

## 琼东南盆地长昌凹陷中部 伸展-走滑复合断裂带及其油气勘探意义

李飞跃, 杨海长, 杨东升, 郭帅, 孙瑞, 纪沫, 赵钊

中海油研究总院有限责任公司

**摘要** 长昌凹陷位于琼东南盆地深水区东部,是重要的油气勘探潜力区。基于高精度三维地震资料,开展了长昌凹陷中部复杂断裂的精细解释。根据断裂发育位置、组合形态、构造样式,结合区域应力特点的综合分析,认为凹陷中部发育2条NWW向的伸展-走滑复合断裂带,其形成与演化过程可分为3个阶段:早渐新世,受NW—SE向区域拉张应力的作用,发育主干伸展断裂;晚渐新世早期,受南海西南次海盆海底扩张的影响,区域张应力发生顺时针旋转,由NW—SE向转变为SN向,开始产生右旋走滑作用,导致形成一系列次级断裂;晚渐新世晚期—早中新世,长昌凹陷内基底断裂持续活动,同时受凹陷北部、南部2个刚性隆起阻碍作用增强的影响,走滑作用更加强烈,产生了大量的负花状构造。北部断裂带具有右行左阶的走滑性质,断裂带内发育挤压应力环境,断裂封闭性较好,有利于油气聚集;南部断裂带具有右行右阶的走滑性质,断裂带内发育拉张应力环境,有利于油气运移。

**关键词** 走滑断裂; 伸展-走滑复合断裂; 构造演化; 油气成藏; 长昌凹陷; 琼东南盆地

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

琼东南盆地深水西区乐东—陵水凹陷近年来的勘探获得重大突破,相继发现了陵水17-2、陵水18-1等大中型气田,但东区松南—宝岛凹陷、长昌凹陷至今未有重大发现。2012年在长昌凹陷钻探的CX1井,虽然没有发现油气层,但揭示了渐新统崖城组烃源岩和陵水组储层<sup>[1]</sup>; 2017年钻探的WX1井,陵水组一段气测显示活跃,测井解释出8m的气层,这证实了长昌凹陷为生烃凹陷,应具有一定的资源潜力和良好的勘探前景。目前对长昌凹陷地质结构、构造特征、演化机制及勘探潜力的研究主要是区域性质的,而且主要是利用二维地震测线和重磁资料开展的<sup>[2-5]</sup>。于俊峰<sup>[6]</sup>对长昌凹陷小面积三维地震资料进行精细解释后认为:渐新世应力顺时针旋转,在不均匀拉张条件下形成了具有走滑性质的断裂体系。李才等<sup>[7]</sup>应用盆地动力学理论方法,对长昌凹陷的不同断裂体系进行了划分,认为中央坳陷中部断裂带具有右行走滑性质。然而对于长昌凹陷中部的2条NWW—SEE向断裂带的形成机制、形成时期还缺少系统研究。笔者利用高精度的三维地震资料

和近年来获得的地质资料,详细分析了长昌凹陷中部断裂带的形成机制、形成时期及其对成藏条件的影响,以期对研究区和类似条件地区的油气勘探提供指导和借鉴。

### 1 区域构造地质背景

琼东南盆地位于南海北部大陆边缘西北部,处于欧亚板块、太平洋板块和印度—澳大利亚板块的衔接部位,受到古太平洋构造域与古特提斯构造域的双重制约,是在前新生界基底之上发育的新生代陆缘拉张型含油气盆地,总体上呈NE—SW向展布,经历了神狐运动、南海运动和东沙运动等3次区域性构造运动,形成了多凸多凹的构造格局<sup>[8-9]</sup>(图1)。盆地海域面积约为 $9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中深水区(水深大于300 m)面积约为 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,最大沉积地层厚度近10 km<sup>[10-11]</sup>。长昌凹陷位于琼东南盆地东部,北邻神狐隆起,南邻南部隆起,西与松南—宝岛凹陷相邻(图1),总体呈NE向展布,面积约为 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,整体水深在1 000~3 000 m之间<sup>[1,4]</sup>。

