

塔里木盆地顺北5号走滑断裂中段活动特征 及其地质意义

邓尚^{1,2},李慧莉^{1,2},韩俊²,崔德育³,邹榕²

(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;

3. 中国石油塔里木油田分公司,新疆库尔勒 841000)

摘要:塔里木盆地顺北5号走滑断裂(简称顺北5断裂)是一条贯穿塔北隆起、顺托果勒低隆以及塔中隆起的断裂带,可识别长度长达270 km,是目前顺北及邻区已知最长的克拉通内走滑断裂带。基于顺北5号断裂走向总体变化特征,可将其分为三段:北段(走向约NW20°)、中段(走向为近南北向-NE10°)和南段(走向约NE20°)。顺北5号断裂中段(NE10°部分)主活动阶段为加里东中期Ⅲ幕与加里东晚期,形成的深层压脊构造与中层地堑构造分别指示斜压(压扭)应力环境与伸展应力环境。顺北5号断裂中段浅层雁列正断层控制了志留系碎屑岩(砂岩段、泥岩段)裂缝-洞穴型储集空间的发育,雁列正断层破碎带在断层上、下盘发育具有不对称性。顺北5号断裂带北段与中段滑移距分布具有“两头大,中间小”的特征,同时北段与中段也具有显著不同的几何学与运动学特征,说明在构造演化初期形成于不同体系的断层在后期逐段拼接,形成了顺北5号断裂现今贯穿塔北隆起、顺托果勒低隆以及塔中隆起的展布格局。

关键词:地堑;志留系碎屑岩;滑移距;走滑断裂;顺北及邻区;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Characteristics of the central segment of Shunbei 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin and its geological significance

Deng Shang^{1,2}, Li Huili^{1,2}, Han Jun², Cui Deyu³, Zou Rong²

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

2. SINOPEC-Northwest, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3. Tarim Oilfield Company Ltd., PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: The Shunbei 5 fault zone is known so far as the longest intracratonic strike-slip fault zone in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin. With a length of 270 km identified by both 2D and 3D seismic data, the Shunbei 5 fault zone is characterized by a long fault trace running through the Tabei uplift, Shuntuoguole low uplift and Tazhong uplift. Based on the overall change of fault strike, the Shunbei 5 fault zone can be divided into three segments: the northern segment (trending approximately NW20°), the central segment (trending nearly NS, i. e. NE10°) and the southern segment (trending approximately NE20°). The main faulting of the central segment (the part trending NE10°) of the Shunbei 5 fault zone occurred in the 3rd episode of the middle stage of the Caledonian and the Late Caledonian, when the deep ridge-like structures and medium-deep grabens were formed under transpressional and extensional stress regimes, respectively. The shallow en echelon normal faults in the central segment of Shunbei 5 fault zone controlled the formation of reservoir space of fracture-cavity type in the Silurian clastic strata (namely sandstone and mudstone intervals). The fractured zones were developed in an asymmetric pattern in the hanging wall and footwall of the en echelon normal faults. The measured displacements of the northern and central segments of the Shunbei 5 fault zone are characterized by “longer at both ends and shorter in the center”. Furthermore, the northern and central segments also remarkably differ in both geometries and kinematics, suggesting that Shunbei 5 fault zone was formed through the linking of various faults developed in different fault systems in early tectonic evolution.

Key words: graben, Silurian clastic rock, displacement, strike-slip fault, Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin

收稿日期:2018-10-18;修订日期:2019-05-21。

第一作者简介:邓尚(1987—),男,博士、高级工程师,构造地质学。E-mail: dengshang.syky@sinopec.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,随着塔里木盆地油气勘探在顺北地区特深碳酸盐岩领域获得重大油气突破,揭示了顺北地区及邻区发育的克拉通内中小滑移距走滑断裂体系对奥陶系碳酸盐岩具有明显的“控储、控藏、控富”作用^[1-5]。在塔北隆起、塔中隆起以及该两大隆起之间的顺托果勒低隆,通过新的地震资料识别出顺北5号断裂(简称顺北5断裂)是一条贯穿南北的主干走滑断裂带,且在其东西两侧发育有不同走向的走滑断裂体系^[6]。新的钻井资料揭示,顺北5断裂不仅控制了中下奥陶统碳酸盐岩地层中孔洞-裂缝型储集体的发育^[1],位于顺北5断裂上的单井在志留系碎屑岩地层(砂岩段、泥岩段)中同样钻遇了漏失与放空。前人针对顺北5断裂位于顺北地区北部部分的分层性、分段性、滑移距^[4]以及储层预测^[7]等方面开展了详尽的研究工作,但对顺北5断裂整体展布特征,不同分段几何学、运动学特征以及活动差异性尚未见系统研究。此外,对于顺北5断裂对志留系碎屑岩储集空间发育的控制作用也未见系统性分析。本文选取顺北5断裂中段为研究对象,解剖研究活动特征,对比其与北段活动差异性,分析其对志留系碎屑岩储集空间发育的控制作用,旨在为深化认识顺北地区走滑断裂控储作用以及断裂体系成因机制提供参考和理论依据。

1 地质背景

1.1 区域地质概况

塔里木盆地顺托果勒低隆北邻塔北隆起,南接卡塔克隆起,东西向位于阿瓦提拗陷与满加尔拗陷之间,是相对稳定的古构造单元^[8]。顺北地区位于顺托果勒低隆北部,该地区下古生界发育完整的生-储-盖组合,多期活动的走滑断裂体系为该地区油气运移、聚集与富集提供了优越的石油地质条件,沿断裂带部署的多口探井均获得高产油气流,揭示了顺北油气藏的存在^[1,3]。

顺托果勒低隆经历了多阶段的构造演化活动。加里东早期(寒武纪—中奥陶世),顺托果勒地区处于克拉通内弱伸展背景阶段,该地区经历了区域性稳定构造沉降。加里东中期(奥陶纪),顺托果勒地区处在克拉通隆起形成演化与整体挤压阶段,在加里东中期Ⅲ幕(晚奥陶世末),顺托果勒低隆南北侧的塔中隆起与塔北隆起形态全面形成,整体挤压状态一直持续到加里东晚期—海西早期(志留纪—泥盆纪)。海西中—晚期(石炭纪—二叠纪),随着塔北隆起持续抬升,顺托果勒低隆也进一步抬升;印支期—燕山期(三叠纪—

