

塔里木盆地塔河油田S80走滑断裂发育特征及其对奥陶系储层的控制作用

韩鹏远^{1,2}, 丁文龙^{1,2}, 杨德彬^{1,2,3}, 张娟^{1,2,3}, 马海陇³, 王生晖^{1,2}

[1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083;
3. 中国石化西北油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011]

摘要:综合运用岩心资料、测井资料、单井漏失段宽度和漏失量数据,利用高精度三维地震数据,结合多层相干属性开展塔里木盆地塔河地区S80走滑断裂带精细解析,厘定了其空间展布特征、活动强度特性及活动期次,探讨了S80走滑断裂对奥陶系储层的控制作用。研究表明:①S80走滑断裂带沿走向可分为西带、中带和东带,3个分带整体具有纵向上由寒武系至奥陶系叠接段数量显著增多、段长和段宽明显增加的特点,平面上由SW向NE张扭段规模减小、压扭段规模增强、平移段逐渐消失。具有“中带断裂活动强、两侧断裂活动弱”的特征。②S80走滑断裂带活动主要经历了加里东中期、加里东晚期—海西早期、海西晚期和印支期—喜马拉雅早期4个阶段。加里东中期和加里东晚期—海西早期为主要活动期。为“前两期左行,后两期右行”的走滑性质。③围绕S80走滑断裂带发育洞穴型、复合型(裂缝-孔洞型、孔洞-裂缝型)以及裂缝型3类储层。溶蚀孔洞的发育与走滑断裂分段性活动密切相关,活动性强的压扭段、平移段及活动性弱的张扭段主干断裂周缘是溶蚀孔洞发育的有利部位。④中奥陶统一间房组压扭段裂缝线密度高,中奥陶统一间房组至中-下奥陶统鹰山组纵向上裂缝线密度显著降低,溶蚀能力局限性大。中奥陶统一间房组张扭段裂缝线密度适中,中奥陶统一间房组至中-下奥陶统鹰山组在纵向上裂缝均较发育,溶蚀孔洞数量和规模相对更大,为储层的有利发育区。

关键词:断裂分段性;断裂活动性;断裂控储;S80走滑断裂带;奥陶系;塔河油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics of the S80 strike-slip fault zone and its controlling effects on the Ordovician reservoirs in the Tahe oilfield, Tarim Basin

HAN Pengyuan^{1,2}, DING Wenlong^{1,2}, YANG Debin^{1,2,3}, ZHANG Juan^{1,2,3}, MA Hailong³, WANG Shenghui^{1,2}

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Enrichment Mechanism (Ministry of Education), China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China]

Abstract: A fine interpretation of the S80 strike-slip fault zone in the Tahe area of Tarim Basin is carried out by comprehensively utilizing core data, logs, the widths and total volume of the lost intervals in individual wells, high-precision 3D seismic data, and multilayer coherence attributes. Its spatial distribution, and activity intensity and stages are determined thereby, and its controlling effects on the Ordovician reservoirs are explored. The findings indicate that the S80 strike-slip fault zone can be divided into the western, central, and eastern subzones along its strike. These three subzones generally show a noticeable increase in the number, length, and width of overlapping segments from the Cambrian to the Ordovician strata vertically. Laterally, the S80 strike-slip fault zone, from SW to NE, exhibits the contraction of its transtensional segments, the expansion of its transpressional segments, and the gradual disappearance of its pure strike-slip segment. Furthermore, the activity of this fault zone proves strong in its central subzone but weak

收稿日期:2024-01-01;修回日期:2024-05-20。

第一作者简介:韩鹏远(1996—),男,博士研究生,走滑断裂发育特征与形成机制、储层裂缝识别与多参数分布预测。E-mail: hanpengyuan2022@126.com。

通信作者简介:丁文龙(1965—),男,教授、博士研究生导师,石油构造分析与控油气作用、非常规油气储层裂缝形成机制与定量表征及工程甜点评价。E-mail: dingwenlong2006@126.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42372171,42072173)。

in its western and eastern subzones. The S80 strike-slip fault zone experienced four activity stages, namely the Middle Caledonian, the Late Caledonian-Early Hercynian, the Late Hercynian, and the Indosinian-Early Himalayan, with the former two stages predominating. This fault zone experienced sinistral strike-slip in the former two stages but dextral in the latter two stages. Three types of reservoirs are developed along the S80 strike-slip fault zone: cavernous, compound (fractured-vuggy and vuggy-fractured types), and fractured types. The development of dissolution vugs is closely related to the segmented activity of strike-slip faults, with the transpressional and translational segments featuring strong activity, as well as the periphery of the major faults of the transtensional segment characterized by weak activity, serving as favorable parts for the development of dissolution vugs. The transpressional segment of the Middle Ordovician Yijianfang Formation exhibits a high linear density of fractures, while those of the Middle Ordovician Yijianfang Formation to the Middle-Lower Ordovician Yingshan Formation show a significantly decreased linear density of fractures vertically, leading to a limited dissolution capacity. The transtensional segment in the Middle Ordovician Yijianfang Formation has a moderate linear density of fractures, and those of the Middle Ordovician Yijianfang Formation to the Middle-Lower Ordovician Yingshan Formation exhibit well-developed fractures and dissolution vugs with an elevated number and scale, establishing this interval as a favorable area for reservoir development.

Key words: fault segmentation, fault activity, faulting-controlled reservoir formation, S80 strike-slip fault zone, Ordovician, Tahe oilfield, Tarim Basin

引用格式:韩鹏远,丁文龙,杨德彬,等. 塔里木盆地塔河油田S80走滑断裂发育特征及其对奥陶系储层的控制作用[J]. 石油与天然气地质,2024,45(3):770-786. DOI:10.11743/ogg20240314.

HAN Pengyuan, DING Wenlong, YANG Debin, et al. Characteristics of the S80 strike-slip fault zone and its controlling effects on the Ordovician reservoirs in the Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 770-786. DOI: 10.11743/ogg20240314.

