

塔里木盆地顺北5号走滑断层空间结构及其油气关系

林波^{1,2}, 云露¹, 李海英¹, 肖重阳¹, 张旭¹, 廖茂辉¹, 韩俊¹, 王鹏¹, 徐学纯²

(中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061)

摘要:塔里木盆地小尺度走滑断层在空间上具有“位移小、延伸长、平面分段、纵向分层”的复杂地质结构,其纵向空间结构的变化对流体成矿富集具有重要的控制作用。近年来,顺北油田的断控缝洞型油气藏勘探表明,走滑断层带在油气成藏过程中具有“控储、控藏、控富”的特点,但走滑断层在油气成藏过程中控制作用尚不清楚。选取顺北5号断层中、北段为研究对象,基于实钻井、钻录井等实物资料和井动态产能资料,利用高精度三维地震断层解析和立体评价技术,首次从油气成藏体系中的通源性、输导性、成储性、封闭性、储改性以及成藏性等方面对走滑断层进行垂向立体评价。研究表明,走滑断层在不同的构造层具有“垂向分层变形、平面分段演化”的特征,不同的构造层中构造响应特征差异明显,由下向上表现为直立走滑、膏盐岩滑脱构造、花状构造、右行雁列正断层、左行雁列正断层、继承性左行雁列正断层的垂向结构序列;走滑断层在不同构造层中的结构样式决定了走滑断层对油气成藏不同要素的控制作用,断层的垂向立体评价有利于查明油气成藏富集过程,优选油气富集目标,为今后的油气勘探开发提供理论指导。

关键词:油气成藏体系;断控缝洞型储集体;走滑断层;顺北油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Spatial structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault and its relationship with oil and gas reservoirs in the Tarim Basin

Lin Bo^{1,2}, Yun Lu¹, Li Haiying¹, Xiao Chongyang¹, Zhang Xu¹, Liao Maohui¹, Han Jun¹, Wang Peng¹, Xu Xuechun²

(1. Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China)

Abstract: Small-scale strike-slip faults developed in the Tarim Basin are spatially characterized by “small displacement, long extension, plane segmentation and longitudinal stratification”. These geological characteristics, especially the longitudinal stratification, are believed to play an important role in hydrocarbon accumulation. Exploration activities in the Shunbei Oilfield in recent years have come across many fault-karst reservoirs and confirmed the impact of these faults on the pooling of oil and gas. However, how exactly the faults control the process of oil and gas accumulation is not fully clarified. The middle-north section of Shunbei No. 5 fault is selected to carry out a three dimensional assessment of the faults in terms of their role in connecting sources and accumulations as well as controlling, capping and improving reservoirs by using high-precision three-dimensional seismic fault analysis and three-dimensional evaluation technology based on available data of drilling, logging and well performance. The results show that the faults have the characteristics of “vertical layered deformation and plane piecewise evolution” in different structural layers. Their structural responses are also very different, revealing a vertical structural sequence from bottom up of vertical slipping, gypsum-salt detachment structure, flower structure, right-lateral echelon normal fault, left-lateral echelon normal fault and inherited left-lateral echelon normal fault. The structural styles of the faults in different structural layers exert different effect on oil and gas accumulations. This study provides a basis for better understanding the process of oil and gas accumulation and wiser selections of exploration targets, thus can be used as a guiding reference for oil and gas exploration and development in the future.

收稿日期:2020-06-27;修订日期:2021-10-19。

第一作者简介:林波(1989—),男,博士、助理研究员,构造地质学。E-mail: linbo_nwpb@163.com。

通讯作者简介:云露(1972—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。E-mail: yunl.xbsj@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U21B2063);中国石化科技部项目(P21033-1, P21071);博士后科学基金面上项目(2018M6331865)。

Key words: fault, oil and gas accumulation system, fault-karst reservoir, strike-slip, Shunbei Oilfield, Tarim Basin

塔里木盆地是古生界海相克拉通盆地与中-新生界陆相前陆盆地叠合的大型盆地^[1-3],近年来随着盆地的油气勘探由古隆起等高地逐渐向斜坡和低隆等古低地的扩展,先后在顺南、顺托和顺北地区的超深层碳酸盐岩领域获得了重大的油气发现^[4-6]。尤其是顺北地区百万吨级产能油田的成功建设,标志着走滑断层带是油气富集带,揭示了走滑断层带对奥陶系碳酸盐岩具有明显的“控储、控藏、控富”的特点^[4,6-7],并进一步地验证了断溶体油气藏理论的合理性与正确性,为塔里木盆地油气增储上产提供了新的资源阵地和理论指导。前人对顺北及邻区的走滑断层的体系划分、纵向分层性、平面分段性、成因机制、活动期次及储层预测等方面开展了详尽的研究工作^[8-16],但对顺北走滑断层的空间结构、断层立体评价及其与油气藏过程的关系等方面尚未见到系统的研究。本文选取顺北5号断层中、北段为研究对象,对该断层开展不同构造层断层活动解析工作,明确走滑断层在空间上的结构差异,探讨其对油气成藏的控制作用,旨在查明断控缝洞型油气藏的主控因素及富集规律,为井位部署和轨迹优化设计提供理论支撑。

1 地质概况

顺托果勒低隆起位于塔里木盆地腹部,其南、北分别与塔中隆起、塔北隆起相接,东西与满加尔坳陷和阿瓦提坳陷相邻,构造上总体表现为低隆起-斜坡的弱变形区^[2-3,15-16]。顺北地区位于顺托果勒低隆起中北部,沉积了大套的下古生界海相碳酸盐岩和碎屑岩地层,在纵向空间上发育了完整的生-储-盖组合。顺北及其邻区发育了多套走滑断层体系,其多期活动的走滑断层为油气的运移、聚集和富集提供了良好的物质基础,依据断层在平面上的走向、剖面上的构造特征及成因机制可将其细分为①“X”型似共轭走滑断层体系、②调节走滑断层体系、③北东向线性走滑断层体系和④北西向线性走滑断层体系等4个断层体系(图1)。其中“X”型似共轭走滑断层体系主要由两组同期剪切走滑断层组成,其断层锐角夹角介于 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$,在轮台断层活动作用的控制下,主要分布于哈拉哈塘、阿克库勒凸起和顺托果勒北部地区^[8,17]。调节走滑断层体系主要分布在塔中隆起内部,在北西向塔中1号边界断层的控制下,形成了大量北东向的左行走滑断层,在平面上将塔中隆起切割成呈条块状,呈多米诺骨式断