白垩纪),顺托果勒地区持续埋深,至喜马拉雅期形成现今格局并定型^[9-13]。

顺北地区下古生界发育相对齐全,奥陶系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})。志留系自下而上为下统柯坪塔格组(S_{1k}),下统塔塔埃尔塔格组(S_{1t}),中统依木干他乌组(S_{1y}),泥盆系发育中下统克孜尔塔格组(D_{1-2k}),上统东河塘组(D_3d)。目前顺北地区勘探开发主要目的层系为奥陶系一间房组和鹰山组上部碳酸盐岩,已知储层类型以孔洞-裂缝型为主,断裂-裂缝体系相关构造破裂作用是储层发育的主控因素^[3]。

1.2 走滑断裂体系分布及活动特征

顺北地区及邻区发育多个走滑断裂体系^[6]。在塔北地区主要发育 NNE—NNW 向“X”型似共轭断裂体系(图1),该体系中具有代表性的 NNE 向主干断裂带(托普39断裂)早期(加里东中期—海西早期)在共轭走滑状态下左行活动,受最大主应力方向的控制,晚期(喜马拉雅期)反转为右行走滑,而同体系中的 NNW 向断裂晚期几乎未活动^[4]。在塔中隆起北坡地区主要发育 NNE 向近平行走滑断裂体系(图1),走向约为 NE30°,该体系大致在加里东中期Ⅲ幕左行走滑,之后在加里东晚期—海西早期再度左行活动^[2]。在顺托果勒低隆中部地区发育顺北1断裂、顺北5断裂体系,以北的“X”型断裂体系发育至顺北1断裂附近逐渐减弱并终止。顺北5断裂东部和西部断裂在走向上呈现明显差异(图1),就断裂差异分区活动而言,在顺北地区可被认为是一条分割东部 NNE 体系与西部 NNW 体系的断裂带(图1)。顺北5断裂先于顺北1断裂带在加里东中期Ⅲ幕形成,在加里东晚期以及海西中晚期再活动,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—NNW 向断裂在活动机制上存在根本差异^[4]。

1.3 顺北5断裂展布与分段特征

随着顺北5井的部署与油气突破^[3,7],二维和三维地震新资料的采集以及地震地质综合解释揭示顺北5断裂是一条贯穿塔北隆起、顺托果勒低隆以及塔中隆起的主干断裂带(图1)。基于已采集的二维和三维地震资料,顺北5断裂可识别长度约为 270 km,断裂走向自北向南整体发生了约 40°的偏转:在塔北隆起走向大致为 NW20°,在顺托果勒低隆走向大致为 NE10°,在塔中隆起走向大致为 NE20°。基于顺北5断裂走向

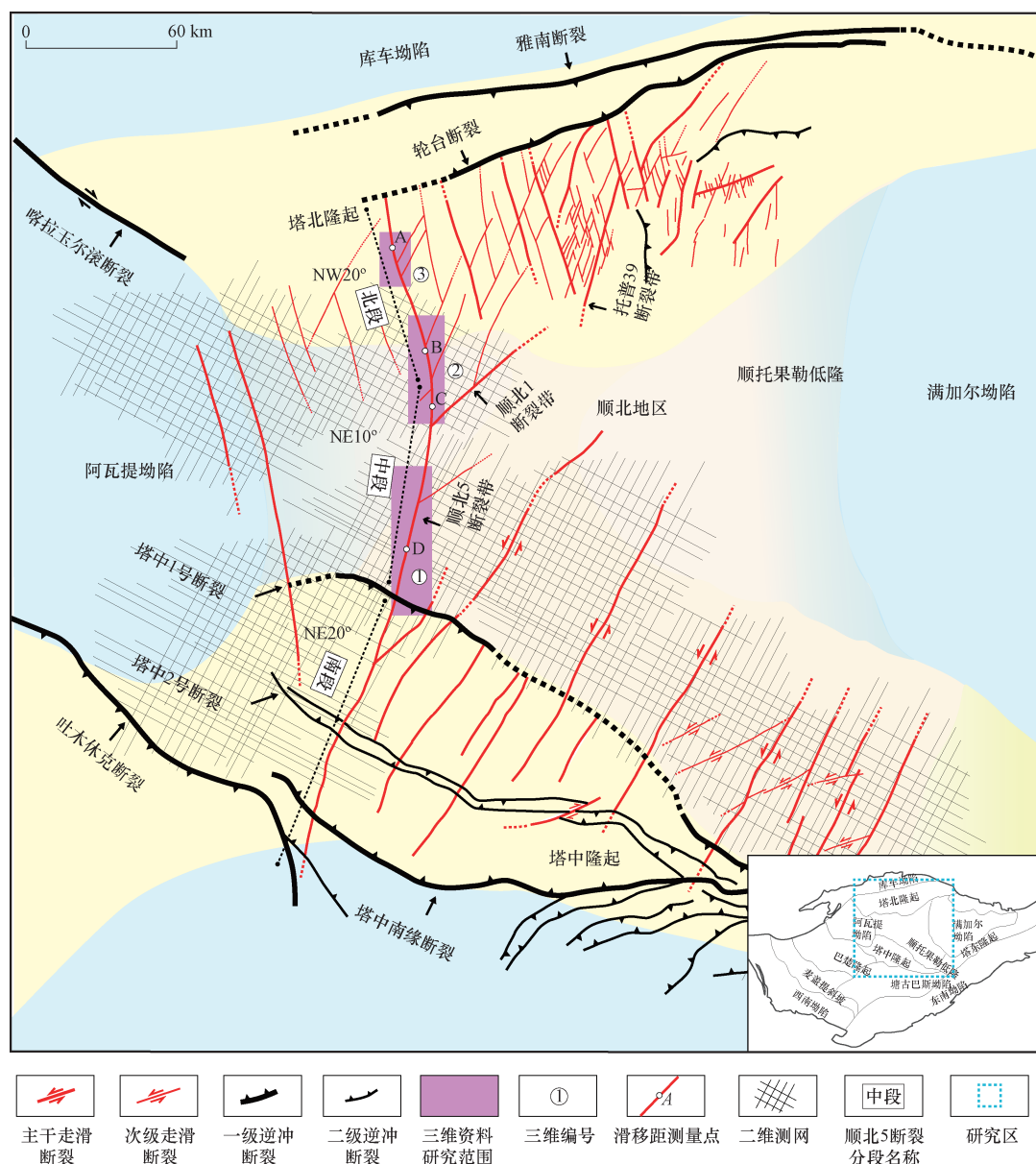


图1 塔里木盆地顺北地区及邻区下古生界主要断裂分布

Fig. 1 A map showing the distribution of major faults in the Lower Paleozoic in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin

