

珠江口盆地珠三坳陷文昌9-7转换斜坡带构造特征与控藏机制

王真真, 胡林, 王世朝, 雷明珠, 李明, 胡潜伟, 刘凯

中海石油(中国)有限公司海南分公司

摘要 珠江口盆地珠三坳陷文昌A凹陷是重要的天然气勘探区,近期文昌9-7区带获得原油勘探重大突破。为了更清楚地认识其成藏规律,充分利用叠前三维地震、钻井资料及地球化学资料,通过断层几何学、活动速率、位移-距离分析及生物标志物和包裹体分析等方法,明确了珠三坳陷文昌9-7同向叠覆型转换斜坡带的变形特征与演化规律,并结合油藏特征分析了转换斜坡带的控藏机制。文昌9-7转换斜坡带表现为大型多边形断坡,受早期伸展作用和转换作用、晚期斜向伸展与走滑拉分作用控制,其构造演化经历了孤立断层、转换带形成、晚期复杂化3个阶段,断裂十分发育。文昌9-7油藏的原油主要来自9注文昌组烃源岩,并且有恩平组烃源岩的贡献。文昌9-7转换斜坡带具有3期原油成藏过程:早中新世(21~18.5 Ma)变换断层控制9注文昌组烃源岩生成的原油运聚成藏;中中新世(16~12 Ma)调节断层造成早期油藏的破坏和调整,并控制9注恩平组烃源岩生成的原油运聚成藏;晚中新世—上新世(9~4.5 Ma)转换斜坡带恩平组烃源岩晚期生成的原油运聚成藏。同向叠覆型转换带油气成藏条件优越,可作为重点勘探领域。

关键词 转换斜坡带;构造特征;构造演化;控藏机制;文昌A凹陷

中图分类号:TE121.2 文献标识码:A

0 前言

1970年,Dahlstrom^[1]在研究挤压变形中的褶皱、逆冲断层的几何形态时,首次提出转换带(transfer zone)的概念,也有学者将其译为变换带、传递带和调节带等术语^[2],本文采用构造转换带。Morley等^[3]将这一概念应用于伸展构造研究中,并提出了分类方案。构造转换带对油气成藏具有重要意义:一方面控制砂体发育,砂岩储层物性良好;另一方面,断层发育有利于圈闭形成及油气输导成藏^[4-5]。国内已在渤海湾盆地、松辽盆地及塔里木盆地等探区发现了多个构造转换带控制的油气田,对这些构造转换带已有较深入的研究^[6-11]。

转换斜坡带作为构造转换带的一种,通常发育在伸展盆地中,在同向叠覆断层控制的洼陷之间形成。转换斜坡带通常发育一系列与区域性断裂斜交的断裂,它们起到调节位移和构造变形的作用^[12]。近期中海油在珠江口盆地珠三坳陷文昌A

凹陷的文昌9-7转换斜坡带获得原油勘探突破,显示了转换斜坡带优越的油气成藏条件,为文昌凹陷下一步勘探提供了新的领域和方向。有学者对珠江口盆地的断层生长连接有所研究,并预测了构造转换斜坡的发育^[13],但主要侧重于断层产状的描述,对转换斜坡带的油气富集规律和控藏机制没有涉及。本文以文昌9-7油田的发现为契机,基于详细的地震地质解释以及地球化学资料,对文昌A凹陷转换斜坡带的断裂特征、构造演化、油气特征与成藏过程进行了深入分析,明确了文昌9-7转换斜坡带的控藏机制和成藏规律,这对下一步油气勘探具有重要意义。

1 地质背景

珠江口盆地属南海北部陆缘新生代裂陷盆地^[14]。珠三坳陷位于盆地西部,以阳江—统暗沙断裂为东边界,坳陷内部具有南北分带、东西分块的构造格局^[15]。其中,文昌凹陷面积最大,沉积最厚,为主力烃源岩沉积凹陷。珠三南断裂为主要控

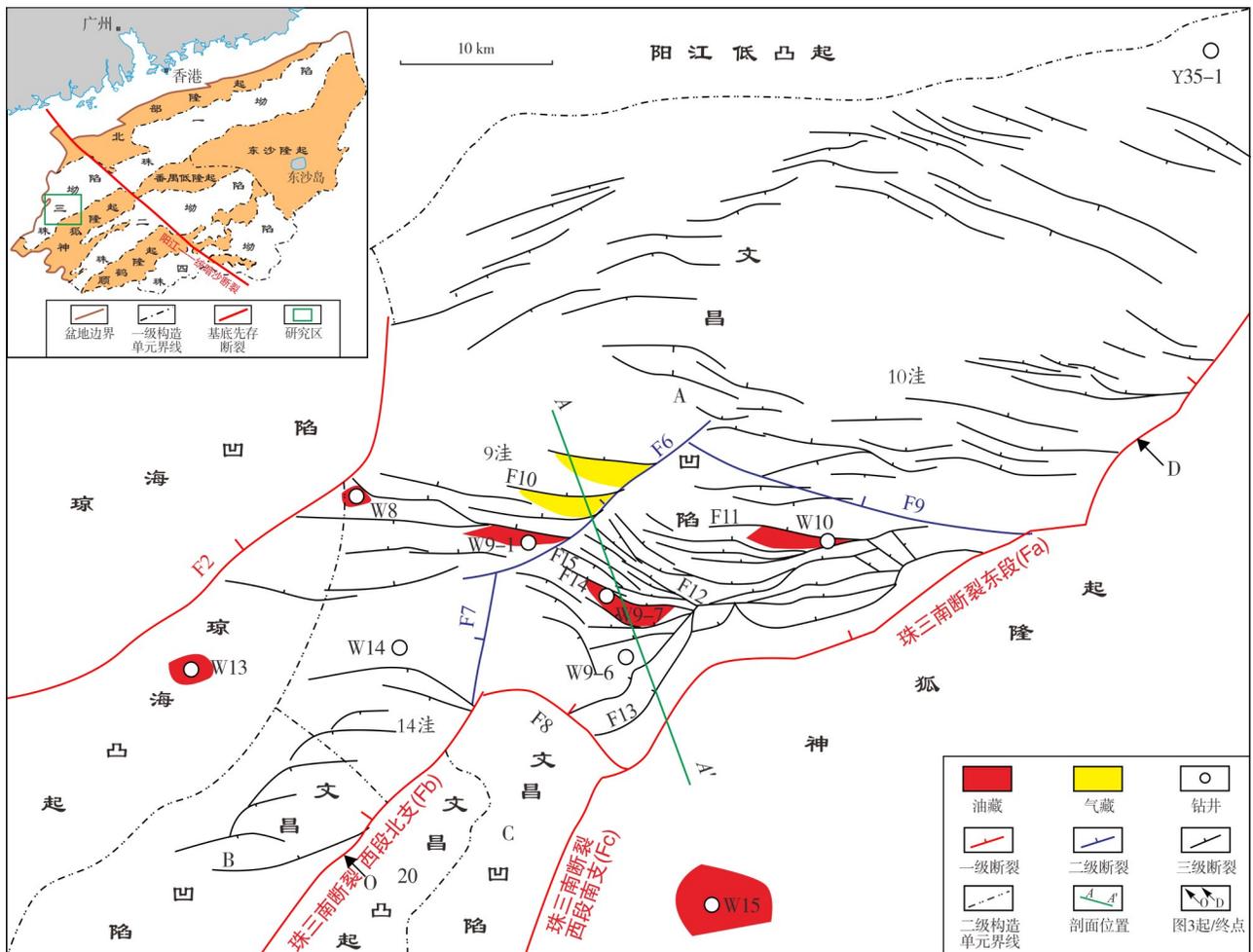
收稿日期:2021-10-15;改回日期:2022-02-24

本文受中国海洋石油集团有限公司重大科技项目“南海西部油田上产2000万方关键技术研究”之课题“南海西部深水气藏开发技术及勘探新领域研究”(编号:CNOOC-KJ 135 ZDXM 38 ZJ 03 ZJ)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,现就职于中海石油(中国)有限公司海南分公司,主要从事石油天然气地质综合研究工作。通信地址:570100 海南省海口市秀英区御府国际大厦;E-mail:wangzhzh19@cnoc.com.cn