层组合展布,剖面上主要表现为花状构造、平行高陡断层带以及与火成岩有关的断层^[8,18]。北东向线性走滑断层体系和北西向线性走滑断层体系主要位于塔中隆起和塔北隆起之间的顺托果勒内部,两个断层体系以顺北5号断层为分界线,其剖面上表现为正花状、负花状和直线型高陡直立走滑断层共存的构造样式,可以分垂向“一”字形、“Y”字型-“半花状构造”、“地堑-地垒”(反转)构造以及“花状构造”等4种基本类型。研究表明,不同走滑断层体系的剖面结构样式、断层性质及断层组合的差异性反应了不同地区的局部构造应力场的差异,其与塔里木盆地周缘板块俯冲消减及边界断层的差异性演化有关,是塔里木盆地在古生代多期盆缘活动远程效应综合作用的结果^[8,19-21]。顺北油田沿断层带部署的钻井均获得了高产油气流,揭开了一种新的“断控裂缝油气藏”勘探的序幕^[4,6]。其中顺北5号断层规模和活动强度大,是油气有利富集区,其在剖面上贯穿了多个古生界地层结构,主体呈深层直立走滑断层叠加浅层雁列正断层,正是断层在不同构造层中的构造样式差异性制约着油气藏的通源、运移、封闭以及调整等油藏成藏要素,对海相碳酸盐岩断控缝洞型油气藏成藏过程具有重要的控制作用。

2 断层构造变形特征

塔里木盆地内的克拉通小尺度走滑断层在平面上具有明显的分段性,在纵向空间上具有复杂的叠合构造样式^[10-12]。顺北5号断层是顺托果勒走滑断层中规模最大,垂向结构序列最复杂的断层之一,其在平面上呈弧形展布特征,主体由北西 20° 的北段、南北 2° 的中段和北东 15° 的南段拼贴而成,延伸距离长约270 km,贯穿了塔北隆起、顺托果勒低隆起和塔中隆起3个二级构造单元,同时也是顺北油田重点含油气带^[11]。基于顺托果勒低隆起古生界地层格架和岩性特征,笔者将其划分为6个构造层^[15],并认为走滑断层在不同构造层中具有不同的构造变形特征,并提出了走滑断层“分层变形、分段演化”的构造变形解析方法。

2.1 垂向结构序列

走滑断层的断层性质在不同的构造层中沿着断层走向具有多变性,不同构造层在纵向上的叠置关系,导致了断层空间结构的复杂性^[7,10,15,22-23]。顺北5号断

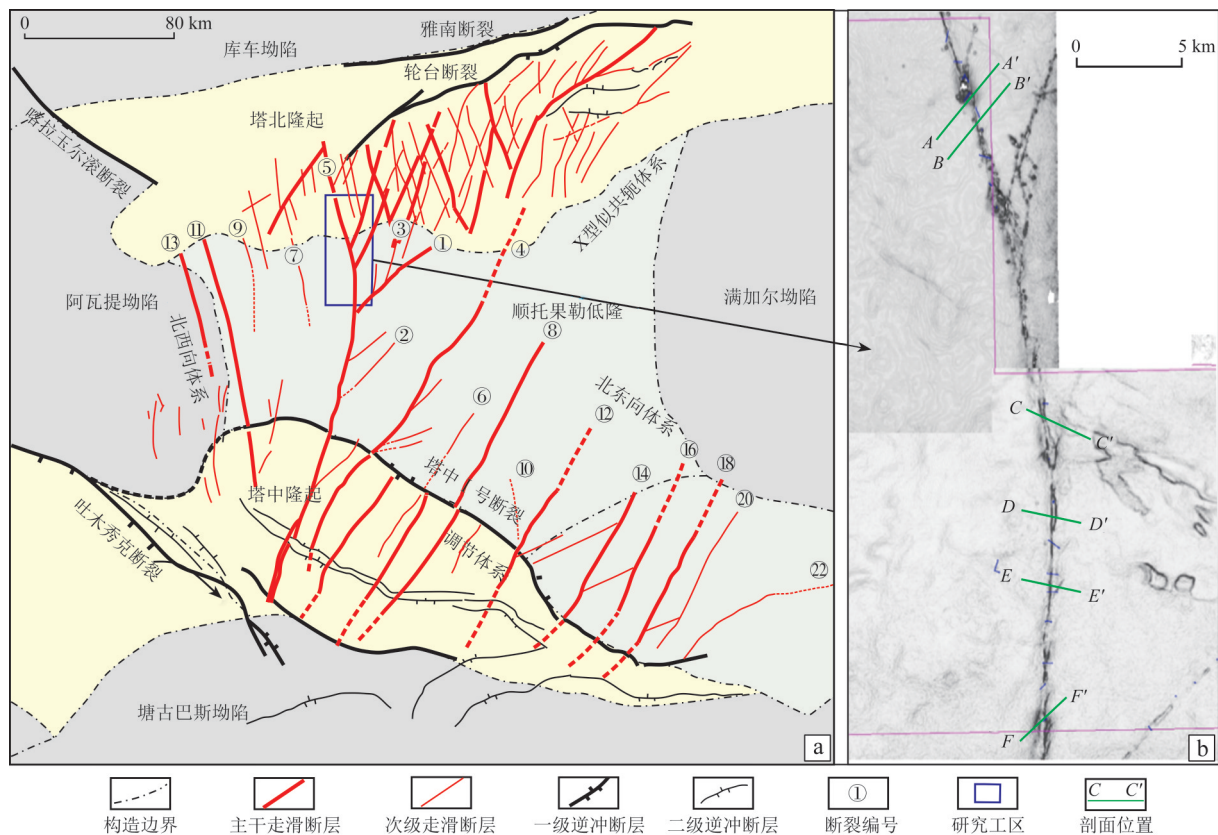


图1 塔里木盆地顺北地区构造位置及邻区下古生界主要断层分布

Fig. 1 Sketch map showing the tectonic locations and distribution of the major faults in the Lower Paleozoic, Shunbei area

a. 顺北地区主要走滑断层分布; b. 顺北5号断层中、北段碳酸盐岩顶界面 T_7^4 三维地震相干拼图

层在寒武系盐下构造层底部表现为直立走滑断层,向上在膏盐岩地层中出现少量的花状结构,伴随着构造层顶部一系列膏盐岩滑脱构造,导致膏盐岩顶界面上的断层平面分段的复杂性(图2)。断层在奥陶系盐上碳酸盐岩构造层底部表现为直立走滑断层,与下伏直立走滑断层呈侧向叠接构造样式,并向该构造层顶部逐渐演化为花状构造,其活动强度在碳酸盐岩顶界面达到最大。断层在奥陶系巨厚泥岩构造层中表现为大角度的雁列正断层构造,在剖面上表现为近对称小型地堑结构。该层中的走滑断层差异演化特征最为明显,其在北段正断层并未与下伏的花状构造连通,而在中段正断层的垂向断距最大,甚至将下覆的右行左阶叠接挤压段结构破坏为下掉构造特征(图1b中D—D'剖面)。断层在志留纪一早、中泥盆世海相碎屑岩构造层中,表现为雁列正断层构造,剖面上为小型的地堑结构,但该构造层的断层与下伏的雁列正断层相比在走向和倾向上都发生了根本的变化,揭示在两个构造层中雁列正断层是独立演化的,代表着不同性质的走滑运动。但实钻井在志留系地层中发现了少量的油斑和原油^[24],揭示了雁列正断层与花状构造在纵向空间上