变化特征,可将其总体分为三段(图1),即北段(走向大致为NW20°)、中段(走向为近南北向-NE10°)和南段(走向大致为NE20°)。目前已有三维地震资料(1号三维与2号三维南部)覆盖了顺北5断裂中段主体部分(图1),2号三维与3号三维覆盖了北段主体部分,其中针对2号三维已有断裂活动特征精细解析^[4]。

2 顺北5断裂中段活动特征以及雁列正断层控储特征

本研究主要针对1号三维进行精细解析,明确了顺北5断裂在该三维区内的几何学与运动学特征,厘定了活动期次,并与顺北5断裂在2号三维内的活动

特征进行了对比。此外,通过对2号三维断裂带上多口单井志留系放空漏失资料进行分析解剖,明确了顺北5断裂雁列正断层对志留系碎屑岩(砂岩段、泥岩段)储集空间发育的控制作用。

2.1 几何学特征

顺北5断裂在1号三维区(图1)走向约为NE10°,具有深层、中层与浅层分层变形特征(图2,图3)。深层构造样式在剖面上表现为断入基底的陡倾走滑断裂,主要在 T_7^4 界面(中奥陶统一间房组顶面)及下伏地层发育。该构造样式在 T_7^4 界面表现为沿断裂走向整段隆起,类似走滑断裂压脊(pressure-ridge)构造^[5,14]。中层构造样式在剖面上表现为断穿 T_7^4 界面,并断入寒

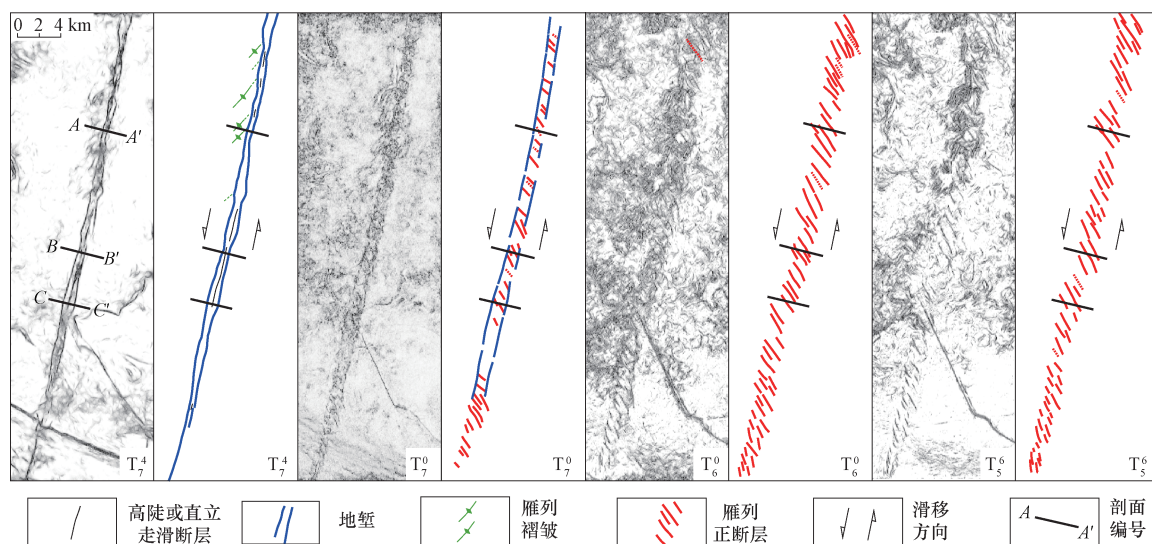


图2 塔里木盆地顺北5号断裂带中段1号三维多层位相干与断裂解释(三维资料研究范围见图1)

Fig. 2 Coherence slices of various reflecting interfaces and fault interpretations of the No. 1 seismic survey covering the central segment of Shunbei 5 fault zone in the Tarim Basin (See Fig. 1 for the location of the No. 13D seismic acreage)

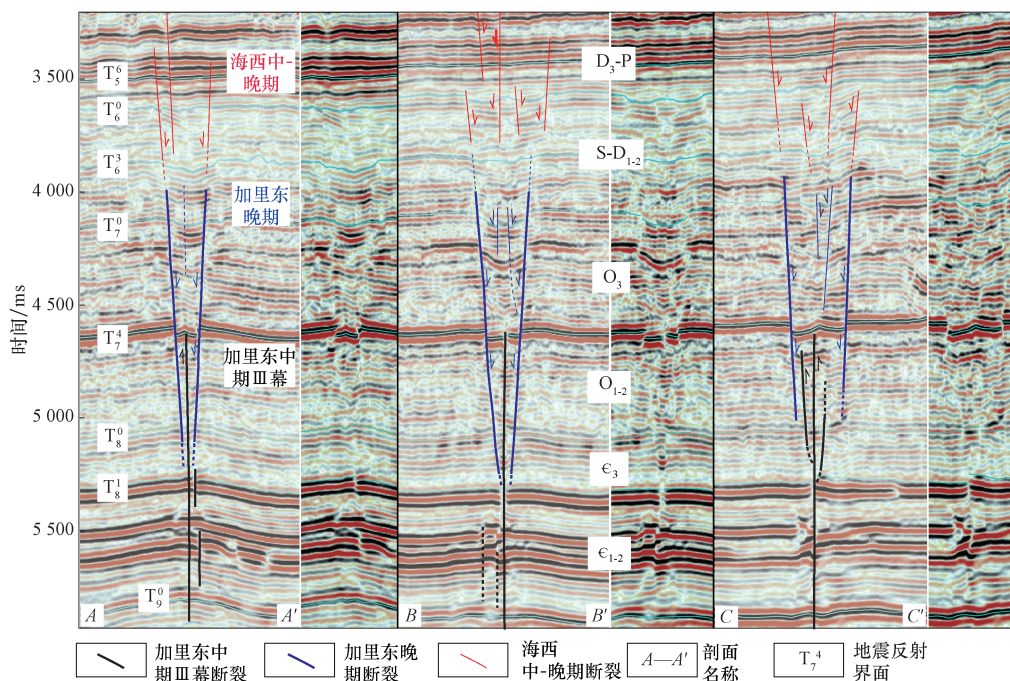


图3 塔里木盆地顺北5号断裂带中段1号三维分层发育典型剖面A-A'、B-B' and C-C' (剖面位置见图2)

Fig. 3 Representative seismic sections of the No. 1 seismic survey covering the central segment of Shunbei 5 fault zone in the Tarim Basin (see Fig. 2 for the location of sections A-A', B-B' and C-C')