收稿日期: 2018-07-17; 改回日期: 2019-04-13; 网络出版日期: 2020-04-15

本文受国家科技重大专项课题“南海深水油气资源潜力与大中型油气田勘探方向”(编号: 2016ZX05026-007)资助

**第一作者:** 李飞跃, 硕士, 工程师, 主要从事地震资料解释及综合性研究工作。通信地址: 100028 北京市朝阳区太阳宫南街六号院(中海油大厦)A座1104; E-mail: lify22@cnooc.com.cn

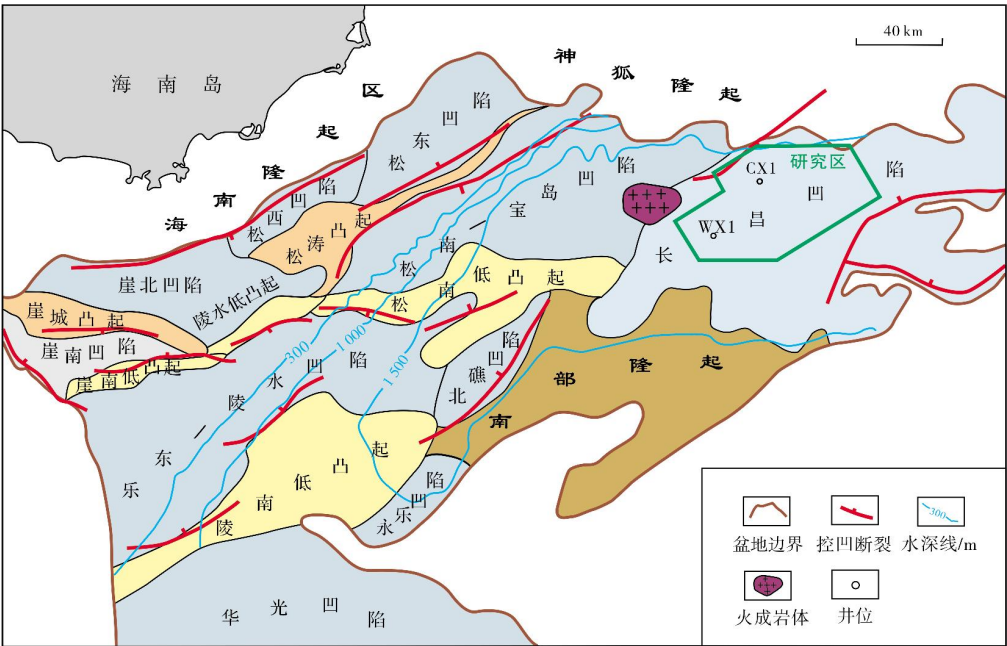


图 1 琼东南盆地构造区划及研究区位置  
Fig. 1 Tectonic division of Qiongdongnan Basin and study area location

长昌凹陷以新生代沉积为主,主要经历了古近纪裂陷阶段和新近纪裂后阶段2个构造演化期(表1),具有下断上坳的双层结构特征<sup>[5,12-13]</sup>,古近系最大厚度近7 000 m。凹陷内断陷构造层包括始新统(推测,尚未证实)、渐新统崖城组和陵水组;坳陷构造层包括中新统三亚组、梅山组、黄流组,以及上新统莺歌海组和第四系乐东组<sup>[14-15]</sup>。

表1 琼东南盆地长昌凹陷地层与构造演化  
Table 1 Strata and structural evolution of Changchang Sag, Qiongdongnan Basin

地 层				地震 反射层	构造 演化 阶段
界	系	统	组		
新 生 界	新 近 系	中 新 统	黄流组	T40	裂 后 阶 段
			梅山组	T50	
			三亚组	T60	
	古 近 系	渐 新 统	陵水组	T70	裂 陷 阶 段
			崖城组	T80	
		始 新 统 (?)		T100	

2 伸展-走滑复合断裂特征及成因

伸展-走滑复合断裂,是指地层早期受拉张作用形成正断裂,后期叠加并且受控于走滑作用,使得前期发育的伸展断裂受到不同程度的改造,同时也有复合应力作用下新生的断裂,从而形成的具有伸展和走滑双重性质的复合断裂系统。

