

# 红河断裂活动对琼东南盆地环崖南凹陷 构造-沉积-成藏的影响

王真真,王世朝,李安琪,李明,李夏露,陈奎

中海石油(中国)有限公司湛江分公司

**摘要** 琼东南盆地西部环崖南凹陷的油气勘探亟需寻找接替领域。针对勘探研究中存在的3个地质问题,利用丰富的钻井和地震资料对红河断裂活动特征及其对环崖南凹陷构造-沉积-成藏的影响开展深入分析。认为红河断裂的走滑活动通过 $F_1$ 断层向琼东南盆地西部传递剪切应力,其演化与环崖南凹陷的构造-沉积作用具有良好的时空耦合关系,并控制了环崖南凹陷的油气运移。晚渐新世,红河断裂左行走滑活动,通过 $F_1$ 断层在琼东南盆地西部诱导产生EW向挤压应力和SN向拉张应力,加剧了盆地西部的南北向快速拉张裂陷,形成了崖北凹陷和崖南凹陷两个沉积中心。中中新世—晚中新世,红河断裂处于平静期,受区域右旋张扭应力控制及海南岛物源减少的影响,环崖南凹陷呈现局部隆升,碳酸盐台地发育,梅山组一段及黄流组二段大范围缺失。上新世至今,红河断裂右行走滑活动,通过 $F_1$ 断层在琼东南盆地西部诱导产生SN向挤压应力和EW向拉张应力,对盆地西部的拉张具有约束作用,并造成NEE、NE走向断层受挤压作用而处于封闭状态,NW走向断层受张扭应力作用而处于开启状态。上新世为盆地生排烃高峰期,NW走向断层可有效输导油气,而NEE、NE走向断层的油气输导能力较差,这合理解释了已钻构造的油气发现情况。环崖南凹陷下一步油气勘探应重点围绕NW走向断裂带展开。

**关键词** 红河断裂;断层活动;油气运移;崖南凹陷;琼东南盆地;南海

中图分类号:TE121.2 文献标识码:A

## 0 前言

琼东南盆地西部环崖南凹陷是盆地内最早开展油气勘探的区域之一。20世纪70年代在崖南凹陷西北部勘探发现的崖城13-1大型气田,为中国海域投产较早的大型海上气田。此后,在崖南凹陷周边开展了大量勘探工作,但收效甚微。随着崖城13-1气田进入生产末期,亟需在周边区域寻找新的气藏来实现油气生产接替。前人对环崖南凹陷地质与成藏条件进行了深入研究,对崖南凹陷构造演化、沉积演化、烃源条件、储盖组合及油气运聚条件等开展了大量工作,取得了一系列重要成果<sup>[1-9]</sup>,但这些成果认识未能助推油气勘探走出困境。

笔者综合分析区域构造-沉积响应特征及成藏要素,认为环崖南凹陷的油气勘探尚有3个方面的地质问题有待解决:①构造方面,琼东南盆地是以NE、NEE走向断层为主要控凹断层的沉积盆地,受

红河断裂影响,环崖南凹陷发育大量NW走向断层<sup>[10]</sup>,这使得构造更为复杂,但在以往的研究中,NW走向断层在区域构造格局和油气成藏中的作用被忽视了。②沉积方面,中中新世环崖南凹陷发育碳酸盐台地,台地范围向北延伸至崖北凹陷西部以及莺歌海盆地东北部,发育范围较大,这是盆地北部最大的碳酸盐沉积区,该时期的沉积演化机制尚没有开展研究。③成藏方面,环崖南凹陷依靠NE、NEE走向断层作为油气输导层的目标全部钻探失利,而依靠NW走向断层作为油气输导层的目标都有较好的油气发现,目前尚未对这种规律提出合理的理论解释。笔者认为开展红河断裂带的活动及其影响的研究可能是解决上述问题的关键。

在前人研究的基础上,本文进一步分析了红河断裂走滑活动对琼东南盆地不同演化阶段的断裂活动性特征、地层与沉积演化特征、油气成藏规律等3个方面的影响,论证了红河断裂走滑活动对环

收稿日期:2019-12-15;改回日期:2020-06-18;网络出版日期:2021-02-03

本文受国家科技重大专项课题“莺琼盆地高温高压天然气富集规律与勘探开发关键技术”(编号:2016ZX05024-005)资助

**第一作者:**王真真,工程师,2014年获中国科学院大学硕士学位,主要从事石油天然气地质综合研究工作。通信地址:524057广东省湛江市坡头区南油二区中海石油(中国)有限公司湛江分公司;E-mail:wangzhz19@cnooc.com.cn

崖南凹陷构造-沉积作用的影响以及对成藏条件的意义,较合理地解释了目前勘探研究中存在的3个问题,为下一步勘探指明了方向。

## 1 区域地质概况

南海位于欧亚板块、印度板块、太平洋板块的交会地带,三大板块的耦合作用控制了南海的构造演化及南海北部陆缘盆地的构造格局、沉积响应及油气地质特征。琼东南盆地作为南海北部重要的

陆缘深水盆地(图1a),其新生代构造演化经历了断陷期、拗-断期、断-拗期和拗陷期等四个阶段<sup>[11]</sup>(表1),与青藏高原隆升、南海扩张、红河断裂走滑活动等构造事件具有重要耦合作用<sup>[12-19]</sup>,其中红河断裂走滑活动在盆地西部构造演化中的作用最为重要<sup>[20]</sup>。红河断裂带又称哀牢山-红河剪切带,是在印度板块与欧亚板块碰撞演化过程中形成的大型走滑断裂带,为华南陆块与印支地块的边界断裂<sup>[21-23]</sup>。

