

塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系

邓尚^{1,2},李慧莉^{1,2},张仲培¹,吴鲜²,张继标¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要:选取位于塔里木盆地顺北及其邻区的托普39断裂体系,顺北1与顺北5断裂带为研究对象,通过对断裂活动特征和期次进行精细解剖,运用断裂力学对演化机制进行力学分析,并结合大量单井生产动态资料深入探讨了走滑断裂对油气富集的控制作用。研究表明,托普39断裂体系与顺北1、顺北5断裂带在几何学特征、运动学特征以及构造演化方面存在根本差异。NNE向托普39断裂带早期在共轭走滑状态下左行活动,晚期受最大主应力方向变化的控制,反转为右行走滑,而同体系中的NNW向次级断裂晚期几乎未活动。顺北5断裂(NNW-NS向)带先于NE向顺北1断裂形成,其构造演化经历了不同的应力环境和最大主应力方向的变化。托普39断裂带主活动期为喜马拉雅期,与油气成藏期匹配,控制了油气的富集,且叠接拉分段是更有利的富集部位。此外,基于对顺北1断裂带上多口井生产动态资料分析表明,油气在相对活动强的雁列正断层所对应的下伏走滑平移段和叠接拉分段富集程度更高。

关键词:断裂分段性;雁列正断层;断裂活动;油气富集;走滑断裂带;顺北地区;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin

Deng Shang^{1,2}, Li Huili^{1,2}, Zhang Zhongpei¹, Wu Xian², Zhang Jibiao¹

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Northwest Oilfield Branch Company Ltd., SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The faulting characters and evolution history of the Tuopu 39 fault system, and the Shunbei 1, Shunbei 5 fault zones, distributed in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin, were investigated in detail. Based on the analysis of fault evolution on mechanics and large amount of single-well production performance, we fully discussed the control of strike-slip faults on hydrocarbon enrichment. The integrated analyses reveal fundamental differences between the Tuopu 39 fault system and the Shunbei 1, Shunbei 5 fault zones in terms of geometries, kinematics, and structural evolution. The NNE-trending Tuopu 39 fault system experienced sinistral movement in conjugate strike-slipping state at the early stage, but turned to dextral strike-slipping at the late stage due to the change of the orientation of maximum principal stress. In comparison, the NNW-trending secondary faults inside the system were almost inactive. Shunbei 5 fault zone (NNW-NS-trending) formed ahead of the NE-trending Shunbei 1 fault zone and experienced different stress regimes and changes of the maximum principal stress orientation. The faulting movements of Tuopu 39 fault system in the late stage occur in Himalayan period, the same as hydrocarbon accumulation, thus control the hydrocarbon enrichment, particularly in the pull-apart areas along the fault zone. The analysis on multiple production wells on Shunbei 1 fault zone suggests that the underlying strike-slip fault segments and the juxtaposed pull-apart intervals corresponding to the en echelon normal faults of relative bigger intensity are more enriched in hydrocarbons.

Key words: fault segmentation, en echelon normal fault, fault movement, hydrocarbon enrichment, strike-slip fault zone, Shunbei area, Tarim Basin

收稿日期:2017-12-05;修订日期:2018-05-03。

第一作者简介:邓尚(1987—),男,博士、高级工程师,构造地质学。E-mail:shang_deng@126.com。

基金项目:中国石化科技部基础前瞻项目(P17045-5, G5800-17-ZSKJB047)。

近年来,塔里木盆地油气勘探在顺南与顺托地区相继实现突破,尤其是在顺北地区(图1)的重大油气发现,揭示了走滑断裂带对奥陶系碳酸盐岩具有明显的“控储、控藏、控富”作用^[1],塔里木盆地顺北及邻区也因此成为我国在西部原油增储上产的主要阵地之一。前人对顺南地区、顺托地区、哈拉哈塘地区和托普台等地区的断裂分层性、分段性、力学成因^[2-6]以及储层地震预测^[7-8]等方面开展了详尽的研究工作,但对顺北地区及邻区主干走滑断裂带几何学和运动学精细解析,多期活动差异性及其力学机制尚未见系统研究。本文选取顺北地区与托普台地区重点走滑断裂带为研究对象,解剖研究活动差异性,探讨其对油气富集的控制作用,旨在为深化认识该地区油气分布规律以及提高钻井成功率提供参考和借鉴。

1 地质背景

1.1 地质概况

顺北地区所在的顺托果勒低隆南北向位于塔中隆起和塔北隆起之间,东西向位于阿瓦提坳陷与满加尔坳陷之间,褶皱变形弱,是塔里木盆地相对稳定的古构造单元^[4]。基于前人对塔北隆起及其南坡与塔中隆起及其北坡的构造演化研究,顺北地区可能经历了至少4个构造演化阶段:加里东早期(寒武纪—中奥陶世)克拉通边缘拗拉槽与克拉通内弱伸展背景阶段、加里东中晚

期—海西早期(中奥陶世—中泥盆世)克拉通隆起形成演化与整体强烈挤压阶段、海西晚期—印支期(早二叠世—侏罗纪)塔北隆起持续抬升与挤压阶段和燕山期—喜马拉雅期古隆起与断裂调整定型阶段^[3,9-12]。

目前顺北地区勘探开发主要目的层为奥陶系一间房组和鹰山组上部碳酸盐岩。顺北地区奥陶系地层发育齐全,自下而上为下统蓬莱坝组(O_{1p}),中—下统鹰山组(O_{1-2y}),中统一间房组(O_{2yj}),上统恰尔巴克组(O_{3q})、良里塔格组(O_{3l})和桑塔木组(O_{3s})。若干钻井在钻进过程中均钻遇放空,表明储层类型为缝洞型,或为孔洞—裂缝型^[1,13]。与顺北地区相比,托普台地区因其位于隆起区,上奥陶统等层系遭受剥蚀更为强烈^[14]。

1.2 走滑断裂体系分布特征

对大量二维、三维资料的地震—地质解析表明,顺北及邻区主要发育有两大断裂体系。在塔中隆起北坡主要发育 NNE 向近平行走滑断裂体系,走向约为 NE30°^[1,4],局部同时发育 NEE 向次级走滑断裂^[15]。在塔北地区主要发育“X”型似共轭断裂体系,平面走向为 NNE 向和 NNW 向,呈菱形状相互交切,比如托普39断裂及其次级断裂体系(图1)。NE 向顺北1断裂和 NNW 向—NS 向顺北5断裂位于两大断裂体系过渡区域,已有研究认为北部“X”型断裂体系发育至顺北1断裂附近逐渐减弱并终止,且顺北5断裂东部和西部断裂在走向上呈现明显差异^[1,6]。

