生界石炭系灰岩基底,同时在中部隆起带(主要为企西隆起带)发现未变质的中生界花岗岩基

底,而在其周缘(包括企西隆起、濶西南凹陷南部、迈陈凹陷等)钻井发现变质程度不一的下古生界浅—中高级变质岩(图2),包括被拆离断层切割的含糜棱状岩石剪切带,出现脆性变形作用形成的碎裂岩、角砾岩、糜棱岩和片麻岩等。镜下薄片鉴定出糜棱化二长花岗岩中被糜棱岩化的硬矿物残斑及拖尾现

象发育,同时受区域动力变质作用可见长英质碎斑岩、碎裂花岗岩等碎斑或碎裂结构(图3)。纵向地震剖面显示,下部莫霍面抬升,地壳—地幔伸展减薄,伸展性断层非常发育,大型低角度正断层下盘出现一定的隆升,结合钻井认为其为变质核杂岩,而从基底以下地震剖面可见拆离断层相对比较清

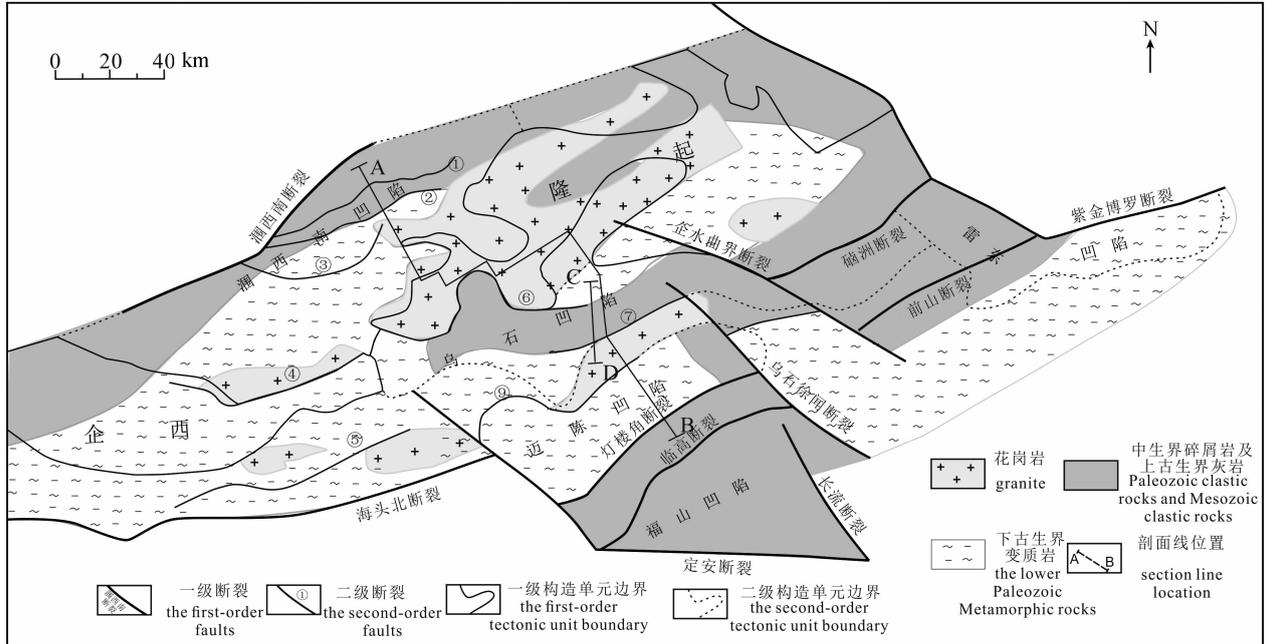


图2 北部湾盆地基底地质构造简图

Fig. 2 The geological foundation structure of Beibu Gulf Basin

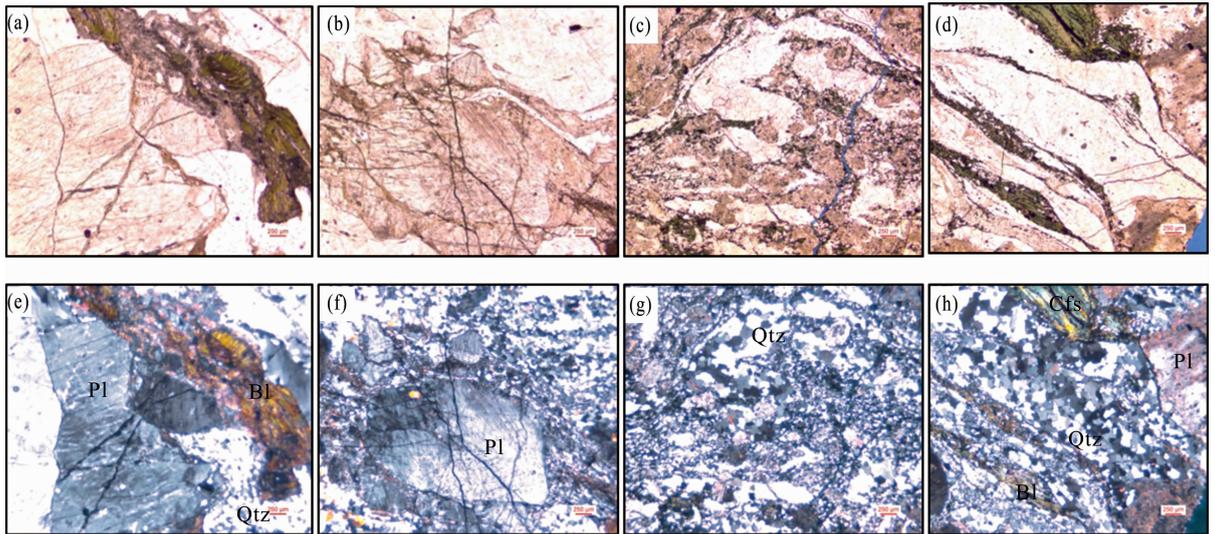


图3 拆离断层内岩石显微照片

Fig. 3 The photomicrographs of the rocks

(a, b, e, f)—碎裂花岗岩,普遍见有裂缝,发育在长石上,呈碎裂结构;(c, g)—糜棱化富石英花岗岩,粗糜棱结构,眼球纹理构造;(d, h)—糜棱化二长花岗岩,被糜棱岩化的硬矿物残斑及拖尾发育,变形条带及流动变形发育,见绿泥石条带。Qtz—石英,Pl—斜长石,Bl—云母,Cfs—绿泥石
 (a, b, e, f)—fractured granite, fractures in feldspars, fragmentation structure;(c, g)—mylonitized granite, coarse mylonitized structure, augen structure;(d, h)—mylonitized monzonitic granite, mineral residue and development of trailing, see the chlorite strip. Qtz—quartz; Pl—Plagioclase; Bl—mica; Cfs—chlorite