凹断裂,呈北东走向,分为东段、西段北支和西段南支;受3支断裂控制,文昌凹陷相应地细分为A、B、C3个凹陷(图1),凹陷结构均为南断北超的半地堑^[16]。文昌凹陷的勘探主要围绕文昌A、B凹陷展开,原油发现集中于一带两脊:珠三南断裂带、琼海凸起构造脊和神狐隆起构造脊。珠三南断裂东段(Fa)与珠三6号断裂(F6)之间发育构造转换斜坡,

东西分别以F8和F9为界限定的范围即为文昌9-7转换斜坡带(图1)。前人在此开展了大量研究工作,但由于该区带构造复杂、圈闭破碎、成藏规律不明,多年来油气发现并不理想,仅有部分天然气发现。基于新的认识,近期在文昌A凹陷的文昌9-7转换斜坡带获得原油勘探突破(W9-7井珠海组三段),开拓了新的勘探领域。



注:转换斜坡带指由断裂F6、F7、F8、Fa、F9所围限的区域。

图1 珠江口盆地文昌9-7转换斜坡带断裂与油藏分布图

Fig. 1 Distribution of faults and oil reservoirs in Wenchang 9-7 transfer slope zone, Pearl River Mouth Basin

文昌凹陷自下而上发育古新统神狐组河流相地层,始新统一下渐新统文昌组、恩平组湖相地层,上渐新统珠海组海陆过渡相地层以及新近系一第四系海相地层^[17](图2)。文昌组一恩平组为主要烃源岩层,恩平组、珠海组、珠江组为主要成藏层系^[18-19]。

珠江口盆地新生代主要经历了裂陷期和裂后

期两个阶段,分别由神狐运动、南海运动拉开序幕(图2)。裂陷期区域应力场为NW—SE向,NE走向伸展断层发育并控制了凹陷的形成;早渐新世恩平组沉积时期,在珠琼运动二幕影响下区域应力场右旋,伸展方向转换为NNW—SSE向,NWW走向变换断层发育。裂后期区域应力场继续右旋为近N—S向,一系列近东西走向的调节断层发育。

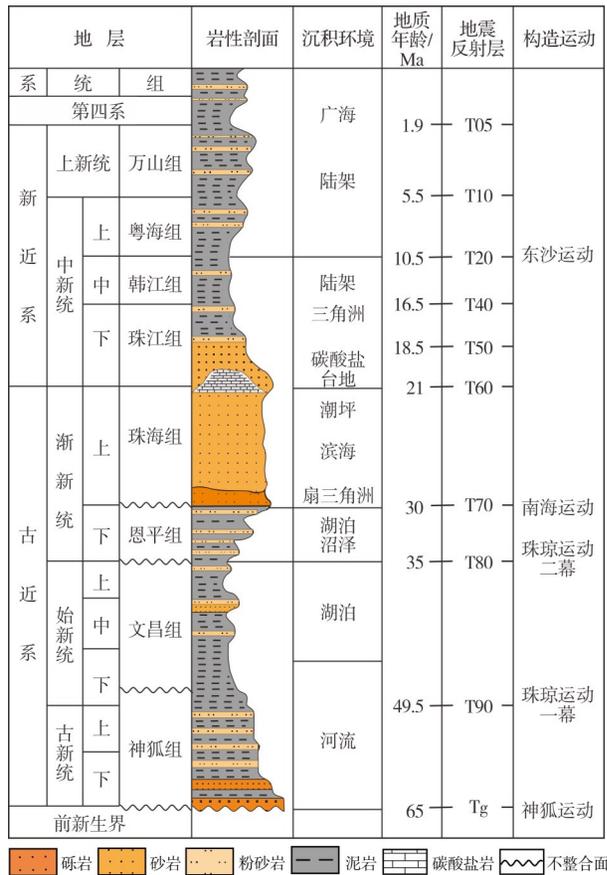


图2 珠江口盆地新生界综合柱状图

Fig. 2 Cenozoic comprehensive column of Pearl River Mouth Basin

2. 转换斜坡带构造特征与演化过程

2.1 转换斜坡带断裂特征

前人认为珠三南断裂(简称南断裂)西段北支(Fb)与东段(Fa)呈S形连接,并对其连接演化过程进行了精细研究,推测至少发育一个转换斜坡^[13]。但对于转换斜坡带的具体位置、规模与构造特征并无描述,对其控藏机制也没有进一步分析。本文基于断层垂直位移与距离关系(图3a)对南断裂的活动性进行分析(图3b),结果显示:文昌组沉积时期Fb和Fa东部呈现高活动速率(100 m/Ma以上),而中间的部分呈现较小的活动速率,表现出两条孤立断层的特征。恩平组沉积时期,随着盆地裂陷活动加强,Fb和Fa东部活动速率陡增,局部增加至400 m/Ma以上,并且规模迅速扩大,趋于连接形成大型控凹断裂。由于两条断裂相距较远,它们之间形成不协调变形区,这是构造转换带形成的主要原因。珠海组沉积时期,整条珠三南断裂活动速率趋于一致,垂直位移相近。整体上,南断裂是由北

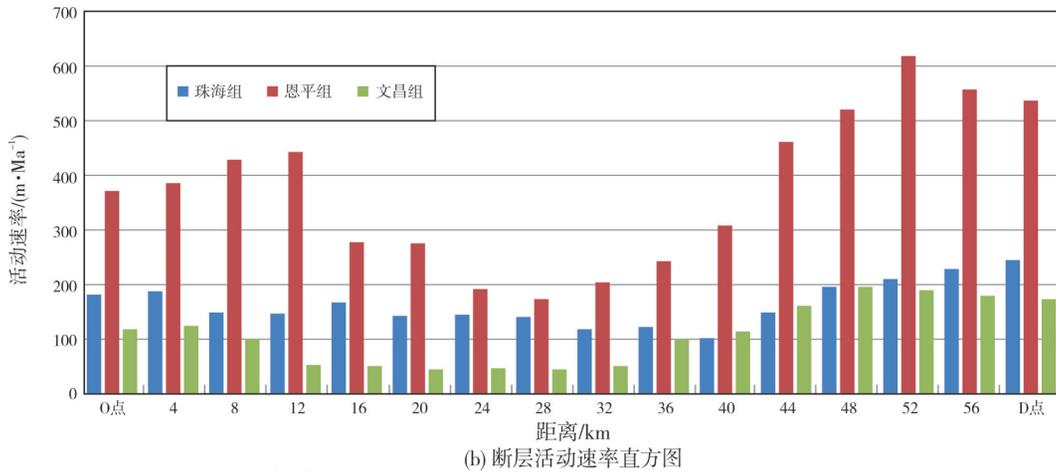
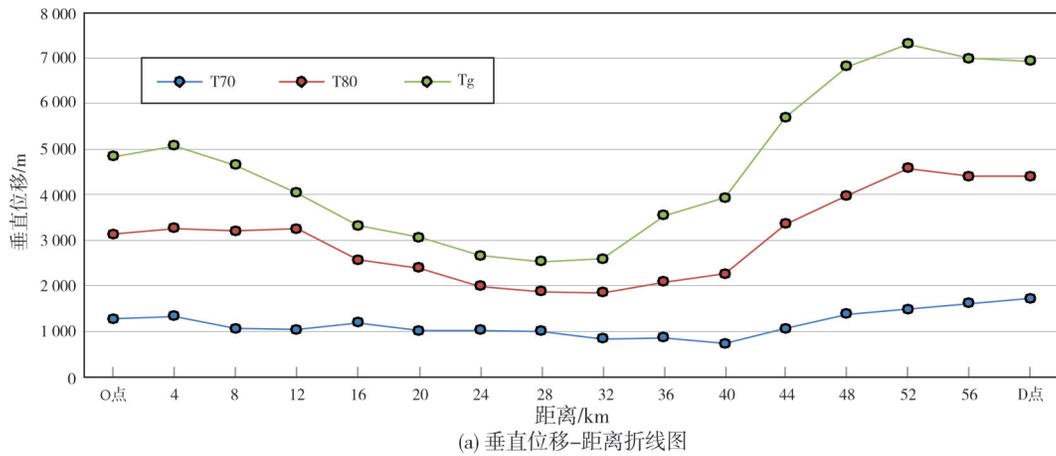
倾的Fb和Fa断裂连接形成:文昌组沉积时期大致为两条孤立断层;恩平组沉积时期开始连接,形成大型的文昌9-7同向叠覆型转换斜坡;至珠海组沉积时期南断裂连接为整条断层(图3)。