武系的地堑构造。该地堑构造主要在 T_6^0 界面(下志留统塔塔埃尔塔格组顶面)以下发育,在 T_7^4 界面与陡倾走滑断裂组合成“复合花状”或“地堑夹隆起”构造样式,即中部上隆,两侧下掉,不同于走滑断裂典型的“正花状”和“负花状”构造样式^[15]。此外,该构造样式在 T_7^4 界面并未表现出明显分段性,而是表现为断裂东、西两侧连续断面(图2),与顺北5断裂在2号三维 T_7^4 界面表现出的分段特征(图4)具有明

显差异。浅层构造样式在平面和剖面上表现为雁列正断层,主要在 T_7^4 界面(上奥陶统桑塔木组顶面)及上覆地层发育。在 T_6^0 界面(中-下泥盆统克孜尔塔格组顶面)和 T_5^6 界面(下石炭统巴楚组顶面),雁列正断层密集发育,展布方向与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,雁列正断层之间以及与中层地堑、深层基地走滑断裂不一定连接(图3)。

2.2 运动学特征

顺北5断裂在1号三维区 T_7^4 界面并未表现出明显分段性,因而无法根据分段侧接阶式以及叠接段应变类型^[16]判断其在 T_7^4 界面滑移方向。然而,在1号三维区北部,紧邻顺北5断裂西侧发育系列雁列褶皱,根据其左阶展布方式^[15],可判断顺北5断裂在 T_7^4 界面表现为左行走滑,该滑移方向也与塔中北坡NNE向走滑断裂体系左行走滑特征一致(图1)。顺北5断裂在1号三维区 T_7^0 界面、 T_6^0 界面与 T_5^6 界面发育右阶展布的雁列正断层(图2),指示其后期同样表现为左行走滑特征。

2.3 活动期次

结合不同构造样式发育层位以及揭示的不同古应力环境,识别出顺北5断裂在1号三维区至少三个阶段的多期活动特征。

第一阶段活动在加里东中期Ⅲ幕,特征表现为顺北5断裂在 T_7^4 界面发育的压脊构造,指示斜压(压扭)应力环境(图3)。虽然该构造样式主要发育在 T_7^4 界面,但因压脊构造同时造成了 T_7^4 界面以上地层以及 T_7^0 界面以下地层的局部隆起(图3,剖面A—A'),且无明显角度不整合,所以该构造样式形成时期大致在晚奥陶世,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,特征表现为顺北5断裂在伸展应力环境下形成的地堑构造与雁列正断层。根据地堑构造与雁列正断层在 T_7^0 界面的交切关

系(图2)可判断,雁列正断层略晚于地堑构造形成。由此说明,伸展地堑构造于加里东晚期开始形成后,深层走滑段再活动(地堑构造可能也进行了走滑活动),拖曳上奥陶统与部分下志留统地层形成的大致断至 T_6^0 界面(下志留统柯坪塔格组顶面)的雁列正断层。

第三阶段活动在海西中、晚期,特征表现为顺北5断裂深层走滑段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_6^0 界面以上地层中发育并断穿 T_5^6 界面(图3),部分疑似断入二叠系火成岩地层。

对比上述3个阶段的活动强度,顺北5断裂在1号三维区 T_7^4 界面发育的压脊构造以及地堑构造相比上覆雁列正断层垂向断距更大(图3),由此可判断加里东中期Ⅲ幕与加里东晚期为顺北5断裂在该区域的主活动阶段。

2.4 雁列正断层志留系控储特征

新的钻井资料揭示,多口钻井在顺北5断裂2号三维区志留系地层发生泥浆漏失,其中一口井钻遇放空,漏失与放空地层多在 T_6^0 (上志留统克孜尔塔格组顶面)与 T_6^3 (下志留统塔塔埃尔塔格组底面)界面之间,岩性以砂、泥岩为主。

对比钻遇漏失(放空)井组分布特征与 T_6^0 界面雁列正断层发育特征表明,顺北5断裂北段南部(走向约NW20°)在 T_6^0 界面发育的雁列正断层宽度与长度较小,活动弱,部署的X1—X4井均未钻遇漏失(图4),而

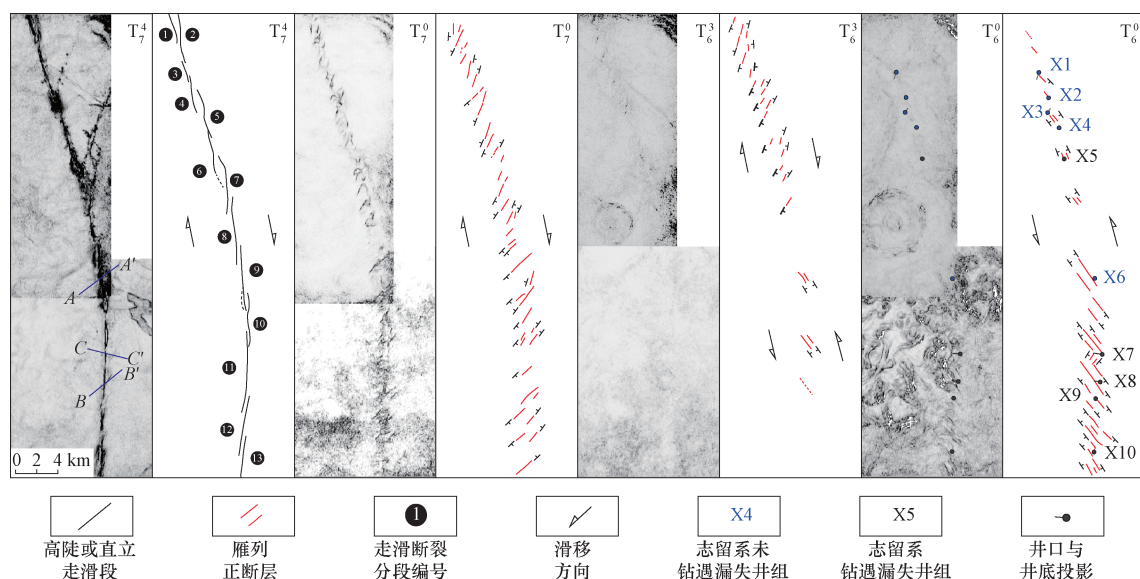


图4 塔里木盆地顺北5号断裂带北段—中段2号三维多层位相干与断裂解释(三维资料研究范围见图1)

Fig.4 Coherence slices of various reflecting interfaces and fault interpretations of the No.2 seismic survey covering parts of the northern and central segments of Shunbei 5 fault zone in the Tarim Basin (see Fig.1 for the 3D seismic acreage)