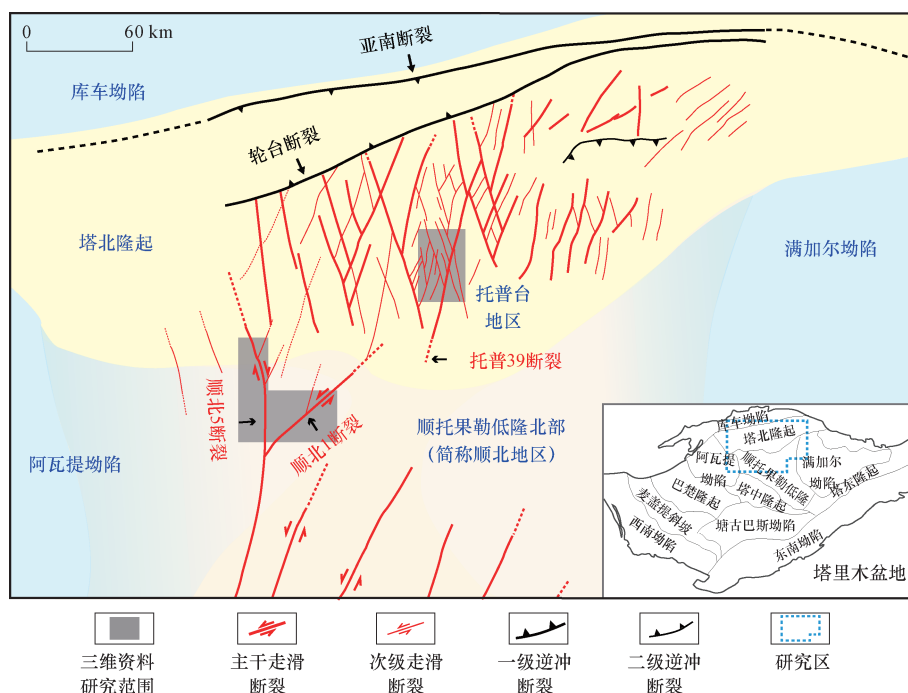


图1 塔里木盆地顺北及邻区下古生界主要断裂

Fig. 1 Distribution of major faults in the Lower Paleozoic of Shunbei area and its surroundings in Tarim Basin

2 主干走滑断裂带活动特征以及油气富集特征

经过对研究区三维地震资料进行处理并提取相干属性,结合多层位相干对托普39断裂体系、顺北1断裂带和顺北5断裂带的精细解析,明确了断裂的几何学特征与运动学特征,厘定了活动期次。此外,通过对断裂带上多口单井生产动态资料分析解剖,明确了不同断裂与油气富集的关系。

2.1 托普39断裂体系

2.1.1 几何学特征

托普39断裂体系在三维区内具有深、浅两种层次的分层特征(图2,图3)。深层构造样式在剖面上表现为高陡或直立走滑断裂,基于剖面精细解释,该构造样式在 T_5^6 界面(石炭系巴楚组顶面)以下地层发育(图3)。以 T_7^8 界面(奥陶系蓬莱坝组顶面)和 T_7^6 界面(奥陶系下鹰山组顶面)为例,该断裂体系在深层呈现出共轭特征^[16]:两组优势走向分别为 $NE22^\circ$ 和 $NW12^\circ$ (图2a,b)。剖面上,多数断裂发育在 T_8^0 界面和 T_7^0 界面之间,只有托普39断裂带等少数断裂(3, 6, 7, 10, 15号)断至基底(图3)。托普39断裂带在平面连续性强,截切多数与其相交的NW向次级断裂,且呈现出分段性,分段以右阶展布为主,分段间可发育拉分盆地,比如5号分段与6号分段之间的叠接区域(图2b)。

在 T_5^6 界面(石炭系巴楚组顶面)之上,浅层构造

表现为NE向雁列正断层,部分成对发育。在 T_4^6 界面(三叠系顶面),除雁列正断层外,还发育有弧形正断层(图2c),剖面上表现为地堑或半地堑(图3)。雁列正断层和弧形正断层展布方向与下伏走滑断裂(TP39断裂带深层构造)走向一致,上下叠置,剖面上构成“负花状”构造^[17]。该系列雁列正断层向上断穿 T_2^2 界面(古近系顶面)至第三系,其走向与下伏走滑断裂夹角约为 45° ,与深层基底走滑断裂不一定连接。

2.1.2 运动学特征

基于托普39断裂体系在深层呈现出的共轭特征,该体系NNE向断裂和NNW向断裂在形成初期应分别以左行走滑和右行走滑为主。托普39断裂带浅层发育的雁列正断层表现为左阶展布,指示右行走滑特征^[18]。该特点表明,托普39断裂带在演化过程中出现了滑移方向的反转,即早期左行走滑转变为晚期的右行走滑。除托普39断裂带外,NNW向断裂与其它NNE向次级断裂未发育明显浅层构造,说明在早期的共轭活动之后,晚期没有明显活动。

2.1.3 活动期次

前人多运用断距分析、雁列正断层生长指数方法识别走滑断裂带活动期次^[4,19]。本研究结合断裂不同构造样式发育层位以及不与整合面接触关系,识别出托普39断裂带3个阶段的多期活动。

第一阶段活动在加里东中期—海西早期,特征表现为共轭走滑状态下的多期活动。相比 T_7^8 界面和 T_7^0 界面,托普39断裂体系在 T_7^6 界面(奥陶系下鹰山组顶

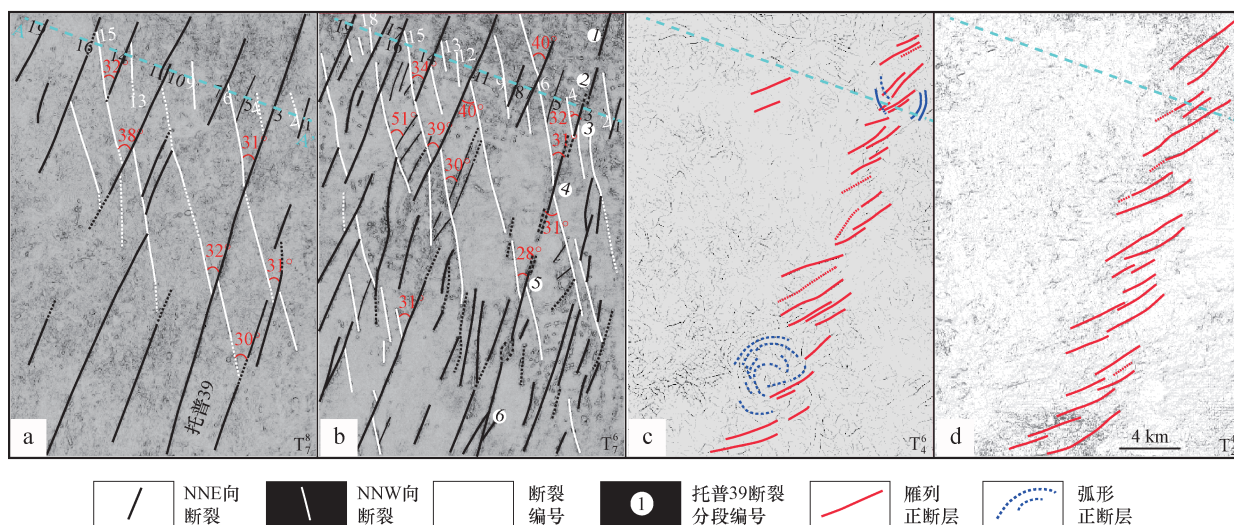


图2 塔里木盆地托普台地区托普39断裂体系多层位相干与断裂分布(三维资料研究范围见图1)

Fig. 2 Tuopu 39 fault array on the coherence slices of various reflecting interfaces in Tuoputai area, Tarim Basin (see Fig. 1 for the location of the 3D seismic acreage)