楚, 涠西南断裂、灯楼角断裂和⑦号断裂为其南部拆离断层的具有拆离性质的低角度铲式正断层。(图 4)

2.2 构造层划分与构造特征

北部湾盆地形成和发育主要经历了两大阶段, 即古近纪的张裂和新近纪的裂后热沉降阶段。纵向上以古近系顶面形成的区域角度不整合 T60 为界, 划分为两大构造层。下构造层为裂陷结构, 构造变形较强, 断裂发育且切割明显, 受伸展拆离及剪切应力共同控制, 发育多种构造样式, 典型构造包括: 伸展顺向调谐断裂带、断层掀斜反转构造带及顺层剪切走滑构造等。南部拗陷发育的伸展型拆离断层主要位于乌石凹陷北部及迈陈凹陷北部斜坡带, 平面上主要呈 NEE 向展布, 延伸长度 5~15km, 剖面上与边界控凹拆离正断层基本顺向分布; 断层掀斜反转构造带主要位于乌石凹陷东北部, 为一个继承性的构造隆升带, 整个古近系受基底持续性抬升, 地层发生反转, 另外反转区靠近注中可见地层上拱区, 横向平面断层呈“马尾”收敛状分布; 而对于乌石东区发育的韧性顺层剪切走滑构造样式, 它的特点不同于平面走滑主要以块体直立轴旋转的模式, 而是以块体绕水平轴转动的水平顺层剪切走滑, 走滑层为流二段韧性地层, 下部可见地层增厚、褶皱等构造现象(图 5)。上构造层为拗陷结构, 除少数边界断裂外, 盆地内绝大多数断裂包括控凹断裂均停止活动, 盆地内各凹陷相互连通形成一个统一盆地, 整体发生热沉降接受沉积, 构造变形较弱, 除局部受应力控制发育背斜型圈闭外, 总体为一个向盆地中心微斜的平缓向斜。

2.3 构造幕式沉降与充填演化

北部湾盆地主体属于欧亚板块, 具有典型的大陆边缘盆地的特征, 其形成与发展受印度板块、太平洋板块与欧亚板块的共同作用。根据前人研究成果, 其形成受控于两大因素: ① 白垩纪末至古近纪早期(65~35Ma)古南海盆地向南俯冲拖曳, 或者称南海盆地的向南扩张(Ru K et al., 1986), 导致南海盆地北缘边界生成新的深大断裂和北部边缘盆地早期的雏形(北部湾盆地此时受力张裂开始形成); ② 古近纪中后期(35~22Ma 或更早开始)印度板块向北持续挤入, 导致印支板块向南东方向旋转挤出, 位于印支板块北部边缘的红河断裂发生强烈的左旋滑动(Tong Yabo et al., 2014; Li Cai et al., 2014), 加剧北部湾盆地的发育和盆地内古近系发育的断裂系统复杂化。之后从古近纪末开始, 盆地整体下陷进

入海侵, 除部分边界断裂持续活动外, 其他断裂活动基本结束。这样形成了北部湾盆地早古近纪的裂陷以及晚古近纪与新近纪的裂后热沉降, 形成了盆地现今的双层构造格局。通过构造沉降史恢复表明, 北部湾盆地南部拗陷带沉降过程具有明显的差异性。下构造层裂陷期主要划分为三个演化阶段, 即裂陷初始阶段(65.5~55.8Ma)、裂陷扩张阶段(55.8~33.9Ma)、裂陷消亡阶段(33.9~23Ma); 上构造层主要为拗陷阶段(23 Ma 至今)(图 6)。

(1) 初始裂陷阶段(65.5~55.8Ma): 晚白垩世末—古新世长流组发育时期, 在 NWW 向区域拉张应力的作用下, 南部拗陷带控制迈陈凹陷和乌石凹陷的灯楼角断裂、⑨号断裂、⑦号断裂和⑥号断裂开始发育, 沉积充填了一套厚层的冲积扇—河流相地层。特别是分别控制两个凹陷西区北边界的⑥号和⑨号弧形断层, 活动能力更强, 沉积厚度更大。

(2) 裂陷扩张阶段(55.8~33.9Ma): 始新世早期珠琼运动 I 幕改变了南部拗陷的沉降格局, 拗陷继续发生张裂, 但整体区域性抬升, 导致沉降中心发生了迁移。特别是迈陈凹陷西区⑥号边界断裂北西向段的发育, 沉降中心由西区转向东区灯楼角断裂下降盘; 而⑦号断裂活动性增强, 控制了乌石凹陷的沉降中心。受到控凹边界断裂的持续性活动, 南部拗陷带经历了第一期快速沉降, 水体深度由浅到深再到浅的变化, 控制沉积了一套完整的“粗—细—粗”沉积旋回组合。早始新世流三段主要以滨浅湖~河流相沉积为主; 中始新世流二段时期, 控凹断裂活动性变最大, 特别是⑦号断裂活动性明显增强, 活动速率最大超过 500m/Ma, 水体变深, 沉积了厚层的中深湖相泥页岩地层, 为本区一套最重要的湖相烃源岩; 晚始新世流一段时期, 控凹断裂活动速率相对减弱, 主要沉积了流一段滨浅湖、三角洲相地层。

(3) 裂陷消亡阶段(33.9~23Ma): 始新世末—早渐新世发生的珠琼运动 II 幕, 是本区非常重要的构造运动。受到张应力方向旋转, 北西向左旋扭动应力持续增强, 凹陷沉降中心再次发生变化, 中心向西迁移, 控凹断裂活动速率达到 100~150m/Ma。该阶段不同于简单的裂陷, 由于受到应力场方向的旋转, 特别是晚渐新世晚期南海扩张, 本区的应力出现了 SSE-NS 向拉张应力及 NW 向左旋扭应力双重作用, 构造类型多样。乌石凹陷东区受到⑦号断裂的持续性拆离伸展—剪切应力控制, 基底隆起, 形