可能存在一定的连通。晚泥盆世—石炭纪海—陆交互地层构造层中的断层继承了下伏雁列正断层构造特征,在剖面上不易识别。

顺北5号断层在空间结构上具有空间叠置性,由下向上表现为直立走滑、膏盐岩滑脱构造、花状构造、右行雁列正断层、左行雁列正断层、继承性左行雁列正断层的垂向结构序列特征。但断层在不同构造层的活动强度差异明显,在盐下碳酸盐岩构造层底部断层的北段活动强度明显强于中段,并持续活动到盐上碳酸盐岩构造层顶部,暗示着走滑断层活动具有继承性。中段的膏盐滑脱构造在盐下碳酸盐岩构造层明显强于北段,推测中段受到了更强的侧向挤压力,可能与加里东中期的北东向差异挤压应力有关。但海相巨厚泥岩层中北段的雁列正断层活动强度明显弱于中段的雁列正断层,指示断裂活动强度发生了改变,同时SB5-8井和SB5-6井实钻表明雁列正断层对盐上碳酸盐岩的花状走滑断层有一定的改造作用,推测其与加里东晚期—海西早期区域应力方向的改变有关。顺北5号断层在古生界的碎屑岩构造层中的走滑方向发生了改变,但其活动强度依旧保持着中段强、北段弱的特征,

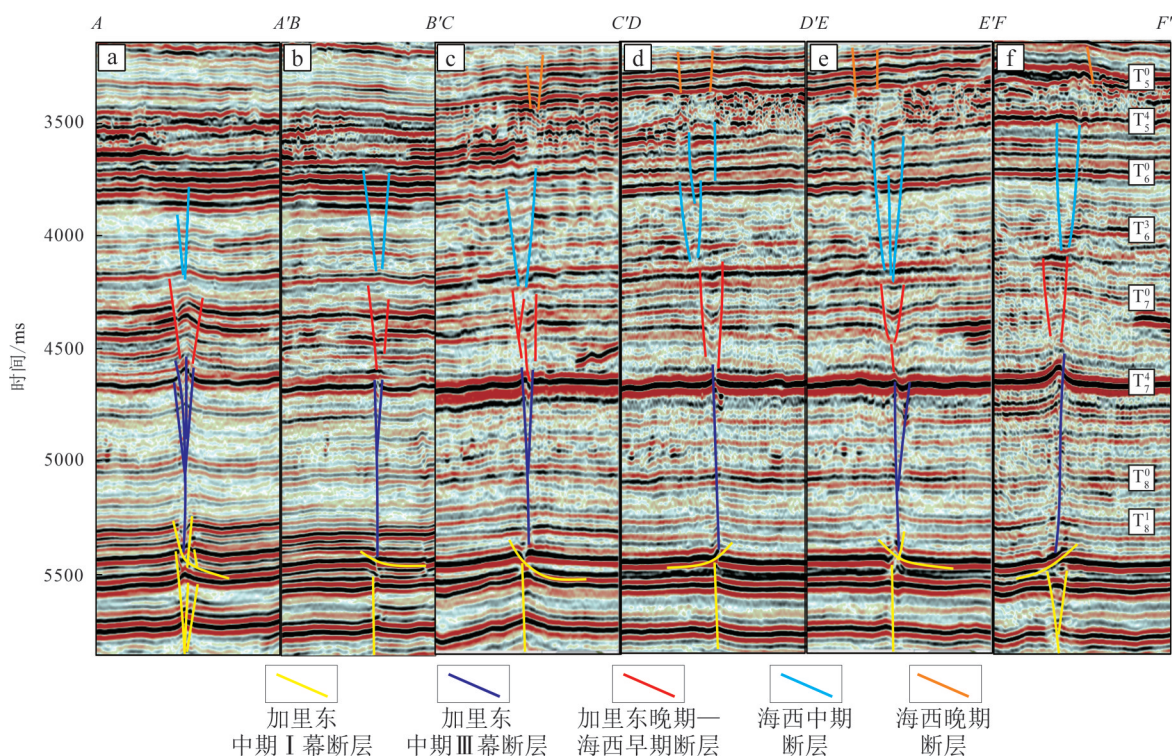


图2 塔里木盆地顺北5号断层分层变形特征(剖面位置见图1b)

Fig. 2 Characteristics of layered deformation of Shunbei No. 5 fault, Tarim Basin

可能与海西中—晚期的北西向弱挤压力有关。

2.2 平面展布特征

前人对走滑断层的深层分段特征开展了系统的研究,提出走滑断层的分段演化特征是断层的基本属性^[10-11, 25]。顺北5号断层中北段在古生界中整体呈NW20°~NE2°展布,不同构造层空间结构差异源自断层的分层构造变形。在第一个盐下构造层从北向南可划分为NW18°分段、NW4°分段和NE2°分段等3个分段(图3a),其中北段见两条近平行的走滑断层,断层的延伸具有一定的弧形特征,其与上伏的盐上碳酸盐岩构造层顶部的分段叠接段纵向空间上重合,揭示着先存断层的构造样式控制着走滑断层的分段叠接位置。断层在盐下构造层由下向上活动强度逐渐增大,在第二个盐上构造层底部具有明显的差异演化,其中北段主体由NW18°和NW10°两个分段组成;中段由NE17°,NE25°和NE2°三个分段呈左阶排列,中段和北段都在膏盐岩滑脱断层的影响下断层宽度达到最大,尤其是叠接部位具有最宽的破碎带宽度(图3c)。断层在第二构造层碳酸盐岩顶(T₇⁺)界面上的分段性明显,活动强度达到了最大,断层呈线性展布,其断层的宽度变小,指示着断层在两个构造层具有不同的演化过程(图3e)。笔者利用走滑断层的垂向断距将碳酸

盐岩顶界面分为14个走滑断层分段^[16],其北段为右行左阶叠接隆起段,而在中段也为右行左阶叠接组合样式,但受后期雁列正断层的破坏,其叠接位置和非叠接位置均表现为正断层特征(图2,图3f)。断层在第三构造层中整体表现为NE向雁列正断层,其中北段的雁列走向主体为NE22°,但深层叠接位置的上方雁列正断层走向为NE45°,指示着叠接段内部具有明显的块体再旋转;中段的雁列走向主体为NE38°~54°,不同段的雁列正断层走向明显受到深层直立走滑断层的控制(图3g-h)。断层在第四构造层中整体表现为NW向雁列正断层,北段的雁列走向主体为NW44°,而中段雁列走向主体为NW36°,北段的活动强度弱于中段(图3i-j)。断层在第五和第六构造层中的表现为继承性活动,因活动迹象弱,在剖面和平面上均不易识别。