平面上,转换斜坡带长约30 km,宽约12~14 km(图1),规模较大。根据三维地震资料精细解释,转换斜坡带断裂十分发育,主要发育NE、NWW、NEE走向的3组断裂(图1),平面上呈平行状、雁列状、梳状或帚状排列,剖面上呈阶状、Y字形、复合Y字形,十分复杂。因此,根据断裂特征差异进行了分级、分类、分期研究。

根据断裂规模、活动性及对沉积的控制特征把断裂划分为三级。如图1所示,以控凹断裂珠三南断裂为一级断裂,由NE走向的西段(Fb)和东段(Fa)、NW走向的中段(F8)组成。根据垂直位移-距离分析,变换断层F7、F9控制转换带边界^[20],列为二级断裂;F6为文昌9洼的控洼断裂,列为二级断裂;其余列为三级断裂。

根据断裂的带状展布特征,将构造转换带自北而南划分为F6断裂带、转换斜坡带(中央部分)、南断裂带(图4),明确其成因类型。根据断层几何学、运动学特征及发育期次,划分了3种断层成因类型:伸展成因、转换成因和调节成因。伸展成因断层是伸展应力作用下形成的断裂,走向与伸展应力垂直,一般具有较强的控沉积作用,为控洼/凹断裂(图4,Fa、F6),活动期较早,断裂走向随伸展应力方向变化而发生明显变化。转换成因断层与伸展应力无关,主要作用是调节大型断裂之间的位移与变形,断裂走向通常与区域性断裂(伸展成因)斜交,只分布于构造转换带,控沉积作用弱(图4,F14),活动期为构造转换期。对于这类成因的断层本文采用了变换断层(transfer fault)这个术语,以区别于转换断层(transform fault)。调节成因断层为区域应力场旋转的产物。随着渐新世应力场右旋,研究区先期活动断裂与应力场斜交而具有一定走滑应力分量,为了调节这种走滑应变,形成了一系列断裂。因此,调节断层多与早期断裂相关,平面上与先存断裂斜交而构成分支断裂,剖面上组合成Y字形或复合Y字形(图4),活动期较晚,多为珠海组—韩江组沉积时期。

F6断裂带主要受F6断裂控制,并发育一系列分支断裂。F6断裂呈NE走向(图1),为早期伸展成



注：起点、终点(O、D)的位置参见图1。

图3 珠江口盆地珠三南断裂活动性分析图

Fig. 3 Activity analysis charts of Zhu-3 south fault in Pearl River Mouth Basin

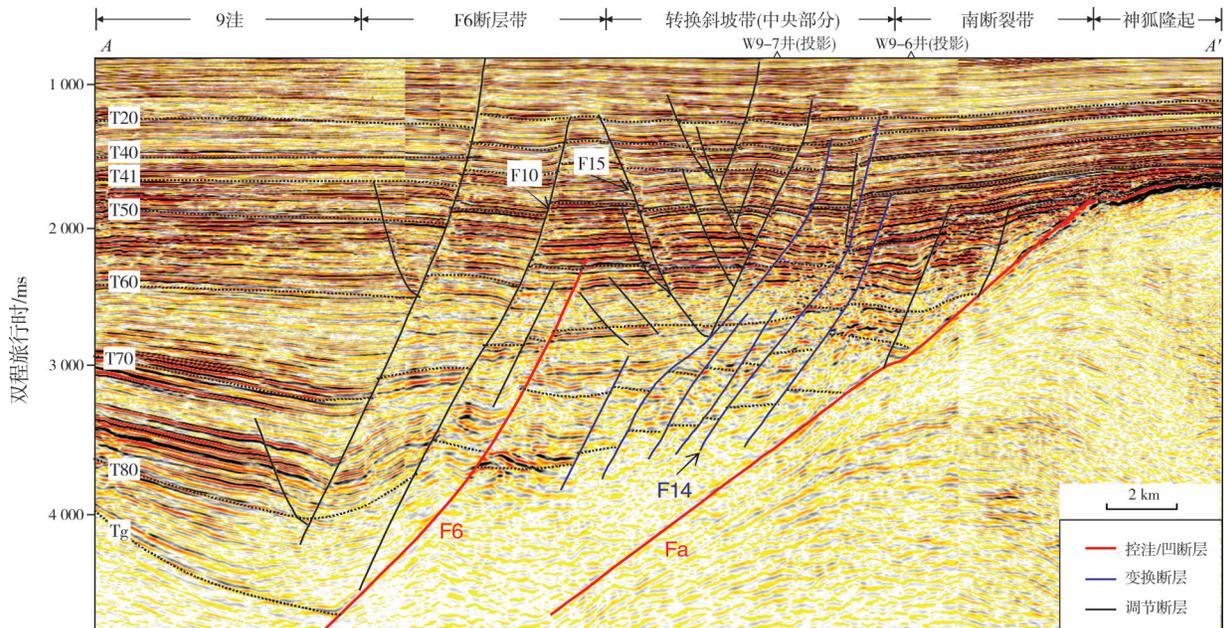


图4 珠江口盆地过文昌9-7转换斜坡带地震解释剖面(剖面位置见图1)

Fig. 4 Seismic interpretation profile across Wenchang 9-7 transfer slope zone in Pearl River Mouth Basin (section location is shown in Fig. 1)

因断层。F6分支断裂呈NEE走向,平面排列呈梳状,梳齿左阶排列,显示右行走滑特征(图1);剖面组合呈Y字形,倾向N,断裂根部会聚于F6主干断裂(图4),它们是F6断裂斜向伸展形成的调节断层^[21]。