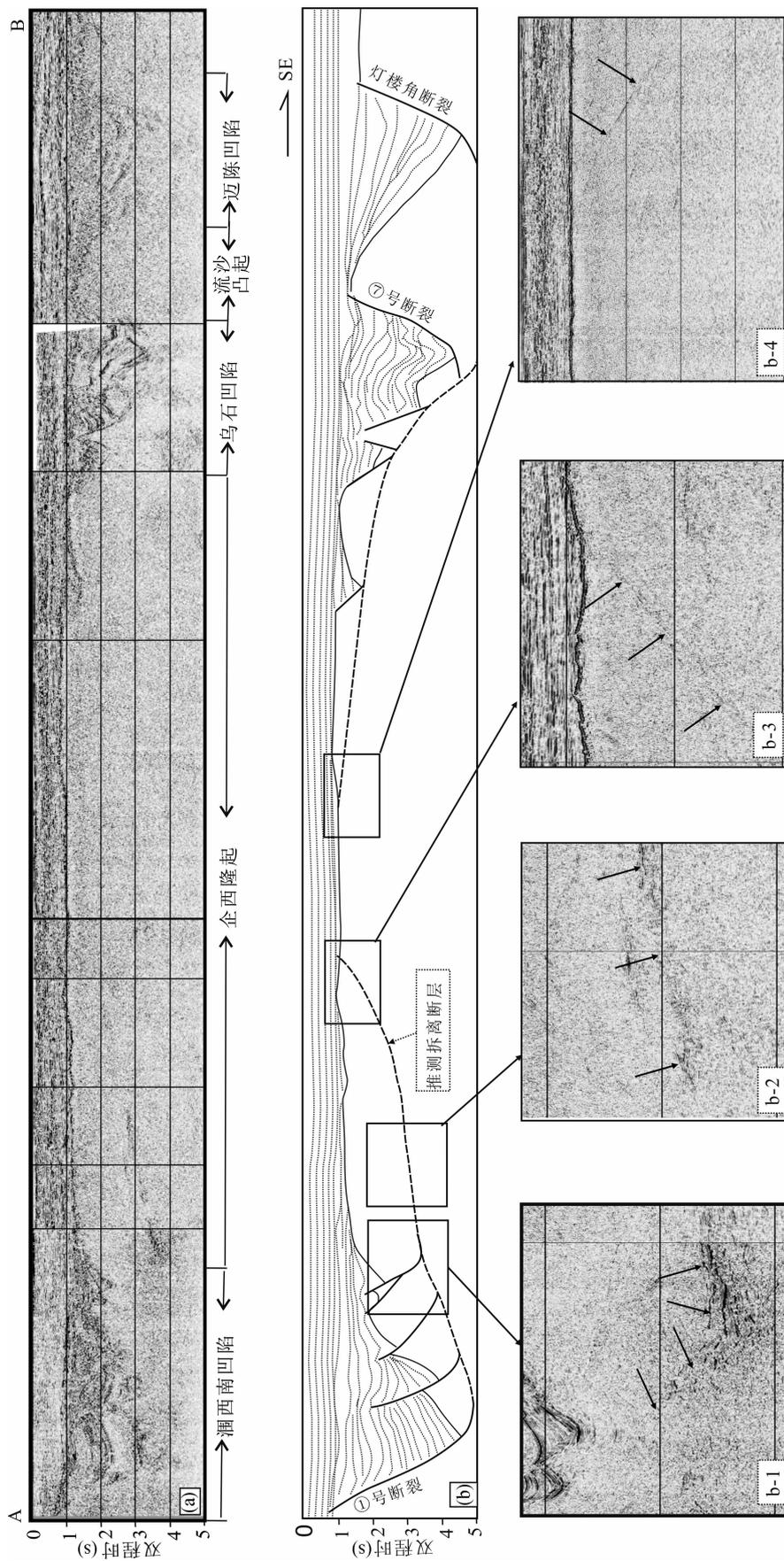


图4 北部湾盆地拆离断层系统
Fig.4 The detachment system of Beibu Gulf Basin

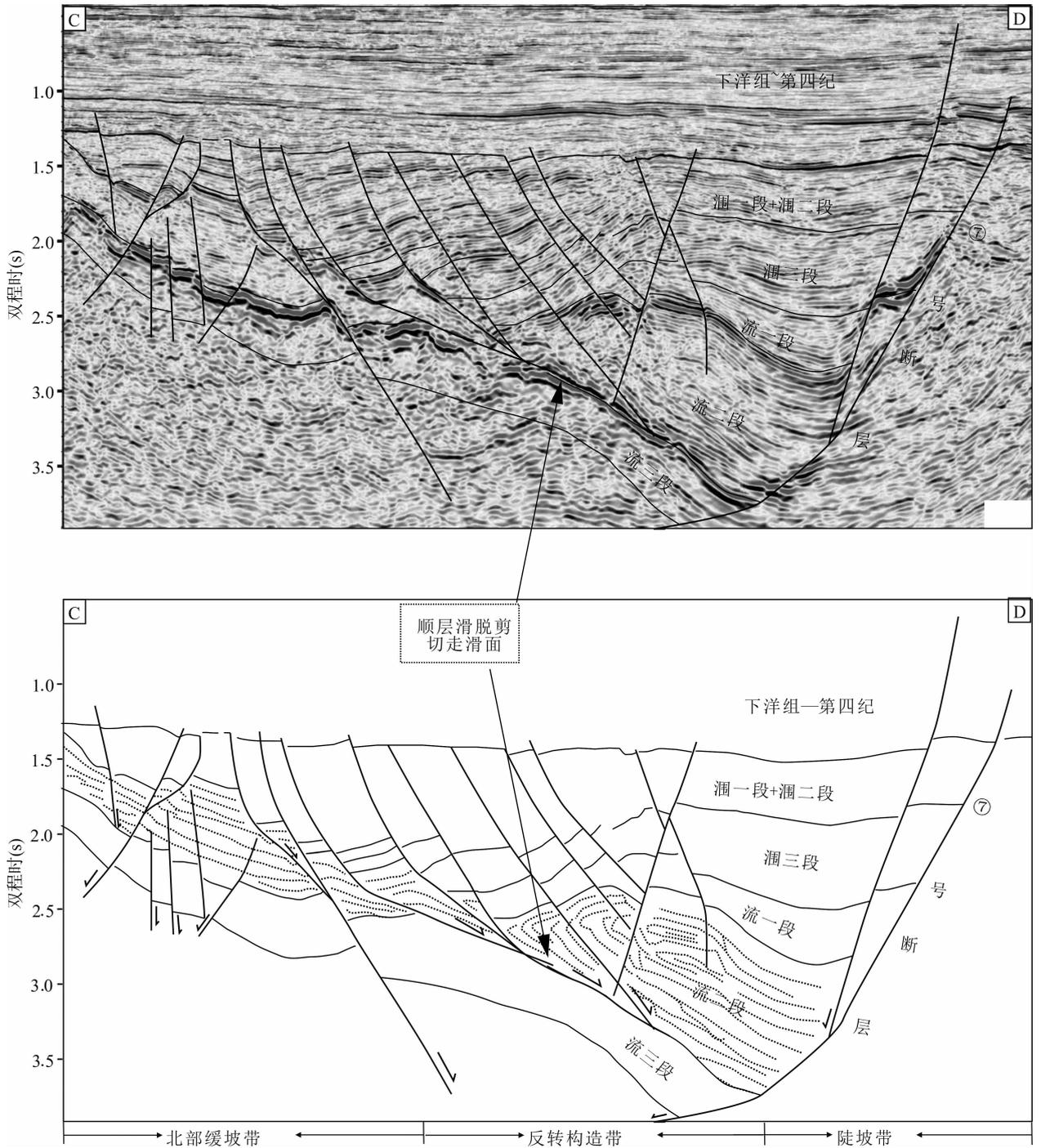


图 5 乌石凹陷反转构造带典型构造样式

Fig. 5 The specific tectonic inversion model of Wushi sag

成掀斜断层型构造、似花状构造、滚动背斜构造等,以及伴随着流沙港组湖相泥页岩与下伏地层存在的软弱面发生了韧性顺层滑脱剪切走滑,形成“a”型平卧褶皱等构造,造成流沙港组二段地层局部出现地壳缩短和堆叠增厚现象。