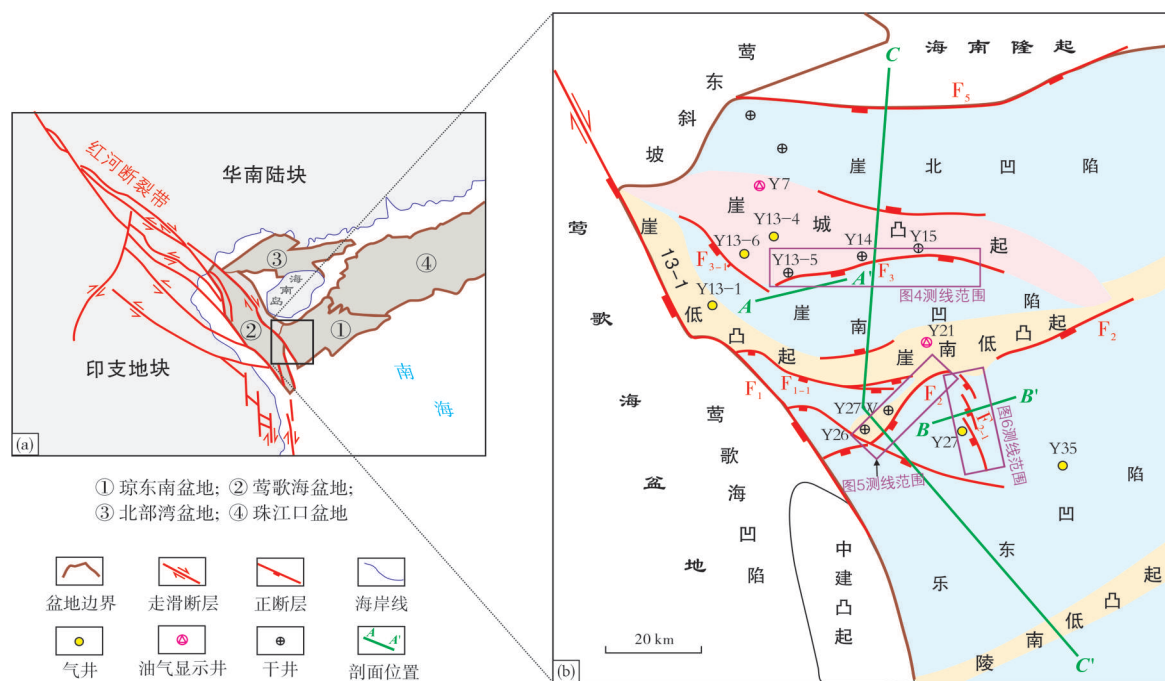


图1 红河断裂带区域位置(a)及琼东南盆地西部构造单元与主要断裂分布(b)

Fig. 1 Regional location of Red River fault zone (a) and tectonic units and fault distribution (b) in the west of Qiongdongnan Basin

表1 琼东南盆地构造-沉积演化表(据文献[11-19,24-27],有修改)

Table 1 Tectonic and sedimentary evolution of Qiongdongnan Basin (cited from reference [11-19,24-27])

地层			地质年龄/Ma	地震反射层	构造运动	构造事件	盆地构造-沉积响应	演化阶段
第四系					新构造运动二幕	区域右旋走滑,第四纪冰期	区域海退,滑塌沉积,陆坡峡谷	
新近系	上新统	莺歌海组	1.81	T20	新构造运动二幕	区域右旋走滑,第四纪冰期	区域海退,滑塌沉积,陆坡峡谷	拗陷期
			5.50	T30	新构造运动一幕	华南陆块挤出,红河断裂右旋走滑	加速热沉降,陆架—陆坡体系	
	中新统	黄流组			东沙运动/西沙运动	菲律宾海板块运动转向,区域右旋应力	红河及越南物源大量注入,中央峡谷轴向水道沉积	
		梅山组	11.6	T40	南沙运动	婆罗西地块与南巴拉望地块碰撞,南海扩张停止,开始向菲律宾板块俯冲	区域强制海退,大型海底扇沉积	
		三亚组	16.0	T50	南海运动	南海西北次海盆洋脊向西南次海盆跃迁,红河断裂左旋走滑逐渐停止	稳定沉降,三角洲—海底扇沉积	断-拗期
古近系	渐新统	陵水组	23.0	T60	珠琼运动二幕	青藏高原隆升,红河断裂快速左旋走滑	EW向断裂活动,逐渐由断陷向拗陷转变	拗-断期
		崖城组	28.4	T70	珠琼运动一幕	印支地块右旋挤出,红河断裂左行走滑逐渐加强,古南海俯冲,新南海开始扩张	区域断陷活动强烈,海侵,进入海相沉积	
	始新统	岭头组	33.9	T80	神狐运动	太平洋板块俯冲后撤,印度板块与欧亚板块碰撞	陆缘破裂,NE向断裂控制断陷湖盆发育	断陷期
			65.0	T100				

$F_1$  断层为红河走滑断裂在海域的延伸部分<sup>[28-31]</sup>, 构成琼东南盆地的西部边界(图 1b), 具有向琼东南盆地传递剪切应力的作用, 这使得琼东南盆地西部的构造-沉积特征与红河断裂走滑活动的时空耦合作用尤其明显。谢文彦等<sup>[10]</sup>、徐子英等<sup>[20]</sup>通过物理模拟方法开展琼东南盆地新生代发育机制的研究, 证实红河断裂活动在新生代盆地演化中扮演了重要角色, 主要表现为 3 个方面: 一是在盆地西部诱导产生 NW、NNW 向张断裂; 二是对盆地北部坳陷带的裂陷产生直接影响——受控于红河断裂左行走滑活动传递的剪切应力, 北部坳陷带的发育晚于中央坳陷带和南部坳陷带; 三是晚渐新世红河断裂左行走滑速率较快, 其诱导产生的走滑挤压直接导致盆地西部局部发育褶皱反转。

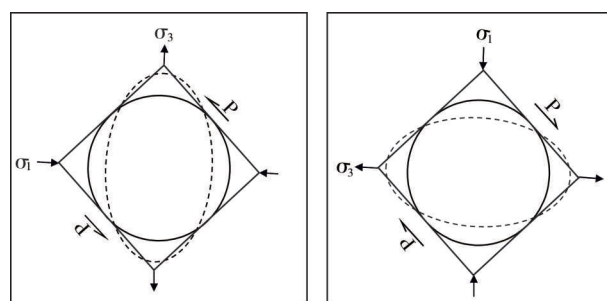
本次研究主要围绕琼东南盆地崖南凹陷周边的构造展开, 研究区简称为环崖南凹陷(图 1b)。崖南凹陷为由西部的  $F_1$  断层、北部的  $F_3$  断层及南部的  $F_2$  断层所夹持的三角形沉积凹陷, 其周边断裂近似平行于这 3 条主断裂分布。

## 2 琼东南盆地西部构造应力演化

对环崖南凹陷的断裂进行分级、分组, 将断裂分为三级: 一级断裂为控凹、控沉积断层, 有  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  等 3 条断层(图 1b); 二级断裂为凹陷内控沉积断层, 有  $F_{1-1}$ 、 $F_{2-1}$ 、 $F_{3-1}$  等断层; 三级断裂为调节断层, 基本不控制沉积, 本文不作研究。区内断裂按走向可