顺北5断裂中段北部(走向近南-北向)在 T_6^0 界面雁列正断层具有一定的规模,活动相对强,部署的X7-X10井均钻遇漏失,且X8井钻遇放空(图4),由此说明,志留系碎屑岩储集空间的发育与顺北5断裂雁列正断层密切相关。

通过井震标定确定地层漏失、放空部位,并对比雁列正断层几何学特征表明,钻遇雁列正断层上盘更易发生漏失和放空(图5)。例如,X6井与X8井相比,X6井钻遇断层下盘,未钻遇放空和漏失,而X8井钻遇断层上盘,共钻遇三处放空。与X8井类似,X7井同样钻遇雁列正断层上盘,且发生多处漏失(图5)。针对X7井漏失段采集的成像测井资料表明,漏失段发育走向约为 $NE45^\circ$ 天然裂缝(图6),该走向与X7井钻遇正断层走向(约为 $NE40^\circ$)相似(图4),由此更进一步说明雁列正断层伴生裂缝体系^[17]是造成漏失的主要储集空间。此外,成像测井解释表明,压裂诱导缝走向也近似为 $NE45^\circ$ (图6),说明现今最大主应力方向与天然裂缝走向近似平行,利于雁列正断层伴生裂缝的开启^[5]。

针对每个漏失、放空点测量其与雁列正断层断面的水平距离,并测量其在断面投影点的垂向断距,与此同时,测量未发生漏失和放空井组与雁列正断层的最小水平距离以及断面最大断距,进行交错分析表

明(图7a),雁列正断层上盘对漏失、放空点的控制范围可超过200 m,而下盘则小于200 m,说明雁列正断层破碎带在断层上、下盘发育具有不对称性(图7b),且上盘破碎带发育规模更大,该特征与前人提出的正断层破碎带发育具有不对称特征的研究认识^[18-21]一致。

3 讨论

3.1 顺北5断裂奥陶系碳酸盐岩储层与志留系碎屑岩洞穴型储集空间成因机制

顺北5断裂北段(图1)部署的顺北5井在奥陶系中统一间房组(O_{2j})与中-下统鹰山组(O_{1-2y})分别钻遇0.77 m与2.92 m放空^[3],揭示顺北5断裂控制了中-下奥陶统碳酸盐岩缝洞型储层的发育。在顺北地区走滑断裂多期活动的背景下,构造破裂作用、断控大气水岩溶作用与埋藏溶蚀作用是碳酸盐岩地层洞穴-裂缝系统形成的主要控制因素^[1,3,22]。

碳酸盐岩因其岩性的特殊性,在表生岩溶与埋藏溶蚀的作用下,大气淡水和酸性流体对碳酸盐矿物的溶解作用本身可形成岩溶孔洞和大型洞穴^[23-24]。与碳酸盐岩不同的是,碎屑岩(砂岩、泥岩)在储层成岩

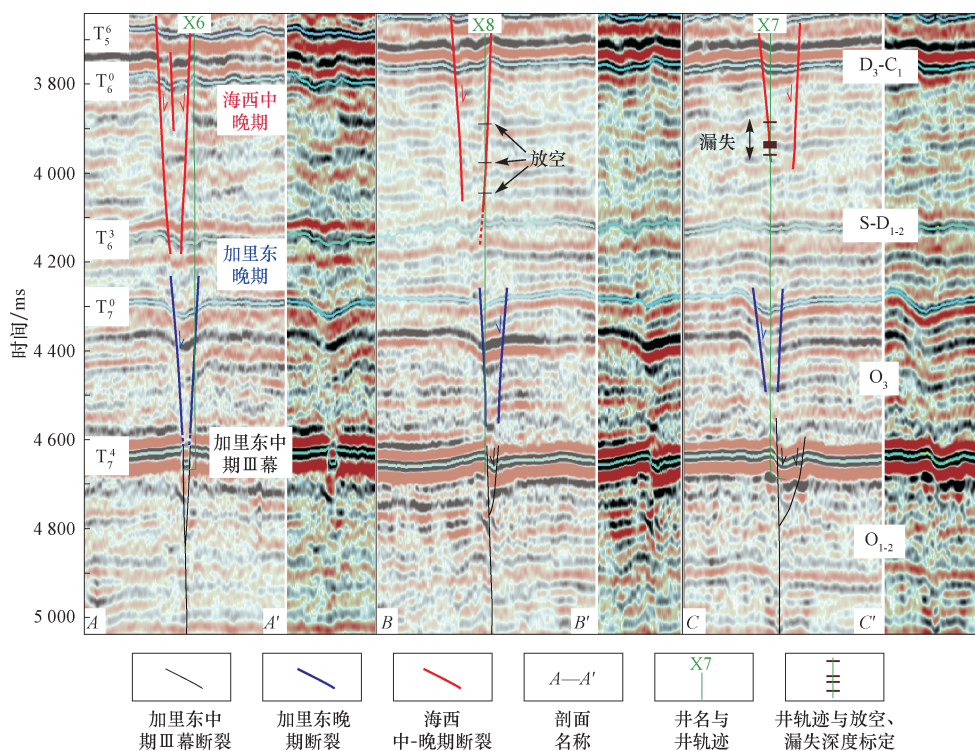


图5 塔里木盆地顺北5号断裂带北段-中段2号三维典型过井剖面A—A',B—B'与C—C'(剖面位置见图4)

Fig. 5 Representative seismic sections of the No. 2 seismic survey covering the northern and central segments of Shunbei 5 fault zone in the Tarim Basin (see Fig. 4 for the locations of sections A—A', B—B' and C—C')