2.1 伸展-走滑复合断裂带特征

从地震地质解释看(图2),长昌凹陷中部的断裂主要在晚渐新世至早中新世活动(T70—T50),总体呈现上陡下缓、阶梯状排列的特征;深层断距一般在200~800 ms之间,主走滑断裂“有根”,伴生的次级断裂依次断至主干走滑断裂面上,从而形成负花状构造,这是走滑最基本的构造特征之一<sup>[16]</sup>。区内自西北向东南,断裂的负花状特征逐渐明显。剖面上主干走滑断裂根部一般较缓,并不具备典型走滑断裂那种以近似直立的大角度断至基底、断面上缓下陡的特征,这与单一剪切应力主导形成的走滑断裂有明显区别<sup>[17]</sup>,推断是早期伸展断裂经后期走滑作用改造而成。

平面上,长昌凹陷中部NNW向断裂带主要发育雁列式、帚状2种样式(图3)。由T60反射层沿层干干



切片(图3a)及断裂平面分布(图3b)可见: NWW的次级断裂呈“入”字形锐角收敛于主干走滑断裂, 根据与主干断裂的夹角关系可以判断为右旋走滑; 次级

走滑断裂并未贯通, 而强烈走滑作用一般具有位移量大、次级断裂相互贯通等特征<sup>[18]</sup>, 这反映出研究区内的走滑作用较弱。

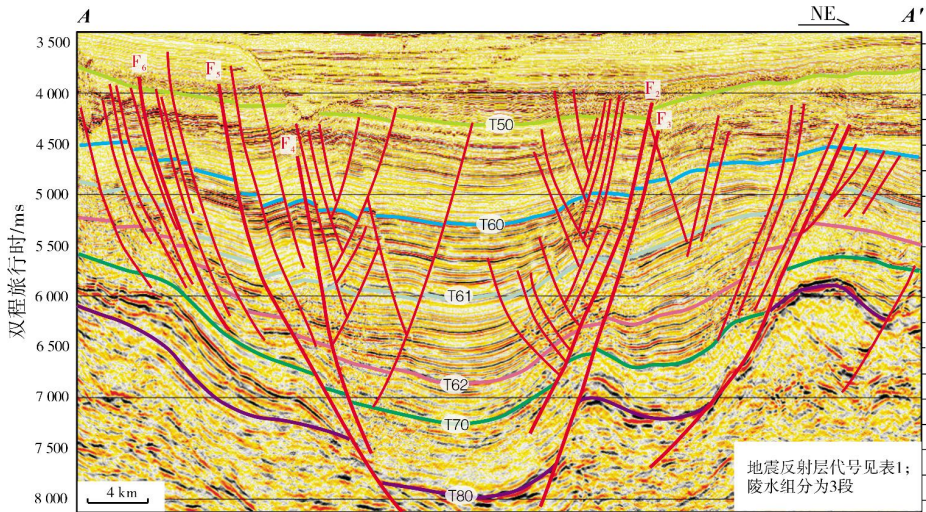


图2 琼东南盆地长昌凹陷中部断裂带地震地质解释(A—A'剖面位置见图3b)

Fig. 2 Seismic geological interpretation of the central fault belts in Changchang Sag, Qiongdongnan Basin (section location is shown in Fig. 3b)