顺北5号断层在碳酸盐岩地层中整体呈线性延伸,北段为北北西向展布,中段为近南北向展布,但在不同构造层中也具有差异分布的特征:在盐下碳酸盐岩底部北段呈线性延伸,中段为左阶排列,揭示着中段的活动强度弱于北段;在盐下碳酸盐岩构造层顶部呈线性延伸,不具明显的分段特征,同时在中段还发育了少量北东向的次级断层,指示着中段的活动强度有所加强。在盐上碳酸盐岩构造层中断层北段为典

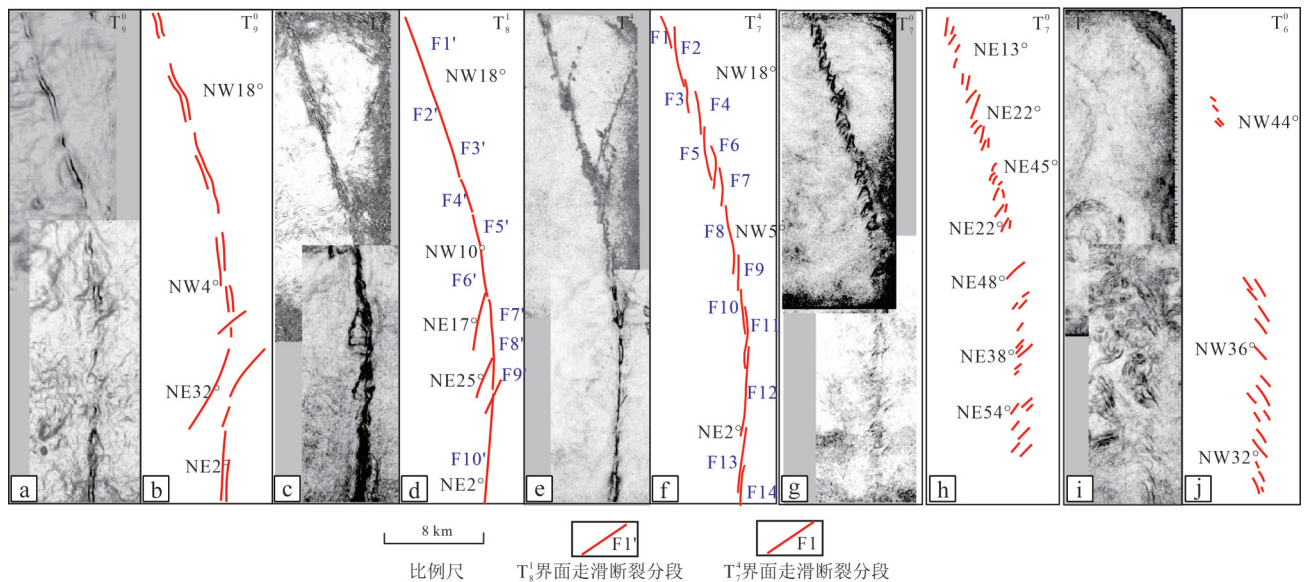


图3 塔里木盆地顺北5号断层不同层系断层展布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of Shunbei No. 5 fault in different strata, Tarim Basin

a. 顺北5号断层中北段 T_9^0 界面相干图;b. 顺北5号断层中北段 T_9^0 断层展布;c. 顺北5号断层中北段 T_8^1 界面相干图;d. 顺北5号断层中北段 T_8^1 断层展布;e. 顺北5号断层中北段 T_7^2 界面相干图;f. 顺北5号断层中北段 T_7^2 断层展布;g. 顺北5号断层中北段 T_6^3 界面相干图;h. 顺北5号断层中北段 T_6^3 断层展布图;i. 顺北5号断层中北段 T_5^4 界面相干图;j. 顺北5号断层中北段 T_5^4 断层展布

型的右行左阶分段叠接挤压段,而中段为非典型的右行左阶叠接段。断层中段的的活动强度和纵向上影响的厚度明显大于北段,揭示该构造层中的断裂活动强度发生了改变,同时北段的深层线性走滑与该构造层的雁列正断层夹角整体小于 45° ,揭示5号断层北段为倾滑拉张走滑断层,处于斜拉应力环境,部分叠接位置的夹角大于 45° ,与叠接段块体再旋转有关;中段的深层走滑与雁列正断层的夹角整体大于 45° ,揭示5号断层中段为倾滑挤压走滑断层,处于斜挤压应力环境,不同段的局部应力差异与盆地北缘海西期早期北北西向持续挤压造山和盆地南缘的加里东晚期—海西早期北阿尔金造山活动的差异挤压有关。在第四构造层中雁列正断层产状发生了反转,指示着走滑性质的改变,与深层线性走滑的夹角均小于 45° ,揭示该构造层为倾滑拉张走滑断层,处于斜拉应力环境,与盆缘海西期天山造山活动有关。顺北5号断层在空间上不同构造层的构造样式差异与其在不同构造层的局部应力差变化有关,是盆缘活动差异演化的远程作用结果。

3 断层评价方法

走滑断层多期活动为致密碳酸盐岩地层提供了构造破碎成储的物质基础,形成了一个“下生上储、垂向

运移”为主的独特新型断控缝洞型油气藏,其中走滑断层的多期次活动、空间结构控制着油气藏差异成藏过程。前人基于油气藏特征,提出了“寒武多期供烃、深埋断溶成储、原地垂向输导、喜马拉雅期成藏为主、走滑断层控富”的深层海相碳酸盐岩断溶体油气藏成藏理论^[4-6]。基于走滑断层“分层变形,分段演化”的构造特征,立足走滑断层空间结构精细解析,结合已钻井的实际生产情况和顺北的地层结构特征,本文提出了走滑断层垂向序列分层立体评价方法,即从油气藏成藏动态要素如通源性、输导性、成储性、封闭性和成藏性等多个方面对走滑断层开展评价工作(图4a)。

1)寒武系的玉尔吐斯组海相泥岩是顺北断溶体油气藏的油源,顺北地区不同断层带上的钻井均能获得工业油气,而在远离断层带的顺北蓬1井与顺北鹰1井等井均以失利告终,揭示了走滑断层在纵向空间上是否通源是制约油气成藏的关键因素,直立走滑断层在盐下构造层中的活动强度在一定程度上控制着油气藏通源性的强弱。基于顺北特殊的地层结构,本文提出走滑断层如能断穿第一构造层底部并向上贯通至第二构造层顶部,即断层具备沟通烃源岩的能力,其通源能力与断层活动强度成正比(图4b)。