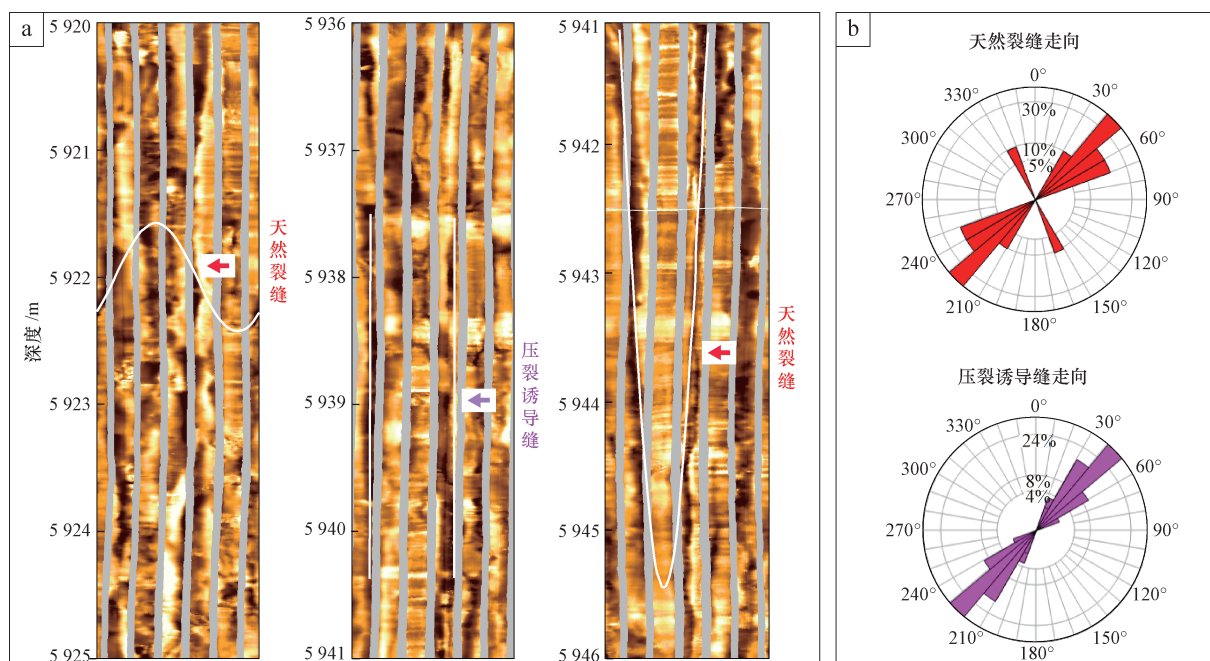


图6 塔里木盆地顺北5号断裂带2号三维X7井志留系裂缝性储层成像测井响应

Fig.6 Image logging responses of the fractured Silurian reservoir rocks in Well X7 in the No.2 seismic survey covering the Shunbei 5 fault zone in the Tarim Basin

a. 裂缝性储层成像测井响应;b. 裂缝走向玫瑰花图

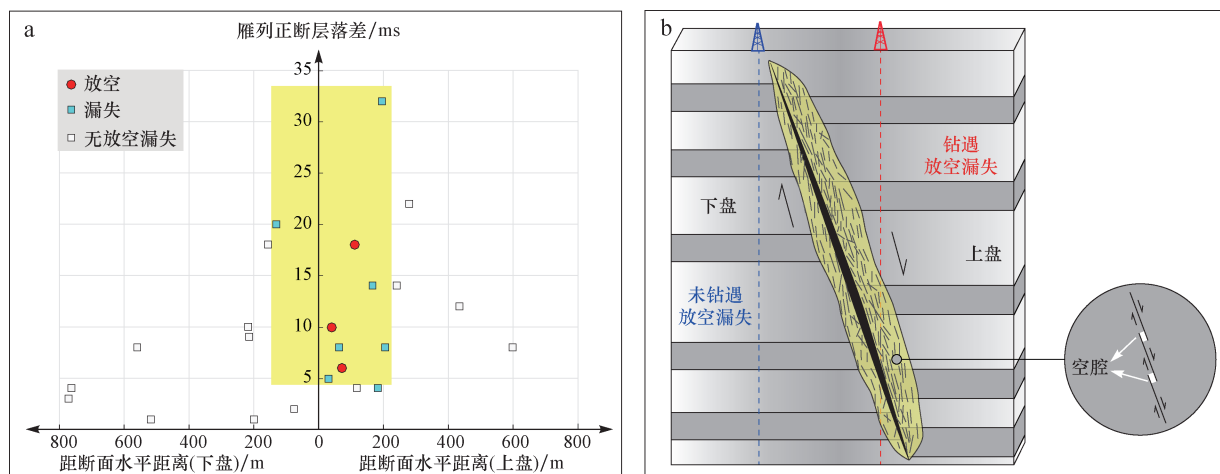


图7 塔里木盆地顺北5号断裂带2号三维志留系放空、漏失部位与雁列断层活动关系(三维资料研究范围见图1)

Fig.7 Locations of thief zones and their relationship with the en-echelon normal faults in the No.2 seismic survey of the Shunbei 5 fault in the Tarim Basin (See Fig.1 for the location of No.2 seismic acreage)

a. 志留系放空、漏失部位与距雁列断层断距与落差交绘图;b. 雁列正断层上、下盘破碎带发育模式

过程中,烃源岩有机质热演化释放的有机酸虽然可对铝硅酸盐进行溶蚀而形成规模性次生空隙^[25-26],但对于是否可形成溶蚀洞穴目前尚未见报道。由此推测,志留系砂岩、泥岩段多致密,物性差,断裂活动形成的空腔及伴生裂缝体系是放空、漏失的主要原因。

正断层与走滑断层在几何学、运动学以及力学机制方面虽存在明显差异^[27],但其都具有分段性^[16-17],在分段叠接部位都可形成叠接拉伸或叠接挤压变形

段。在叠接拉伸段的发育过程中,受局部张应力的控制作用^[28],岩石趋于形成张性破裂,在烃类流体充注的情况下破裂空间可进一步保留,成为现今钻遇的洞穴或空腔(图5,图7)。前人研究表明,渤海湾裂谷盆地断块(碎屑岩)油气富集区主干断裂带附近发育一系列断裂空腔沥青带,其厚度可达3 m^[29],井-震标定揭示断裂空腔多发育于正断层断面叠接部位,由此也进一步说明,正断层分段叠接部位对碎屑岩洞穴型储

集空间的发育具有重要的控制作用。

3.2 顺北5断裂发育机制

现有二维和三维地震资料揭示顺北5断裂贯穿顺北及邻区南北,是该地区及邻区目前已知最长的走滑断裂带(长度 ≥ 270 km),对于该断裂带水平滑移距分布特征以及发育机制尚未见系统性研究。

本文作者前期运用倾斜地层同相轴断错法^[5]对顺北5断裂北段南部(图1, B点) T_7^4 界面附近水平滑移距进行了测量,大约为0.3 km。根据北段南部与中段北部 T_7^4 界面平面分段(图4)长度差异,以及分段平均长度与滑移距的拟合关系^[5,30],本研究估算出中段北部(C点,图1)附近滑移距大约为0.48 km。顺北5断裂3号三维(图1) T_7^2 界面相干属性图(图8a)揭示,顺北5断裂断错塔北古隆起控制的良里塔格组台缘,测得北段北部(A点,图1)滑移距约为1.2 km。此外,在1号三维内基于倾斜地层同相轴断错法,测得中段南部(D点,图1)滑移距约为1.4 km(图8b)。经测量A—D点距顺北5断裂北端(估测)距离,绘制滑移距分布图^[28]并运用高次函数拟合出滑移距分布曲线表明,顺北5断裂北段与中段滑移距分布具有“两头大,中间小”的特征,这与单一断层经典滑移距分布模式^[31-32],即“中间大,两头小”模式具有截然相反的特征。该差异表明,顺北5断裂北段和中段在断裂发育初期应该是两条(或多于两条)不同的断层。