分为 NE、NEE、NW 等 3 组(图 1b), 分别与  $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_1$  断层近似平行。

对于  $F_1$  断层传导的剪切应力在琼东南盆地西部产生的应变, 将其简化为递进简单剪切变形。 $F_1$  断层的南段构造走向约为北偏西  $41^\circ$ , 假设地质历史时期  $F_1$  断层走向几乎未发生明显旋转, 则  $F_1$  诱导应力所产生的应力场的表达如图 2 所示:  $F_1$  断层传递左旋剪切应力时, 将产生近 EW 向(东偏南  $9^\circ$ )挤压应力和近 SN 向(北偏东  $9^\circ$ )拉张应力(图 2a); 反之,  $F_1$  断层传递右旋剪切应力时, 将产生近 EW 向拉张应力和近 SN 向挤压应力(图 2b)。



(a) 左行走滑

(b) 右行走滑

注:  $P$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为剪切应力、最大主应力、最小主应力。

图 2  $F_1$  断层传导的剪切应力所产生的递进简单剪切变形椭圆分析图

Fig. 2 Ellipse analysis of progressive simple shear deformation caused by strike slip stress of fault  $F_1$

应用应变圆方法分析  $F_1$  断层传递的剪切应力对环崖南凹陷应力场的影响。图 3 示意了研究区不同演化阶段应力场特征及主要断层的应力状态。

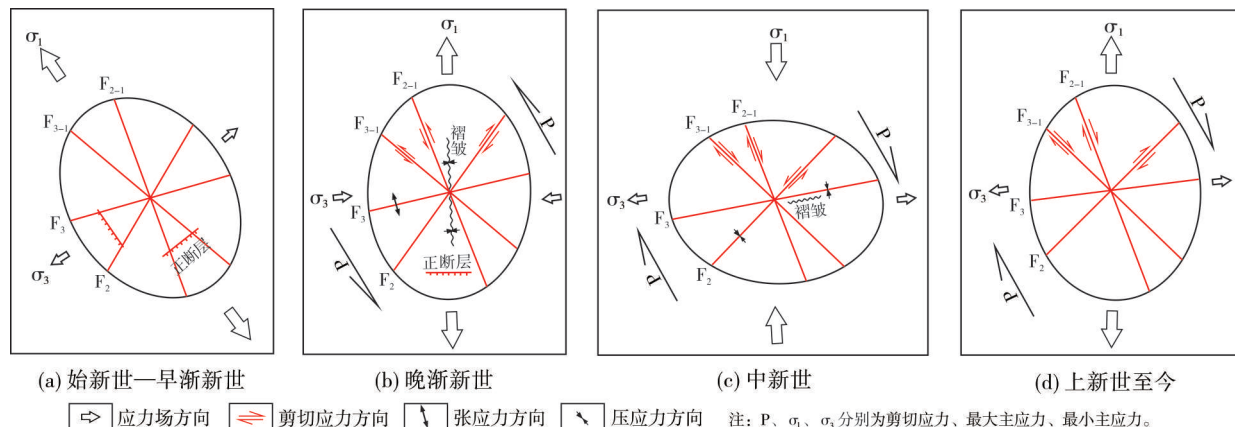


图 3 琼东南盆地西部构造应力场及主要断层应力演化图

Fig. 3 Tectonic stress field and stress evolution of main faults in the west of Qiongdongnan Basin

始新世—早渐新世 红河断裂缓慢左行平移, 走滑位移量较小, 推测该时期红河断裂向琼东南盆

地传递的剪切应力极为有限, 因此可假设琼东南盆地西部未受到红河断裂走滑活动影响, 而主要受



NW向区域拉张应力控制<sup>[12]</sup>。另外,受印支地块顺时针旋转挤出及莺歌海盆地拉张裂陷的影响,推测琼东南盆地西部同时受到NE向斜向拉张应力作用<sup>[10,15]</sup>(图3a)。在NW向最大主应力作用下,琼东南盆地西部主要发育NE走向正断层(如 $F_2$ )、NEE走向正断层(如 $F_3$ );受NE向拉张应力影响,同时产生两组NW走向正断层(如 $F_{2-1}$ 、 $F_{3-1}$ )。始新世—早渐新世基本形成了琼东南盆地西部的断裂格局。

晚渐新世 红河断裂快速左行走滑, $F_1$ 断层传递的左旋剪切应力诱导产生近SN向拉张应力和近EW向挤压应力(图3b),叠加到盆地西部近SN向的区域构造应力场。晚渐新世琼东南盆地西部最大主应力方向为SN向。

中新世 红河断裂左行走滑活动逐渐停止,但受邻区构造事件包括南海停止扩张并开始向东俯冲及菲律宾海板块仰冲与转向等影响,南海北部在南北向拉张应力下普遍受右旋剪切应力场影响<sup>[27]</sup>,故推测虽然红河断裂仍有缓慢左行走滑,但海域的断层包括 $F_1$ 断层、南部的越东断层等已经开始发生右行走滑,并诱导产生南北向挤压应力(图3c)。关于红河断裂与其海域延伸断层活动方向的不一致性,孙珍等<sup>[15]</sup>作过相关讨论,认为两者并不矛盾。

早中新世构造稳定,处于平衡沉降阶段;中中新世之后 $F_1$ 断层向琼东南盆地西部传递的右旋剪切应力加强,造成局部应力场表现为南北向挤压。

上新世至今 红河断裂右行走滑活动加强,但受盆地加速热沉降控制,盆地西部整体仍处于拉张应力场(图3d),其中不同走向的断层受到不同的应力作用可发生开启或者闭合。

### 3 红河断裂走滑活动对环崖南凹陷构造-沉积-成藏的影响

#### 3.1 断裂活动特点

##### 3.1.1 断层活动速率分析

在三维地震资料解释的基础上,选择环崖南凹陷三组不同走向(NEE、NE和NW)的重点断裂进行断层活动速率分析。

NEE走向断裂以 $F_3$ 断层为代表,为崖南凹陷控凹断裂(图1b)。断层活动速率分析显示(图4): $F_3$ 断层活动期主要集中在渐新世,以晚渐新世陵水组沉积期活动速率最大,其中陵水组一+二段沉积时期平均活动速率约为330 m/Ma,并呈现东西部活动速率差异较大的特征,中部、东部活动速率明显大于西部。