2)走滑断层在不同岩石力学层中的活动性质不同,在碳酸盐岩刚性地层中常常表现为构造破碎为主,从而改变致密碳酸盐岩的孔隙度和渗透率,对断层的

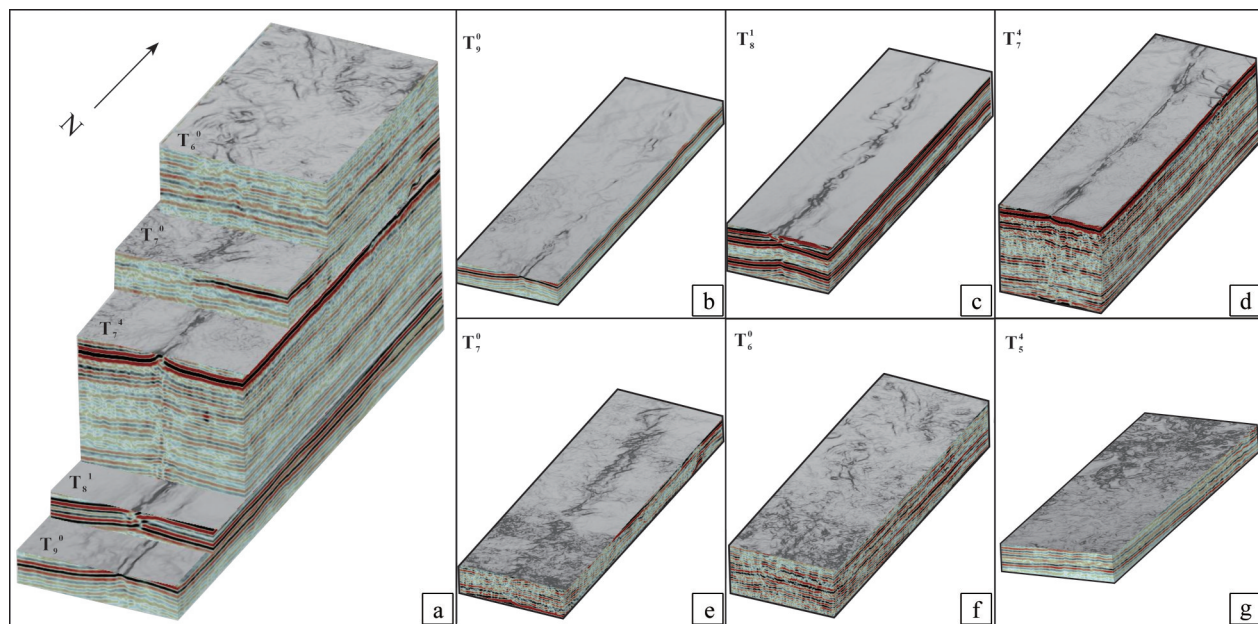


图4 塔里木盆地顺北5号断层不同构造层空间结构特征

Fig. 4 Spatial structures of different structural layers of Shunbei No. 5 fault, Tarim Basin

a. 顺北5号断层多层空间立体结构; b. T_0^0 界面断层空间结构; c. T_8^1 界面断层空间结构; d. T_7^4 界面断层空间结构; e. T_7^0 界面断层空间结构; f. T_6^0 界面断层空间结构; g. T_3^4 界面断层空间结构

运转移导具有建设性作用,在泥岩或膏盐岩地层表现为塑性变形,对岩石物性改造作用小。盐下构造层中的直立走滑断层能否断穿寒武系两套膏盐岩层,制约着油气在垂向上的运转移导性,同时膏盐岩滑脱构造会导致膏盐岩沿着断层破碎带汇聚或逃逸,其在一定程度上降低断层破碎带的物性条件,降低油气的输导性,从而影响油气的后期充注。本文结合走滑断层和膏盐滑脱构造在第一套膏盐岩地层顶部的构造活动特征,认为直立走滑断层在该层活动强度越大越利于油气的输导,而膏盐岩滑脱构造在该构造层中活动强度越小,越利于油气的运转移导(图4c)。

3)走滑断层在盐上碳酸盐构造层的刚性变形具有构造增容的作用,形成与构造相关的缝洞型储集体。顺北已钻井表明断层叠接段储层发育好于非叠接段,断层在第二构造层顶部断距越大,储层发育越好,揭示着走滑断层的叠接构造样式的复杂程度和活动强度制约着断控缝洞型储层发育规模。本文拟通过对该构造层顶部(T_7^4 界面)的断距、分段、侧接方式等断层要素来表征断层的活动强度,以此达到断控缝洞型储层规模的定性评价(图4d)。

4)走滑断层在第三套巨厚的海相泥岩中为塑性变形,在剖面上具有深层断距小,浅层断距大的撕裂正断层特点。在实钻过程中多次钻遇该构造层的雁列正断层,但并未发生放空漏失等异常工况,揭示雁列正断层

内部结构物性参数差,不利于油气运移,可能与泥岩涂抹作用有关,巨厚的泥岩盖层的封堵性强。本文提出该构造层的雁列正断层在关键层系上的延伸长度和剖面上的断距大小能代表断层活动规模和强度,认为雁列正断层如未贯穿第二构造层则盖层封闭条件好,反之则封闭条件差(图4e)。

5)走滑断层在第四个碎屑岩构造层中为小规模活动的雁列正断层,在平面走向上与第三构造层中的雁列正断层近垂直,指示走滑断层发生了走滑性质反转,形成构造滑脱空腔。实钻井钻遇该断裂时常常漏失或出盐水,揭示雁列正断层控制该构造层中具有断控缝洞型储层发育,同时SB5-6井的油迹、油斑与深层油气同源,标志着该构造层的雁列正断层活动在一定程度上对早期走滑断层具有改造作用,为油气运移提供通道。基于该层雁列正断层活动与第三构造层雁列活动差异性对比,提出该构造层的雁列正断层虽活动强度弱,但是对下伏构造层的改造作用和成储性明显更强,认为该构造层的雁列正断层活动强度能在一定程度上评价第二构造层中的储层改造作用(图4f)。

6)顺北地区主要存在加里东晚期—海西期早期、海西期晚期和喜马拉雅3个主要成藏期,前人认为现今可动用的油气主要为海西期晚期以后的成藏期^[4, 6, 24],而第五和第六构造层为海西期中晚期沉积,

其内部的雁列正断层与顺北的主成藏期具有较好的时空匹配性。雁列正断层在剖面上表现为继承性雁列正断层活动,但活动迹象不明显,仅在少数关键层系能见到雁列正断层的活动迹象,本文认为对这两个构造层中的断层活动强度进行评价,可以达到间接评价断溶体油气藏的油气充注强度的目的(图4g)。