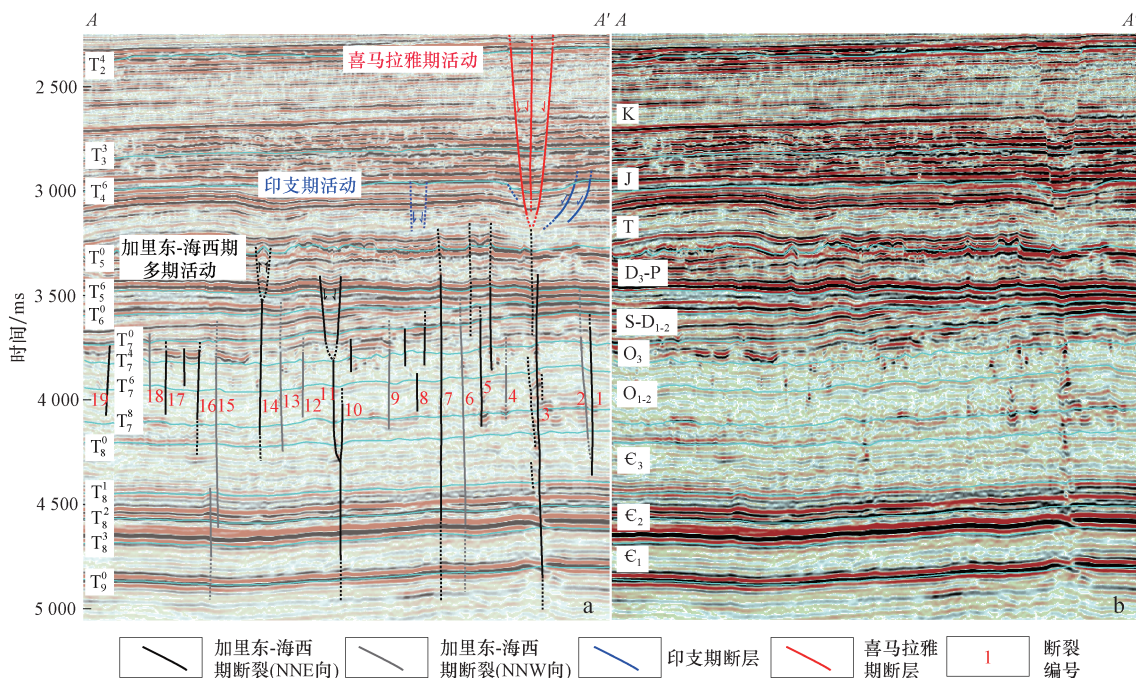


图3 塔里木盆地托普台地区托普39断裂体系典型剖面A-A'(剖面位置见图2)

Fig. 3 Representative 2D seismic section A-A' of the Tuopu 39 fault system in Tuoputai area, Tarim Basin (see Fig. 2 for the location of section A-A')

a. A-A'解释剖面; b. A-A'原始未解释剖面

面)更为发育(图2b),如不考虑地层能干性差异,可推断加里东中期(Ⅲ幕)为该断裂带在纯剪应力状态下的主活动期。加里东中期-海西早期是塔北南坡主要形成期,托普39断裂体系所在的哈拉哈塘邻区在该阶段发生大规模构造变形,遭受多次抬升剥蚀^[6],形成了 T_7^4 界面(奥陶系一间房组顶面), T_7^0 界面(奥陶系桑塔木组顶面), T_6^0 界面(泥盆系克孜尔塔格组顶面)等大范围岩溶、角度不整合面(图3)。

第二阶段活动在印支期,表现为沿托普39断裂带局部发育弧形正断层。该系列正断层多数断至 T_4^6 界面(三叠系顶面),造成地层明显下凹(图3)。整个哈拉哈塘地区在该时期剥蚀作用不强烈,三叠系稳定沉积,但在三叠纪末期经历了明显的小规模构造活动^[12],弧形正断层的形成可能与该构造活动有关。

第三阶段活动在喜马拉雅期,表现为上覆地层在深层走滑断裂再活动时引起的盖层变形,形成贯穿中生界地层的雁列正断层。该系列正断层与深层基底走滑断裂夹角约为 45° ,表明其在上覆地层中形成时深层走滑断面未受到垂直于断面的张应力作用,主要在剪切应力作用下活动^[20-21]。托普39断裂带在该阶段活动强度比上述第一、第二阶段活动强度大,早期左行活动特征被完全改造,其深层走滑分段现今的右行右阶展布方式(图2b)在该活动阶段形成,由此可判断喜马拉雅期是托普39断裂的主活动期。

2.1.4 油气差异富集特征

在托普39断裂体系所在区域共选取了51口单井进行分析,其中,12口井位于托普39断裂带叠接拉分段上,11口井位于其平移段上,9口井位于相邻NNE向次级断裂上,19口井位于相邻NNW向次级断裂上(图4a)。对单井资料运用箱线图分析表明,托普39断裂叠接拉分段累计产液量明显高于平移段,其次是相邻NNE向次级断裂,再次是相邻NNW向次级断裂(图4b)。因此,托普39断裂带相对相邻的次级断裂油气更富集,且拉分段是油气富集更有利部位。

2.2 顺北1与顺北5断裂带

2.2.1 几何学特征

顺北1与顺北5断裂带在三维区内同样具有深层与浅层分层变形的特征(图5,图6)。深层构造样式在剖面上表现为断入基底的高陡或直立走滑断裂,主要在 T_7^0 界面(上奥陶统桑塔木组顶面)以下地层发育(图6)。在 T_7^4 界面(中奥陶统一间房组顶面),顺北1与顺北5断裂带具有明显分段性。顺北1断裂带在三维区内可分为5段,总体走向约为 $NE40^\circ - NE45^\circ$,主要以左阶斜列展布(1~4号分段)。顺北5断裂在三维区内可分为12段,也主要以左阶斜列展布,其走向自北向南发生偏转,从 $NW20^\circ$ 偏转至近南北向