转换斜坡带(中央部分)发育早晚两期断裂。早期断裂向下断至基底(图4,蓝色的),向上断至T60或T70附近,少数断裂新近纪持续活动,剖面上呈阶梯状,倾向N;平面上为NWW走向,呈平行状排列,与转换斜坡边界断裂F8、F9一致(图1),其成因类型属变换断层。晚期断裂向下断至T70附近(图4,黑色的),向上断至T20附近,倾向N或S,剖面组合呈复合Y字形;平面上为NWW走向,呈平行状至雁列状排列(图1)。相似的断裂在文昌A凹陷两侧均有发育,其雁列状展布特征是走滑应力作用的结果。通过区域沉降特征分析,晚渐新世—中新世,随着文昌A凹陷伸展方向转换为NNE向,区域右行走滑应力加强,文昌A凹陷14洼、9洼和10洼呈右阶排列,在区域右旋应力场下形成右行右阶拉分样式,造成文昌A凹陷逐渐呈现菱形特征,加速沉降,并派生大量NWW向调节断层^[22]。另外,由于晚渐新世后转换斜坡带的转换作用减弱,随凹陷发生加速沉降,晚期快速沉降也可能形成滚动塌陷型调

节断层^[23-24]。因此,转换斜坡带晚期断裂为右行走滑拉分作用或者滚动塌陷作用形成的调节断层。

南断裂带的三级断裂主要为NEE走向(图1),前排断裂剖面上组合为Y字形,平面上组合为帚状,与F6断裂带次级断裂成因相似,为斜向伸展成因。受右行斜向走滑作用控制,由于转换斜坡带位于珠三南断裂(Fb—Fa)的S型转弯走滑释压区(图1),伸展应力较强,因此该区南断裂带走滑—伸展型次级断裂格外发育^[16,25]。

选取部分代表性断裂进行活动性对比研究(图5)。一级断裂(如Fa、Fb、F8)活动速率最大,持续活动时间最长,控制凹陷沉降。二级断裂中F6为控洼断裂,活动速率仅次于一级断裂,尤其是文昌组—恩平组沉积时期沉积速率较大。二级断裂中的变换断层(F7、F9)活动均具有明显的阶段性,主要活动期为恩平组沉积时期,即转换斜坡形成期间。三级断裂活动速率低,其中:斜向伸展成因断层(如F10、F11、F12、F13)主要在珠海组沉积期形成,主要活动期为珠海组—珠江组沉积时期;变换断层(如F14)活动期早,主要为恩平组—珠海组沉积早期。总体上,转换斜坡带内部的变换断层活动性较弱,为相对稳定的构造单元。

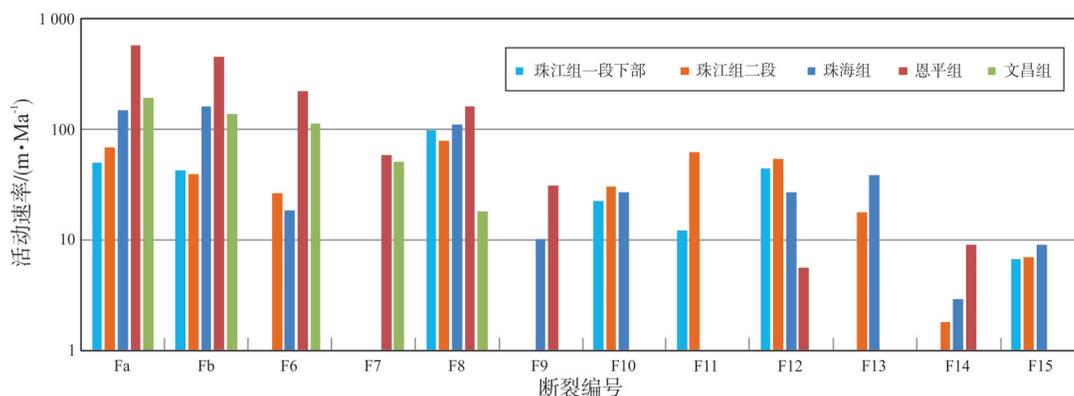


图5 珠江口盆地文昌9-7转换斜坡带断裂活动速率直方图

Fig. 5 Histogram of fault activity rate in Wenchang 9-7 transfer slope zone in Pearl River Mouth Basin

2.2 转换斜坡带构造演化

根据断裂特征与成因,对文昌9-7转换斜坡带的构造演化过程进行了分析和恢复(图6)。

早始新世文昌组沉积早期,区域应力场为NW—SE向,文昌凹陷NE走向伸展断层发育,以孤立断层为特征,控制沉积洼陷分布,Fb、F6、Fa分别控制文昌14洼、9洼和10洼的沉积(图6a)。

中一晚始新世,为珠琼运动二幕后快速伸展

期,文昌凹陷断裂活动性加强,并开始发生断层连接(以断层接近型连接为主),Fb与F6通过F7连接形成一条大型断裂,Fa也发生多段连接,向西延伸至文昌20凸起附近(图6b)。在Fb—F6断裂控制的14洼—9洼与Fa断裂控制的10洼之间的叠覆区形成大型转换斜坡。

早渐新世恩平组沉积时期,区域应力场右旋,伸展方向转换为NNW—SSE向,随着文昌A凹陷加速沉降,叠覆型转换斜坡发生断层连接,形成两条

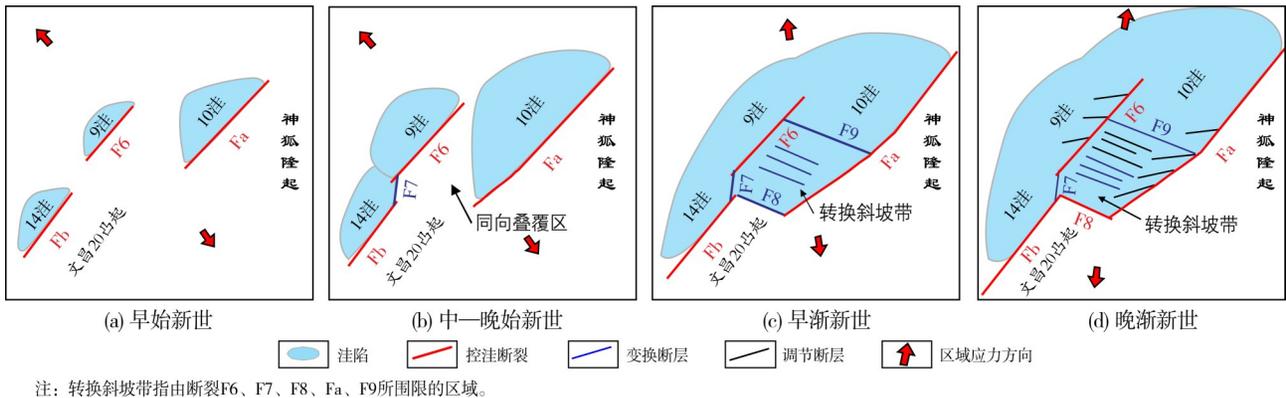


图6 珠江口盆地文昌9-7转换斜坡带构造演化示意图

Fig. 6 Structural evolution diagram of Wenchang 9-7 transfer slope zone in Pearl River Mouth Basin

主要横向传递断层F8和F9,内部发育多条NW向变换断层,平面上近平行展布(图6c),至此大型多边形转换断块基本定型。

晚渐新世珠海组沉积时期为转换带复杂化阶段(图6d)。此阶段应力伸展方向近N—S向,随着文昌A凹陷继续沉降,沉降中心向西迁移。在斜向伸展作用下,南断裂受S型走滑释压作用,转换斜坡带西部加速沉降,尤其是F8断裂快速活动。此时的构造特征为:一方面在转换斜坡带发育大量调节断层;另一方面南断裂开始产生大量次级断裂,造成南断裂带的破碎化。