(4)拗陷阶段(23 Ma 至今):新近纪开始,除少数边界断裂外,盆地内绝大多数断裂包括控凹断裂均停止活动,盆地内各凹陷相互连通形成一个统一

盆地,整体发生热沉降接受沉积,构造变形较弱。

3 构造成因机制讨论

3.1 低角度拆离正断层成因动力学分析

涸西南断裂、灯楼角断裂和⑦号断裂为一种低角度铲式正断裂。在伸展性裂陷盆地内,发育的这种低角度铲式正断裂多为大型的拆离断层。该断裂带位于北部湾盆地,发育于欧亚板块,具有典型的大

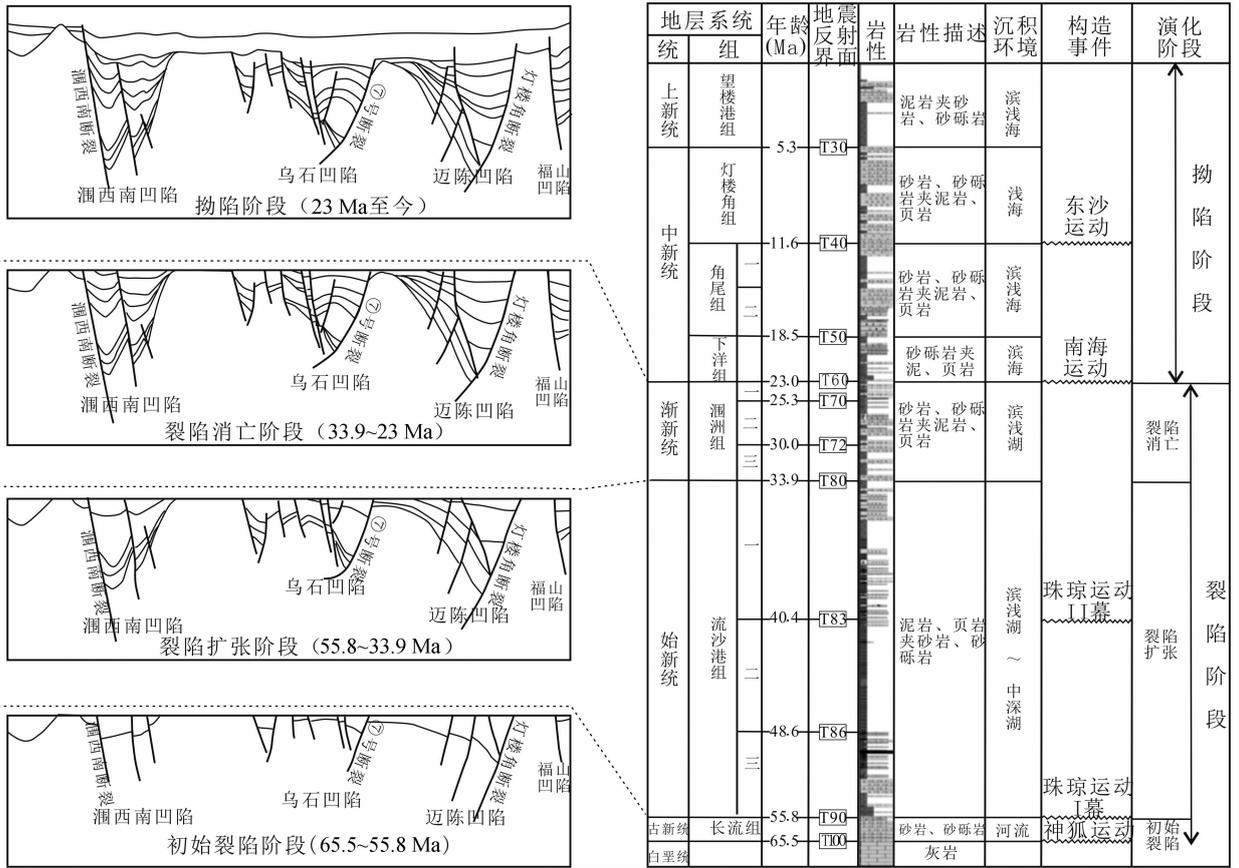


图6 北部湾盆地构造演化及综合柱状图

Fig. 6 Map of tectonic evolution and columnar section of Beibu Gulf Basin

陆边缘盆地的特征,其形成受印度板块、太平洋板块与欧亚板块的共同作用。在晚白垩世—早古新世,太平洋板块和印度板块分别以 NNW 和 NE 向欧亚板块俯冲,其汇聚速率分别达到 130mm/a 和 105mm/a,在此作用下,中国大陆边缘盆地整体处于左旋挤压应力场的作用之下,并发生了大规模的岩浆作用和强烈的构造运动;而到晚古新世—始新世,其汇聚速率有所变化,其中太平洋板块汇聚欧亚板块的速率变化较大,减弱为 75mm/a,而印度板块的俯冲速率却开始加快,达到 165mm/a,这样造成的结果就是华南板块大陆边缘由早期的挤压应力,变为拉张应力场环境(Zhang Jianpei, 2013),岩石圈在这种水平方向上拉伸或薄化作用下,地幔上涌,地壳发生张裂,地壳浅层次表现为正断层,裂陷盆地开始发育。特别是一级边界断层,在这种快速伸展应力的作用下,容易沿着地壳深部的韧性薄弱面发育,形成低角度的铲式拆离正断层。而以缓倾的拆离断层为接触界面,其上覆盖了第三系以来的未变质的沉积地层,其下为变质核杂岩,呈孤立的强烈变形的穹形或拱形变质岩和侵入岩隆起。