塔河油田是塔里木盆地油气相对富集的产区之一,其中以中-下奥陶统顶部的碳酸盐岩岩溶缝洞型油气藏的油气产量最为丰富^[1-2]。前人对塔河地区的研究主要集中在岩相古地理特征分析^[3]、岩溶古地貌恢复^[4-5]、岩溶水系分布^[6-7]、古隆起构造演化与岩溶作用关系^[8-9]及岩溶作用对储层发育的控制作用^[10-11]等方面。然而,随着勘探开发程度的不断深入,奥陶系浅层岩溶缝洞型储层中剩余“常规串珠”的数量减少、规模变小,“断控”型“断溶体油藏”逐渐进入人们的视野^[12]。近年来,随着塔里木盆地顺北和富满等地区围绕走滑断裂体系开展的油气勘探取得一系列重大突破,走滑断裂带及其所形成的油气藏已成为现阶段塔里木盆地碳酸盐岩层系增储上产的首要目标,走滑断裂带对奥陶系碳酸盐岩“控储、控藏、控富”作用的研究受到极大的重视^[13-17]。前人对塔河地区走滑断裂的研究主要围绕在确定断层性质、厘定断层级次、解析构造样式和划分平面组合等方面,并在构造演化、成因机制及其对岩溶控制的研究工作中获得了一系列的认识^[18-19]。但研究尺度相对宏观,在塔河油田S80走滑断裂带几何学和运动学的精细解析、活动性差异分析及其对储层的控制作用等方面尚未开展针对性研究,对走滑断裂影响下岩溶储层的发育模式未进行系统性的分析。本文针对塔河油田S80走滑断裂带,利用高精度三维地震

数据体,开展走滑断裂构造、几何学和运动学特征分析、活动性评价及其演化模式厘定,并结合岩心、钻-录-测井、实际生产资料和已有岩溶研究成果探讨走滑断裂对碳酸盐岩储层的控制作用,为深化对塔河油田内部走滑断裂带刻画和明确走滑断裂控储机制提供参考。

1 区域地质背景

塔里木盆地位于中国西北部新疆维吾尔自治区,被天山造山带、昆仑造山带和阿尔金造山带所环绕,是一个大型含油气叠合盆地^[1, 20-22]。塔河油田所在的阿克库勒凸起位于塔里木盆地北部沙雅隆起中段南翼,是塔里木盆地油气相对富集的构造单元之一^[23-27](图1a)。其东、西两侧受哈拉哈塘凹陷和草湖凹陷夹持,向南紧邻满加尔坳陷及顺托果勒低隆,其上的奥陶系碳酸盐岩油气藏是迄今为止在塔里木盆地发现的最大油气藏群^[1, 10, 28-29]。前人研究表明该地区经历至少4个构造演化阶段:加里东早-中期隆起雏形期^[30-32]、加里东晚期-海西早期强烈挤压隆升期^[33-34]、海西中期-印支期挤压剥蚀期^[35-36]和燕山期-喜马拉雅期调整期^[37-38]。在多期不同性质的构造运动中以加里东期和海西期构造运动对寒武系-奥陶系中走滑断裂的形成与发展起到了至关重要的作用,并形成了该地区NNE

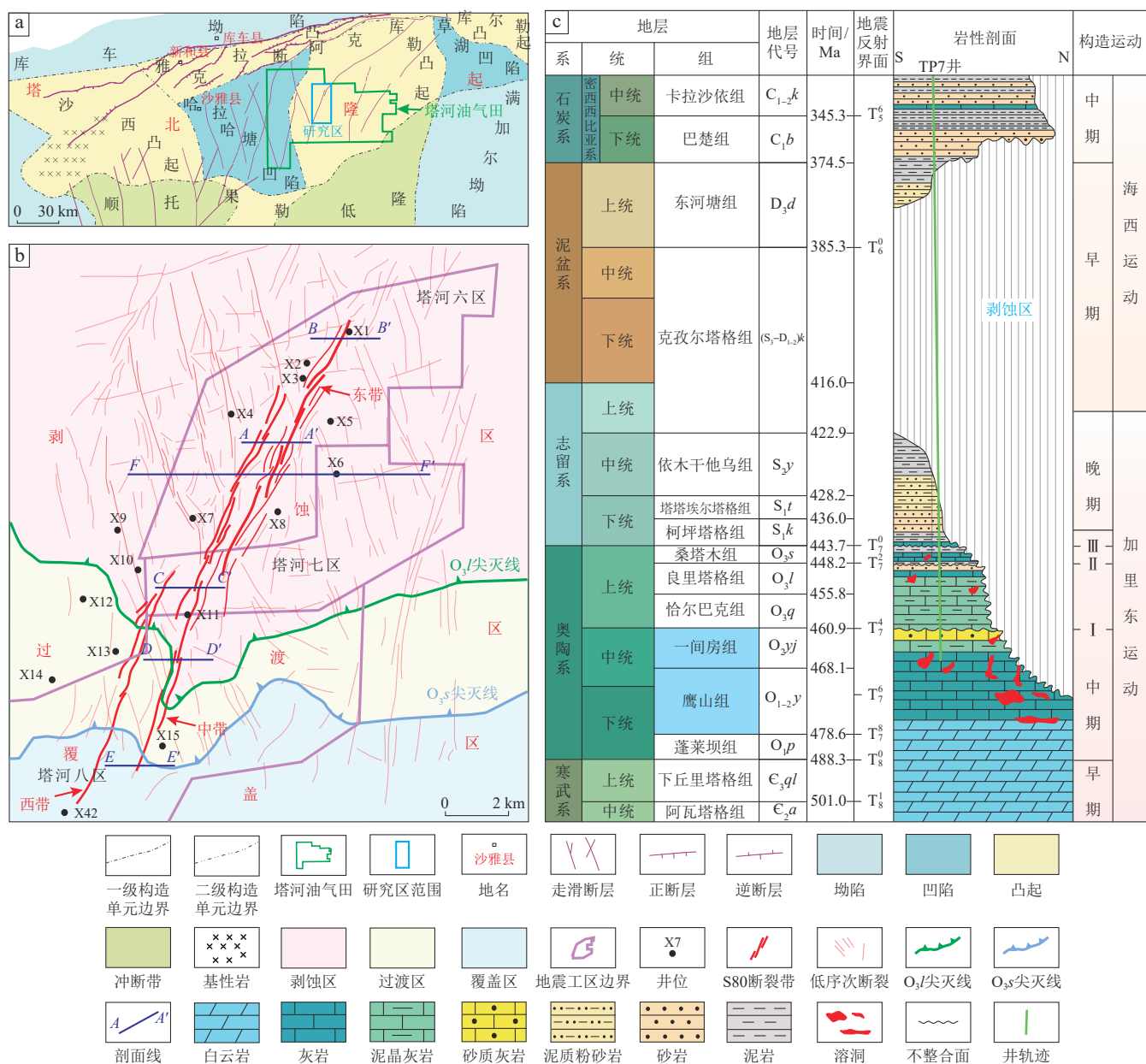


图1 塔里木盆地塔北隆起构造区划分、断裂分布特征及地层综合柱状图

Fig. 1 Structural division, fault distribution characteristics, and composite stratigraphic column of the Tabei uplift in the Tarim Basin
a. 塔北隆起构造单元划分及主干断裂分布(据文献[1,8]补充修改); b. 研究区断裂分布特征; c. 塔河地区地层综合柱状图(据文献[18]补充修改)