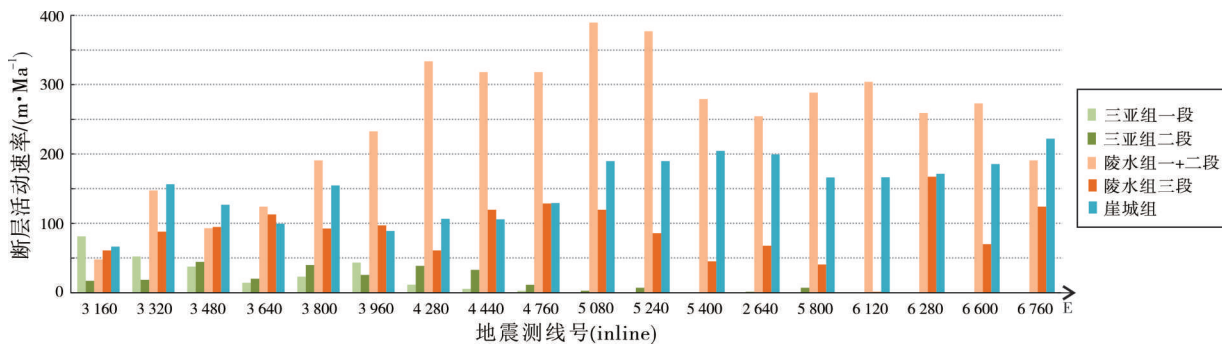


图4  $F_3$ 断层活动速率直方图(测线范围见图1)

Fig. 4 Histogram of fault activity rate of Fault  $F_3$  (line location is shown in Fig. 1)

NE走向断裂以 $F_2$ 断层为代表,为乐东凹陷控凹断裂(图1b)。受局部隆起分割, $F_2$ 断层分东西两段,本文主要研究 $F_2$ 断层西段。断层活动速率分析显示(图5): $F_2$ 断层主要活动期为崖城组沉积时期,平均活动速率约为350 m/Ma,陵水组沉积后活动速率较低。

NW走向断裂以 $F_1$ 断层为代表,为琼东南盆地西部边界断层(图1b)。 $F_1$ 断层北段为莺歌海凹陷与莺东斜坡的分界断层,主要控制莺歌海凹陷沉积; $F_1$ 断层南段为莺歌海盆地与琼东南盆地的分界

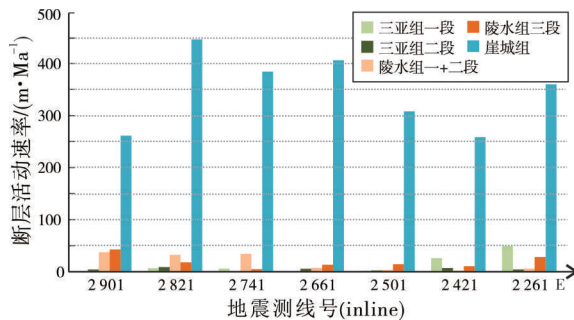


图5  $F_2$ 断层西段活动速率直方图(测线范围见图1)

Fig. 5 Histogram of fault activity rate of the west section of Fault  $F_2$  (line location is shown in Fig. 1)

断层,基本不控制沉积,推测以走滑活动为主,各时期走滑位移量难以确定,从断裂两侧错动特征分析, $F_1$ 断层现今呈现右行走滑特征。

NW走向断裂在 $F_1$ 断层附近发育较多。对其中的 $F_{3-1}$ 、 $F_{2-1}$ 断层活动速率的分析显示,其主要活动期

为崖城组沉积时期,平均活动速率分别为190 m/Ma、400 m/Ma。 $F_{2-1}$ 断层由3条分支断层左行雁列展布组成(图1b)。 $F_{2-1}$ 断层活动速率在崖城组三段沉积时期最大(图6b),陵水组沉积时期突然减小,约为30 m/Ma。

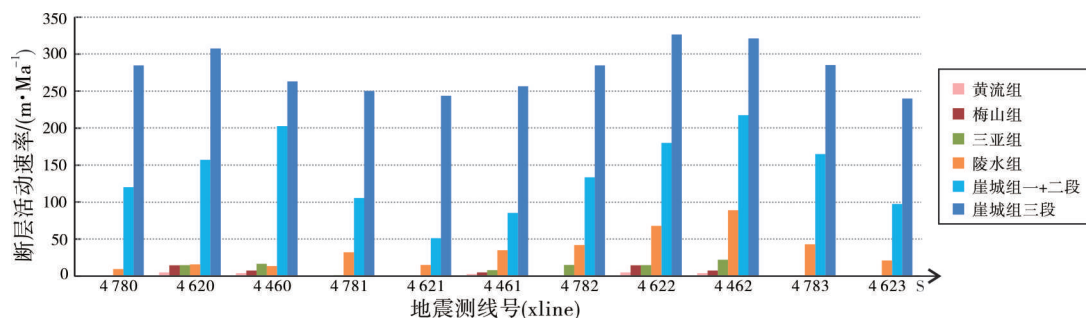


图6  $F_{2-1}$ 断层活动速率直方图(测线范围见图1)

Fig. 6 Histogram of fault activity rate of Fault  $F_{2-1}$  (line location is shown in Fig. 1)

环崖南凹陷断层活动速率具有明显的阶段性特征:早渐新世,以NE走向断层( $F_2$ )与NW走向断层( $F_{2-1}$ 、 $F_{3-1}$ )活动速率较高,以正断作用为主,控制崖城组沉积;晚渐新世,以近EW走向断层( $F_3$ 、 $F_5$ 等)活动速率最高,并派生一系列近EW向断层,控制陵水组沉积,而NE、NW走向断层活动速率均陡降,基本不控制沉积,推测以走滑活动为主,但走滑位移量较小而难以测量;中新世之后,盆地断陷作

用减弱,所有断层活动均逐渐停止。

### 3.1.2 褶皱特征

进一步分析研究区褶皱构造特征发现,琼东南盆地西部发育两组褶皱,分别位于 $F_3$ 断层下降盘西段(图7a)及 $F_{2-1}$ 断层两侧(图7b),褶皱主轴方向均为近SN向(略偏西),东西方向多个背斜和向斜相间分布,显示挤压应力为近EW向。