中新世珠江组沉积期时期至今,随着区域应力场进一步右旋为NNE向,盆地进入拗陷演化阶段,同沉积断层活动逐渐减弱。在右行应力场下,文昌A凹陷14洼、9洼和10洼呈右阶排列;受右行右阶走滑拉分作用,文昌A凹陷持续沉降,并在南北两侧形成大量NW走向调节断层。此时南断裂活动仍较强烈,文昌A凹陷沉积中心继续向西迁移,转换斜坡带快速埋藏,整个凹陷构造特征趋于一致。

3 转换斜坡带油气成藏特征

文昌9-7转换斜坡带被14洼、9洼、10洼环绕,聚油背景优越,油气来源复杂;发育断鼻、断块型圈闭,断层多期、多成因,圈闭复杂;钻井揭示油气类型包括轻质油、凝析油、天然气和二氧化碳,油气性质复杂;包裹体指示多期充注,成藏过程复杂。

3.1 油气来源

文昌凹陷发育文昌组和恩平组2套4类烃源岩^[26]。文昌A凹陷钻井已证实恩平组湖沼相和浅湖相烃源岩。恩平组湖沼相烃源岩有机显微组分

中,镜质体约占40%,腐殖无定形体约占45%,不含藻质体,为典型的Ⅲ型干酪根;烃源岩抽提物具有较高的姥植比(Pr/Ph),介于1.86~4.80,反映出偏氧化的沉积环境;在规则甾烷中,比较显著的特征是以C₂₉规则甾烷为主(图7),而不含或者微含来自于水生生物的C₃₀-4甲基甾烷(C₃₀-4MST),反映陆源有机质的树脂化合物“T”整体含量较高,指示沉积有机质主要是陆源贡献。恩平组浅湖相烃源岩有机显微组分以腐殖无定形体为主(60%),藻质体含量低(不足5%),属于Ⅱ₂-Ⅲ型干酪根;烃源岩抽提物Pr/Ph值较大(1.0~6.1),指示偏氧化的沉积环境;样品中含有丰富的树脂化合物“T”(图7),大部分样品“T”指数(T/C₃₀H)大于1,奥利烷指数(O/C₃₀H)较高,在0.27~0.37之间,不含或者微含C₃₀-4甲基甾烷,指示了陆源有机质的贡献比较大。目前,文昌A凹陷内发现的油气大多数来自恩平组烃源岩^[27]。

文昌A凹陷文昌组埋深较大,目前尚无钻井证实。凹陷内文昌组厚度大,烃源岩生排烃时间非常早(21~18 Ma),受晚期构造运动破坏,不易保存,推测会以束缚烃或者包裹体烃的形式赋存于储层之中。应用储层连续抽提技术发现储层中含有早期充注的古油气组分,其与储层中源自恩平组的油气的地球化学参数不同,成熟度参数Ts/Tm值(0.30~1.20)、C₂₉Ts/C₂₉H值(0.10~0.45)均较低,表明文昌A凹陷早期原油成熟度较低;Pr/Ph值(0.34~1.58)和DiaC₃₀ST/C₃₀ST值(0.02~0.09)均较小,反映了偏还原的沉积环境;而反映水生有机质贡献的C₃₀-4甲基甾烷含量较高,ΣC₃₀-4MST/ΣC₂₉ST值在0.16~0.26之间,反映陆源有机质贡献的树脂化合物“T”指数(0.07~0.56)和奥利烷指数(0.03~0.09)较低。早期充注的油气组分反映有机质来源主要是水生生物,与恩平组烃

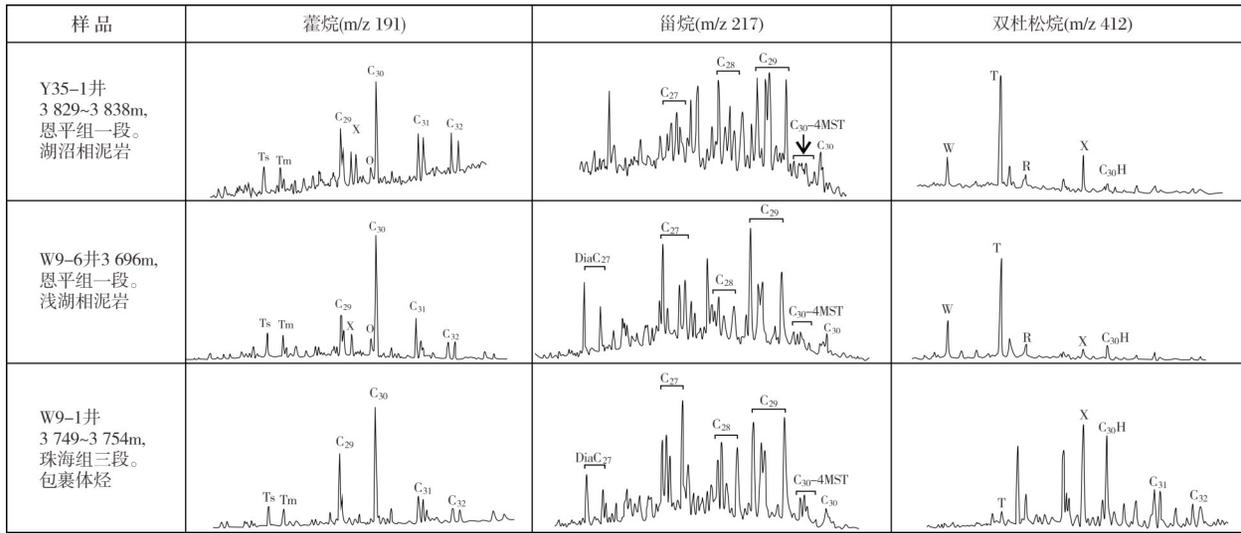


图7 珠江口盆地文昌A凹陷烃源岩/包裹体烃典型生物标志物质谱图

Fig. 7 Mass spectrom of typical biomarker compounds of source rock and inclusions in Wenchang A Sag, Pearl River Mouth Basin

源岩特征差异较大,可能为文昌组浅湖相烃源岩,但目前还没有发现完全来自文昌组烃源岩的油藏。

从油-源生物标志物对比来看,W9-7井原油 $C_{29}Ts/C_{29}H$ 值(0.38~0.50)较恩平组烃源岩低,反映成熟度较低; $\Sigma C_{30}-4MST/\Sigma C_{29}ST$ 值在0.35~0.58之间,与恩平组烃源岩相比明显偏高,指示水生来源比例

大;树脂化合物“T”指数在0.59~1.2之间,与恩平组烃源岩相比明显偏低,反映陆源有机质贡献较低。因此,文昌9-7油藏的原油并非主要来自恩平组烃源岩,可能来自尚未证实的文昌组烃源岩,混有少量恩平组来源的原油。