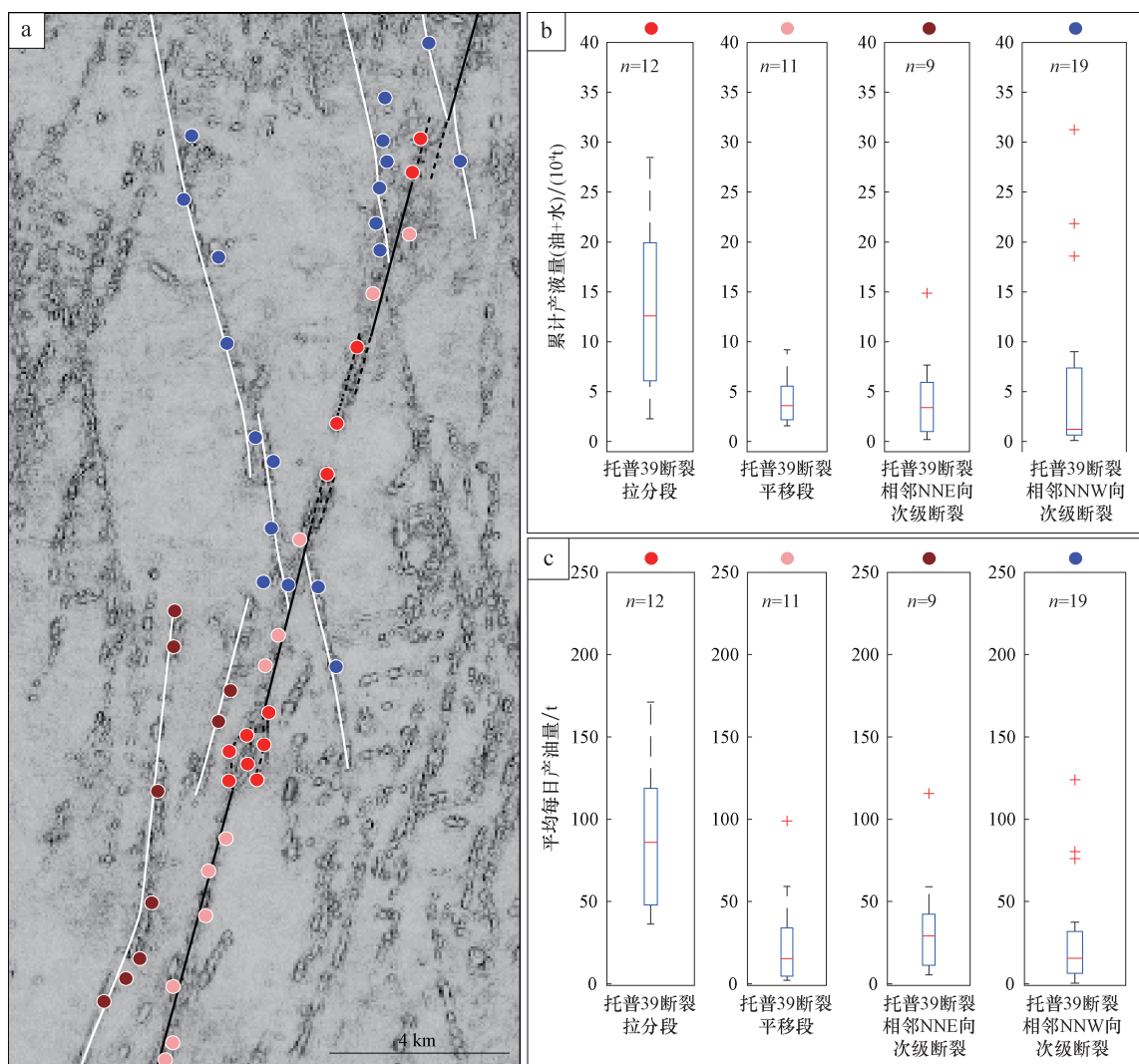


图4 塔里木盆地托普台地区托普39断裂与邻近次级断裂单井产能统计对比

Fig. 4 Comparison of single well production of Tuopu 39 fault system and its adjacent secondary faults in Tuoputai area, Tarim Basin

a. 托普39断裂与邻近次级断裂平面解释与井组分类; b. 不同类别井组累计产液量对比; c. 不同类别井组平均每日产油量对比

(图5a)。剖面上, 顺北1断裂带深层走滑断裂对同相轴不造成明显错断, 而顺北5断裂带深层走滑断裂明显错段同相轴, 局部可见串珠状强反射(图6)。

在 T_7^4 界面(中奥陶统一间房组顶面)之上, 浅层构造表现为雁列正断层。在 T_7^0 界面(上奥陶统桑塔木组顶面), 顺北1断裂带雁列正断层明显成对展布, 而顺北5断裂带只有部分成对发育。在 T_6^0 界面(中下泥盆统克孜尔塔格组顶面), 顺北5断裂带北部雁列正断层发育规模明显小于南部。雁列正断层展布方向和下伏走滑断裂走向一致, 上下叠置, 在剖面上表现为“负花状”构造, 但雁列正断层之间以及与深层基底走滑断裂不一定连接(图6)。顺北1与顺北5断裂带雁列正断层向上都断穿 T_5^6 界面(石炭系巴楚组顶面)(图6), 但雁列正断层走向与下伏走滑断裂夹角(雁列角)存在差异。顺北1断裂带雁列角约为 45° , 而顺北5断裂带雁列角明显小于 45° (图5b, c)。

2.2.2 运动学特征

根据走滑断裂分段侧接阶式和叠接区域应变类型可判断走滑断裂滑移方向^[22]。顺北1断裂带在 T_7^4 界面发育的左阶斜列展布分段间的叠接区域(1~4号)主要发育拉分盆地, 指示该系列走滑分段左行走滑(图5a')。顺北5断裂带在 T_7^4 界面发育的左阶斜列展布分段间的叠接区域主要发育隆起构造, 指示该系列走滑分段右行走滑(图5a'')。在 T_7^0 界面, 顺北1断裂带与顺北5断裂带雁列正断层分别以右阶和左阶方式展布, 分别指示左行和右行走滑特征(图5b), 而在 T_6^0 界面, 顺北1、顺北5断裂带雁列正断层都以右阶方式展布, 指示同为左行走滑(图5c)。

2.2.3 活动期次

结合不同构造样式揭示的不同古应力环境、发育

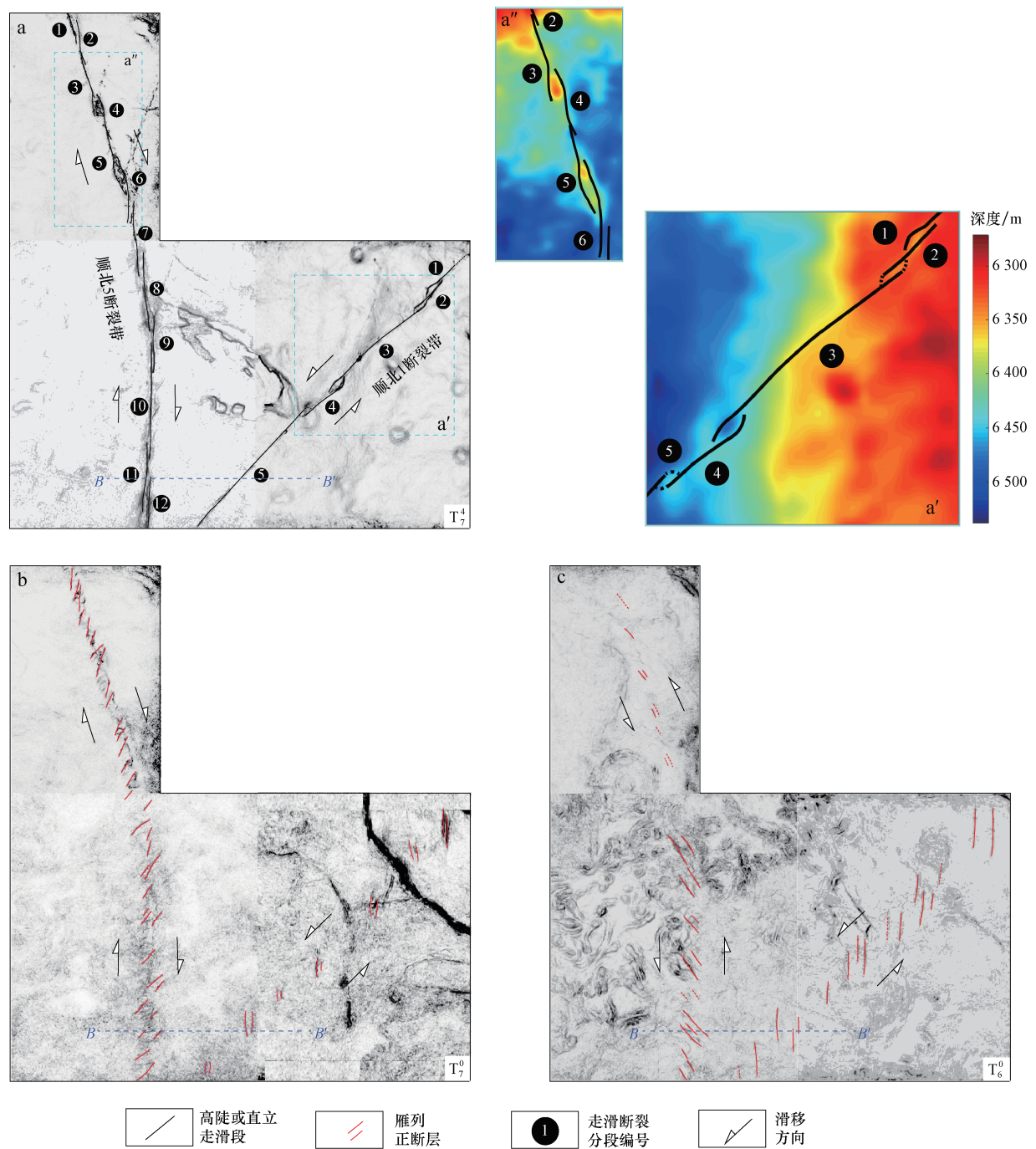


图 5 塔里木盆地顺北地区顺北 1 与顺北 5 断裂带多层位相干与断裂平面解释(三维资料研究范围见图 1)