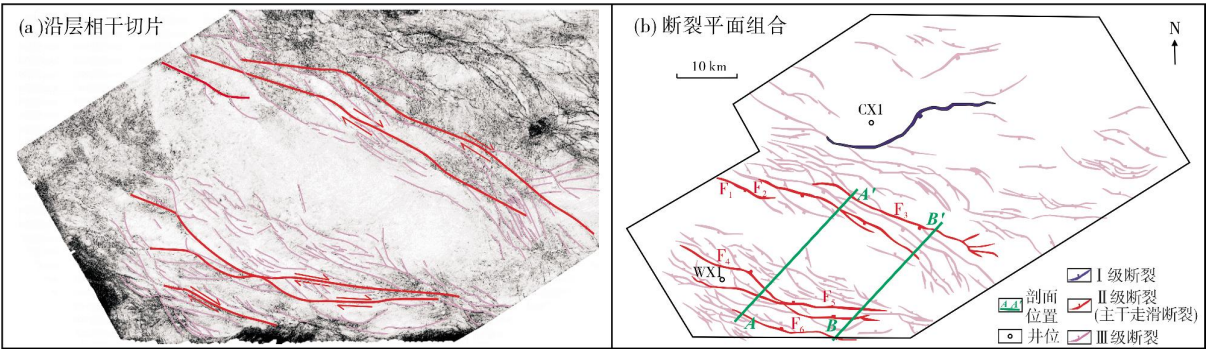


图3 琼东南盆地长昌凹陷中部沿层(T60)断裂分布

Fig. 3 Distribution of T60 faults in central Changchang Sag, Qiongdongnan Basin

长昌凹陷中部NWW向断裂带的空间展布特征, 按单纯的伸展断裂或走滑断裂模式均不能准确解释(图4), 其更符合在伸展断裂基础上叠加走滑作用而形成的伸展-走滑复合断裂模式<sup>[19-20]</sup>, 是拉张应力与

剪切应力在不同时期叠加的效应。整体上看, 断裂演化可以分为下部伸展、上部走滑2个发育阶段: 始新世—早渐新世发育伸展断裂, 晚渐新世—早中新世叠加并且受控于走滑作用。

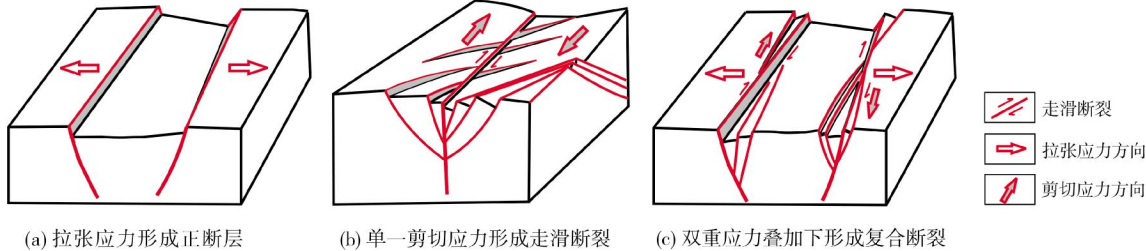


图4 伸展断裂、典型走滑断裂与伸展-走滑复合断裂模式图

Fig. 4 Model of extensional fault, typical strike-slip fault, and extension-strike-slip composite fault

## 2.2 伸展-走滑复合断裂成因机制

对长昌凹陷中部NWW向断裂带的成因目前还没有统一的认识<sup>[3,6-7,13]</sup>。纪沫等<sup>[13]</sup>认为是由NW—SE向区域拉张应力和南海扩张形成的近SN向拉张应力调谐而成;于俊峰<sup>[6]</sup>和李才等<sup>[7]</sup>认为是区域应力场顺时针旋转,由于凹陷东西部不均匀拉张,导致不同部位伸张量发生差异而形成,断裂具有走滑或张扭的性质。总体来看,花状构造、底辟构造和雁列式、帚状断裂展布形态等特征,反映长昌凹陷中部晚渐新世—早中新世具有右旋张扭的应力背景,并不是一个简单的断拗转换或者凹陷走向变化调节带的构造特征。

根据多速波地形地貌资料及磁异常条带分析<sup>[21-22]</sup>,南海海底在32~15.5 Ma期间发生扩张活动。始新世—早渐新世(32~25.5 Ma),南海北部陆缘受菲律宾—太平洋板块的俯冲作用,产生弧后拉张应力,区域应力场以NW—SE向伸展为主;晚渐新世(25.5~15.5 Ma),由于南海西南次海盆海底扩张,区域应力发生顺时针旋转,变为以近SN向拉张为主<sup>[23-24]</sup>。结合长昌凹陷