3.2 伸展型反转构造与韧性顺层剪切走滑的成因机制

南部拗陷乌石凹陷东区发育大型的反转构造带,多位学者对反转构造带的成因机制有些研究,但认识存在差异(Yang Haichang et al., 2011; Yuan Bing et al., 2012),其焦点集中到区域应力场的属性上,出现了伸展应力论和挤压应力论的不同观点。反转构造一直是构造地质学研究的重要课题,这里主要指变形作用的反转,如原来的构造低地发生了上隆。从目前研究的成果来看,引起构造反转的成因是多样的(Zhang Yuming et al., 2006),包括主压应力对断陷盆地的正向、斜向挤压产生的压扭性断层上隆,拉张断陷向挤压转换形成的隆起,及区域拉伸应力作用下重力活动引起的块体旋转等,均可导致盆地局部出现反转构造。从本区构造演化及拗陷发育的角度来看,板块相互作用引起的区域伸展应力是南部拗陷发生裂陷的主要动力来源,主应力方向的变化是构造延伸方向及后生构造的重要原因。乌石脊状凹陷反转构造带发育位置正好位于⑦号低角度拆离铲式正断裂的上盘,而低角度铲式正断层

最大的特点就是具有下凸断面,且断面产状向上变陡,而向下随深度变缓,主应力 σ 方向从上部的近乎90度垂直,到深部逐渐变缓。这类断层的特点表明,在铲式正断层早期伸展阶段,靠近断层的部位沉积地层相对较厚,后期由于伸展速度的加快,沉积加载地层的厚度无法形成拉伸引起的应力补偿,引起重力折弯下沉发生逆牵引,导致上盘岩石掀斜引起反转,造成了本区乌石凹陷东区局部出现反转构造。晚渐新世—早中新世,太平洋板块俯冲速度增大,汇聚速率略有增加(75~90 mm/a),而印度板块向欧亚板块汇聚挤压达到高峰,汇聚速率逐渐减小(50~90 mm/a)(Zhang Jianpei, 2013)印支地块挤出,叠加南海扩展,北部湾盆地应力场发生右旋,局部发生张扭上拱,加剧了乌石东区构造的反转。同时,该期构造活动使反转构造带引诱了顺层剪切走滑的发生。

顺层剪切走滑构造主要位于乌石凹陷反转构造带斜坡区。钻井揭示北部湾盆地古近系地层呈现一种“三明治”充填模式。长流组一流三段时期主要以冲积平原、滨浅湖、扇三角洲沉积为主,岩性主要为砂砾岩、含砾砂岩、粗砂岩等,以砂岩沉积为主;流二段时期由于湖盆的快速扩张,表现为大规模湖侵,中—深湖沉积为主,岩性主要为一套厚层暗色泥岩、页岩,钻井揭示页理非常发育,部分岩屑见片状。流一段湖盆开始萎缩,晚期为滨浅湖环境,以泥岩沉积为主,盆地边缘为三角洲、滩坝等;涠洲组整体上为滨浅湖沉积环境,主要以扇三角洲、辫状河三角洲、曲流河三角洲沉积为主,甚至可见冲积平原等陆上沉积物。形成了古近系岩性粗—细—粗的“三明治”沉积组合模式。这种模式的特点就是形成的刚柔性岩石地层呈层状分布,其界面处(刚柔界面、柔性界面内部)存在明显的物理力学差异性,特别是流二段沉积的泥页岩地层,页理非常发育,二维层状滑动面摩阻力非常小,受到构造应力的变化极易造成岩石的顺层剪切走滑。乌石凹陷东区地层的反转构造,地层发生掀斜,特别是南海扩张应力场右旋驱动力的叠加,斜坡区地层失衡,出现了断层在上部刚性地层断切,当断层深入中部柔性地层时由于顺层摩阻力较小,主剪切应力发生变化,断层开始沿层理面或柔性层与刚性接触面向低部位走滑,块体绕水平轴转动,形成顺层剪切走滑构造,造成区域性流二段地层缩短、堆叠增厚和褶皱等(图7)。而造成这类构造现象(顺层剪切走滑)的力学成因机制可以引用库仑·莫尔强度理论来解释(图8)。其原理是形成剪切的

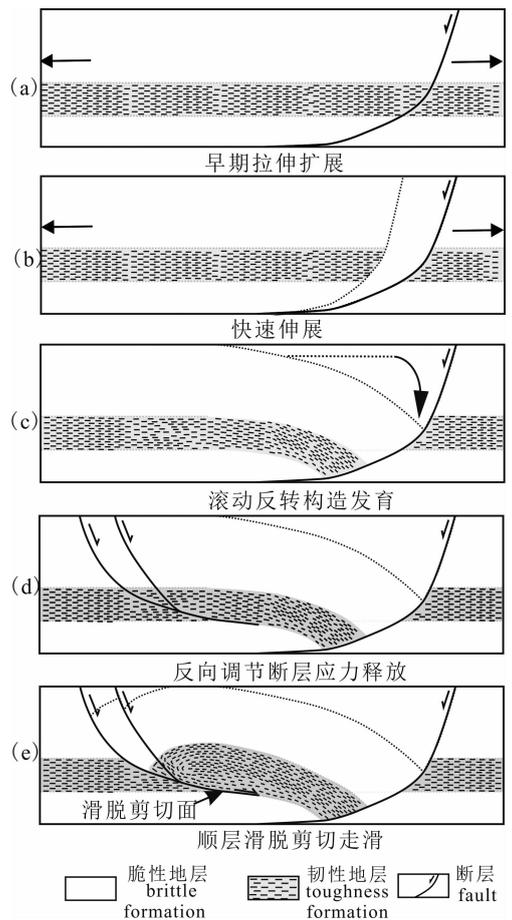


图7 顺层剪切走滑构造发育模式

Fig. 7 The bedding detachment shear structure pattern

破坏力 τ 的一部分用来克服与正应力无关的黏聚力 C ,使岩石颗粒间脱离联系;另一部分剪切破坏力用来克服与正应力成正比的摩擦力,使面内错动而最终破坏,其数学表达式为:

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \Phi \quad (1)$$

其中, τ 为剪切力(N); Φ 为内摩擦角($^{\circ}$),其中破坏方向角 $\theta = 45^{\circ} + \Phi/2$, $\operatorname{tg} \Phi$ 为内摩擦系数; C 为黏聚力(N)。

在相同正压力 σ 的情况下,剪切力 τ 与黏聚力 C 值、内摩擦系数 $\operatorname{tg} \Phi$ 成正比关系。其中,内摩擦角 Φ 与围压、岩石性质有关,不是一个常量,实验证明, Φ 随围压增大而减小,同时砂岩的内摩擦角要大于页岩(Wang Qingchen et al., 2004; Hubbert et al., 1959),这样刚性砂岩的内摩擦系数 $\operatorname{tg} \Phi$,要大于泥页岩;黏聚力 C 值与材料的抗剪能力有关,通常刚性均质砂岩的黏聚力要大于泥页岩、膏盐层。