向和NNW向2组规模较大、发育程度大体一致、基本对称分布的共轭(“X”型)走滑断裂体系^[18, 39](图1b)。

塔河地区地层自南向北剥蚀程度逐渐增强,寒武系碳酸盐岩(白云岩为主)-膏盐岩之上的奥陶系碳酸盐岩(灰岩为主)-志留系碎屑岩地层随地势的增高逐渐抬升,剥蚀程度显著提升并最终尖灭(图1b),其上超覆有少量泥盆系碎屑岩和大量石炭系碎屑岩与膏泥岩^[40-41]。当前,塔河油田油气勘探开发主要集中在奥陶系碳酸盐岩储层中,奥陶系自下而上发育下奥陶统蓬莱坝组(O_{2p})、中-下奥陶统鹰山组($O_{1-2}y$)、中奥陶统一间房组(O_{2y})及上奥陶统恰尔巴克组(O_{3q})、良里塔格组

(O_3l)和桑塔木组(O_3s),以中-下奥陶统鹰山组与中奥陶统一间房组的缝洞型储层为主力油气产层^[9, 42](图1c)。

2 S80走滑断裂带断裂特征

2.1 空间展布特征

2.1.1 平面特征

S80走滑断裂带位于塔河油田中部,平面上该断裂线性延伸距离长,规模大,横跨塔河主体区六、七、八

区,整体呈NNE向展布(图1b)。不同层位中S80走滑断裂带均具有较好延续性,并以中奥陶统一间房组顶界面(T_7^4)为界可分为深、浅2套断裂体系(图2f)^[43-44]。深层(上震旦统奇格布拉克组顶界面—上寒武统阿瓦塔格组顶界面,即 T_9^0 — T_8^1)为线性延伸的主干走滑断裂,向上走滑断裂逐渐发散,形成主干断裂“S”形弯曲、斜列展布和分支断裂伴生两侧的特征,浅层则表现为NE向的雁列式正断层(图2a—e)。浅层雁列式正断层的形成受控于深部主干走滑断裂,上、下叠置关系良好,然而地震剖面上显示浅层雁列式正断层同深层走滑断裂多表现为纵向上断裂不连接。由于 T_7^4 界面受岩溶改造较为强烈,相干效果较差,故对S80走滑断裂带的刻画以紧邻 T_7^4 界面的中—下奥陶统鹰山组顶界面(T_7^6)相干为依据。因S80走滑断裂带叠接段多为左阶展布,在叠接部位普遍发育拉分段,故判断 T_7^4 界面上S80走

滑断裂带呈左行走滑,而浅层雁列式正断层,尤以中二叠统开派兹雷克组顶界面(T_5^0)和下白垩统亚格列木组顶界面(T_3^4),与走滑断裂锐夹角关系表明,后期运动中S80走滑断裂存在走向转换,因此S80走滑断裂带具备“前期左行,后期右行”的走滑特点。在多期挤压应力的影响下最终形成以压扭为主、张扭为辅的形态特征,沿走向可将其划分为西带、中带和东带。西带倾角较大,断裂直插基底,少量穿过 T_7^4 ;中带叠接段丰富,断裂纵向切穿能力强,深部直插基底,浅部可穿过下石炭统巴楚组顶界面(T_6^6),断距较大;东带倾向、倾角及切穿能力均同中带大体相同,断距小于西带和中带(图1b,图2;表1)。

通过对不同层位S80走滑断裂带的刻画可以发现,不同层位中叠接段数量存在差异, T_7^4 界面共有13个叠接段,数量最多,且压扭段占比较高,下奥陶

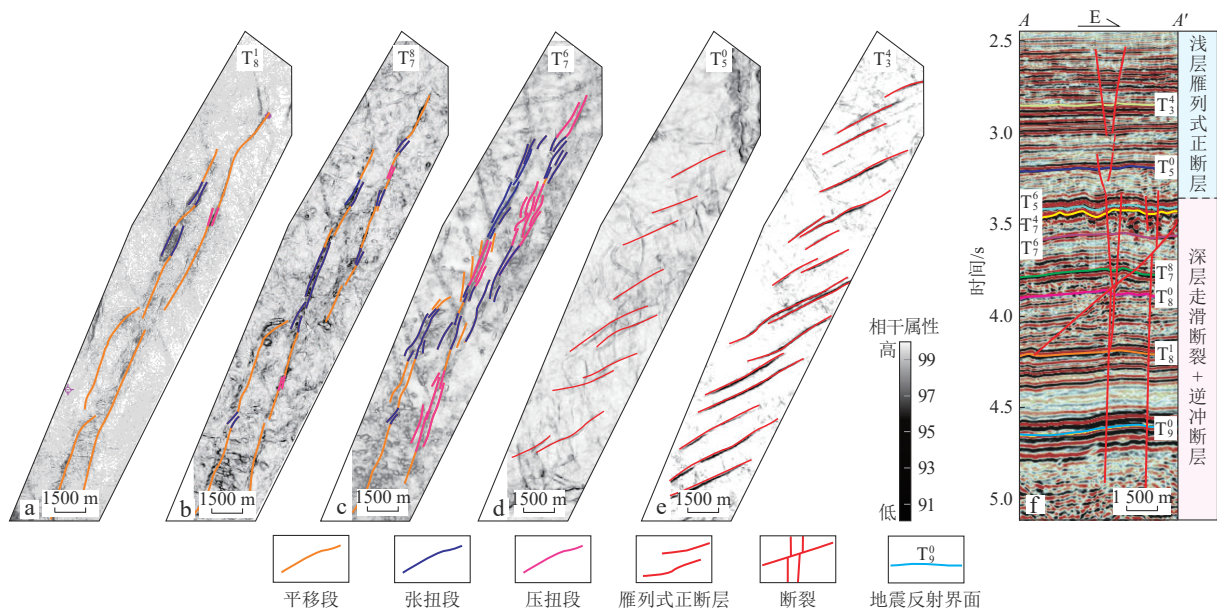


图2 塔河地区S80走滑断裂带地震多层相干特征与断裂解释典型剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 2 Typical profiles showing the multilayer coherence and fault interpretations of the S80 strike-slip fault zone in Tahe area (see Fig. 1b for the profile locations)

a. T_8^1 层位相干及断裂解释结果;b. T_7^8 层位相干及断裂解释结果;c. T_7^6 层位相干及断裂解释结果;d. T_5^0 层位相干及断裂解释结果;
e. T_3^4 层位相干及断裂解释结果;f. 过S80走滑断裂带典型地震剖面及构造层划分