从油-油生物标志物对比来看(图8),W9-7井

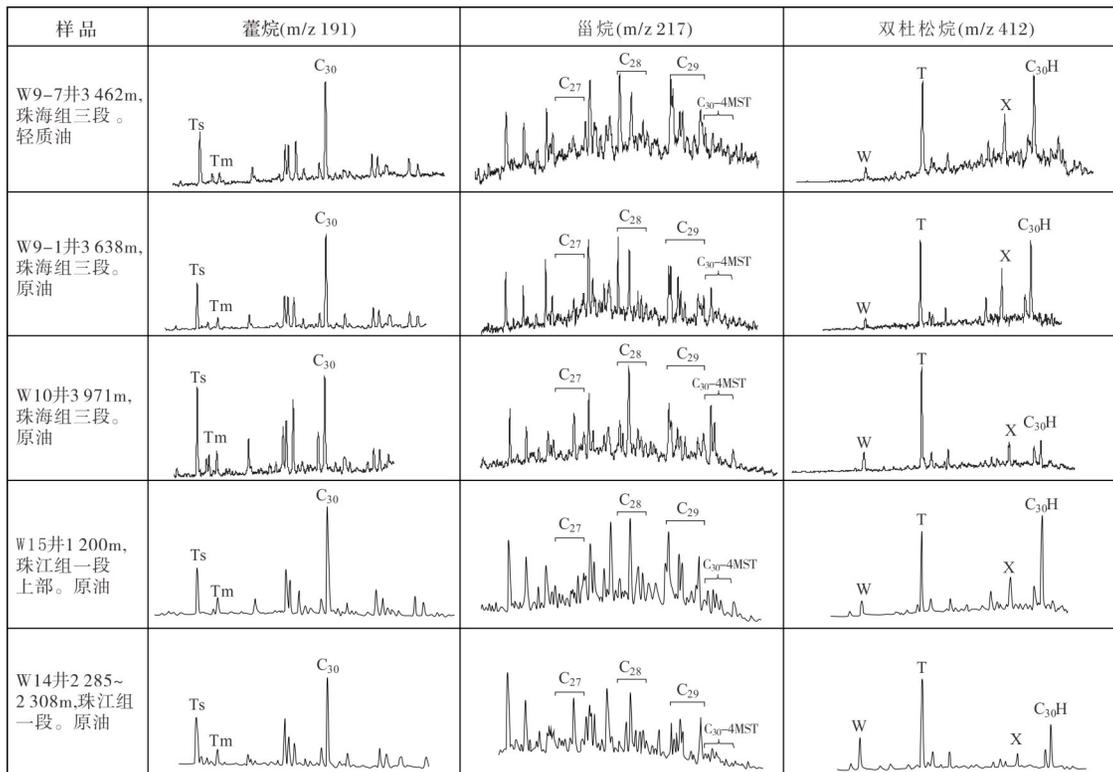


图8 珠江口盆地文昌A凹陷原油生物标志物质谱图

Fig. 8 Mass spectrom of biomarker compounds of oil in Wenchang A Sag, Pearl River Mouth Basin

原油与W9-1井、W15井原油相似度较高,与W10井、W14井差异较明显,反映文昌9-7原油主要来自9洼。另外,W9-7井凝析油与原油差异较大,与W9-1井凝析油也有一定差异性,推断有来自本地(斜坡带范围内)烃源岩的贡献。

综合分析认为:文昌9-7油藏的原油主要来自9洼文昌组烃源岩,混有9洼恩平组生成的原油和天然气,也有本地烃源岩生成的凝析油贡献。

3.2 油气充注期次

流体包裹体分析显示,W9-7井含有不同颜色

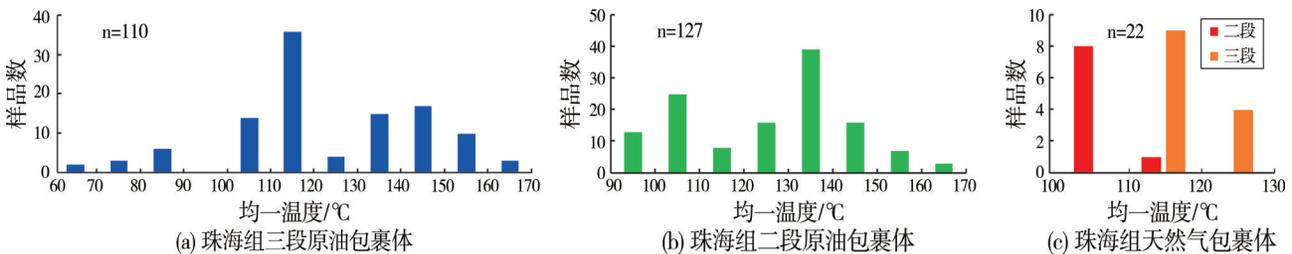


图9 珠江口盆地W9-7井烃类包裹体均一温度直方图

Fig. 9 Homogenization temperature histograms of hydrocarbon inclusions of Well W9-7 in Pearl River Mouth Basin

结合W9-7井埋藏史分析,不同的流体包裹体温度区间显示出3个主要的原油充注期次和1个主要的天然气充注期次(图10):第1期原油充注时间约为21~18.5 Ma;第2期原油充注时间约为16~12 Ma;第3期原油充注时间约为9~4.5 Ma;天然气充注时间约为14~9 Ma,与第2期原油充注时间相近。

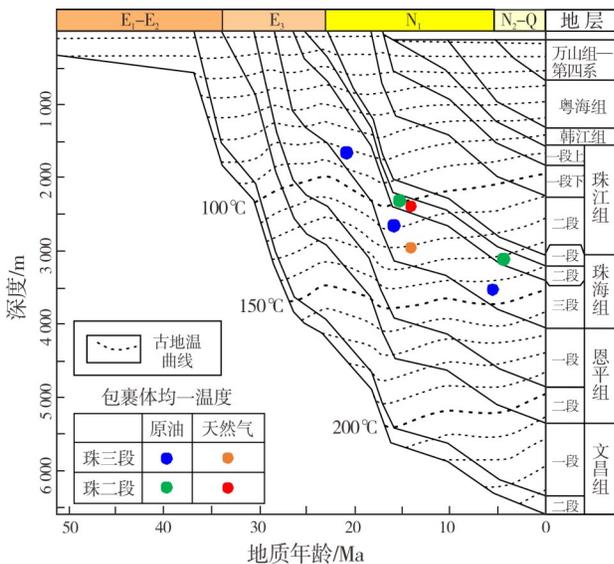


图10 珠江口盆地W9-7井埋藏史-热史图

Fig. 10 Burial history-thermal history graph of Well W9-7

的同期油包裹体,见大量富气相或高均一温度的非均一捕获的油包裹体以及大量气态烃包裹体和沥青,这与油藏形成以后,后期天然气进一步充注造成的气洗有关^[28]。气洗也是文昌9-7油藏原油密度较低、含蜡量较高的主要原因。W9-7井包裹体均一温度分析(图9)显示:珠海组三段原油存在3个主要的均一温度区间(70~90 °C, 100~120 °C, 130~150 °C),天然气存在一个主要温度区间(110~120 °C);珠海组二段原油存在2个主要的均一温度区间(90~110 °C, 120~150 °C),天然气存在一个主要温度区间(100~110 °C)。

3.3 构造控藏机制

不同来源的油气多期充注,造成文昌9-7油藏成藏过程复杂。

第1期原油充注时期(21~18.5 Ma,早中新世),与9洼文昌组烃源岩排油高峰对应,此时F6断裂带分支断裂初始形成,雁列状展布,很难形成有效圈闭,9洼文昌组烃源岩生成的原油直接通过F6主断裂向上运移至转换斜坡带成藏。该时期转换斜坡带变换断层(F14等)已经基本停止活动,封堵性较好,可有效保存油气(图4,图5),而正在活动的调节断层(F15等),较难形成高封堵性圈闭,因此主要成藏层系为珠海组。该时期为变换断层控藏阶段。

第2期原油充注时期(16~12 Ma,中中新世),文昌A凹陷恩平组烃源岩成熟并大量生烃,为凹陷内第2期成藏高峰期^[27]。该时期F6、南断裂带均次生大量NEE走向调节断层(F10、F11、F12、F13等)。一方面,文昌9洼生成的原油沿F6断裂带向上运移,在梳状调节断层形成的断背斜圈闭中成藏,以及向西南部琼海凸起构造脊和转换斜坡带运移成藏;另一方面,南断裂次级断裂活动,对转换斜坡带油藏造成