Fig. 5 Coherence slices of various reflecting interfaces for Shunbei 1 and Shunbei 5 faults and planar interpretation of faults in Shunbei area, Tarim Basin, (see Fig. 1 for the location of the 3D seismic acreage)

a. 顺北 1、顺北 5 断裂带 T_7^4 界面断裂分段平面解释; b. 顺北 1、顺北 5 断裂带 T_7^0 界面雁列正断层平面解释;

c. 顺北 1、顺北 5 断裂带 T_6^0 界面雁列正断层平面解释

层位以及与不整合面接触关系,识别出顺北 1 与顺北 5 断裂带至少有三个阶段的活动。

第一阶段活动在加里东中期Ⅲ幕,表现为顺北 5 断裂带在 T_7^4 界面发育的左阶右行走滑分段,分段间多发育叠接隆起构造,且沿走滑平移段也有局部隆起特征,指示斜压(压扭)应力环境(图 6)。虽然该构造样式主要发育在 T_7^4 界面,但因叠接隆起构造同时造成了 T_7^4 界面以上以及 T_7^0 界面(加里东中期Ⅲ幕运动造成的不整合面)以下地层的隆起,且无明显角度不整合,所以该构造样式形成时期应在晚奥陶世,对应加里东中期Ⅲ幕构造运动。

第二阶段活动在加里东晚期,表现为上覆地层在

顺北5断裂带深层走滑断裂再活动时形成的雁列正断层以及顺北1断裂带深层走滑断裂与上覆雁列正断层的形成。顺北5断裂带在 T_7^0 界面发育的雁列正断层断至 T_6^3 界面(下志留统柯坪塔格组顶面)下方(图6),其雁列角多数小于 45° ,指示其在上覆地层中形成时深层走滑断裂除了受剪切应力作用外,还受到了垂直于断面的张应力作用(斜拉应力环境)^[20-21],说明其不在加里东中期Ⅲ幕的斜压应力环境中形成,推断在加里东晚期形成。与该系列雁列正断层类似,顺北1断裂带深层走滑断裂左阶左行活动,分段间多发育叠接拉分,且沿走滑平移段局部有下凹特征,该系列特征同样指示斜拉(张扭)应力环境,推断其也在加里东晚期形成。顺北1断裂带在 T_7^0 界面发育的雁列正断层雁列角约为 45° (图6),说明其在形成时下伏走滑断裂主要在剪切应力作用下活动。该系列雁列正断层错断 T_6^3 界面并在其紧邻上覆地层停止活动,发育层位与顺北5断裂带加里东晚期活动形成的雁列正断层类似,指示其同在加里东晚期形成。

第三阶段活动在海西中、晚期,表现为顺北1与顺北5断裂带深层走滑断裂再次活动而在上覆地层中再

次形成雁列正断层。该阶段形成的雁列正断层在 T_6^3 界面以上地层中发育并断穿 T_5^6 界面,部分疑似断入二叠系火成岩地层(图6)。顺北1与顺北5断裂带在该阶段同时表现为左行走滑活动(图5c)。

对比上述三个阶段的活动特征,顺北5断裂带深层走滑段现今的右行右阶展布方式在加里东中期Ⅲ幕活动时就已形成,顺北5断裂晚期活动虽然经历了滑移方向的反转,但其对深部走滑段改造程度低,由此可判断加里东中期Ⅲ幕为顺北5断裂带主活动期。顺北1断裂带在上述活动阶段始终保持左行走滑,其在加里东晚期活动强度大于海西中晚期活动强度(图6),因此,加里东晚期为顺北1断裂带主活动期。

在剖面上还可识别出在中下寒武统中发育并断穿 T_9^0 界面(震旦系顶面)的正断层,其与顺南地区早寒武世发育的正断层类似^[11],可能是加里东早期(寒武纪-中奥陶世)克拉通内弱伸展背景下形成的张性构造。此外,在三叠系也局部发育正断层,对应印支期断裂活动。因为该组正断层离散分布(图6),无法确定顺北1断裂带与5断裂带在该阶段有活动。

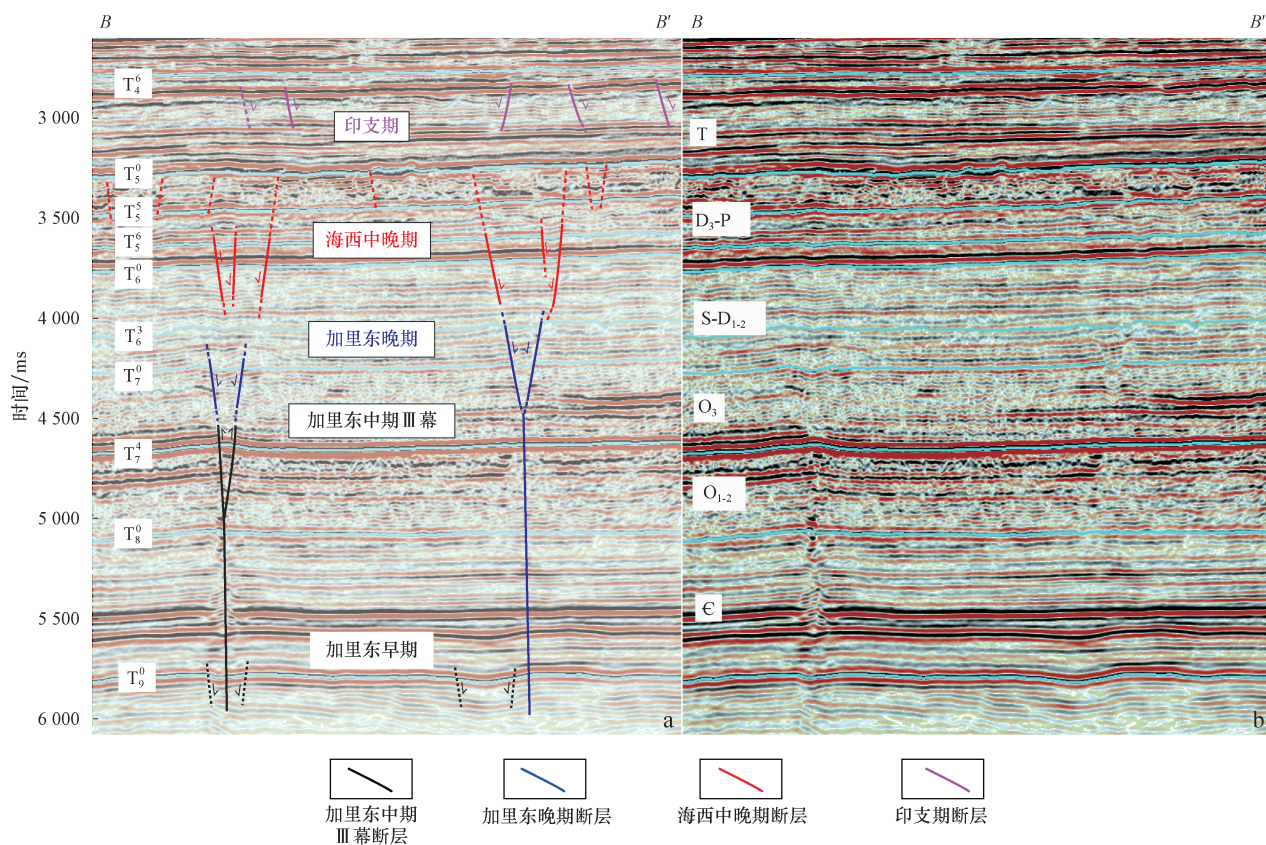


图6 塔里木盆地顺北地区顺北1、顺北5断裂带分层发育典型剖面 $B-B'$ (剖面位置见图5)