中部NWW向断裂带特征分析,其构造演化过程如下(图5,图6):早渐新世—晚渐新世早期(崖城组—陵水组三段,图5c),受NW—SE向区域拉张应力的作用,发育主干伸展断裂;晚渐新世晚期(陵水组二段—一段,图5b),区域应力顺时针旋转后,受近SN向拉张应力作用,凹陷内深部基底断裂持续活动,同时由于神狐隆起、南部隆起这2个刚性隆起的阻碍,长昌凹陷中部产生不均匀拉伸,开始产生右旋走滑作用,导致一系列次级调节断裂发育;早中新世(三亚组,图5a),随着长昌凹陷南部、北部这2个刚性隆起阻碍作用的增强,不均匀拉张位移量增大,中部走滑作用更加强烈,产生了大量负花状构造。因此,长昌凹陷中部NWW向断裂早期主要表现为伸展特征,晚期叠加走滑作用,最终形成具有伸展和走滑双重性质的复合断裂。通过长昌凹陷中部断裂演化及其与南海扩张过程的耦合关系分析,笔者认为晚渐新世的这种右旋张扭作用,是在南海西南次海盆海底扩张而引起区域应力顺时针旋转的背景下,凹陷内深部基底断裂持续活动和凹陷南部、北部2个刚性隆起的阻碍共同作用的结果。