T_3^4 : 下白垩统亚格列木组顶界面; T_5^0 : 中二叠统开派兹雷克组顶界面; T_6^6 : 下石炭统巴楚组顶界面; T_7^4 : 中奥陶统一间房组顶界面; T_7^6 : 中—下奥陶统鹰山组下段顶界面; T_7^8 : 下奥陶统蓬莱坝组顶界面; T_8^1 : 上寒武统下丘里塔格组顶界面; T_8^1 : 上寒武统阿瓦塔格组顶界面; T_9^0 : 上震旦统奇格布拉克组顶界面

表1 塔河地区S80走滑断裂带断裂要素统计

Table 1 Statistics of fault elements of the S80 strike-slip fault zone in Tahe area

分带	走向	倾向	倾角/(°)	延伸长度/km	主干断层数量/个	断穿层位	断距/m		
							最小值	最大值	平均值
西带	NNE	SE	80 ~ 85	7.72	2	基底— T_7^4	0	54.60	39.56
中带	NNE	NW	70 ~ 85	12.18	7	基底— T_5^0	8.54	59.59	40.78
东带	NNE	NW	70 ~ 85	9.74	5	基底— T_5^0	5.73	63.25	37.41

统蓬莱坝组顶界面(T_7^8)共有9个叠接段并以张扭段为主,而中寒武统阿瓦塔格组顶界面(T_8^9)仅含有3个叠接段(表2)。S80走滑断裂带整体表现为由深至浅叠接段数量显著上升, T_7^8 界面由于大量分支断裂的出现,造成 T_7^8 界面局部叠接段明显加宽,3个分带由SW向NE张扭段长度减小,压扭段长度增大,平移段逐渐消失(图2c)。

2.1.2 剖面特征

塔河地区S80走滑断裂带不同分带在剖面上均可识别出2大类走滑构造样式。

1) 花状构造样式

在剖面上表现为直插基底的主干断层向浅层发散出多条分支断裂,这是走滑断裂独有的构造样式之一^[45-47]。花状构造样式贯穿整个S80走滑断裂带,根据走滑断裂对地层变形的控制作用可将花状构造进一步划分为正花状和负花状2种构造样式,正花状构造样式具有“局部挤压、地层隆升、分支断裂多、高角度裂缝发育、破碎空间范围大”的特点(图3a,c),负花状构造样式具有“张性环境、地层下掉、分支断裂少、开度大”的特点^[48-49](图3b)。这2种构造样式沿S80走滑断裂带交替出现,主要集中在奥陶系之中,少量可断至寒武系。

2) 直立状构造样式

该类型构造样式较花状构造样式规模小,按照断开层位数量可分为2种类型。第一类为切穿寒武系—上奥陶统的大规模直立状断裂,该类型直立状断裂多分布于S80走滑断裂带两端,断层面陡直,倾角大于 80° ,两侧同相轴错断较为微弱,地层起伏变化极小,断裂带宽度较窄;第二类为直立状层间断裂,多数为奥陶系内部或仅断至寒武系顶部的小规模层间走滑断裂,该类型断裂多作为次级断裂伴生出现在S80主干走滑断裂带两侧(图3d)。研究区内还发育1条NNE向低角度逆冲断裂,对已形成的S80走滑断裂带的不同构造样式起到改造作用,并造成上寒武统—奥陶系一定程度的逆冲,逆冲断裂及走滑断裂控制区域地层的破碎程度(图3b—c)。

2.2 活动强度特征

通过统计S80走滑断裂带主干断裂两侧地层的变形幅度,即主干断裂两侧同一地震反射界面的垂直位移量大小,来反映走滑断裂的活动特征。垂直位移量为正表明地层受挤压作用,发生地层隆升,为负则表示受拉张作用,地层下掉,但无论垂直位移量为正值与负值,其绝对值的大小均是对走滑断裂两侧地震反射界面的变形幅度的体现^[50-52]。因此,利用垂直位移量绝对值可判断走滑断裂活动强度,垂直位移量绝对值越大,表示走滑断裂带活动性越强^[53]。由于一间房组顶界面(T_7^8)受岩溶改造作用过于强烈,且S80走滑断裂带不存在典型的纵向多套走滑断裂体系^[54-55],因此选取鹰山组顶界面(T_9^8),通过分别计算S80走滑断裂带西带、中带和东带两侧鹰山组顶界面地层高差变化幅度,分析不同分带活动性的差异。因3个分带的纵向延伸距离不同,故选取垂直于3个分带不同的采样间隔距离(400,300和500 m),进行两侧地层垂直位移量计算,以垂直位移量的绝对值大小代表活动强度的强弱。计算结果表明,东带活动强度变化幅度较大,整体波动性较强,具有两侧强、中部弱的特点,垂直位移量多集中在8.0~18.0 m(图4a)。中带中部垂直位移量显著上升,活动强度明显增强,垂直位移量多为38.0~76.0 m,局部可达98.8 m,而向两侧活动强度递减,多在11.4~57.0 m变化(图4b)。分析认为,中带中部活动强度的激增及断裂带两侧地层垂直位移量的显著变化,同该部位处在NNE向中带与NNW向断裂的交汇部位、应力较为集中、地层破碎严重有关,又与该部位同时处于中带的张扭段有关。西带与东带相同,表现为两侧强、中部弱的特点,垂直位移量在19.0~76.0 m(图4c)。整体上来看,S80走滑断裂带中带活动性最强,西带次之,东带相对最弱。

2.3 演化模式

根据不同层位中构造样式特征的差异性,认为S80走滑断裂带具备多期活动的特点,可将S80走滑断裂带划分出至少4个活动阶段。

表2 塔河地区S80走滑断裂带NNE向3个分带力学性质分段特征

Table 2 Mechanical property-based segmentation of the three NNE-trending subzones of the S80 strike-slip fault zone in Tahe area

层位	运动方向	排列方式	西带分段数量/个			中带分段数量/个			东带分段数量/个		
			压扭段	张扭段	平移段	压扭段	张扭段	平移段	压扭段	张扭段	平移段
T_8^1	左行	左阶	0	0	2	0	2	4	1	0	2
T_7^8	左行	南侧多右阶,北侧多左阶	0	1	2	1	3	4	1	3	5
T_7^6	左行	多左阶	0	2	3	3	5	4	2	2	2