Fig. 6 Representative 2D seismic section $B-B'$ in Shunbei 1 and Shunbei 5 fault zones in Shunbei area, Tarim Basin (see Fig. 5 for the location of section $B-B'$)

a. $B-B'$ 解释剖面;b. $B-B'$ 原始未解释剖面

2.2.4 油气差异富集特征

顺北地区内目前建产井总体沿走滑断裂带分布,其中沿顺北1断裂已钻开发井均获得高产和稳产,但单位压降产油量有较大差异(图7)。比如,位于顺北1断裂带北段的X6井单位压降产油量甚至高于南部X1井与中部X3井单位压降产油量的总和(图7b)。因此,油气沿顺北1断裂带差异富集,断裂带北段富集程度相对好于南段。

3 讨论

3.1 走滑断裂差异活动动力学机制

托普39断裂体系在第一阶段共轭走滑活动时(图8a),依据库伦-安德森(Coulomb-Anderson)模型^[23],该阶段最大主应力方向应平分断裂共轭角,约为NE5°(图8b)。该主应力方向大致垂直于塔北隆起整体走向,进一步说明托普39断裂共轭体系的形成与塔北隆起隆升背景相关。根据Anderson断裂理论,最大主应力与共轭断裂夹角为 $45^\circ - \phi/2$ (ϕ 为内摩擦角),由此得出 ϕ 等于 56° ,内摩擦系数 μ ($\mu = \tan \phi$) 等

于1.48。这一数值在灰岩常见实测内摩擦系数范围内($0.5 \sim 1.8$)^[24-25]。依据摩尔-库伦准则,临界应力状态下的共轭断裂体系与主应力关系可用摩尔圆表示(图8c)。托普39断裂带在第三阶段的活动表现为雁列正断层(张性T破裂)在基底断裂上覆盖层中发育(图8d),符合简单剪切构造几何学模型^[26](图8e)。在喜马拉雅期,受印度板块和欧亚板块碰撞作用的影响,塔里木盆地整体受北东-南西方向水平挤压应力场控制^[27-28]。塔中地区现今地应力场分析表明,最大主应力方向为NE45°^[29],未发表数据同样显示托普台地区最大主应力方向也大致在NE45°。当最大主应力方向从NE5°旋转至NE45°,根据阿蒙顿摩擦定律(假设摩擦角 ϕ 等同于内摩擦角),NNE向断裂在破坏包络面以内,而NNW向断裂处在稳定的地应力状态,因此未活动。托普39断裂体系附近的其它共轭断裂体系,也具有NNE向断裂在喜马拉雅期再活动而NNW向断裂未活动的特征^[3,30],同样也受上述力学机制控制。

顺北1与顺北5断裂体系与托普39断裂体系存在显著差异。顺北5断裂带走向在三维区内有明显偏转,且进入塔中地区后可能进一步偏转至NNE走向(图1),其可能由先存的多组不同走向的高角度区域

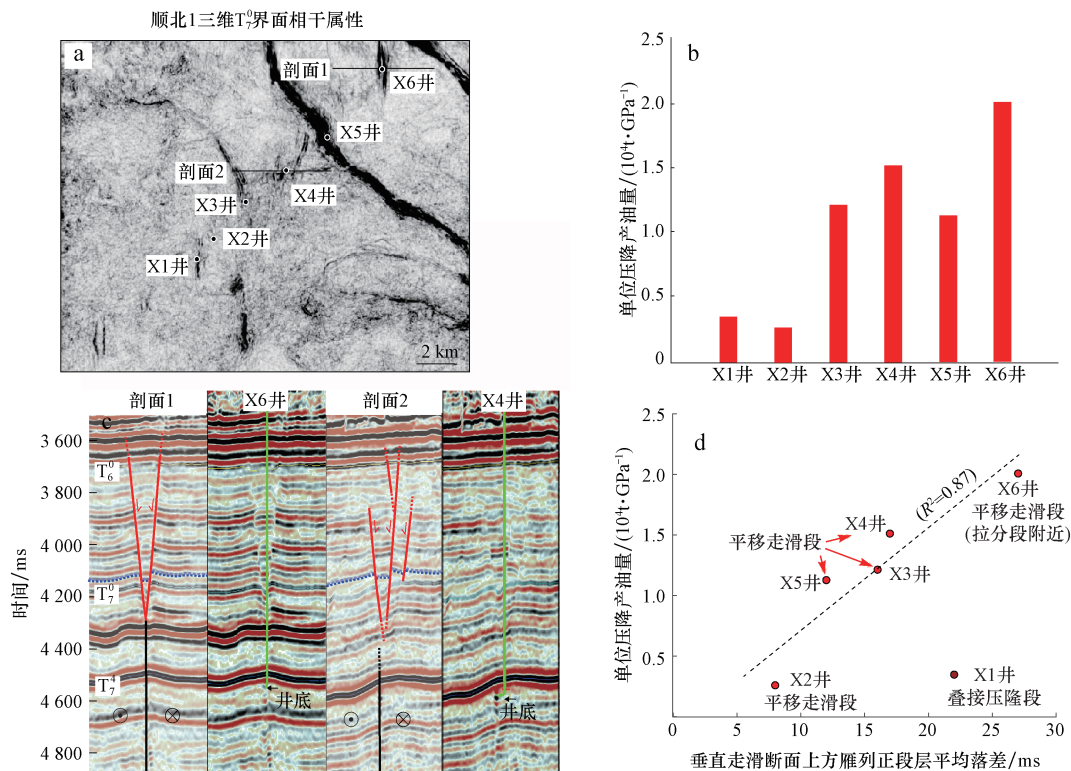


图7 沿塔里木盆地顺北地区顺北1断裂带单井产能以及雁列活动强度对比

Fig. 7 Single well production of Shunbei 1 fault zone in Shunbei area, Tarim Basin, and their cross-relationship with the vertical separation of the en echelon normal faults located right above

a. T₇⁴ 界面相干属性图与雁列正断层平面解释; b. 已钻井单位压降产油量对比; c. X6井与X7井雁列正断层剖面解释; d. 单井产能与雁列正断层平均落差交会图