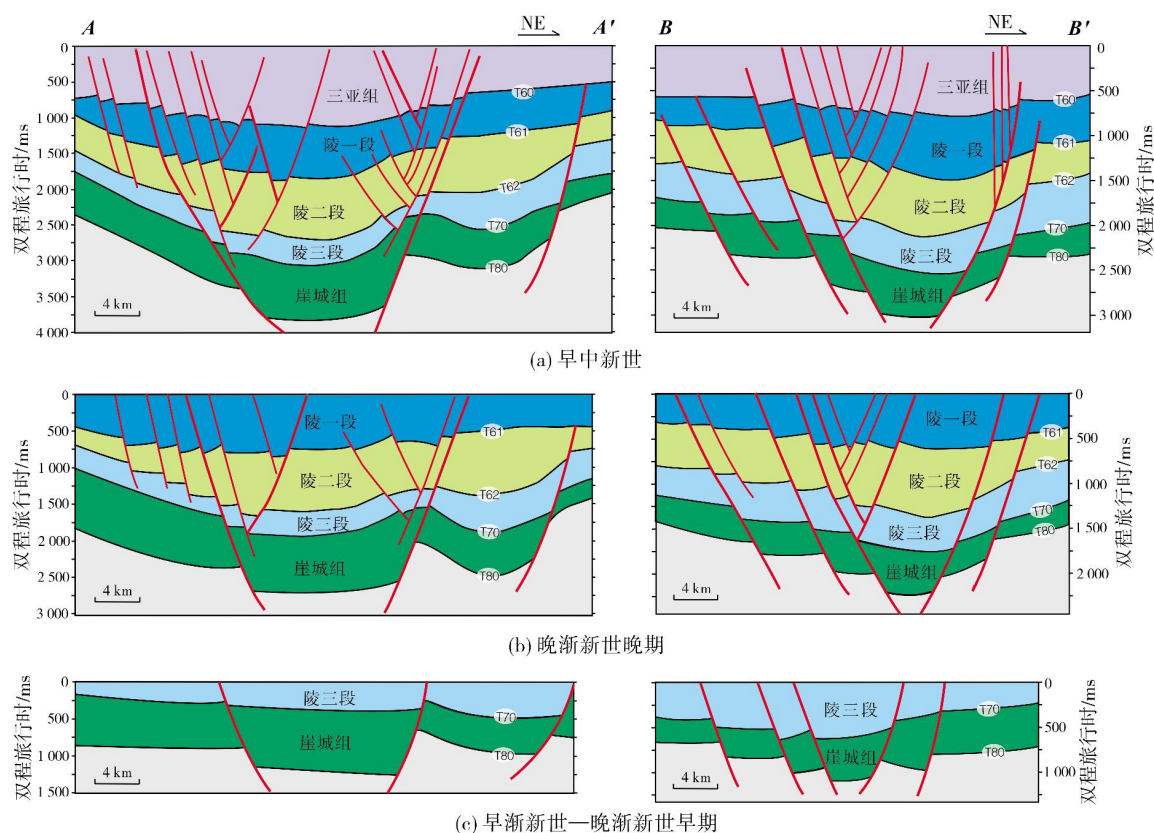


图5 琼东南盆地长昌凹陷中部断裂带演化剖面图(A—A', B—B'剖面位置见图3b)

Fig. 5 Evolution profile of fault belts in central Changchang Sag, Qiongdongnan Basin (section location is shown in Fig. 3b)



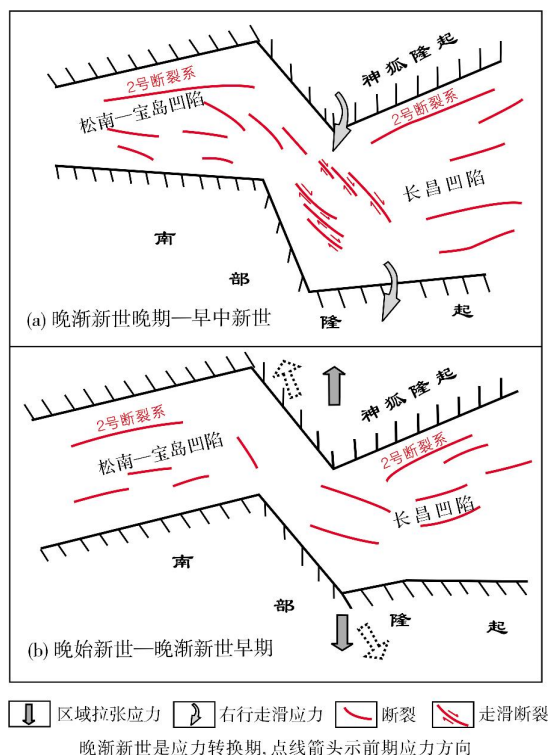


图6 琼东南盆地长昌凹陷中部伸展-走滑复合断裂带成因示意图

Fig. 6 Genetic sketch map of the extension-strike-slip composite fault belts in central Changchang Sag, Qiongdongnan Basin

依据走滑断裂的错动方向与运动方向的关系,走滑断裂排列模式可以分为左阶式和右阶式<sup>[25-26]</sup>。研究区形成了右行左阶和右行右阶两种走滑断裂排列模式(图3b):北部断裂带属于右行左阶,南部断裂带属于右行右阶。在右行左阶式走滑断裂排列模式下,由于剪切作用导致相邻断裂所夹持的地层发生相对运动,在断裂系之间形成挤压应力环境,断裂具有较强的封闭性,能够起到有效的封堵作用,故北部断裂带是有利的油气聚集带。在右行右阶式走滑断裂排列模式下,由于剪切作用导致相邻断裂所夹持的地层发生相反方向的运动,在断裂系之间形成拉张应力环境,断裂具有较高程度的开启性,能够作为高效的运移通道,故南部断裂带是有利的油气输导区。

### 3 油气勘探意义

琼东南盆地长昌凹陷中部的伸展-走滑复合断裂带控制了凹陷的沉降中心和沉积中心,在其影响下,崖城组发育大型煤系三角洲,陵水组—三亚组发育海底扇。伸展-走滑复合断裂带也控制了多个断块、

断鼻等构造圈闭群及构造-岩性复合圈闭的发育,这些圈闭面积大,多层发育。伸展-走滑复合断裂带内的主干断裂切穿了崖城组烃源岩(图2),成为油气垂向运移的通道。2017年钻探的WX1井已经证实,长昌凹陷为生烃凹陷,中部断裂带内构造圈闭发育,油气运移活跃。近年来在渤海湾郜庐走滑断裂带<sup>[27-28]</sup>,黄骅拗陷歧口凹陷<sup>[29]</sup>、青东凹陷<sup>[30]</sup>等区域已经发现多个受走滑断裂控制的大型油气田,说明走滑断裂对油气成藏具有重要的指向意义。