顺北5断裂中段(1号三维,图1)与北段具有显著不同的几何学与运动学特征。顺北5断裂北段呈现出清晰的走滑分段特征,分段主要呈右阶展布(图4),分段间多发育叠接隆起段^[4],而顺北5断裂中段(1号三维,图1)在 T_7^4 界面不具有明显分段特征,而是发育

“地堑夹隆起”构造样式(图2,图3),兼具斜压走滑与伸展性质。目前资料表明,地堑构造的发育只见于顺北5断裂中段1号三维覆盖区,在2号和3号三维区未见类似构造发育,说明顺北5断裂中段南部区域在加里东晚期经历了较为特殊的伸展应力环境。与顺北5断裂中段南部相邻的塔中隆起上发育了规模较大的地堑^[13],类似地堑的形成可能也受到该伸展应力环境的影响。此外,顺北5断裂北段(2号、3号三维,图1)在 T_7^4 界面表现为右行走滑(图4),而中段(1号三维,图1)在 T_7^4 界面表现为左行走滑(图2)。由此更进一步说明,顺北5断裂北段与中段在发育初期是不同的断层,分属于不同的断裂体系,具有不同的构造样式,构造演化过程中经历了截然不同的应力环境。因此,构造演化初期形成于南、北以及南北之间不同体系的断层在后期逐段拼接,形成了顺北5断裂现今贯穿塔北隆起、顺托果勒低隆以及塔中隆起的展布格局。

4 结论

1) 顺北5断裂是一条贯穿塔北隆起、顺托果勒低隆以及塔中隆起的主干断裂带,其可识别长度长达270 km,断裂走向自北向南整体发生了约40°的偏转,是目前顺北及邻区已知最长的克拉通内走滑断裂带。基于顺北5断裂走向总体变化特征,可将其分为三段:北段(走向约NW20°)、中段(走向为近南北向—NE10°)和南段(走向约NE20°)。

2) 顺北5断裂中段(走向NE10°部分,展布于顺托果勒低隆中—南部)具有深层、中层与浅层分层变形特征。深层构造样式在剖面上表现为断入基底的陡倾走滑断裂,在 T_7^4 界面表现为沿断裂走向整段隆起,类

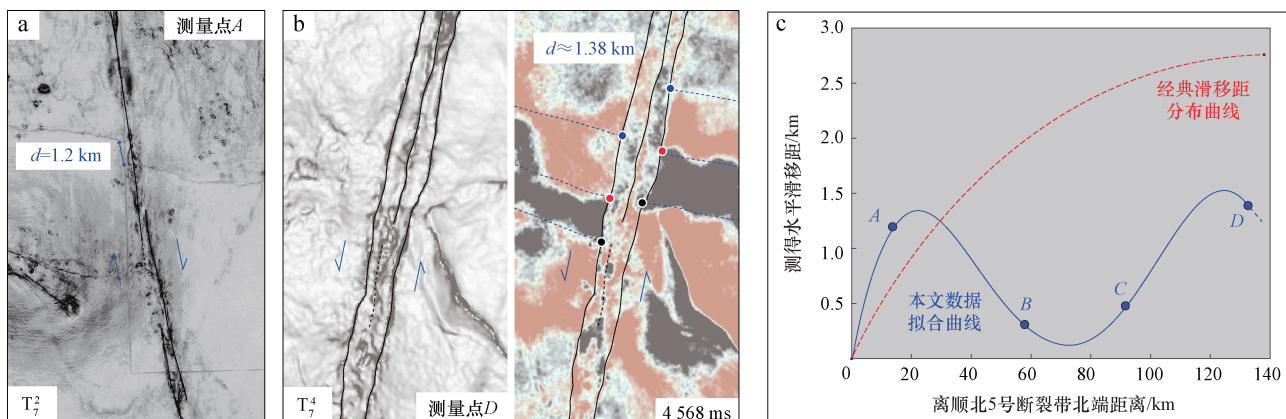


图8 塔里木盆地顺北5号断裂带北段—中段滑移距分布特征(滑移距测量点A—D位置见图1)

Fig. 8 Distribution characteristics of the displacement in the northern-central segments of Shunbei 5 fault zone in the Tarim Basin (see Fig. 1 for the location of displacement measurement of A—D)

a. 顺北5号断裂3号三维 T_7^2 界面相干; b. 顺北5号断裂1号三维 T_7^4 界面相干与4 568 ms时深切片; c. 顺北5号断裂A—D点滑移距分布

似压脊构造。中层构造样式表现为断穿 T_7^4 界面并断入寒武系的地堑构造,在 T_7^4 界面与陡倾走滑断裂组合成“复合花状”或“地堑夹隆起”构造样式。浅层构造样式在平面和剖面上表现为雁列正断层。顺北5断裂中段(走向 $NE10^\circ$ 部分)至少经历了3个阶段的活动,分别是加里东中期Ⅲ幕,加里东晚期和海西中、晚期。其中,加里东中期Ⅲ幕与加里东晚期为顺北5断裂在该区域的主活动阶段,构造样式分别指示斜压(压扭)应力环境与伸展应力环境。

3) 顺北5断裂中段雁列正断层控制了志留系碎屑岩(砂岩段、泥岩段)中裂缝-洞穴型储集空间的发育,雁列正断层破碎带在断层上、下盘发育具有不对称性,上盘破碎带发育规模更大。顺北5断裂北段与中段滑移距分布具有“两头大,中间小”的特征,北-中段也具有显著不同的几何学与运动学特征。构造演化初期形成于南、北以及南北之间不同体系的断层在后期逐段拼接,形成了顺北5断裂现今贯穿塔北隆起、顺托果勒低隆以及塔中隆起的展布格局。