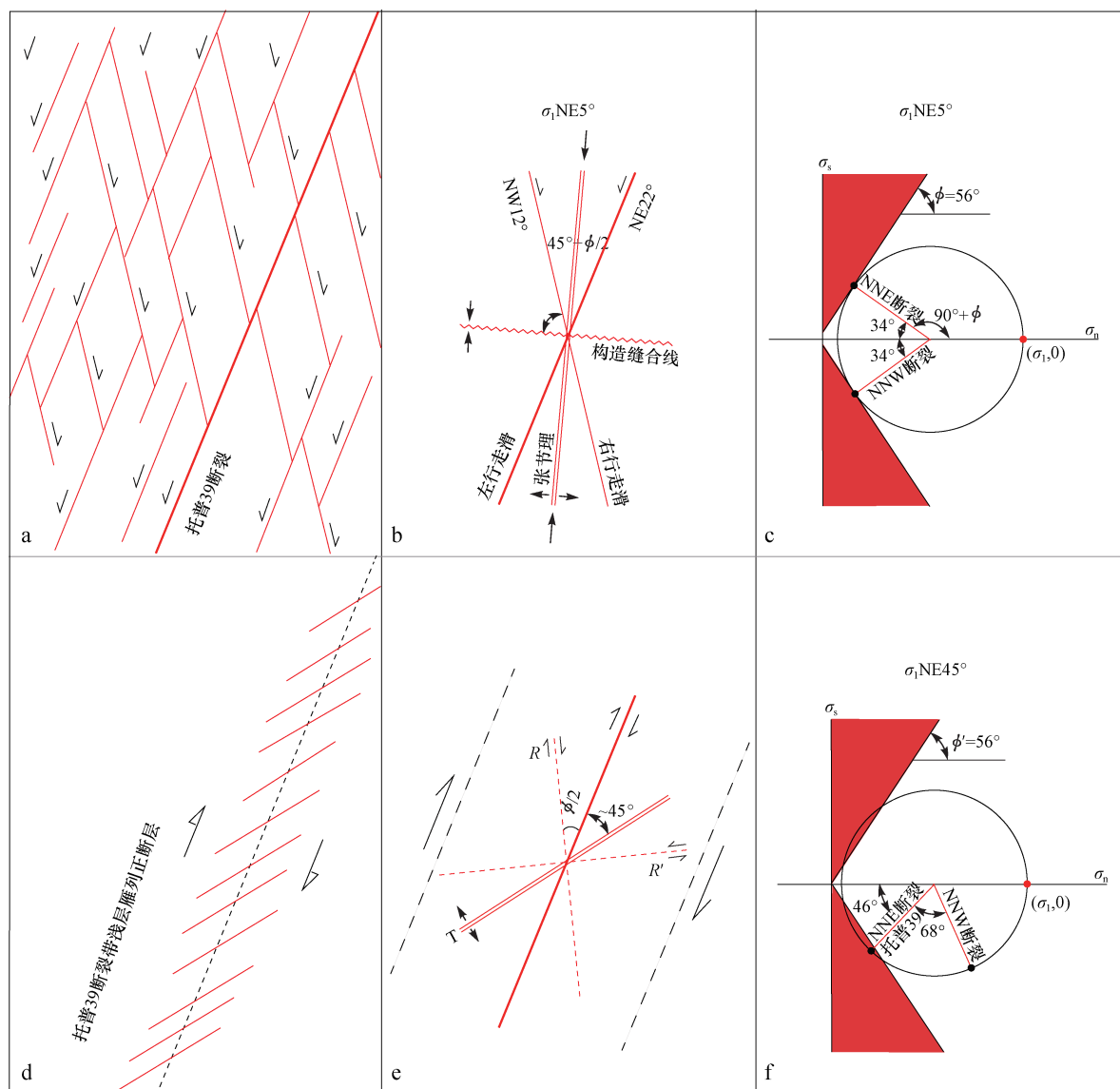


图8 塔里木盆地托普台地区托普39断裂体系差异活动力学机制

Fig. 8 Differential activity mechanics of the Tuopu 39 fault system in Tuoputai area, Tarim Basin

a. 托普39断裂体系简化几何学模型(T_1^6 界面); b. 库伦-安德森(纯剪切)构造几何学模型; c. 摩尔-库伦准则与临界应力状态下的共轭断裂体系; d. 托普39断裂浅层简化几何学模型(T_1^2 界面); e. 简单剪切构造几何学模型; f. 阿蒙顿摩擦定律与不同应力状态下的不同走向断裂

节理在加里东中期Ⅲ幕的斜压应力环境中右行活动拼接而成,最大主应力方向应为NNE向或NE向。加里东晚期,顺北1断裂带深层走滑断裂在斜拉应力环境中形成并左行活动,顺北5断裂带在同样的应力环境中右行活动,说明该时期最大主应力方向在两条断裂锐夹角内分布,即NNE向。海西中、晚期,顺北1断裂带与顺北5断裂带同时左行活动,说明最大主应力方向偏转至NNW向,此时最大主应力与顺北5断裂带三维区内NNW段小角度相交或近似平行,所以该段剪切活动弱,形成的雁列正断层发育规模小,其雁列角小于 10° ,指示该阶段最大主应力方向与深层走滑断裂近似平行^[31]。

综上所述,顺北1断裂带与顺北5断裂带的构造演

化经历了不同的应力环境与主应力方向的变化,与托普39断裂体系的早期共轭走滑活动以及晚期差异活动在力学机制与演化过程上有根本差异,该差异应该受塔北-塔中区域构造演化以及边界条件差异的控制。

3.2 走滑断裂差异活动对油气差异富集的控制作用

前人对托普台地区邻区(跃参区块)走滑断裂控藏机制的研究表明,NNE向主干断裂因其与轻质油气在喜马拉雅期充注方向一致,是油气运移的主要通道,因此高产、稳产井均分布在NNE向主干断裂带附近,而NW向次级走滑断裂带上油气充注程度低^[12]。本研究对托普39断裂带活动期次与力学机制的分析表明,托普39断裂带主活动期为喜马拉雅期,与主成藏

期匹配,因而油气充注强,油气沿托普39断裂优势富集,叠接拉分段相比平移段对碳酸盐岩储层改造程度更高^[32],因此是更有利的富集部位。相邻的NNE向与NNW向次级断裂在新生界中未形成明显的雁列正断层(图2,图8),未见明显活动特征,因此油气充注弱,富集程度低。

顺北1断裂带开发井组都钻入奥陶系一间房组,其中,X1井位于叠接压隆段上,其余井都位于平移走滑段上(图7d),X6井紧邻叠接拉分段。顺北1断裂带成对发育的雁列正断层在 T_7^0 界面呈现出活动强度的差异,比如X6井井底上方的雁列正断层对 T_7^0 界面及其上方黑相位造成的平均落差明显高于其它雁列正断层,其相对较大的活动强度同时也体现在相干属性图上(图7a)。基于对6口井上方正断层平均落差的测量(图7c),并结合单井单位压降产油量进行交会分析表明,除位于叠接压隆段的X1井外,其它单井井底上方雁列正断层活动强度与单位压降产油量成正比关系(图7d)。前人对走滑断裂活动机理的研究表明,走滑断裂带雁列正断层的活动强度可用来指示深部走滑段活动强度^[18,31,33]。由此可见,深层走滑段上覆雁列正断层活动越强,对应的深部走滑断裂对储层改造程度越高,规模性储集体越发育,油气在相应部位更富集。虽然X1井井底上方雁列正断层活动强,但单井产能低于大部分其它井,说明叠接压隆段富集程度低于平移走滑段和叠接拉分段。

4 结论

1) 塔里木盆地顺北及邻区发育的托普39断裂带和顺北1、顺北5断裂带在三维区内都具有深、浅两种层次的分层特征。深层构造样式在剖面上表现为高陡或直立走滑断裂,浅层表现为雁列正断层。深层走滑断裂在 T_4^1 界面具有明显分段性,托普39断裂带分段右阶展布,分段间主要发育叠接拉分,而顺北1与顺北5断裂带分段左阶展布,分段间分别发育叠接拉分和叠接隆起。

2) 托普39断裂体系至少经历了3个阶段的活动,分别是加里东中期-海西早期多期活动、印支期活动以及喜马拉雅期活动。托普39断裂作为NNE向主干断裂,早期在共轭走滑状态下左行活动,晚期反转为右行走滑,而同体系中的NNW向次级断裂晚期几乎未活动。断裂力学分析表明,该断裂体系的差异活动受最大主应力方向的控制。

3) 顺北1和顺北5断裂带至少经历了3个阶段的

活动,分别是加里东中期Ⅲ幕、加里东晚期以及海西中、晚期。顺北5断裂带先于顺北1断裂带在加里东中期Ⅲ幕形成,两者的构造演化经历了不同的应力环境和最大主应力方向的变化,与托普39断裂体系中NNE与NNW向断裂早期的共轭活动在力学机制上存在根本差异。

4) 结合托普39断裂体系、顺北1断裂带单井动态资料与断裂活动强度的关系研究表明,主活动期与油气成藏期匹配的主干断裂带是油气富集的更有利部位。此外,深层走滑段上覆雁列正断层活动越强,对应的深部平移走滑段和叠接拉分段对储层改造程度越高,油气在相应部位更富集。