长昌凹陷中部的伸展-走滑复合断裂带位于主注的南北两侧,紧邻生烃中心,具有近源优势。走滑带内的圈闭主要发育于晚渐新世,定型于中新世,主注大规模排烃期主要为中新世(15 Ma)以后,因此圈闭形成期与排烃期时空匹配良好,而且主注崖城组压力系数在1.2~1.4之间,有利于油气沿断裂垂向运移并在合适的圈闭中聚集。北部主干走滑断裂 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 构成典型的右行左阶的断裂模式,断裂之间处于挤压应力环境,有利于油气聚集;南部 $F_4$ 、 $F_5$ 、 $F_6$ 主干走滑断裂构成右行右阶的断裂模式,断裂之间处于拉张应力环境,有利于油气垂向运移,但不利于聚集成藏。

### 4 结论

(1)琼东南盆地长昌凹陷中部发育2条NWW向断裂,在始新世—早渐新世主要表现为伸展特征,在晚渐新世—早中新世叠加并且受控于走滑作用,形成伸展-走滑复合断裂。这是在南海西南次海盆海底扩张引起的区域应力产生顺时针旋转的背景下,凹陷内深部基底断裂持续活动与神狐隆起、南部隆起2个刚性隆起的阻碍共同作用的结果。

(2)长昌凹陷中部的伸展-走滑复合断裂带中,北部断裂带具有右行左阶的走滑性质,断裂侧向封堵性强,断块、断背斜圈闭发育,是油气勘探的有利区域;南部断裂带具有右行右阶的走滑性质,断裂开启程度较高,有利于油气的垂向运移。

#### 参考文献

- [1] 程光华,王丽. 琼东南盆地深水区长昌凹陷勘探潜力[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(4): 28-32.
- [2] 雷超,任建业,李绪深,等. 琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 560-569.
- [3] 王章稳,孙珍,邱宁,等. 琼东南盆地深水区长昌凹陷地壳结构特征[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(8): 7-17.
- [4] 廖计华,王华,孙志鹏,等. 琼东南盆地深水区长昌凹陷构造演化及其对层序样式控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(8): 3121-3132.