破坏,造成原油沿南断裂带向上运移至珠江组区域砂体输导层,沿构造脊向神狐隆起远距离运移成藏(W15油田等)。该时期为调节断层控藏阶段。

天然气充注时期为14~9 Ma,对应恩平组烃源岩生气高峰。该时期天然气大量生成,沿F6断裂带向上运移,驱替早期油藏的原油沿珠江组区域输导层向两侧构造脊运移,包括琼海凸起和转换斜坡带。从古构造脊地貌特征分析,琼海凸起方向发育构造脊深入9洼,应为主要运移方向,这也是琼海凸起原油以恩平组来源特征为主的原因。此外,有少量天然气向转换斜坡带运移,造成早期油藏被气洗改造。

第3期原油充注时期(9~4.5 Ma,晚中新世—上新世),对应本地烃源岩成熟时期。钻井证实转换斜坡带发育厚层恩平组二段浅湖相泥岩。由于转换斜坡带埋藏时间晚,本地烃源岩形成最后一期晚期生烃,以凝析油贡献为主。

综上所述,文昌9-7转换斜坡带具有以下控藏特征:转换斜坡带为应变集中发育带,多期、多级、多成因断层活动,持续时间长,有利于形成构造圈闭群;转换斜坡带被多洼环抱,凹中隆构造脊背景有利于汇聚油气;转换斜坡带为沉积物输入区,控制砂体发育,有利于储层形成。文昌9-7转换斜坡带原油的发现,从侧面证实了文昌A凹陷发育文昌组浅湖相烃源岩,其生排烃时间早,生成的烃类保存于早期圈闭中。转换斜坡带油气成藏时间早,埋藏时间晚,对储层起到一定保护作用。文昌9-7转换斜坡带钻井揭示储层以低渗—特低渗储层为主,已钻井平均孔隙度为8%~10%,而W9-7井揭示砂岩储层孔隙度平均为13%,属低渗—中渗,测压流度(油层有效渗透率与流体黏度的比值)为1~46 mD/cp,部分油组平均流度为10 mD/cp以上,指示甜点储层发育。钻探和研究证实变换断层控藏最优,晚期调节断层具有破坏作用,因此,转换斜坡带的勘探目标优选需要精细刻画断裂。

4 结 论

(1)珠江口盆地珠三坳陷文昌A凹陷文昌9-7转换斜坡带是在同向洼陷叠覆区发育的大型转换斜坡带,其构造演化受控于控洼(凹)断裂F6和珠三南断裂,经历了孤立断层、转换斜坡带形成、晚期复杂化3个阶段,形成复杂断裂体系。

(2)文昌9-7转换斜坡带W9-7井珠海组三段原油主要来自于9洼文昌组烃源岩,另有9洼恩平组烃源岩和转换斜坡带恩平组烃源岩的贡献;转换斜坡带经历了3期原油充注和1期天然气充注;转换斜坡带转换断层晚期活动较弱,使得早期油气藏得以较好保存。

(3)文昌9-7转换斜坡带被多洼环绕,聚油背景好,大型沉积砂体发育,埋藏时间晚,甜点储层发育,多期断裂控制圈闭群形成,为有利勘探区带。

参 考 文 献

- [1] DAHLSTROM C D A. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains [J]. *Bulletin of Canadian petroleum geology*, 1970, 18(3): 332-406.
- [2] 童亨茂, 范彩伟, 童传新, 等. 琼东南盆地宝岛变换带的特征、类型及其成因机制 [J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 897-905.
TONG Hengmao, FAN Caiwei, TONG Chuanxin, et al. Characteristics, types and genetic mechanism of Baodao transfer zone, Qiongdongnan Basin [J]. *Oil & gas geology*, 2015, 36(6): 897-905.
- [3] MORLEY C K, NELSON R A, PATTON T L, et al. Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts [J]. *AAPG bulletin*, 1990, 74(8): 1234-1253.
- [4] 王家豪, 王华, 任建业, 等. 黄骅坳陷中区大型斜向变换带及其油气勘探意义 [J]. *石油学报*, 2010, 31(3): 355-360.
WANG Jiahao, WANG Hua, REN Jianye, et al. A great oblique transition zone in the central Huanghua Depression and its significance for petroleum exploration [J]. *Acta petrolei sinica*, 2010, 31(3): 355-360.
- [5] 余一欣, 周心怀, 汤良杰, 等. 渤海海域辽东湾坳陷正断层联接及其转换带特征 [J]. *地质论评*, 2009, 55(1): 79-84.
YU Yixin, ZHOU Xinhui, TANG Liangjie, et al. Linkages of normal faults and transfer zones in the Liaodongwan Depression, offshore Bohai Bay Basin [J]. *Geological review*, 2009, 55(1): 79-84.
- [6] 周心怀, 余一欣, 魏刚, 等. 渤海辽东湾海域JZ25-1S转换带与油气成藏的关系 [J]. *石油学报*, 2008, 29(6): 837-840.
ZHOU Xinhui, YU Yixin, WEI Gang, et al. Relationship between JZ25-1S transfer zone and hydrocarbon accumulation in Liaodongwan offshore of Bohai Bay Basin [J]. *Acta petrolei sinica*, 2008, 29(6): 837-840.
- [7] 梁锋, 范军侠, 李宏伟, 等. 大港油田板桥凹陷构造变换带与油气富集 [J]. *古地理学报*, 2008, 10(1): 73-76.
LIANG Feng, FAN Junxia, LI Hongwei, et al. Relationship between tectonic transfer zones and petroleum accumulation in Banqiao Sag, Dagang Oilfield [J]. *Journal of palaeogeography*, 2008, 10(1): 73-76.
- [8] 胡望水, 王燮培. 松辽盆地北部变换构造及其石油地质意义