4 讨论

前人立足走滑断裂的垂向结构序列,通过分析浅层雁列正断层的构造特征,提出后期断层活动强度控制着油气富集的规模^[4, 10-11],本文对顺北5号带已钻井开展断层空间结构解析,结合断层宏观特征对走滑断层开展立体评价工作。顺北5号上的高产井主要分布在北段,低产和水井分布在中段(图5),揭示了北段的油气富集程度明显好于中段。基于断层在第一构造层的平面样式和断层活动强度,可知北段通源性强于中段,因此在不考虑后期流体作用的条件下,本文认为第一构造层中的断层活动强度和演化程度制约着断层的通源性评价,其中断层活动强度越大、断层的演化程度越高,断层的通源能力越强(图6)。前文论述可知北段膏盐岩滑脱构造发育强度明显弱于中段,同时北段断层继承性发育,断层构造样式呈线性延伸,而中段在顶部的活动强度增大,侧接断层已完全贯穿,形成了线性延伸的趋势(图4,图5a),揭示了走滑断层均能贯穿膏盐岩层。SB5-8井和SB5-9井在该构造层的膏岩滑

脱构造活动强度最大,但其油气富集程度最低,主要以产水为主,油产量最高仅为10%左右,说明膏岩滑脱构造对油气的运移具有明显的破坏作用(图5b),同时,北段的膏岩滑脱构造相对于中段,对油气运移的封闭作用有限。本文认为顺北5号断层中、北段均能贯穿膏盐岩封堵层,其中断层输导能力强弱主要取决于该构造层顶部的膏岩滑脱构造发育强度,其活动强度越弱,断层的输导能力越强(图6)。

顺北5号走滑断层中、北段在第二构造层中呈近线性延伸,北段的分段特征明显,为典型的右行左阶叠接挤压段,而中段为非典型的右行左阶叠接段(图5c)。断层整体呈北强中弱的活动特征,其中分段叠接段内的裂缝较未叠接段更为发育,SB5井为北段典型挤压段上一口探井,未酸压前产能差,酸压后为高产井,揭示断层通源性和输导性均较好,但是储层规模有限,酸压改造有利于油气的沟通。与之对比的是发育在中段非叠接段的SB5-5井,其左侧发育了一条分支断层,与主干断层构成局部下凹的构造形态,该井在侧钻至分支断层处钻遇水层,后上返主干断面处测试获得良好的工业油气流,指示着北段的油气充注能力(通源能力)较北段弱,油气仅将主干断层的有效储集空间的水驱替掉,分支断层的储集空间的水还未被驱替(图5);从另一个角度看,非叠接段的断控裂缝发育规模较分段叠接段弱,主干与分支之间即使酸压后也无法有效沟通。本文认为走滑断层在该第二构造层中分段构造样式和断层活动强度在一定程度上限制断控缝洞型

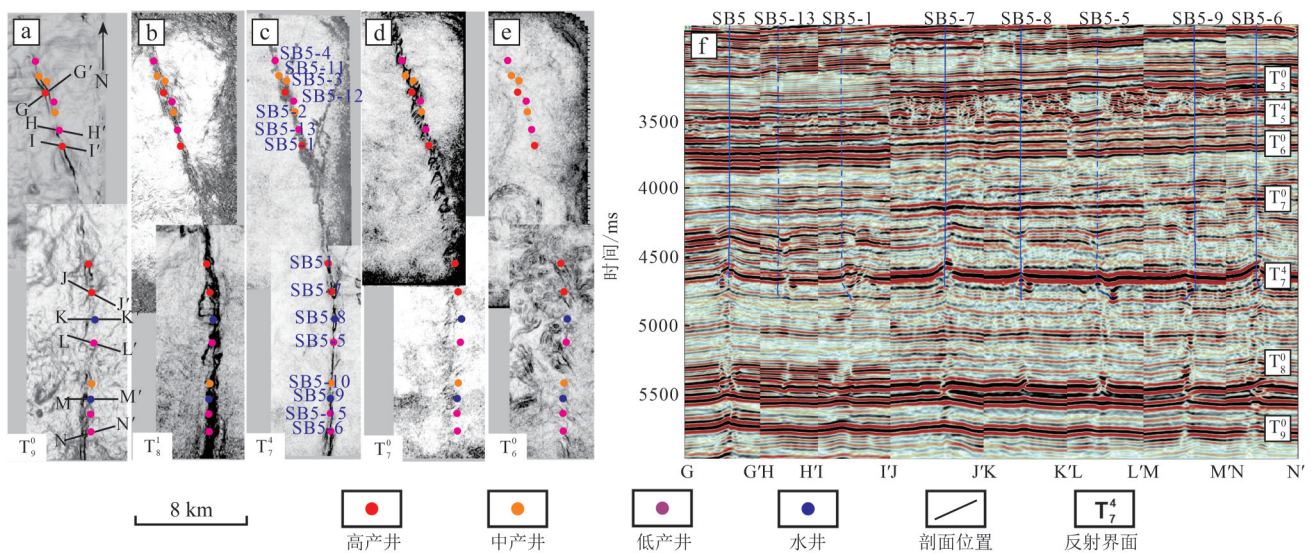


图5 塔里木盆地顺北5号断层中、北段井位分布及典型井纵向结构

Fig. 5 Well locations and vertical structure of typical wells in the middle-north segment of Shunbei No. 5 fault in the Tarim Basin

a. T_9 界面相干图、剖面位置与井位分布;b. T_8 界面相干图与井位分布;c. T_7 界面相干图与井位分布;d. T_7 界面相干图与井位分布;

e. T_6 界面相干图与井位分布;f. 典型井剖面结构特征(剖面位置见图5a)

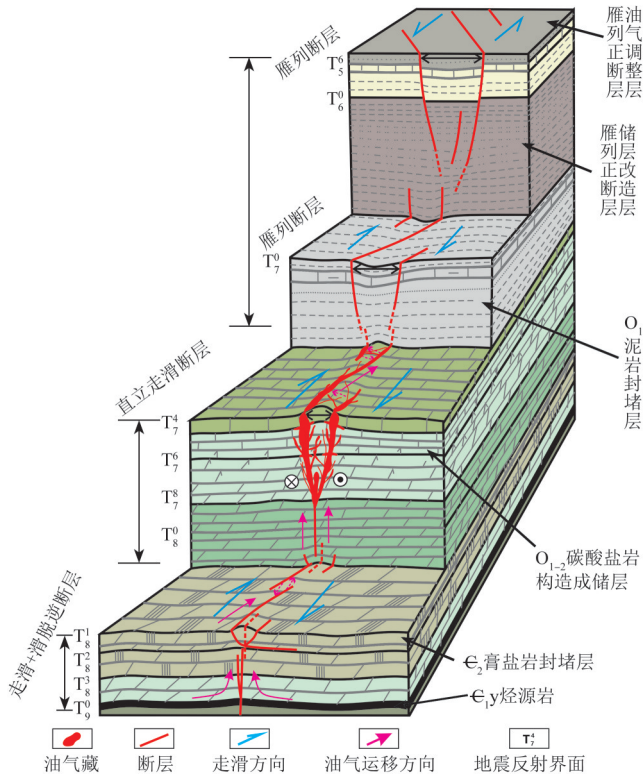


图6 塔里木盆地顺北5号断层带空间结构及油气藏成藏模式

Fig. 6 Spatial structure and reservoir-forming model of Shunbei No. 5 fault zone, Tarim Basin