- [5] 杨金海, 李才, 王利杰, 等. 南海西部深海区长昌凹陷油气地质条件与勘探潜力[J]. 化学工程与装备, 2014(11): 135-137.
- [6] 于俊峰. 琼东南盆地长昌凹陷三维地震区中新统微构造成因探讨[J]. 海相油气地质, 2011, 16(2): 66-72.
- [7] 李才, 尤丽, 朱继田, 等. 琼东南盆地深水中央坳陷断裂体系及其对油气成藏的控制[J]. 海相油气地质, 2016, 21(1): 73-78.
- [8] 张功成. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 528-533.
- [9] 赵民, 张晓宝, 吉利明, 等. 琼东南盆地构造演化特征及其对油气藏的控制浅析[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3): 495-502.
- [10] 张功成, 张义娜, 沈怀磊, 等. “源热共控”琼东南盆地的天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2014, 34(1): 18-27.
- [11] 张功成, 朱伟林, 米立军, 等. 源热共控论: 来自南海海域油气田“外油内气”环带有序分布的新认识[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 987-1004.
- [12] 邱宁, 王章稳, 王振峰, 等. 南海北部琼东南盆地地层结构与地壳伸展特征[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3189-3207.
- [13] 纪沫, 张功成, 杨海长, 等. 琼东南盆地深水区东区凹陷带结构构造及其演化特征[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(9): 26-35.
- [14] 李飞跃, 张功成, 杨海长, 等. 复杂断裂综合解释方法在长昌凹陷的应用[J]. 石油物探, 2017, 56(4): 543-550.
- [15] 黄保家, 李绪深, 王振峰, 等. 琼东南盆地深水区烃源岩地球化学特征与天然气潜力[J]. 中国海上油气, 2012, 24(4): 1-7.
- [16] 夏义平, 刘万辉, 徐礼贵, 等. 走滑断裂的识别标志及其石油地质意义[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(1): 17-23.
- [17] 马德波, 汪泽成, 段书府, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区走滑断层构造特征与天然气成藏意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 795-805.
- [18] 毕素萍, 潘懋, 夏朝辉, 等. 南海西南部西纳土纳盆地中部走滑构造带分段性及对油气控制作用[J]. 地质论评, 2016, 62(3): 770-777.
- [19] 李万程. 走滑运动与调整断裂[J]. 中国煤田地质, 1995, 7(3): 1-5.
- [20] 刘勇. 走滑断裂带伴生的构造结及各种相关的沉积盆地[J]. 海相油气地质, 1999, 4(3): 49-52.
- [21] BRIAIS A, PATRIZI 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, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [22] 赵长煜, 宋海斌, 李家彪, 等. 南海西南次海盆 NH973-1 测线地震解释[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3258-3268.
- [23] 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等. 南海的发育机制研究: 相似模拟证据[J]. 中国科学, D 辑 地球科学, 2006, 36(9): 797-810.
- [24] LISTER G S, ETHERIDGE M A, SYMONDS P A. Detachment models for the formation of passive continental margins[J]. Tectonics, 1991, 10(5): 1038-1064.
- [25] 朱志澄. 构造地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.
- [26] 朱建军, 周建勋. 雁列构造是走滑断裂存在的充分判据?: 来自平面砂箱模拟实验的启示[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(2): 142-148.
- [27] 龚再升, 蔡东升, 张功成. 郿庐断裂对渤海海域东部油气成藏的控制作用[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 1-9.
- [28] 邓运华. 郿庐断裂带新构造运动对渤海东部油气聚集的控制作用[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(5): 301-305.
- [29] 王芝尧, 苏俊青, 钱茂路, 等. 走滑断裂作用对油气成藏的控制: 以歧口凹陷新生代断裂为例[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 35-40.
- [30] 王永诗, 杨贵丽, 张顺. 青东凹陷油气成藏条件再认识[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 1116-1124.

编辑:董庸

## The extension-strike-slip composite fault belts in central Changchang Sag of Qiongdongnan Basin and their significance for oil and gas exploration

LI Feiyue, YANG Haichang, YANG Dongsheng, GUO Shuai, SUN Rui, JI Mo, ZHAO Zhao

**Abstract:** Changchang Sag, located in the east of the deep water area of Qiongdongnan Basin, is an important potential area for oil and gas exploration. Based on high-precision three-dimensional seismic data, fine interpretation of complex faults in central Changchang Sag is carried out. According to the development position, combination form and structural style of faults, combined with the characteristics of regional stress, it is considered that there are two NWW trending extension-strike-slip composite faults in the study area, whose evolution can be divided into three stages: (1) in the Early Oligocene, under the action of NW-SE regional tensile stress, the main extension faults are developed; (2) in the early period of Late Oligocene, under the sea floor expansion of southwest sub-basin of South China Sea, the regional tensile stress rotates clockwise, and changes from NW-SE to SN, which produces dextral strike slip, resulting in a series of secondary faults; (3) from the late period of Late Oligocene to Early Miocene, the basement faults in Changchang Sag are continuously active, and the strike slip becomes more intense, resulting in the development of a large number of negative flower structure due to the enhanced obstructing of two rigid uplifts in the north and south of the depression. The north fault belt is characterized by right-slip faults with left step, which has good sealing due to the extrusion stress. The south fault belt is characterized by right-slip faults with right step, which is conducive to the hydrocarbon migration due to the tensile stress.

**Key words:** strike-slip fault; extension-strike-slip composite fault; tectonic evolution; hydrocarbon accumulation; Changchang Sag; Qiongdongnan Basin

**LI Feiyue,** First author: MSc, Geological Engineer, mainly engaged in seismic data interpretation and comprehensive research. Add: Block A 1104, Yard No. 6 Taiyanggong South Street, Chaoyang District, Beijing 100028, China