参 考 文 献

- [1] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207-216.
Jiao Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207-216
- [2] 邬光辉, 杨海军, 屈泰来, 等. 塔里木盆地塔中隆起断裂系统特征及其对海相碳酸盐岩油气的控制作用[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 87-99.
Wu Guanghui, Yang Haijun, Qu Tailai, et al. The fault system characteristics and its controlling roles on marine carbonate hydrocarbon in the Central uplift, Tarim basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 793-805.
- [3] 马德波, 何登发, 陶小晚, 等. 塔北哈拉哈塘地区剪切断裂系统构造特征及其对油气分布的控制[J]. 地质科学, 2016, 51(2): 470-483.
Ma Debo, He Dengfa, Tao Xiaowan, et al. Structural features of shear fault system and its control on hydrocarbon distribution in Halahatang area, North Tarim Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2016, 51(2): 470-483.
- [4] 李萌, 汤良杰, 李宗杰, 等. 走滑断裂特征对油气勘探方向的选择——以塔中北坡顺1井区为例[J]. 石油实验地质, 2016, 38(11): 113-121.
Li Meng, Tang Liangjie, Li Zongjie, et al. Fault characteristics and their petroleum geology significance: A case study of well Shun-1 on the northern slope of the central Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(1): 113-121.
- [5] Han X, Deng S, Tang L, et al. Geometry, kinematics and displacement characteristics of strike-slip faults in the northern slope of Tazhong uplift in Tarim Basin: A study based on 3D seismic data [J]. Marine & Petroleum Geology, 2017, 88: 410-427.
- [6] 吕海涛, 张哨楠, 马庆佑. 塔里木盆地中北部断裂体系划分及形成机制探讨[J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 444-452.
Lu Haitao, Zhang Shaonan, Ma Qingyou. Classification and formation mechanism of fault systems in the central and northern Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(4): 444-452.
- [7] 客伟利, 张光亚, 潘文庆, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区奥陶系一间房组岩溶储集层地震识别与控制因素[J]. 古地理论, 2014, 16(1): 125-132.

- Ke Weili, Zhang Guangya, Pan Wenqing, et al. Seismic identification and controlling factors on karsted carbonate reservoir for Yijianfang Formation of Ordovician in Hanikatan area of Tarim Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(1): 125–133.
- [8] 刘军, 任丽丹, 李宗杰, 等. 塔里木盆地顺南地区深层碳酸盐岩断裂和裂缝地震识别与评价[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(4): 703–710.
- Liu Jun, Ren Lidian, Li Zongjie, et al. Seismic identification and evaluation of deep carbonate faults and fractures in Shunnan area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(4): 703–710.
- [9] 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 塔里木盆地克拉通内古隆起的成因机制与构造类型[J]. *地学前缘*, 2008, 15(2): 207–221.
- He Dengfa, Zhou Xinyuan, Yang Haijun, et al. Formation mechanism and tectonic types of intracratonic paleo-uplifts in the Tarim Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2): 207–221.
- [10] 安海亭, 李海银, 王建忠, 等. 塔北地区构造和演化特征及其对油气成藏的控制[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 142–147.
- An Haiting, Li Haiyin, Wang Jianzhong, et al. Tectonic evolution and its controlling on oil and gas accumulation in the northern Tarim Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 142–147.
- [11] 黄太柱. 塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3): 257–267.
- Huang Taizhu. Structural interpretation and petroleum exploration targets in northern slope of middle Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(3): 257–267.
- [12] 李萌, 汤良杰, 漆立新, 等. 塔北隆起南坡差异构造演化及其对油气成藏的控制[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(2): 218–227.
- Li Meng, Tang Liangjie, Qi Lixin, et al. Differential tectonic evolution and its controlling on hydrocarbon accumulation in the south slope of Tabei Uplift [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(2): 218–227.
- [13] 田鹏, 马庆佑, 吕海涛. 塔里木盆地北部跃参区块走滑断裂对油气成藏的控制[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(2): 156–161.
- Tian Peng, Ma Qingyou, Lv Haitao. Strike-slip faults and their controls on hydrocarbon reservoirs in the Yuecan block of the Northern Tarim Uplift, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(2): 156–161.
- [14] 孟祥霞, 王宏斌, 姚清洲, 等. 塔北隆起构造演化特征及对奥陶系碳酸盐岩的控储控藏作用[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(S1): 109–120.
- Meng Xiangxia, Wang Hongbin, Yao Qingzhou, et al. Tectonic evolution characteristics of Tabei Uplift and its controlling effect on the reservoir and hydrocarbon accumulation of Ordovician carbonate [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26: 109–120.
- [15] 杨圣彬, 刘军, 李慧莉, 等. 塔中北围斜区北东向走滑断裂特征及其控油作用[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(6): 797–802.
- Yang Shengbin, Liu Jun, Li Huili, et al. Characteristics of the NE-trending strike-slip fault system and its control on oil accumulation in north peri-cline area of the Tazhong paleoupift [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(6): 797–802.
- [16] Fossen H. *Structural Geology* [M]. New York: Cambridge University Press, 2010: 1–4.
- [17] Harding T P. Seismic characteristics and identification of negative flower structures, positive flower structures, and positive structure-inversion [J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(4): 582–600.
- [18] Sylvester A G. Strike-slip faults [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100(100): 1666–1703.
- [19] 吴斌, 何登发, 孙方源. 塔里木盆地古城低凸起下古生界的断裂特征及成因机制[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(5): 871–879.
- Wu Bin, He Dengfa, Sun Fangyuan. Fault characteristic and genetic mechanism of the Lower Paleozoic in Gucheng Lower Uplift, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 26(5): 871–879.
- [20] Ramsay J G. Shear zone geometry: A review [J]. *Journal of Structural Geology*, 1980, 2(1): 83–99.
- [21] Olson J E, Pollard D D. The initiation and growth of en échelon veins [J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13(5): 595–608.
- [22] Aydin A, Nur A. The types and role of stepovers in strike-slip tectonics [J]. *Special Publications*, 1985: 35–44.
- [23] Anderson B E M. The dynamics of faulting [M]. Edinburgh, United Kingdom: Oliver and Boyd, 1951: 1–206.
- [24] Carmichael R. *Handbook of physical properties of rocks* [M]. Florida, United States: CRC Press, 1983.
- [25] Zoback M D. *Reservoir geomechanics* [M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2010: 1–499.
- [26] Aydin A, Page B M. Diverse Pliocene-Quaternary tectonics in a transform environment, San Francisco Bay region, California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, 95(11): 1303–1317.
- [27] Sobel E R, Dumitru T A. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim basin during the India-Asia collision [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, 102(102): 5043–5063.
- [28] Gan W, Zhang P, Shen Z K, et al. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, B08416. Doi: 10.1029/2005.SB004120.
- [29] Yin S, Ding W, Zhou W, et al. In situ stress field evaluation of deep marine tight sandstone oil reservoir: A case study of Silurian strata in northern Tazhong area, Tarim Basin, NW China [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2017, 80: 49–69.
- [30] 孙东, 杨丽莎, 王宏斌, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区走滑断裂体系对奥陶系海相碳酸盐岩储层的控制作用[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(s1): 80–87.
- Sun Dong, Yang Lisha, Wang Hongbin, et al. Strike-slip fault system in Halahatang area of Tarim Basin and its control on reservoirs of Ordovician marine carbonate rock [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(S1): 80–87.
- [31] Naylor M A, Mandl G, Suppe F J. Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states [J]. *Journal of Structural Geology*, 1986, 8(7): 737–752.
- [32] 任健, 官大勇, 陈兴鹏, 等. 走滑断裂叠置拉张区构造变形的物理模拟及启示[J]. *大地构造与成矿学*, 2017, 41(03): 455–465.
- Ren Jian, Guan Dayong, Chen Xingpeng, et al. Analogue modeling of structural deformation in releasing stepovers of strike-slip faults and its significance [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2017, 41(03): 455–465.
- [33] Shang Deng, Li Huili, Zhang Zhongpei, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2018 (in press).