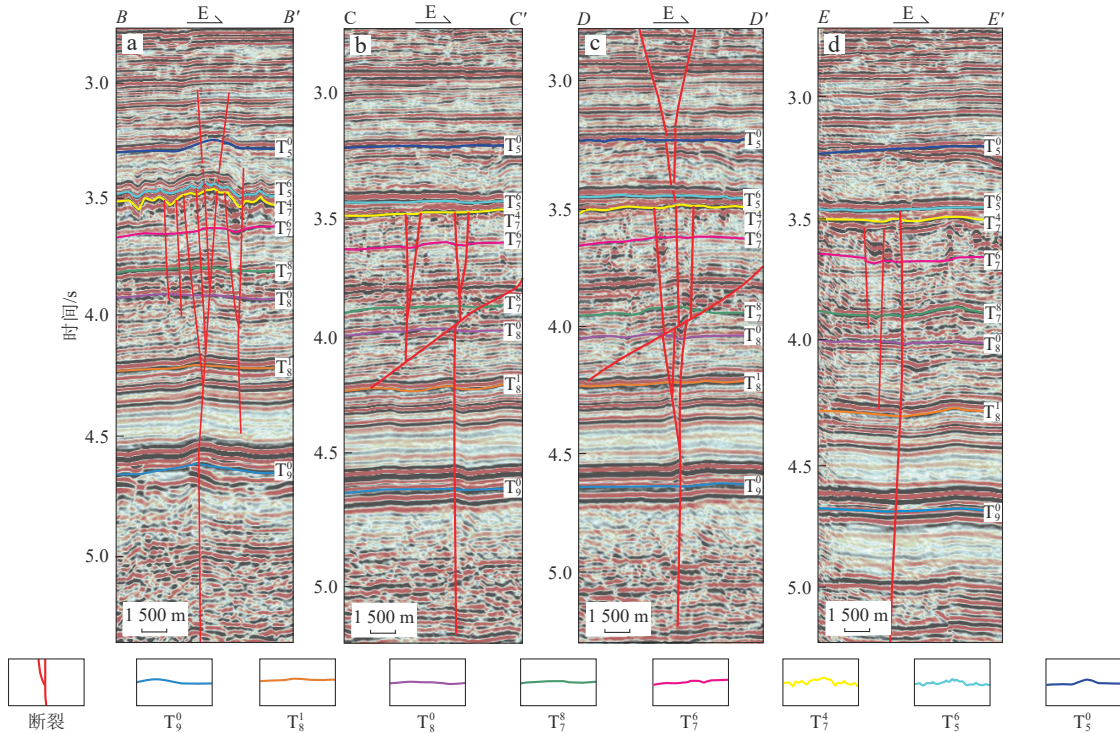


图3 塔河地区S80走滑断裂带剖面构造样式(剖面位置见图1b)

Fig. 3 Structural styles along sections of the S80 strike-slip fault zone in Tahe area (see Fig. 1b for the section locations)

- a. 正花状构造样式地层-断裂综合解释剖面; b. 负花状+逆冲构造样式地层-断裂综合解释剖面; c. 正花状+逆冲构造样式地层-断裂综合解释剖面; d. 直立状构造样式地层-断裂综合解释剖面

T_5^0 : 中二叠统开派兹雷克组顶界面; T_5^6 : 下石炭统巴楚组顶界面; T_7^1 : 中奥陶统一间房组顶界面; T_7^6 : 中-下奥陶统鹰山组下段顶界面; T_8^7 : 下奥陶统蓬莱坝组顶界面; T_8^8 : 上寒武统下丘里塔格组顶界面; T_9^1 : 上寒武统阿瓦塔格组顶界面; T_9^0 : 上震旦统奇格布拉克组顶界面

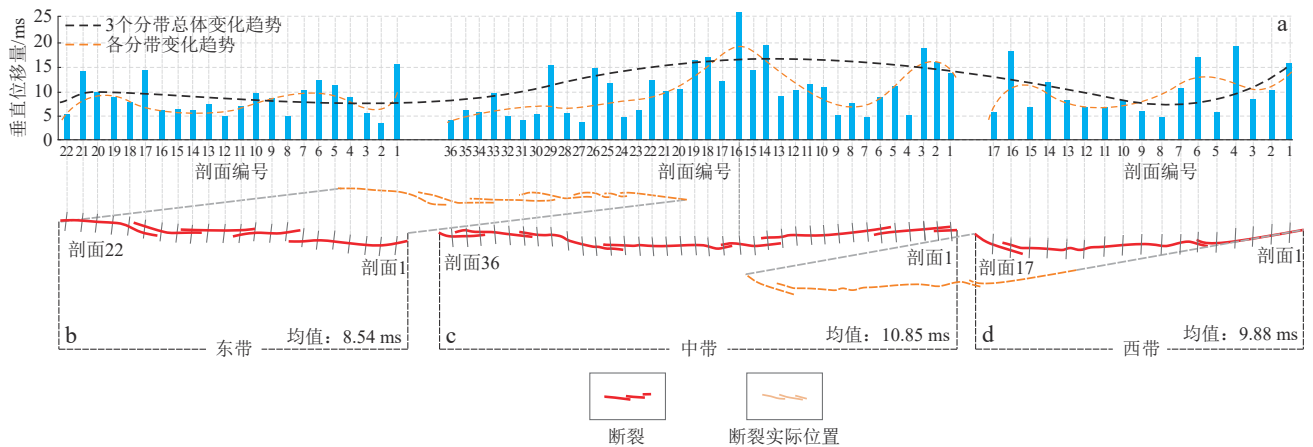


图4 塔河地区S80走滑断裂带不同分带活动强度特征

Fig. 4 Activity intensity of the three subzones of the S80 strike-slip fault zone in Tahe area

- a. 各分带垂直位移量柱状图; b. 东带垂直位移量统计剖面划分方案; c. 中带垂直位移量统计剖面划分方案; d. 西带垂直位移量统计剖面划分方案

2.3.1 加里东中期(走滑断裂带初始发育期)

前震旦纪—中奥陶世,研究区在拉张作用影响下,形成一定数量和规模的正断层^[56]。晚奥陶纪末期受西南侧古昆仑洋闭合以及北部南天山洋逐渐剪刀式闭合的影响,导致盆地性质由张性向压性转变^[57-58]。此

时阿克库勒凸起受到近SN向强烈挤压作用,在先期存在的正断裂基础上形成了S80走滑断裂带,平面上S80走滑断裂带线性延伸好,主干断裂长度大,各断层段之间相互叠覆,剖面上断裂深部直插基底,并在中-下奥陶统内形成一系列伴生于主干断裂的分支断裂,分支断裂同主干断裂的相互组合共同构成了典型的正花状

或负花状构造样式。走滑断裂花状构造引起奥陶系起伏变化明显,其中 T_7^0 界面地层变化最为强烈(图3,图5a)。在幕式抬升的影响下奥陶系由南向北剥蚀增强,因为研究区无法明确观察到上奥陶统的变化特点,于是通过分析邻区托甫台及顺北地区剖面,认为上奥陶统具有与中-下奥陶统相同的变化特征^[59-61]。因此可以推断走滑断裂构造样式最晚形成于晚奥陶世,对应加里东中期Ⅲ幕构造运动。