储层发育规模,其分段构造特征是制约储集体发育的主要控制因素,所有的高产井均位于分段叠接位置,指示分段叠接段的储层规模明显大于分段非叠接段。断层活动强度则是制约断控储集体的次要控制因素,在构造样式保持一致时,断层活动强度控制着断控缝洞型储集体的发育规模(图6)。

顺北5号断层北段第三巨厚泥岩构造层中雁列正断层的发育规模较中段大,但雁列正断层的长度和活动强度较中段更弱(图5d)。北段SB5井区的第三构造层底部的构造特征与第二构造层的顶部构造特征具有相似性,均呈挤压隆起,揭示直立走滑断层在第三构造层中继承性发育,同时在其构造层顶部发育撕裂正断层。顺北5号北段的实钻资料指示花状构造和浅层的雁列正断层可能并未连通,断控裂缝油气藏的盖层具有良好的封堵性。而中段典型叠接段的SB5-8井实钻轨迹位于右行左阶挤压段的中间地块,因受后期雁列断层活动改造呈下凹构造形态,储层上覆的盖层封堵性被破坏,实钻为水层,见少量油气(图5)。结合断层构造特征和实钻结果,提出第三构造层的雁列正断层在纵向空间上与第二构造层中的花状走滑断层连通与否与雁列正断层的活动强度有关,雁列正断层的活动强度越大,贯穿至第二构造层的花状构造时,泥岩的封

堵性被破坏(图6)。综合分析认为顺北5号断层北段的封堵性强于中段,中段的盖层封堵性与后期的雁列活动强度有关。

顺北5号断层中北段在第四构造层的雁列正断层对早期的断层构造具有重要的改造作用,易于形成反向滑脱空腔的储集空间(图5e)。北段的雁列正断层活动规模有限,活动强度弱,而中段的雁列正断层的发育规模和强度与第三构造层相当,标志着该构造层的雁列正断层在活动过程中对深层断层具有一定的改造作用(图6)。SB5-6井是中段最南端的分段叠接段的一口低产井,并在志留系地层中钻遇油迹、油斑和少量原油^[24],揭示着该井的第二构造层与第四构造层的雁列正断层存在一定的连通,但规模有限。该井区的花状构造在第二构造层中的活动强度大,虽其第三构造层的雁列正断层发育规模有限,但第四构造层中的雁列正断层活动强度可观,标志着第四构造层的雁列正断层在一定程度上对第二构造层的缝洞型储层的构造破碎成储有建设作用,此外其对第三构造层中的雁列正断层在垂向上的沟通也具有一定的建设作用(图5)。本文认为该期的雁列正断层对油气成藏具有双重作用,该期的雁列正断层活动强度越大,储层的改造越好,表明断层活动对早期的断控缝洞型储层具有进一步的改造作用;同时断层对第三构造层盖层封堵性具有一定程度的破坏作用(图6)。顺北5号断层中北段在第五构造层中的活动强度达到最弱,同时北段和中段差异演化,其中段强度弱于北段,结合顺北地区的主要成藏期次,该构造层的断层活动与海西晚期油气成藏期具有较好的时空关系,指示着该层的断层活动强度越大,越利于断控裂缝油气藏的油气充注,这一认识与现今的顺北5号断层带中、北段油气藏产能差异现状相吻合(图6)。

顺北5号断层中北段现已完钻井16口,其中4口高产井,4口中产井,6口低产井和2口产水井(图5c),盐上碳酸盐岩顶界面的叠接段部署了9口钻井,非叠接段部署了7口钻井,其中4口高产井均分布在北段和中段北端的分段叠接段内,揭示走滑断层的叠接段内断控缝洞型储集体规模明显强于非叠接段。2口中产井分布在北段顺北5井区的叠接段内,另外2口分布在中段和北段的非叠接段上;6口低产井中4口分布在中段的非叠接段上,另2口分别分布在北段的非叠接段和叠接段上;2口水井分别分布在中段的叠接段和非叠接段,其中叠接段产水与后期雁列正断层的改造导致油气藏被破坏有一定关系。结合已钻井的产能和单位压降采油量可知叠接段上主要为中、高产井,低产井

少见,而非叠接段主体为中低产井及水井,揭示断控缝洞型储集体与断层的分段特征有一定的相关性,同时在构造样式相同时,断层的活动强度和规模制约着缝洞型储层发育的规模。钻井的产能差异不仅与盐上碳酸盐岩构造层的缝洞型储层发育规模有关,还与深层油气的垂向输导有一定关系,低产井和水井所在的盐下膏盐岩构造层顶部均呈滑脱挤压构造样式,推测与膏盐岩的塑性流动逃逸导致断层破碎带的物性参数变差有关,主体分布在中段;中产井与高产井所在的盐下膏盐岩构造层顶部呈拉分下掉或未明显变形(SB5井区除外),表明膏盐岩塑性活动的强度更弱,断层的垂向构造破碎带受膏盐封堵的作用有限,主要分布在断层的北段和中段北端。从断层平面分布来看,雁列活动强的北段单井产能明显好于中段,指示加里东晚期和海西期的雁列正断层活动强度对储集体改造和油气藏充注调整有一定的控制作用。SB5-8井中间地块下掉并产水,表明雁列正断层对早期的断控缝洞型储集体有改造破坏作用。海西期的雁列活动与油气充注期相匹配,有利于油气的垂向运移,顺北5号断层中北段走滑性质均在该时期发生改变,易于形成构造滑脱空腔,并对盐上碳酸盐岩缝洞型储集体具有进一步的改造作用。中段的钻井在志留系碎屑岩地层实钻过程中较北段更易发生放空漏失及出盐水,进一步证实了大强度的雁列正断层易于形成构造滑脱空间。同时,SB5-6井实钻表明,海西期雁列正断层的活动能对早期的走滑断层及雁列正断层进行改造,并有利于走滑断层在垂向空间上的油气输导性。中北段的油气产能及单位压降差异指示海西期雁列正断层的活动强度适中,有利于油气的充注及封闭,但中段雁列正断层的强度过大导致油气藏的封闭条件被破坏,整体油气产能不如北段。

基于走滑断层在不同构造层的构造变形特征,对断控缝洞型油气藏开展了系统研究后认为,顺北5号带中北段整体通源能力强,制约油气藏差异富集的关键因素为深层垂向输导能力、盐上碳酸盐岩构造成储规模及后期储层改造和油气充注强度,这3个关键因素均受到不同构造层中走滑断层构造变形特征及空间结构控制,膏盐岩塑性流动逃逸和海西期雁列正断层活动强度控制了中北段的油气富集程度。同一构造样式产能差异与浅深层不同构造层的差异变形在空间上的组合有关,而同一叠接段或非叠接段上不同钻井的产能差异与断层在平面上非均质性、垂向上的活动强度及深层膏盐岩对油气垂向运移的封堵有关。