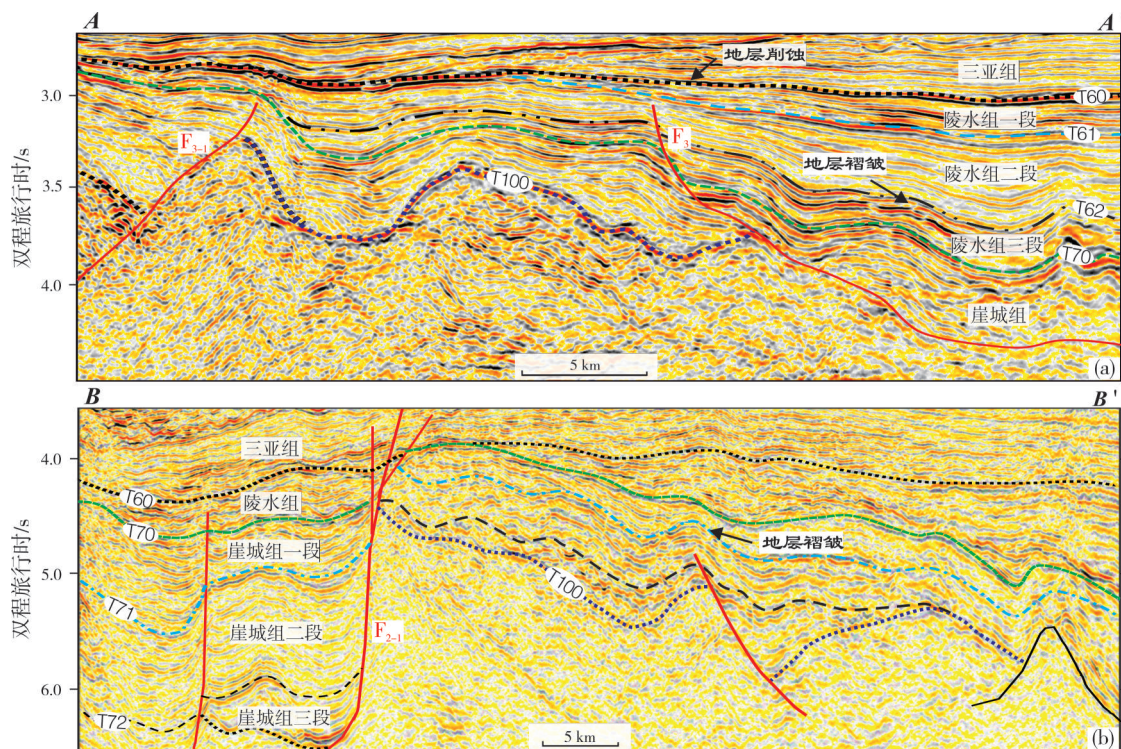


图7 过崖城组—陵水组褶皱的典型地震剖面(位置见图1)

Fig. 7 Seismic profiles showing folded strata of Yacheng Formation-Lingshui Formation (location is shown in Fig. 1)



褶皱地层主要为崖城组—陵水组二段,向斜内的陵水组厚度略大于背斜,分析认为这与褶皱形成时的同沉积作用有关;背斜两翼夹角向上逐渐增大直至背斜特征消失,推测背斜形成时间为晚渐新世,早期褶皱较强,晚期逐渐减弱。需要说明的是,这类褶皱特征在盆地内其他地区尚未发现,应为受东西向挤压应力而产生的局部构造。

### 3.1.3 综合分析

早渐新世环崖南凹陷以NW向拉张应力为主应力(图3a),同时受印支地块挤出和莺歌海盆地走滑拉分的影响,存在NE向拉张应力,推测这一时期红河断裂走滑活动的影响主要表现为在琼东南盆地西部诱导产生北西向断层<sup>[10]</sup>。该时期主要断裂以正断层为主,NE、NW走向断层均呈现较大的活动速率(图5,图6),而NEE走向断层呈现中等活动速率(图4)。该时期 $F_2$ 断层剧烈活动,北部物源供给充足,形成了盆地西部的乐东凹陷沉降—沉积中心。

晚渐新世红河断裂左行走滑活动(图3b)对研究区影响最大,不仅诱导产生EW向挤压应力,造成局部地层褶皱,而且诱导产生SN向拉张应力,加快了NEE走向断层的活动速率(图4)。在研究区以 $F_3$ 、 $F_5$ 两条NEE走向断层剧烈活动为特征,控制了陵水组沉积,形成了崖北凹陷和崖南凹陷两个沉降—沉积中心,造成盆地西部的加速裂陷,并在崖北凹

陷南部、崖南凹陷南部派生了大量近EW走向的次级断层。该时期NW走向断层(如 $F_{3-1}$ 、 $F_{2-1}$ )表现为同向走滑活动,NE走向断层(如 $F_2$ )表现为反向走滑活动(图3b),正断层活动速率均突然减小。

中新世之后,盆地以拗陷作用为主,断层活动速率均较低或停止活动,但从断层活动速率来看,NW走向断层持续活动时间较长,局部活动至黄流组沉积时期(图6)。

## 3.2 环崖南凹陷构造-沉积响应

通过单井相分析、连井地层对比及地震相分析,建立了琼东南盆地西部区域构造—沉积格架剖面(图8)。结合前述构造应力演化,对环崖南凹陷的构造—沉积演化特征与红河断裂走滑活动的关系进行综合研究。

渐新世,琼东南盆地西部沉积主要受控于断层活动,钻井证实沉积相以扇三角洲相及滨浅海相为主。早渐新世,受 $F_2$ 断层强烈活动控制,崖城组沉积中心位于乐东凹陷(图8),崖北凹陷西部和崖南凹陷沉积较薄,厚度横向变化不大。晚渐新世,受 $F_5$ 、 $F_3$ 断层活动控制,形成崖北凹陷、崖南凹陷两个陵水组沉积中心,由于同期沉积物向乐东凹陷搬运受限及 $F_2$ 断层活动较弱,乐东凹陷陵水组较薄。晚渐新世,红河断裂快速左行走滑(图3b),NEE走向断裂活动加剧,对环崖南凹陷的地层沉积产生了明显影响。