2.3.2 加里东晚期—海西早期(走滑断裂带持续生长期)

在东南部阿尔金洋和北部南天山洋闭合的影响下,阿克库勒凸起遭受NNW-SSE向挤压,持续隆起^[8,62]。研究区先存S80走滑断裂带主干断裂继承性活动,部分主干断裂可继续断穿上覆碎屑岩地层,而大部分区域的主干走滑断裂及分支断裂均未能断穿石炭系的巨厚泥岩地层,但其活动仍对上覆碎屑岩地层中雁列式正断层的发育起到了控制作用。同期,在NNW-SSE向的挤压作用下,研究区还形成1条NNE向的逆冲断裂,该逆冲断裂东西跨度约6.7 km,南北长度约15.7 km,断距达50.0~70.0 m(图5b)。

2.3.3 海西晚期(第一期雁列式正断层发育期)

在近NNE-SSW向区域应力场下,阿克库勒地区再次抬升,遭受剥蚀,沉积间断,形成 T_5^0 不整合面^[63]。深部S80走滑断裂再次被激活,在下石炭统巴楚组顶界面(T_6^0)可明显观察到一系列规模小、断距小的雁列式正断层,且部分可向上断穿 T_5^0 界面(图5c)。

2.3.4 印支期—喜马拉雅早期(第二期雁列式正断层发育期)

阿克库勒地区并未产生较大变形,在长期的近NE向区域构造应力场下,S80走滑断裂带持续活动,并在印支期形成一系列右行左阶的雁列式正断层,在后期运动中雁列式正断层不断扩大,在 T_5^0 界面以上,雁列式正断层规模增大、断距较大,下白垩统亚格列木组顶界面(T_4^0)雁列式正断层特征最为显著,并向上断至上白垩统顶界面后迅速消失(图5d)。

3 储层特征

塔河地区奥陶系储层平均有效孔隙度为1.95%,平均渗透率为 $1.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,具有典型的低孔、低渗特征^[20]。在后期构造运动与岩溶改造作用下,塔河油田奥陶系中发育了一系列次生溶蚀孔、洞和裂缝,以大型洞穴和裂缝对储集性能的改善最强,并最终形成了独特的缝洞型储层^[17,64-66]。利用岩心、成像测井(FMI)和常规测井数据分析认为,围绕S80走滑断裂带共发育洞穴型、复合型(裂缝-孔洞型、孔洞-裂缝型)以及裂缝型3类储层。

3.1 洞穴型

洞穴型储集体多是通过测井和地震尺度所识别的、可引起钻具放空或泥浆漏失的大-巨洞^[67-69]。研究区洞穴型储集体多为岩溶期在构造抬升背景下,岩溶水沿先存断裂对原生孔隙发育的一间房组和鹰山组碳酸盐岩地层溶蚀扩大而形成,或为走滑断裂破碎形成

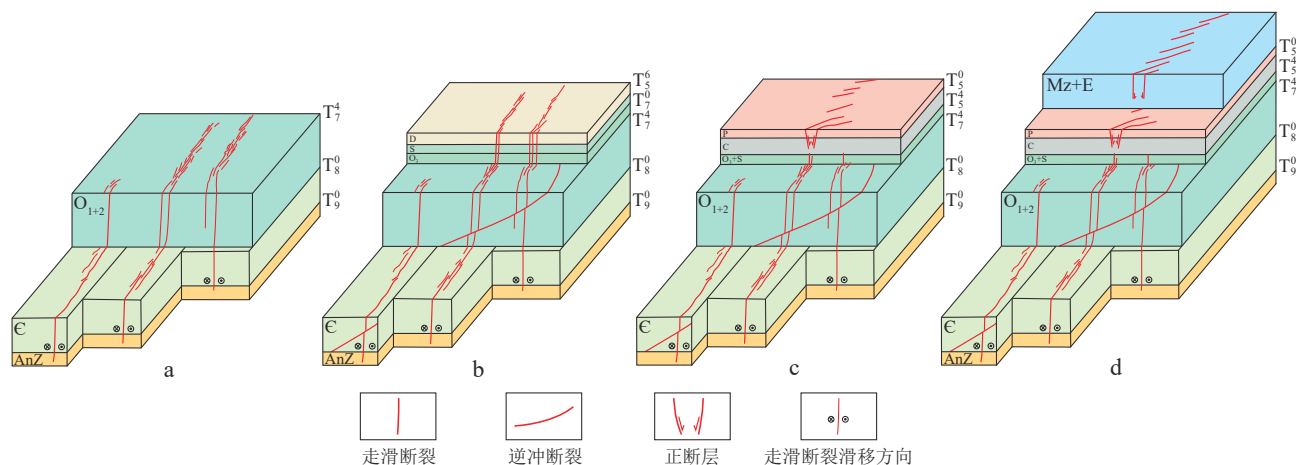


图5 塔河地区S80走滑断裂带演化模式

Fig. 5 Evolutionary model of the S80 strike-slip fault zone in Tahe area

a. 加里东中期; b. 加里东晚期—海西早期; c. 海西晚期; d. 印支期—喜马拉雅早期

T_5^0 , 中二叠统开派兹雷克组顶界面; T_6^0 , 下石炭统巴楚组顶界面; T_7^0 , 上奥陶统桑塔木组顶界面; T_4^0 , 中奥陶统一间房组顶界面; T_8^0 , 上寒武统下丘里塔格组顶界面; T_9^0 , 上震旦统奇格布拉克组顶界面

的空腔进一步遭遇溶蚀改造形成^[70-71]。通过测井曲线的变化可以有效识别该类型储集体,例如X3井5 627.4~5 646.0 m深度段,大型洞穴厚度为18.6 m,测井曲线表现为声波时差(AC)、井径(CAL)、自然伽马值(GR)、自然电位(SP)增大,密度(DEN)和深、侧向电阻率(RD)降低的特点(图6a),且在该层段漏失量达140.00 m³。研究区围绕S80走滑断裂带共计发现有21口钻井存在较大的漏失层段,平均漏失段厚度达22.38 m,平均漏失量达258.15 m³(图6)。对于受充填的洞穴,无论是砂、泥质充填还是垮塌角砾充填,能否成为有效储层一方面取决于其充填程度,另一方面则明显受控于洞穴内部充填物质差异性造成的孔渗能力的强弱不同。如S30井,洞径达9.0 m,仅有1.0 m未充填空间,垮塌角砾及细粒沉积物充填严重,裂缝的发育改善了储层结构,沟通了储集空间^[67,72]。