5 结论

1)塔里木盆地走滑断层在空间上具有“分层变形、分段演化”的特征,顺北5号断层在不同构造层中的构造变形差异明显,在立体空间上由下向上表现为直立走滑、膏盐岩滑脱构造、花状构造、右行雁列正断层、左行雁列正断层及继承性左行雁列正断层的垂向结构序列。

2)立足于构造层概念,对顺北断控裂缝油气藏的立体评价具有科学性。断控缝洞型油气藏中断层断穿了第一构造层底部,是沟通了寒武系玉尔吐斯组海相烃源岩的前提条件;同时贯穿膏盐岩是油气能顺利进入第二构造层中断控缝洞型储层的必要条件;第二构造层中的断层分段特征及活动规模是制约断控缝洞型储层发育规模的关键因素;第三构造层中的雁列正断层与第二构造层中的花状构造是否连通,是盖层封堵性评价的重要内容;第四构造层的雁列正断层活动强度是控制第二构造层储层改造规模和走滑断层纵向空间连通性的决定因素;第五和第六构造层中的雁列正断层与海西晚期油气充注具有良好的时空关系,其活动强度制约着油气藏的充注强度,是油气藏差异富集程度的关键所在。

参 考 文 献

- [1] 汤良杰,张一伟,金之钧,等.塔里木盆地、柴达木盆地的开合旋回[J].地质通报,2004,23(3):254-260.
Tang Liangjie, Zhang Yiwei, Jin Zhijun, et al. Opening-closing cycles of the Tarim and Qaidam basins northwestern China [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(3): 254-260.
- [2] 何碧竹,焦存礼,许志琴,等.塔里木盆地显生宙古隆起的分布及迁移[J].地学前缘,2015,22(3):277-289.
He Bizhu, Jiao Cunli, Xu Zhiqin, et al. Distribution and migration of the Phanerozoic palaeo-uplifts in the Tarim Basin, NW China [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 277-289.
- [3] Lin B, Zhang X, Xu X, et al. Features and effects of basement faults on deposition in the Tarim Basin [J]. Earth-Science Reviews, 2015, (145): 43-55.
- [4] 漆立新.塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J].中国石油勘探,2020,25(01):102-111.
Qi Lixin. The characteristics and enlightenment of ultra-deep carbonate reservoir controlled by fault-zone-architecture related dissolution in Shunbei, Tarim Basin [J]. China Petroleum exploration, 2020, 25(01): 102-111.
- [5] 焦方正.塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断层带的油气勘探意义[J].石油与天然气地质,2017,38(05):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.
- [6] 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(02): 207-216.
- Jiao Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2018, 39(2):207-216.
- [7] 马德波, 邬光辉, 朱永峰, 等. 塔里木盆地深层走滑断层分段特征及对油气富集的控制:以塔北地区哈拉哈塘油田奥陶系走滑断层为例[J]. 地学前缘, 2019, 26(01): 225-237.
- Ma Debo, Wu Guanghui, Zhu Yongfeng, et al. Segmentation characteristics of deep strike slip faults in the Tarim Basin and its control on hydrocarbon enrichment: taking the Ordovician strike slip fault in the Halahatang Oilfield in the Tabei area as an example [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1):225-237.
- [8] 吕海涛, 张哨楠, 马庆佑. 塔里木盆地中北部断层体系划分及形成机制探讨[J]. 石油实验地质, 2017, 39(04): 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(04): 444-452.
- [9] 王璐瑶, 邓尚, 张仲培, 等. 顺北三维区“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 Reservoirs, 2017, 24(06): 66-71.
- [10] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断层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(05): 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.
- [11] 邓尚, 李慧莉, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断层中段活动特征及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(05): 990-998+1073.
- Deng Shang, Li Huili, Han Jun, 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, 2019, 40(05): 990-8+1073.
- [12] 黄诚. 叠合盆地内部小尺度走滑断层幕式活动特征及期次判别——以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 石油实验地质, 2019, 41(03): 379-389.
- Huang Cheng. Multi-stage activity characteristics of small-scale strike-slip faults in superimposed basin and its identification method: a case study of Shunbei area, Tarim[J]. Petroleum Experimental Geology, 2019, 41(03): 379-389.
- [13] 李映涛, 漆立新, 张哨楠, 等. 塔里木盆地顺北地区中——下奥陶统断溶体储层特征及发育模式[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1470-1484.
- Li Yingtao, Qi Lixin, Zhang Shaonan, et al. Characteristics and development mode of the Middle and Lower Ordovician fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1470-1484.
- [14] 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层和裂缝地震识别与评价[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(04): 703-710.
- Liu Jun, Ren Lidan, 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(04): 703-710.
- [15] 林波, 张旭, 况安鹏, 等. 塔里木盆地走滑断层构造变形特征及油气意义——以顺北地区1号和5号断层为例[J]. 石油学报, 2021, 42(7):906-923.
- Lin Bo, Zhang Xu, Kuang Anpeng, et al. Structural deformation characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and its hydrocarbon significance: A case of Shunbei No. 1 fault and No. 5 fault [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7):906-923.
- [16] 林波, 云露, 张旭, 等. 一种板内小尺度走滑断层平面分段研究方法:以塔里木盆地顺北5号断层中北段为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4):1006-1018.
- Lin Bo, Yun Lu, Zhang Xu, et al. A method for plane segmentation of intraplate small-scale strike-slip faults: A case of the middle-north section of Shunbei No. 5 fault in Tarim Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 1006-1018.
- [17] 廖涛, 侯加根, 陈利新, 等. 断层对塔北地区哈拉哈塘油田奥陶系非暴露岩溶缝洞型储集层的控制作用[J]. 古地理学报, 2016, 18(2): 221-235.
- Liao Tao, Hou Jiagen, Chen Lixin, et al. Fault controlling on non-exposed karst fracture-vug reservoirs of the Ordovician in Halahatang Oilfield, northern Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(2): 221-235.
- [18] Lan X, L X, Zhu Y, et al. The geometry and origin of strike-slip faults cutting the Tazhong low rise megaanticline (central uplift, Tarim Basin, China) and their control on hydrocarbon distribution in carbonate reservoirs [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2015, 22(3): 633-645.
- [19] 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.
- [20] 韩晓影, 汤良杰, 曹自成, 等. 塔中北坡“复合花状”构造发育特征及成因机制[J]. 地球科学, 2018, 43(02): 525-537.
- Han Xiaoying, Tang Liangjie, Cao Zicheng, et al. Characteristics and formation mechanism of composite flower structures in northern slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2018, 43(2): 525-537.