参 考 文 献

- [1] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831-839.
Jiao Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 831-839.
- [2] 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.
- [3] 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, (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, (2): 207-216.
- [4] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 878-888.
Deng Shang, Li Huili, Zhang Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 878-888.
- [5] Deng S, Li H, Zhang Z, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(1): 109-137.
- [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.
Lv 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] 王璐瑶, 邓尚, 张仲培, 等. 顺北北三维区“串珠”发育特征与油气地质意义[J]. 特种油气藏, 2017, 6: 66-71.
Wang Luyao, Deng Shang, Zhang Zhongpei, et al. Development characteristics and petroleum geological significance of string beads in 3D seismic region of northern Shun 8 block[J]. Special Oil and Gas Reservoirs. 2017, 6: 66-71.
- [8] Li Desheng, Liang Digang, Jia Chengzao, et al. Hydrocarbon accumulations in the Tarim basin, China[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(10): 1587-1603.
- [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. Geotectonica et Metallogenia[J]. 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] Qiu Huabiao, Deng Shang, Cao Zicheng, et al. The evolution of the complex anticlinal belt with crosscutting strike-slip faults in the central Tarim Basin, NW China[J]. Tectonics, 2019. 10. 1029/2018TC005229(In press).
- [14] Cunningham W D, Mann P. Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2007, 290(1): 1-12.
- [15] Sylvester A G. Strike-slip faults[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(100): 1666-1703.
- [16] Aydin A, Nur A. The types and role of stepovers in strike-slip tectonics[J]. Special Publications, 1985: 35-44.
- [17] Fossen H, Rotevatn A. Fault linkage and relay structures in extensional settings—A review[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 154: 14-28.
- [18] Deng S, Cilona A, Morrow C, et al. Cross-bedding related anisotropy and its interplay with various boundary conditions in the formation and orientation of joints in an aeolian sandstone[J]. Journal of Structural Geology, 2015, 77: 175-190.
- [19] 吴智平, 陈伟, 薛雁, 等. 断裂带的结构特征及其对油气的输导和封堵性[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 570-578.
Wu Zhiping, Chen Wei, Xue Yan, et al. Structural characteristics of faulting zone and its ability in transporting and sealing oil and gas[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(4): 570-578.

(下转第1073页)

- [24] 王琪, 嵇喜准, 陈国俊, 等. 鄂尔多斯盆地盐池—姬源地区三叠系长4+5砂岩成岩演化特征与优质储层分布[J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 397–404.
- Wang Qi, Zhuo Xizhun, Chen Guojun, et al. Characteristics of diagenetic Evolution of Chang 4 + 5 sandstones (Upper Triassic) in Yanchi-Jiyuan Area Ordos Basin and Distribution of High-Quality Reservoir[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 397–404.
- [25] Ehrenberg S N. Preservation of anomalously high porosity in deeply buried sandstones by grain-coating chlorite: Examples from the Norwegian continental shelf[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77: 1260–1286.
- [26] Bloch S, Lander R H, Bonnell L. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(2): 301–328.
- [27] 柳广弟, 杨伟伟, 冯渊, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组原油地球化学特征及成因类型划分[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 108–115.
- Liu Guangdi, Yang Weiwei, Feng Yuan, et al. Geochemical characteristics and genetic types of crude oil from Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 108–115.
- [28] Zhu Shifa, Wang Xiaoxu, Qin Yi, et al. Occurrence and origin of pore-lining chlorite and its effectiveness on preserving porosity in sandstone of the middle Yanchang Formation in the southwest Ordos Basin[J]. Applied Clay Science, 2017 (148): 25–38.
- [29] 高辉, 朱耿博, 王汝懿, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩储层微观孔喉特征差异及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 302–312.
- Gao Hui, Zhugeng Bolun, Wang Xuanyi, et al. Differences and origin of micro pore throat characteristics for tight sandstone reservoir of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 302–312.
- [30] 邱隆伟, 穆相骥, 李浩, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系下石盒子组岩屑发育特征及其对储层物性的影响[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 24–33.
- Qiu Longwei, Mu Xiangji, Li Hao, et al. Characteristics of detritus development in the Permian Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area and its influence on reservoir physical properties[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 24–33.

(编辑 张亚雄)

(上接第998页)

- [20] 陈伟, 吴智平, 侯峰, 等. 断裂带内部结构特征及其与油气运聚关系[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 774–780.
- Chen Wei, Wu Zhiping, Hou Feng, et al. Internal structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 774–780.
- [21] Schueller S, Braathen A, Fossen H, et al. Spatial distribution of deformation bands in damage zones of extensional faults in porous sandstones: Statistical analysis of field data[J]. Journal of Structural Geology, 2013, 52(1): 148–162.
- [22] 周文, 李秀华, 金文辉, 等. 塔河奥陶系油藏断裂对古岩溶的控制作用[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2339–2348.
- Zhou Wen, Li Xiuhua, Jin Wenhui, et al. The control action of fault to paleokarst in view of Ordovician reservoir in Tahe area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2339–2348.
- [23] 钱一雄, Conxita Taberner, 邹森林, 等. 碳酸盐岩表生岩溶与埋藏溶蚀比较——以塔北和塔中地区为例[J]. 海相油气地质, 2007, 12(2): 1–7.
- Qian Yixiong, Conxita Taberner, Zou Senlin, et al. Diagenesis comparison between Epigenic karstification and burial dissolution in carbonate reservoirs: an instance of Ordovician carbonate reservoirs in Tabei and Tazhong regions, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(2): 1–7.
- [24] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347–355.
- Lu Xinbian, Hu Wenge, Wang Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347–355.
- [25] Meshri I D. On the reactivity of carbonic and organic acids and generation of secondary porosity[J]. Special Publications of Sepm, 1986.
- [26] 远光辉, 操应长, 葱克来, 等. 东营凹陷北带古近系碎屑岩储层长石溶蚀作用及其物性响应[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 853–866.
- Yuan Guanghui, Cao Yingchang, Xi Kelai, et al. Feldspar dissolution and its impact on physical properties of Paleogene clastic reservoirs in the northern slope zone of the Dongyingsag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 853–866.
- [27] Twiss R J, Moores E M. Structural geology[M]. Macmillan, 1992.
- [28] Pollard D D, Fletcher R C. Fundamentals of Structural Geology[J]. Fundamentals of Structural Geology, 2005: 512.
- [29] 蒋有录, 刘华. 断裂沥青带及其油气地质意义[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 36–41.
- Jiang Youlu, Liu Hua. Fault asphalt zone and its significance in petroleum geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 36–41.
- [30] De Jossineau G, Aydin A. The evolution of the damage zone with fault growth in sandstone and its multiscale characteristics[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2007, 112(B12).
- [31] Cowie P A, Scholz C H. Growth of faults by accumulation of seismic slip[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1992, 97(B7): 11085–11095.
- [32] Kim Y S, Sanderson D J. The relationship between displacement and length of faults: a review[J]. Earth Science Reviews, 2005, 68(3): 317–334.

(编辑 董立)