以此分析表明,相同正压力 σ 下,刚性砂岩的抗剪力 τ 和破坏方向角 θ 均要大于泥页岩。因此在图7a中正常刚性砂岩地层断裂发育的临界剪切力

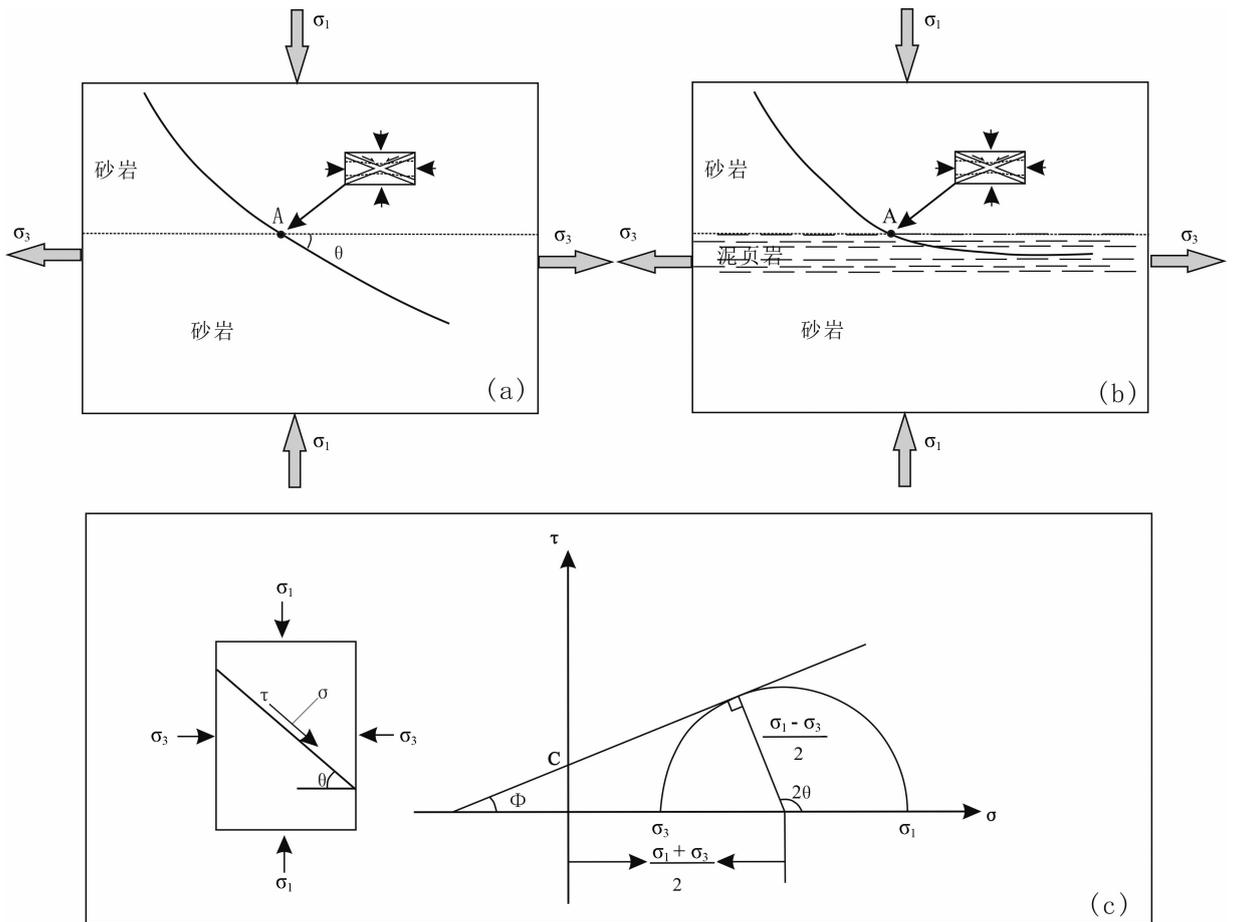


图 8 顺层滑脱剪切走滑力学成因机制分析

Fig. 8 The structure mechanics analysis on bedding detachment shear pattern

(a)—正常“刚性”砂岩地层断裂发育模式；(b)—“三明治”式地层断裂发育模式；(c)—库仑—纳维尔破坏准则

(a)—Development models of fault on sandstone formation; (b)—development models of fault on “sandwich” formation;

(c)—mohr-coulomb failure criteria

$\tau_{砂}$ 在 A 点破坏方向角为 $\theta_{砂}$ 的情况下，图 7b “三明治”式地层中同样为 A 点需要的剪切力 $\tau_{泥}$ 就小，破坏方向角 $\theta_{泥}$ 也小。这样断层在向下延伸的过程中，就形成了顺泥页岩层滑动剪切的现象，塑性泥页岩地层增厚，并受到断层的下滑形成褶皱等。

4 结论

(1) 北部湾盆地控凹边界断层涠西南断裂、灯楼角断裂和⑦号断裂为大型的具有拆离性质的低角度正断层。下盘穹隆状变质核杂岩由中下地壳中—高级变质岩，及晚期的岩浆岩（主要为花岗岩）组成。受拆离断层的影响，发育脆性变形作用，形成碎裂岩、角砾岩、糜棱岩和片麻岩等。

(2) 厘清了乌石凹陷东区发育的大型反转构造带成因机制。⑦号断层低角度拆离过程中，地层伸展，在应力补偿机制下，地层受到重力作用引起折弯

下沉，从而发生反转；另外印支地块的挤出，叠加南海扩展，局部地层张扭上拱，加剧了该区局部构造的反转。

(3) 古近系“三明治”式充填地层，形成的刚柔性岩石呈层状分布，其界面处（刚柔界面、柔性界面内部）存在明显的物理力学差异。乌石凹陷东区地层的反转掀斜及后期应力场旋转的叠加作用，导致地层失衡，流二段顺层摩阻力较小，断层沿层理面或柔性接触面向低部位走滑，块体绕水平轴转动，形成顺层剪切走滑构造，出现地层的缩短和堆叠增厚，局部出现褶皱。

References

Chen Jianjun, Ma Yanping, Chen Jianzhong, sun Guibin. 2015. Tectonic dynamics of northern continental margin basins in South China Sea. Earth Science Frontiers, 22(3): 38~47 (in Chinese with English abstract).