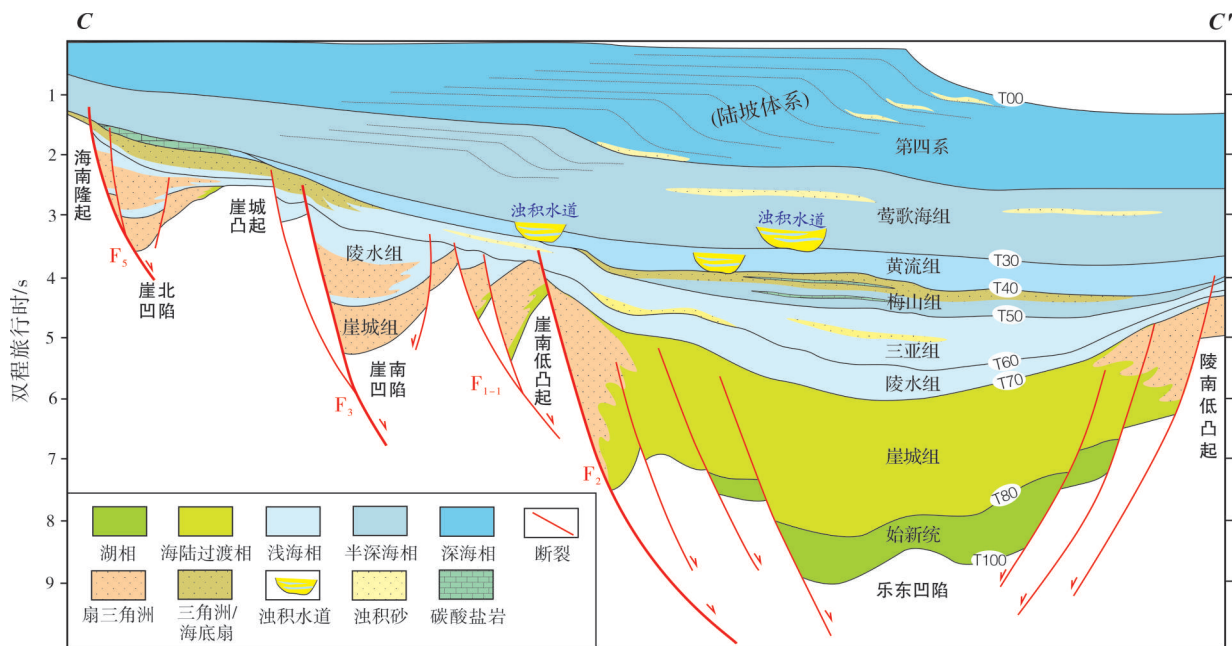


图8 琼东南盆地西部构造—沉积格架剖面(位置见图1)

Fig. 8 Stratigraphic-sedimentary framework section in the west of Qiongdongnan Basin (location is shown in Fig. 1)

早中新世,盆地以拗陷作用为主,局部断陷。同期红河断裂活动较弱,推测对琼东南盆地西部的影响较小。崖南凹陷往北靠近物源区,三亚组广泛发育三角洲沉积(图8),地层厚度横向变化较小,显示区域稳定沉降。

中一晚中新世,盆地西部局部短暂隆升,沉积作用受限。钻井及地震资料显示,环崖南凹陷大范围缺失梅山组一段和黄流组二段(图8)。这套地层缺失主要为沉积间断,局部高点存在剥蚀。研究区梅山组二段和黄流组一段局部发育,岩性以泥岩、粉砂岩、灰质泥岩、灰质砂岩夹石灰岩、生物碎屑灰岩为主,属于碳酸盐台地相混合沉积。中中新统梅山组碳酸盐台地主要沉积范围为崖城凸起及以北地区,包括崖北凹陷西部以及莺歌海盆地东北部,钻井揭示的石灰岩和灰质岩类发育区面积达4 600 km<sup>2</sup>。对于盆地西部中新统的这套地层缺失以及梅山组碳酸盐台地的发育,存在不同角度的解释:①中一晚中新世红河断裂活动处于平静期,矿物同位素测年研究显示,该时期随着印度板块的北移和红河断裂的旋转,内切旋转圆与红河断裂的切点逐渐北移,红河断裂带原处于压扭状态的部分开始发生自南向北的冷却抬升<sup>[32-33]</sup>,这种变化可能对琼东南盆地西部产生影响,造成局部短暂隆升。②该时期南海扩张停止,并开始向马尼拉海沟俯冲,同期菲律宾海板块发生向西北方向的仰冲,造成南海北部处于右旋张扭应力状态,这也可能造成海域断层(如F<sub>1</sub>等大型断层)的右行走滑,并在琼东南盆地西部诱导产生挤压应力,这需要进一步研究证实。③受青藏高原快速隆升影响,亚洲东部物源发生了较大改变,以青藏高原为发源地的西物源体系开始形成,重矿物、古水

流研究均已证实,中中新世琼东南盆地西部沉积体系开始混入越南崑崙隆起的物源,晚中新世红河已搬运沉积物至琼东南盆地中央峡谷沉积<sup>[34]</sup>,因此海南岛物源的减少,可能是盆地西北部中新统部分地层缺失、发育碳酸盐沉积的重要原因。

上新世一现今,琼东南盆地加速热沉降,区域拉张应力显著增强,红河断裂右行走滑诱导产生的SN向挤压应力的影响较小。新近系盆地东区构造沉降速率明显大于盆地西区<sup>[35]</sup>,推测红河断裂活动可能对盆地西区拉张沉降具有一定约束作用。上新世之后地层快速沉积,莺歌海组一第四系发育典型陆架-陆坡体系<sup>[36-39]</sup>(图8)。

3.3 NW走向断裂控制油气运移

环崖南凹陷纵向发育古近系和新近系两套储盖组合。目前在古近系发现崖城13-1气田,在新近系发现崖城13-4气田和崖城27气藏,勘探成效较好。但近年来钻探连连失利,勘探形势严峻,因此很有必要从基础研究和关键成藏要素上解决勘探面临的问题。

研究区勘探程度较高,目前已有探井超过30口,钻探构造近20个。笔者对几个重点构造的钻井油气发现情况作了统计分析(表2)。研究区大型构造圈闭发育,储层物性较好,储盖组合条件优越,多数目标钻探失利的原因主要是缺乏油气运移条件,因此,油气运移成为油气成藏的关键要素。考虑到已钻目标主要依靠断层垂向沟通烃源,因此油气通过断层的运移能力对圈闭能否成藏起主要控制作用。如表2所示,依靠NEE、NE走向断层作为油气输导层的目标均钻探失利,而依靠NW走向断层作

表2 琼东南盆地环崖南凹陷已钻构造油气地质条件与钻探成效  
Table 2 Petroleum geological conditions and drilling results of drilled structures around Ya'nan Sag in Qiongdongnan Basin