- [J]. 石油与天然气地质, 1994, 15(2): 164-172.
- HU Wangshui, WANG Xiepei. Transform structures in northern part of Songliao Basin and its significance in petroleum geology [J]. *Oil & gas geology*, 1994, 15(2): 164-172.
- [9] 邬光辉, 漆家福, 黄骅盆地一级构造变换带的特征与成因[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 125-128.
- WU Guanghui, QI Jiafu. Characteristics and origin of first order transfer zones in Huanghua Basin [J]. *Oil & gas geology*, 1999, 20(2): 125-128.
- [10] 邬光辉, 李启明, 张宝收, 等. 塔中 I 号断裂坡折带构造特征及勘探领域[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 27-30, 37.
- WU Guanghui, LI Qiming, ZHANG Baoshou, et al. Structural characteristics and exploration fields of No. 1 Faulted Slope Break in Tazhong area [J]. *Acta petrolei sinica*, 2005, 26(1): 27-30, 37.
- [11] 陈书平, 漆家福, 王德仁, 等. 东濮凹陷断裂系统及变换构造[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 43-49.
- CHEN Shuping, QI Jiafu, WANG Deren, et al. Fault systems and transfer structures in Dongpu Sag [J]. *Acta petrolei sinica*, 2007, 28(1): 43-49.
- [12] SONG T, CAWOOD P A. Structural styles in the Perth Basin associated with the Mesozoic break-up of Greater India and Australia [J]. *Tectonophysics*, 2000, 317(1/2): 55-72.
- [13] 雷宝华, 郑求根, 李俊良, 等. 珠三拗陷珠三南断裂形成演化及其对沉积中心迁移的控制[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 807-813.
- LEI Baohua, ZHENG Qiugen, LI Junliang, et al. Formation and evolution of Zhu-3 south fault and its control on the depocenter shift in Zhu-3 Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta petrolei sinica*, 2012, 33(5): 807-813.
- [14] LI Sitian, LIN Changsong, ZHANG Qiming, et al. Episodic rifting of continental marginal basins and tectonic events since 10 Ma in the South China Sea [J]. *Chinese science bulletin*, 1999, 44(1): 10-23.
- [15] 陈汉宗, 吴湘杰, 周蒂, 等. 珠江口盆地中生代主要断裂特征和动力背景分析[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(2): 52-61.
- CHEN Hanzong, WU Xiangjie, ZHOU Di, et al. Meso-Cenozoic faults in Zhujiang River Mouth Basin and their geodynamic background [J]. *Journal of tropical oceanography*, 2005, 24(2): 52-61.
- [16] 李俊良, 雷宝华, 郑求根, 等. 珠江口盆地文昌凹陷应力场演化及其对成藏要素的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(4): 601-609.
- LI Junliang, LEI Baohua, ZHENG Qiugen, et al. Stress field evolution and its controls on oil accumulation in the Wenchang Sag [J]. *Geotectonica et metallogenia*, 2015, 39(4): 601-609.
- [17] 姜华, 王华, 李俊良, 等. 珠江口盆地珠三拗陷层序地层样式分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(1): 87-93.
- JIANG Hua, WANG Hua, LI Junliang, et al. Analysis on sequence formation styles of Zhu-3 Depression in Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine geology & Quaternary geology*, 2009, 29(1): 87-93.
- [18] 姜华, 王华, 李俊良, 等. 珠江口盆地珠三拗陷油气成藏模式与分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 275-281, 286.
- JIANG Hua, WANG Hua, LI Junliang, et al. Research on hydrocarbon pooling and distribution patterns in the Zhu-3 Depression, the Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & gas geology*, 2009, 30(3): 275-281, 286.
- [19] 姜华, 王华, 刘军, 等. 珠江口盆地珠三拗陷神狐组一恩平组沉积时期南断裂活动性对沉积的控制作用[J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 49-53.
- JIANG Hua, WANG Hua, LIU Jun, et al. Activity of south fault of Zhu III Depression and its controlling on sedimentation during Shenhui Formation to Enping Formation in Pearl River Mouth Basin [J]. *Geological science and technology information*, 2009, 28(2): 49-53.
- [20] PEACOCK D C P, SANDERSON D J. Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones [J]. *Journal of structural geology*, 1991, 13(6): 721-733.
- [21] 童亨茂, 赵宝银, 曹哲, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统成因的构造解析[J]. 地质学报, 2013, 87(11): 1647-1661.
- TONG Hengmao, ZHAO Baoyin, CAO Zhe, et al. Structural analysis of faulting system origin in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Acta geologica sinica*, 2013, 87(11): 1647-1661.
- [22] 占旺华, 蔡国富, 张志伟, 等. 南海北缘古近纪断裂活动规律及控盆特征: 以阳江东凹为例[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 20-39.
- ZHAN Wanghua, CAI Guofu, ZHANG Zhiwei, et al. Paleogene fault activity and basin controlling characteristics in the northern South China Sea margin: a case study of the eastern Yangjiang Sag [J]. *Geotectonica et metallogenia*, 2021, 45(1): 20-39.
- [23] MCCLAY K R. Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies [J]. *Marine and petroleum geology*, 1990, 7(3): 206-233.
- [24] DOOLEY T, MCCLAY K R, PASCOE R. 3D analogue models of variable displacement extensional faults: applications to the Revfallet Fault system, offshore mid-Norway [J]. *Geological Society of London special publications*, 2003, 212(1): 151-167.
- [25] 李辉, 陈胜红, 张迎朝, 等. 珠江口盆地珠三拗陷断裂特征与油气成藏[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(3): 115-124.
- LI Hui, CHEN Shenghong, ZHANG Yingzhao, et al. Faults in the Zhu-3 Depression of Pearl River Mouth Basin and their control over hydrocarbon accumulation [J]. *Marine geology & Quaternary geology*, 2014, 34(3): 115-124.
- [26] 王碧维, 徐新德, 吴杨瑜, 等. 珠江口盆地西部文昌凹陷油气来源与成藏特征[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(7): 980-992.
- WANG Biwei, XU Xinde, WU Yangyu, et al. Oil-gas origin and accumulation characteristics of Wenchang Depression, western

- Pearl River Mouth Basin [J]. *Natural gas geoscience*, 2020, 31 (7): 980-992.
- [27] 黄保家, 李俊良, 李里, 等. 文昌A凹陷油气成藏特征与分布规律探讨[J]. *中国海上油气*, 2007, 19(6): 361-366.
- HUANG Baojia, LI Junliang, LI Li, et al. A discussion on the hydrocarbon accumulation characteristics and distribution in Wenchang A Sag [J]. *China offshore oil and gas*, 2007, 19(6): 361-366.
- [28] 李美俊, 张忠涛, 陈聪, 等. 珠江口盆地白云凹陷储层沥青成因及其对油藏调整改造的启示[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(1): 133-141.
- LI Meijun, ZHANG Zhongtao, CHEN Cong, et al. Origin of reservoir bitumen and its implications for adjustment and reformation of hydrocarbon-accumulation in Baiyuan Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & gas geology*, 2019, 40(1): 133-141.

编辑:董庸

Structural characteristics and reservoir-control mechanism of Wenchang 9-7 transfer slope zone in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

WANG Zhenzhen, HU Lin, WANG Shichao, LEI Mingzhu,
Li Ming, HU Qianwei, LIU Kai

Abstract: The Wenchang A Sag in Zhu III Depression of the Pearl River Mouth Basin is an important natural gas exploration area, with a major crude oil breakthrough in Oligocene Zhuhai Formation of Wenchang 9-7 zone recently. In order to better understand its reservoir-forming rules, based on fault geometry analysis, activity rate and displacement-distance analysis, biomarker composition and inclusion analysis by making full use of pre-stack 3D seismic, drilling and geochemical data, the deformation characteristics and evolution rules of Wenchang 9-7 syndromic superimposed transfer slope zone in the Zhu III Depression are clarified, and the reservoir-controlling mechanism of the transfer slope zone is analyzed in combination with the reservoir characteristics. The results show that: (1) Wenchang 9-7 transfer slope zone is characterized by large polygonal fault slope. Due to early extension and transformation, late oblique extension and strike-slip pull-apart, its tectonic evolution has gone through three stages: isolated fault, formation of transfer zone and late complication with more derived branch faults. (2) According to the local oil-oil correlation and oil-source correlation results and the regional oil-source study, the crude oil of Wenchang 9-7 reservoir mainly comes from the source rock of Wenchang Formation in the 9th sub-sag, and partially from the source rock of Enping Formation. (3) Wenchang 9-7 transfer slope zone has three stages of crude oil accumulation process. In the early Miocene (21-18.5 Ma), the transform fault controlled the migration and accumulation of crude oil generated by the source rocks of Wenchang Formation in the 9th sub-sag. In the middle Miocene (16-12 Ma), the adjustment fault caused the damage and adjustment of the early oil reservoirs, and controlled the migration and accumulation of crude oil generated by the source rocks of the Enping Formation in the 9th sub-sag. In the late Miocene-Pliocene (9-4.5 Ma), the crude oil generated by the source rock of the Enping Formation in the transfer slope zone was migrated and accumulated into reservoirs. The syndromic superimposed transfer zone has excellent reservoir forming conditions and is a key exploration area.

Key words: transfer slope zone; structural characteristic; tectonic evolution; reservoir-control mechanism; Wenchang A Sag

WANG Zhenzhen, First author: MSc, Engineer, mainly engaged in the comprehensive research of oil and gas geology. Add: Hainan Branch of CNOOC China Ltd, Yufu International Building, Xiuying District, Haikou, Hainan 570100, China