- Chen Wei, Liu Hongyu, Wu Feng, Hou Feng, Chen Changzheng, Ma Yueqin. 2013. Structural Evolution of Eastern Maichen Sag in Junggar Basin and Influence on Its Structural Styles. *Xinjiang Petroleum Geology*, 34(4): 402~404 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Zhao Guochun, Meng Fei, Xiong Long. 2016. The Intrusive Spatial Temporal Evolutional Framework in the Southeast China. *Geological Review*, 62(1): 3~16 (in Chinese with English abstract).
- Gong Zaisheng. 2004. Neotectonics and Petroleum Accumulation in Offshore Chinese Basins. *Earth Science Journal of China University of Geosciences*, 29(5): 513~517 (in Chinese with English abstract).
- Hu Aiyu. 2016. The tectonic and sedimentary characteristics of Maichen Sag and its control function to hydrocarbon accumulation. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 4(1): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Hu Aiyu, Chen Wei, Yu Wenquan, Tong Hengmao. 2015. Difference in fault development and its controlling on oil and gas accumulation in Maichen Sag, Beibuwan Basin. *Journal of Geomechanics*, 21(3): 318~329 (in Chinese with English abstract).
- He Wenyuan, Li Jianghai, Qian Xianglin, Guo Zhaojie. 2001. Mechanism of negative Inversion-Structuring In north Tarim Uplift. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 234~240 (in Chinese with English abstract).
- He Jiankun, Lu Huafu, Zhu Bin. 1999. The tectonic inversion and its geodynamic processes in Northern Daba mountains of Eastern Qinling Orogenic Belt. *Scientia Geologica Sinica*, 34(2): 139~153 (in Chinese with English abstract).
- Hubbert M K, Rubey W W. 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. *Geological Society of America Bulletin*, 70: 115~166 (in Chinese with English abstract).
- Li Cai, Zhu Jitian, You Li, Yang Jinhai, Xiang Liangcun, Zheng Rongfen. 2014. Studies on the characteristics of the fault belt in Changchang Sag and its implication for the oil and gas exploration. *Natural Gas Geoscience*, 25(3): 372~378 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianghai, Zhang Huatian, Li Honglin. 2015. The tectonic setting and evolution of Indian Ocean-Research progress of tectonic map of Indian Ocean. *Haiyang Xuebao*, 37(7): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Pei Jianxiang, Dong Guineng, Zhu Qi. 2016. Characteristics and petroleum geological significance of lacustrine forced regressive deposits in the 1st Member of Liushagang Formation in Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin. *Oil & Gas Geology*, 37(4): 520~527 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Zhao Lei, Xu Qinqin, Zhu Junbin. 2016. Global Tectonic Position and Geodynamic System of China. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2100~2108 (in Chinese with English abstract).
- Ru K, Pigoott J D. 1986. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea. *AAPG Bulletin*, 70: 1136~1155 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yanyun, Yang Wencai, Hou Zunze, Yu Changqing. 2015. Deformation Scratches and Crustal Structures in Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau. *Geological Review*, 61(2): 269~280 (in Chinese with English abstract).
- Tang Daqing, Chen Honghan, Jiang Tao, Zhang Hui, Qiu Yuchao, Chen Li. 2013. Neogene differential structural inversion and hydrocarbon accumulation in the Yitong Basin, East China. *Petroleum Exploration and Development*, 40(6): 682~691 (in Chinese with English abstract).
- Tan Zhuo, Liu Zhiguo, Li Yunzhen, Shen Ye. 2015. Forming Types and Evolution of Sand Body in Steep Slope Belt of Weixinan Sag, Beibu Gulf Basin. *Geological Survey and Research*, 38(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Tong Dianjun, Li Yazhe, Ren Jianye, Yang Huaizhong. 2010. Style and Formation Mechanism and Its Control on Hydrocarbon Accumulation of Linnan Depression. *Journal of Oil and Gas Technology*, 32(4): 31~36 (in Chinese with English abstract).
- Tong Yabo, Yang Zhenyu, Zhang Xu Dong, Zhang Xudong, Wu Zhonghai, Zhao Yue, Wang Heng, Xu Yingchao, Gao Liang, An Chunzhi. 2014. The Paleomagnetic Analysis about the Later Cenozoic Crustal Deformation Characteristics of the Chuandian Terrane Clock wise Rotation System in the Southeast Edge of Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 88(11): 2057~2070 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xinong, Ren Jianye, Wang zhenfeng, Li Xushen, Lei Chao. 2015. Difference of tectonic evolution of continental marginal basins South China Sea and relationship with SCS spreading. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 77~87 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Wang Qin, Li Zhonghai, Li Huaqi, Cai Zhihui, Liang Fenghua, Dong Hanwen, Cao Hui, Chen Xijie, Huang Xuemeng, Wu Chan, Xu Cuiping. 2016. Indo-Asian Collision: Tectonic Transition from Compression to Strike Slip. *Acta Geologica Sinica*, 90(1): 1~23 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Bing. 2014. Structural Evolution and Deformation Mechanism of Maichen Sag in Beibu Gulf Basin, South China Sea. *Science Technology and Engineering*, 14(18): 199~203 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Bing, Lin Wenxue. 2012. Formation Mechanism of Central Structural Zone in Wushi sag, Beibuwan Basin. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 13(1): 138~140 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai, Yu Changqing. 2015. Tectonic Divisions of the Chinese Continental Lithosphere Based on Forming Tectonic Processes. *Geological Review*, 61(4): 709~716 (in Chinese with English abstract).