井名	主要目的层	储层类型	圈闭类型	油气运移条件			油气显示	结论
				垂向输导层	侧向输导层	通源断层走向		
Y13-5井	陵水组	扇三角洲砂岩	断鼻	F <sub>3</sub> 断层		NEE	无	断层油气 输导能力较差
Y14井	陵水组	扇三角洲砂岩	断鼻	F <sub>3</sub> 断层		NEE	无	
Y15井	陵水组	扇三角洲砂岩	断鼻	F <sub>3</sub> 断层		NEE	薄层气测异常	
Y26井	三亚组	浊积扇砂岩	岩性	F <sub>2</sub> 断层		NE	无	
Y27W井	黄流组	浊积水道砂岩	岩性	F <sub>2</sub> 断层		NE	气测异常,亚生物气	断层为油气 有效运移通道
Y13-4井	三亚组	三角洲砂岩	背斜	F <sub>3-1</sub> 断层	砂体	NW	高熟气藏	
Y13-6井	三亚组	三角洲砂岩	断鼻	F <sub>3-1</sub> 断层	砂体	NW	高熟气藏	
Y27井	黄流组	浊积水道砂岩	岩性	F <sub>2-1</sub> 断层		NW	高熟气藏	

注:亚生物气,指浅部地层生物成因气;高熟气藏,指烃源岩成熟度达到高成熟生成的热成因气,与深部油气运移成藏有关。

为油气输导层的目标均有较好油气发现。

包裹体及盆地模拟研究显示<sup>[4,9]</sup>,琼东南盆地西区生排烃高峰期为晚中新世—上新世。上新世红河断裂右行走滑,诱导产生SN向的挤压应力,可能造成NEE走向断层主要受挤压应力、NE走向断层主要受压扭应力而处于封闭状态,NW走向断层则受张扭应力而处于开启状态。这能够较好地解释表2的统计结果:晚中新世—上新世NEE、NE走向断层的油气输导能力较差,而NW走向断层为有效运移通道。

总而言之,琼东南盆地西部发育渐新统和中新统两套储盖组合,烃源岩规模发育,为重要的油气勘探区,下一步深入挖潜应密切关注油气运移这个关键成藏要素,勘探活动应重点围绕NW走向断裂带开展。如果在NE、NEE走向构造带进行勘探研究,应注意分析其应力状态,判断断层是否具备油气输导能力。

## 4 结 论

红河断裂走滑活动对琼东南盆地西部环崖南凹陷的构造—沉积—成藏具有重要的影响:

(1)晚渐新世,红河断裂快速左行走滑活动,通过 $F_1$ 断层向琼东南盆地西部传递剪切应力,诱导产生EW向挤压应力和SN向拉张应力,造成环崖南凹陷NEE走向断层剧烈活动并诱发产生大量NEE走向的二级断裂,加速了盆地西部的拉张裂陷,形成崖南凹陷和崖北凹陷两个沉积中心。

(2)中新世,红河断裂左行走滑活动逐渐停止,受区域右旋张扭应力控制及海南岛物源减少的影响,环崖南凹陷梅山组一段和黄流组二段大范围缺失,梅山组二段广泛发育碳酸盐台地。

(3)上新世至今,红河断裂右行走滑活动,通过 $F_1$ 断层在琼东南盆地西部诱导产生近EW向拉张应力与近SN向挤压应力,一方面对盆地西部的沉降有约束作用,另一方面对环崖南凹陷的断裂封闭性产生影响,造成NEE、NE走向断层受挤压应力而封闭,NW走向断层受张扭应力而开启。

(4)上新世为盆地生排烃高峰期,NW走向断层可作为油气有效运移通道。下一步油气勘探研究中应关注油气运移这个关键成藏条件,勘探活动应重点围绕NW走向断裂带开展。

### 参 考 文 献

- [1] 谢玉洪,童传新.崖城13-1气田天然气富集条件及成藏模式[J].天然气工业,2011,31(8): 1-5.
- [2] 孙嘉陵.南海崖城13-1气田特征及富集成藏条件[J].天然气工业,1994,14(2): 1-7.
- [3] 郝芳,邹华耀.油气成藏动力学及其研究进展[J].地学前缘,2000,7(3): 11-21.
- [4] 李绪深,肖贤明,黄保家,等.崖南凹陷烃源岩生烃及碳同位素动力学应用[J].天然气工业,2005,25(8): 9-11.
- [5] 李文浩,张枝焕,李友川,等.琼东南盆地古近系渐新统烃源岩地球化学特征及生烃潜力分析[J].天然气地球科学,2011,22(4): 700-708.
- [6] 李绪宣,刘宝明,赵俊青.琼东南盆地古近纪层序结构、充填样式及生烃潜力[J].中国海上油气,2007,19(4): 217-223.
- [7] 王根发,吴冲龙,周江羽,等.琼东南盆地第三系层序地层分析[J].石油实验地质,1998,20(2): 124-128.
- [8] 傅宁,于晓果.崖城13-1气田油气混合特征研究[J].石油勘探与开发,2000,27(1): 19-22.
- [9] 刘文超,叶加仁,雷闯,等.琼东南盆地乐东凹陷烃源岩热史及成熟史模拟[J].地质科技情报,2011,30(6): 110-115.
- [10] 谢文彦,张一伟,孙珍.琼东南盆地新生代发育机制的模拟研究[J].地学前缘,2008,15(2): 232-241.
- [11] 张迎朝,甘军,杨希冰,等.琼东南盆地陵水凹陷构造演化及其对深水大气田形成的控制作用[J].海洋地质前沿,2017,33(10): 22-31.
- [12] 李绪宣.琼东南盆地构造动力学演化及油气成藏研究[D].广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所),2004.
- [13] 袁玉松,杨树春,胡圣标,等.琼东南盆地构造沉降史及其主控因素[J].地球物理学报,2008,51(2): 376-383.
- [14] BRIAIS A, PATRIAT P, TAPPONNIER P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor 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.
- [15] 孙珍,钟志洪,周蒂,等.红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据[J].热带海洋学报,2003,22(2): 1-9.
- [16] 孙珍,周蒂,钟志洪,等.南海莺歌海盆地形成机制的物理模拟[J].热带海洋学报,2001,20(2): 35-40.
- [17] 李三忠,索艳慧,刘鑫,等.南海的基本构造特征与成因模型:问题与进展及论争[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(6): 35-53.
- [18] 任建业,雷超.莺歌海—琼东南盆地构造—地层格架及南海动力变形分区[J].地球物理学报,2011,54(12): 3303-3314.
- [19] 雷超.南海北部莺歌海—琼东南盆地新生代构造变形格局及其演化过程分析[D].武汉:中国地质大学,2012.
- [20] 徐子英,孙珍.琼东南盆地西南部反转构造发育机制物理模拟[J].海洋地质前沿,2015,31(8): 47-52.
- [21] 向宏发,万景林,韩竹军,等.红河断裂带大型右旋走滑运动发生时代的地质分析与FT测年[J].中国科学:D辑 地球科学,2006,36(11): 977-987.
- [22] 曹淑云,刘俊来,LEISS B,等.哀牢山—红河剪切带左行走滑作用起始时间约束:点苍山高温糜棱岩的显微构造与热年代学证据[J].地质学报,2009,83(10): 1388-1400.
- [23] 高红芳.南海西缘断裂带走滑特征及其形成机理初步研究[J].中国地质,2011,38(3): 537-543.
- [24] 吴海威,张连生,嵇少丞.红河—哀牢山断裂带:喜山期陆内大型左行左滑剪切带[J].地质科学,1989,8(1): 1-8.
- [25] TAPPONNIER P, LACASSIN R, LELOUP P H. The Ailao Shan-Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral



- shear between Indochina and South China[J]. *Nature*, 1990, 343: 431-437
- [26] LELOUP P H, LACASSIN R, TAPPONNIER P, et al. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1/4): 3-10.
- [27] 赵淑娟, 吴时国, 施和生, 等. 南海北部东沙运动的构造特征及动力学机制探讨[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(3): 1008-1019.
- [28] 鲁宝亮, 王万银, 张功成, 等. 红河断裂带海域延伸位置的地球物理证据及其与南海扩张的关系[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(5): 64-74.
- [29] 鲁宝亮, 王璞珺, 梁建设, 等. 古南海构造属性及其与特提斯和古太平洋构造域的关系[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(5): 1441-1450.
- [30] 刘宝明, 夏斌, 李绪宣, 等. 红河断裂带东南的延伸及其构造演化意义[J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 2006, 36(10): 914-924.
- [31] 万玲, 姚伯初. 红河断裂带入海后的延伸及其构造意义[J]. *南海地质研究*, 2000(12): 22-32.
- [32] HARRISON T M, CHEN Wenji, LELOUP P H, et al. An early Miocene transition in deformation regime within the Red River fault zone, Yunnan, and its significance for Indo-Asian tectonics[J]. *Journal of geophysical research: solid earth*, 1992, 97(B5): 7159-7182.
- [33] 陈文寄, 哈里森 T M, 洛弗拉 O M, 等. 哀牢山-红河走滑剪切带的热年代学研究: 多重扩散域模式的运用实例[J]. *地震地质*, 1992, 14(2): 121-128.
- [34] 姜涛, 解习农, 王振峰, 等. 南海西北部深水区中央峡谷体系沉积物来源与演化[C]// 中国科学技术协会. 第十七届中国科协年会论文集. 广州, 2015: 1-11.
- [35] ZHAO Zhongxian, SUN Zhen, WANG Zhenfeng, et al. The dynamic mechanism of post-rift accelerated subsidence in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Marine geophysical research*, 2013, 34(3/4): 295-308.
- [36] 吕明. 琼东南盆地沉积相展布及演化[C]// 中国矿物岩石地球化学学会, 中国地质学会, 中国石油学会. 第十届全国古地理学及沉积学学术会议论文集. 成都, 2008: 123-124.
- [37] 魏魁生, 崔早云, 叶淑芬, 等. 琼东南盆地高精度层序地层学研究[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2001, 26(1): 59-66.
- [38] 王海荣, 王英民, 邱燕, 等. 南海北部陆坡的地貌形态及其控制因素[J]. *海洋学报*, 2008, 30(2): 183-199.
- [39] 袁圣强. 南海北部陆坡区深水水道沉积体系研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2009.

编辑: 董庸

## Strike slip activity of Red River fault and its tectonic-sedimentary response and influence on hydrocarbon accumulation around Ya'nan Sag in the west of Qiongdongnan Basin

WANG Zhenzhen, WANG Shichao, LI Anqi, LI Ming, LI Xialu, CHEN Kui

**Abstract:** It is urgent to find replacement fields for oil and gas exploration around Ya'nan Sag in the west of Qiongdongnan Basin. In view of the three geological problems existing in the exploration and research, the characteristics of Red River fault activity and its influence on the structure-sedimentation and hydrocarbon accumulation around Ya'nan Sag are analyzed by using abundant drilling and seismic data. It is considered that the strike slip activity of Red River fault transfers shear stress to the west of Qiongdongnan Basin through Fault  $F_1$ , and its evolution has a good space-time coupling relationship with the structure-sedimentation around Ya'nan Sag, and controls the oil and gas migration around Ya'nan Sag. In Late Oligocene, the sinistral strike slip activity of Red River fault induced EW trending compressive stress and SN trending tensile stress in the west of Qiongdongnan Basin through Fault  $F_1$ , resulting in the intense activity of NEE trending strike slip faults and the formation of two sedimentary centers, Yabei Sag and Ya'nan Sag. During the Middle and Late Miocene, the Red River fault was inactive, and under the control of regional dextral tension and torsion stress and the decrease of sedimentary source in Hainan Island, carbonate platform developed at the local uplift around Ya'nan Sag, and the Meishan Formation and Huangliu Formation were absent in wide. Since Pliocene, the dextral strike slip activity of Red River fault has induced SN trending compressive stress and EW trending tensile stress in the west of Qiongdongnan Basin through Fault  $F_1$ , which has constrained the tension in the west of Qiongdongnan Basin and caused NEE and NE trending faults to be closed by compressive stress and NW trending faults to be open by tensile and torsional stress. The Pliocene is the peak period of hydrocarbon generation and expulsion in the basin. NW trending faults can effectively transport oil and gas, while NEE and NE trending faults have poor oil and gas transportation ability, which reasonably explains the oil and gas discovery in drilled structures. The next step of oil and gas exploration around Ya'nan Sag should focus on NW trending fault zones.

**Key words:** Red River fault; fault activity; oil and gas migration; Ya'nan Sag; Qiongdongnan Basin; South China Sea

**WANG Zhenzhen**, First author: MSc, Engineer, mainly engaged in comprehensive research on oil and gas geology. Add: Zhanjiang Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Potou District, Zhanjiang, Guangdong 524057, China