3.2 复合型

复合型储层可进一步根据岩心和FMI尺度识别的裂缝和孔洞的空间特征和组合情况,划分为裂缝-孔洞型和孔洞-裂缝型2种类型,其中在奥陶系良里塔格组尖灭线以北岩溶作用强烈,溶蚀孔洞大量发育,储层类型多为裂缝-孔洞型储层,通过FMI资料可以识别出纵向上发育一系列次生溶蚀孔洞,如X1井5 507.5~

5 509.5 m深度段,不仅沿层发育大量近圆形、暗色高导、排列整齐的未充填孔洞,还在纵向上发育一定数量边缘暗黑、中间白亮、形状规则、随机排列的全充填-半充填孔洞,裂缝在其中起到纵向连通溶蚀孔洞的作用(图6b)。而奥陶系良里塔格组尖灭线以南溶蚀作用减弱,溶蚀孔洞数量显著下降,如X15井5 511.3~5 513.4 m深度段多表现为沿着裂缝发育因溶蚀扩大而形成的孔洞-裂缝型储层(图6c)。

3.3 裂缝型

裂缝型储层沿S80走滑断裂带不同部位均有出现,且以中-高角度(倾角介于45°~75°)和中-大裂缝(裂缝长度>5 cm)为主(图6d,e),岩心上部分裂缝可纵向上贯穿多块岩心(图6f)。裂缝以构造缝为主,多为缝面平直且具有一定开度的剪切缝,张性缝数量较低且充填程度较高,多被方解石全充填(图6f)。

4 S80走滑断裂带对储层的控制作用

4.1 走滑断裂带控制岩溶缝洞系统的发育

对于塔河地区而言,岩溶作用对储层的形成和分布起到了重要的控制作用^[73-74],然而断裂的发育规模

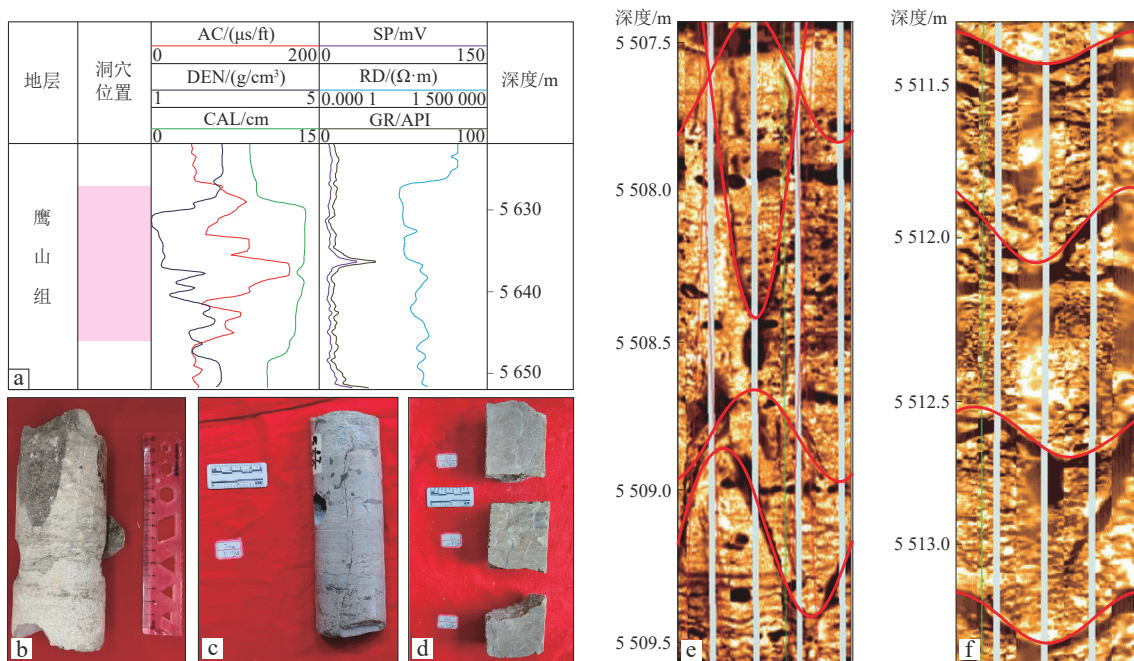


图6 塔河地区S80走滑断裂带储层类型

Fig. 6 Reservoir types of the S80 strike-slip fault zone in Tahe area

- a. X3井洞穴型储层测井解释结果;b. X3井高角度裂缝岩心照片;c. X42井高角度裂缝贯穿岩心照片;d. X15井剪切缝全充填岩心照片;
e. X1井裂缝-孔洞型储层成像测井图像;f. X15井孔洞-裂缝型储层成像测井图像;
(e—f红色曲线为裂缝。)

及分布模式影响了岩溶作用的侵蚀程度与溶蚀能力^[54]。利用单井漏失数据同S80走滑断裂带各叠接段和断裂活动性进行匹配分析得出,与平移段相比叠接段往往具有更大的漏失段宽度和更高的漏失量,且叠接段中的张扭段漏失强度强于压扭段。对于同一类型叠接段中漏失段宽度和漏失量大小的差异还受到走滑断裂活动性强弱及距离主干断裂的远近的影响。对于压扭段,单井漏失段宽度和漏失量的大小同断层活动

性相关性较强,如断裂东带的X1,X16和X17这3口井均位于压扭段,走滑断裂由NE向SW活动强度增强,在强烈挤压应力作用下,奥陶系内部构造裂缝将进一步发育、扩张,地层破碎更为彻底,3口井的漏失段宽度和漏失量随断裂活动性的增强呈显著上升趋势(图7a)。对于张扭段,单井漏失段厚度和漏失量的大小同断层活动性相关性较弱,反而同该井与主干断裂的距离相关性更大,紧邻主干断裂的井2项数据均呈高值,而位于