- Yang Haichang, Liang Jianshe, Hu Wangshui. 2011. Structural features and impacts on hydrocarbon accumulation in Wushi sag. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 33(3): 41~46 (in Chinese with English abstract).
- Wang Peng, Zhao Zhigang, Liu Yongjie, Li Jianhong, Xiao Lingli. 2011. Some Key Geological Issues on Oil and Gas Exploration in the Northern Deepwater Area of the South China Sea. *Offshore Oil*, 31(2): 13~19 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qingchen, Zhang Zhongpei, Lin Wei. 2004. The feature of Neogene deformation of Kuqa-Tianshan system. *Science in China: Series D*, 34(Supplement D): 45~55 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yitian, Li Jiliang. 1999. Fault-related Tectonics Of the Strike-Slip faulting. *Geological Science and Technology Information*, 18(3): 30~34 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guohua, Zhang Jianpei. 2015. A discussion on the tectonic inversion and its genetic mechanism in the East China Sea Shelf Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 260~270 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianpei. 2013. Fault system and its genetic mechanism in the Pinghu slope of the Xihu Sag in the East China Sea Shelf Basin. *Chinese Journal of Geology*, 48(1): 291~303 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuming, Zhang Qinglin, Wang Mingjun, Yang Muzhuang. 2006. The Reverse Structural Styles in the Shiwu Rift Depression, Songliao Basin, and Their Oil and Gas Exploration Significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(2): 151~156.
- ### 参 考 文 献
- 陈建军, 马艳萍, 陈建中, 孙贵宾. 2015. 南海北部陆缘盆地形成的构造动力学背景. *地学前缘*, 22(3): 38~47.
- 陈伟, 刘宏宇, 吴峰, 侯峰, 陈长征, 马月琴. 2013. 迈陈凹陷东部构造演化及其对构造样式的影响. *新疆石油地质*, 34(4): 402~404.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 刘翠, 肖庆辉, 苏尚国, 赵国春, 孟斐, 熊龙. 2016. 华南地区侵入岩时空演化框架. *地质论评*, 62(1): 3~16.
- 龚再升. 2004. 中国近海含油气盆地新构造运动与油气成藏. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(5): 513~517.
- 胡爱玉. 2016. 迈陈凹陷构造沉积特征及对油气成藏控制作用. *复杂油气藏*, 4(1): 1~6.
- 胡爱玉, 陈伟, 于雯泉, 童亨茂. 2015. 北部湾盆地迈陈凹陷断裂差异发育特征及对油气成藏控制作用. *地质力学学报*, 21(3): 318~329.
- 何文渊, 李江海, 钱祥麟, 郭召杰. 2001. 塔里木盆地北部隆起负反转构造成因机制探. *地质科学*, 36(2): 234~240.
- 何建坤, 卢华复, 朱斌. 1999. 东秦岭造山带南缘北大山构造反转及其动力学. *地质科学*, 34(2): 139~153.
- 李才, 朱继田, 尤丽, 杨金海, 向良寸, 郑榕芬. 2014. 琼东南盆地文昌凹陷断裂带特征及其油气藏勘探意义. *天然气地球科学*, 25(3): 372~378.
- 李江海, 张华添, 李洪林. 2015. 印度洋大地构造背景及其构造演化——印度洋底大地构造图研究进展. *海洋学报*, 37(7): 1~14.
- 裴健翔, 董贵能, 朱其. 2016. 北部湾盆地涠西南凹陷流一段强制湖退沉积体的特征及其油气地质意义. *石油与天然气地质*, 37(4): 520~527.
- 任纪舜, 赵磊, 徐芹芹, 朱俊宾. 2016. 中国的全球构造位置和地球动力系统. *地质学报*, 90(9): 2100~2108.
- 孙艳云, 杨文采, 侯遵泽, 于常青. 2015. 青藏高原原刻痕与地壳分层构造. *地质论评*, 61(2): 269~280.
- 唐大卿, 陈红汉, 江涛, 张辉, 邱玉超, 陈粟. 2013. 伊通盆地新近纪差异构造反转与油气成藏. *石油勘探与开发*, 40(6): 682~691.
- 谭卓, 刘志国, 李运振, 沈野. 2015. 北部湾盆地涠西南凹陷陡坡带砂体成因类型及其演化. *地质调查与研究*, 38(1): 1~9.
- 佟殿君, 李亚哲, 任建业, 怀怀忠. 2010. 临南洼陷构造样式、发育机制及其对油气成藏的控制. *石油天然气学报*, 32(4): 31~36.
- 全亚博, 杨振宇, 张旭东, 吴中海, 赵越, 王恒, 徐颖超, 高亮, 安纯志. 2014. 青藏高原东南缘晚新生代川滇地体旋扭构造体系地壳变形特征的古地磁学分析. *地质学报*, 88(11): 2057~2070.
- 解习农, 任建业, 王振峰, 李绪深, 雷超. 2015. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系. *地学前缘*, 22(1): 77~87.
- 许志琴, 王勤, 李忠海, 李化启, 蔡志慧, 梁风华, 董汉文, 曹汇, 陈希节, 黄学猛, 吴婵, 许翠萍. 2016. 印度—亚洲碰撞: 从挤压到走滑的构造转换. *地质学报*, 90(1): 1~23.
- 袁冰. 2014. 南海北部湾盆地迈陈凹陷构造演化与变形机制. *科学技术与工程*, 14(18): 199~203.
- 袁冰, 凌文学. 2012. 北部湾盆地乌石凹陷中央构造带形成机制. *内蒙古石油化工*, 13(1): 138~140.
- 杨文采, 于常青. 2015. 根据形成地质作用对中国大陆岩石圈作构造分区. *地质论评*, 61(4): 709~716.
- 杨海长, 梁建设, 胡望水. 2011. 乌石凹陷构造特征及其对油气成藏的影响. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 33(3): 41~46.
- 王鹏, 赵志刚, 柳永杰, 李建红, 肖伶俐. 2011. 迈陈凹陷构造特征与油气勘探方向. *海洋石油*, 31(2): 13~19.
- 王清晨, 张仲培, 林伟. 2004. 库车——天山山盆系统新近纪变形特征. *中国科学 D 辑地球科学*, 34(增刊 I): 45~55.
- 王义天, 李继亮. 1999. 走滑断层作用的相关构造. *地质科技情报*, 18(3): 30~34.
- 张国华, 张建培. 2015. 东海陆架盆地构造反转特征及成因机制探讨. *地学前缘*, 22(1): 260~270.
- 张建培. 2013. 东海西湖凹陷平湖斜坡带断裂系统特征及成因机制探讨. *地质科学*, 48(1): 291~303.
- 张玉明, 张青林, 王明君, 杨木壮. 2006. 松辽盆地十屋断陷反转构造样式及其油气勘探意义. *地球学报*, 27(2): 151~156.

On the Evolution Process of the Beibu Gulf Basin and Forming Mechanism of Local Structures

LI Cai, YANG Xibing, FAN Caiwei, HU Lin, DAI Long, ZHAO Shunlan
CNOOC LTD. Zhanjiang, Zhanjiang 524057, China

Abstract

In order to further understand the tectonic evolution and mechanism of the Beibu Gulf Basin, this study analyzes the process of tectonic evolution of the basin and the mechanism of typical structure development using 2D/3D seismic, drilling and Bouguer gravity anomaly data. The results show that (1) the basin is characterized by two depressions and one rise, i. e. north depression, south depression and middle rise. The faults controlling the boundary of depressions in the Beibu Gulf Basin are large low-angle normal faults, separating metamorphic core complexes in footwall from hanging wall rocks. The metamorphic core complexes in footwall consist of the middle- and high-grade ancient metamorphic rocks and the late magmatic rocks, such as kataclasite, breccia, mylonite and gneiss in mylonitic rock-bearing shear zones. (2) A large inverted structure in the eastern part of Ushi depression was formed due to spreading detachment of faulting, superimposed by late stress rotation of the low-angle normal faults. (3) A formation mechanism of “Sandwich strata filling” mode is proposed for formation of bedding shearing strike-slip structure. The “Sandwich”-mode flexible rocks occur as layers, which are subject to losing balance due to superposition effect of reversal tilting and late stress field rotation. Especially on the interfaces of the rigid or flexible rocks or within flexible interface exist distinct physical and mechanical difference, and the lower surface friction resistance of two-dimensional layered sliding surface can easily result in bedding shearing strike-slip.

Key words: Beibu gulf basin; metamorphic core complex zone; detachment; tectonic inversion; mechanism