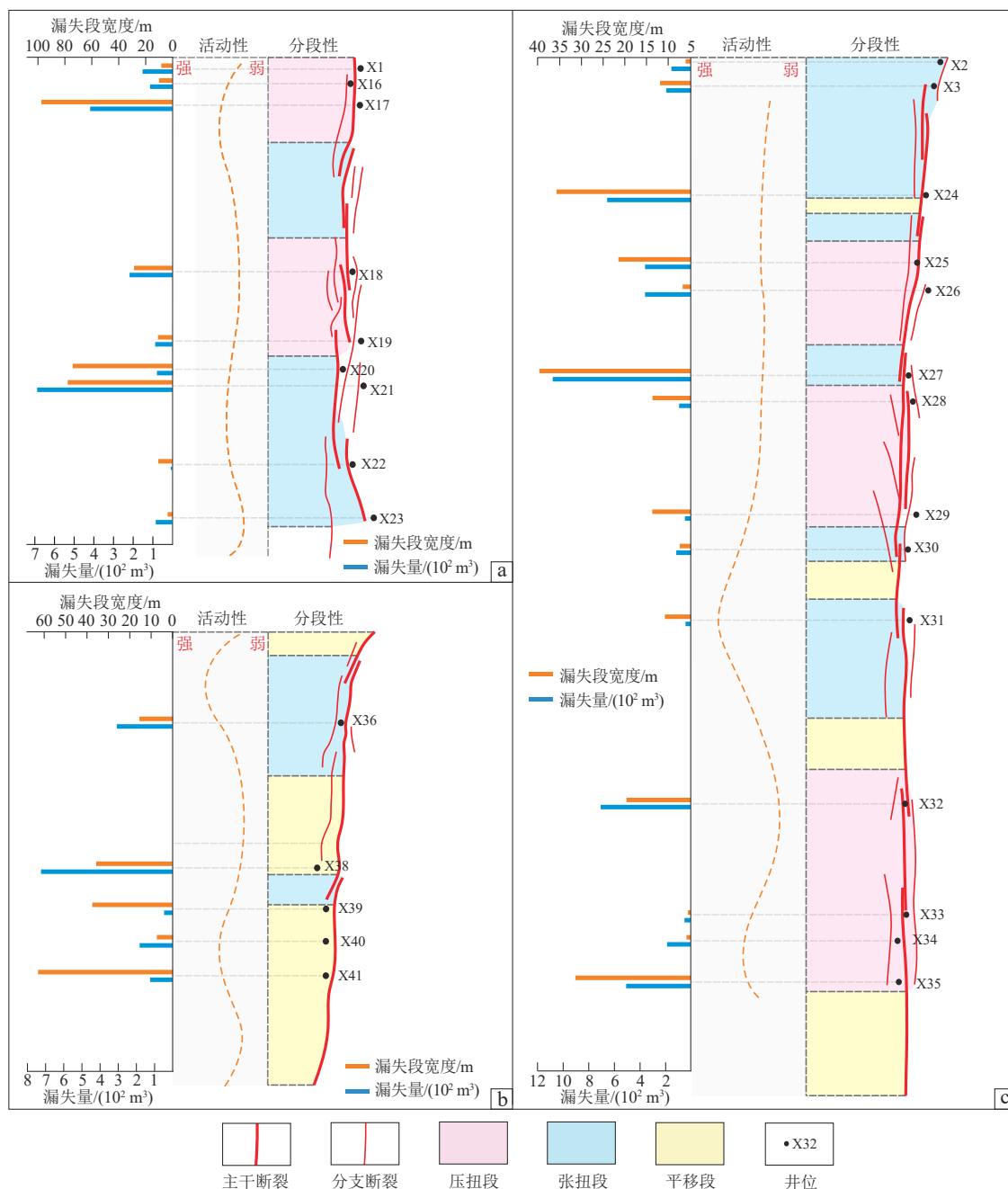


图7 塔河地区S80走滑断裂带同单井漏失的关系

Fig. 7 Relationships between the S80 strike-slip fault zone and mud leakage in individual wells in Tahe area

a. 东带单井漏失数据同断裂带活动性及叠接段的关系;b. 西带单井漏失数据同断裂带活动性及叠接段的关系;

c. 中带单井漏失数据同断裂带活动性及叠接段的关系

分支断裂或远离主干断裂的井2项数据明显较低(图7b)。对于平移段来说,活动性的增强可促进断裂两盘的相向运动,增强地层的破碎,进而为孔洞的发育提供空间(图7c)。

断裂多期活动与多期岩溶改造的匹配关系制约了岩溶地貌形态,对于S80走滑断裂带而言,不同叠接段都形成于加里东中期,并于加里东晚期—海西早期进一步加剧并最终定型,不同叠接段的交替出现造成了沿S80走滑断裂带地貌特征的改变,而对于塔河地区而言,加里东中期和海西早期2期岩溶作用的改造更进一步加剧了地貌特征的差异。在压扭段局部挤压应力作用下,NNE向主干断裂和众多次级断裂构成正花状构造,导致奥陶系局部隆升。在相同的构造背景和岩性条件下,岩溶水系成为控制岩溶作用的重要因素。加里东中期间歇性的大气降水,造成构造高部位水量有限,且由于地层暴露时间较短,水-岩作用不充分,发生相对短暂的侵蚀与溶蚀作用,且水流多沿构造高部位不断向低部位富集,形成高部位贫水而低部位富水的局面,这也造成谷地水量充沛,岩溶作用持续性增强,地貌呈现逐渐降低的趋势,形成高部位岩溶作用较弱、残余厚度高的特点^[54]。海西早期,地层大幅度的构造抬升,奥陶系碳酸盐岩地层广泛出露地表,因局部压扭作用所形成的构造高部位,其内部在正花状构造样式的影响下断裂—裂缝(断—缝)发育程度较高,大气淡水在重力作用下更容易沿断—缝发育的部位发生扩

散式岩溶作用,从而在奥陶系内部形成大量溶蚀孔洞和缝洞复合体^[43]。而谷地断裂发育程度较低,且地表水不断地侵蚀和冲刷作用,造成地层剥蚀程度相对较大,有效储层较薄,多形成呈孤立片状分布的缝洞体。张扭段在局部拉张应力下形成地层沉降,这恰为水流的汇聚提供了天然的条件,因此水流的汇聚进一步加剧了地层的侵蚀。且张扭段走滑断裂的开启性相对较好,张性裂缝发育程度高,地表水更易于沿断裂开启部位向深部侵蚀,并逐渐溶蚀扩大形成落水洞或地下溶洞^[8,11]。通过将S80走滑断裂带主干断裂同现今岩溶地貌匹配可以发现,压扭段大量发育于峰丛洼地的峰丘高部位,而张扭段则多为丘丛洼地中的残丘谷地中(图8a)。从S80走滑断裂带周缘地层幅度上来看,压扭段控制区更多的地层幅度为正幅度10~40 m,而张扭段控制区地层幅度多为-10~10 m(图8b)。对于溶蚀孔洞而言,断—缝的发育程度比孔洞所处构造部位对溶蚀孔洞的形成影响更大。密集的断—缝网络有利于水对奥陶系碳酸盐岩地层造成扩散式岩溶作用^[75]。距离主干断裂带越近,纵向(T_7^4 — T_7^6 层间)裂缝线密度越高,孔洞发育规模越大(表3)。通过对S80走滑断裂带 T_7^4 目的层进行RMS(均方根振幅)属性的提取,结合波阻抗属性对溶蚀孔洞的反应,以及钻测井上钻遇孔洞的匹配关系也可观察到S80走滑断裂带内部及周缘地层中分布一系列受控于断裂的岩溶缝洞(图9a),统计显示围绕走滑断裂带共发育79个岩溶缝洞。而远

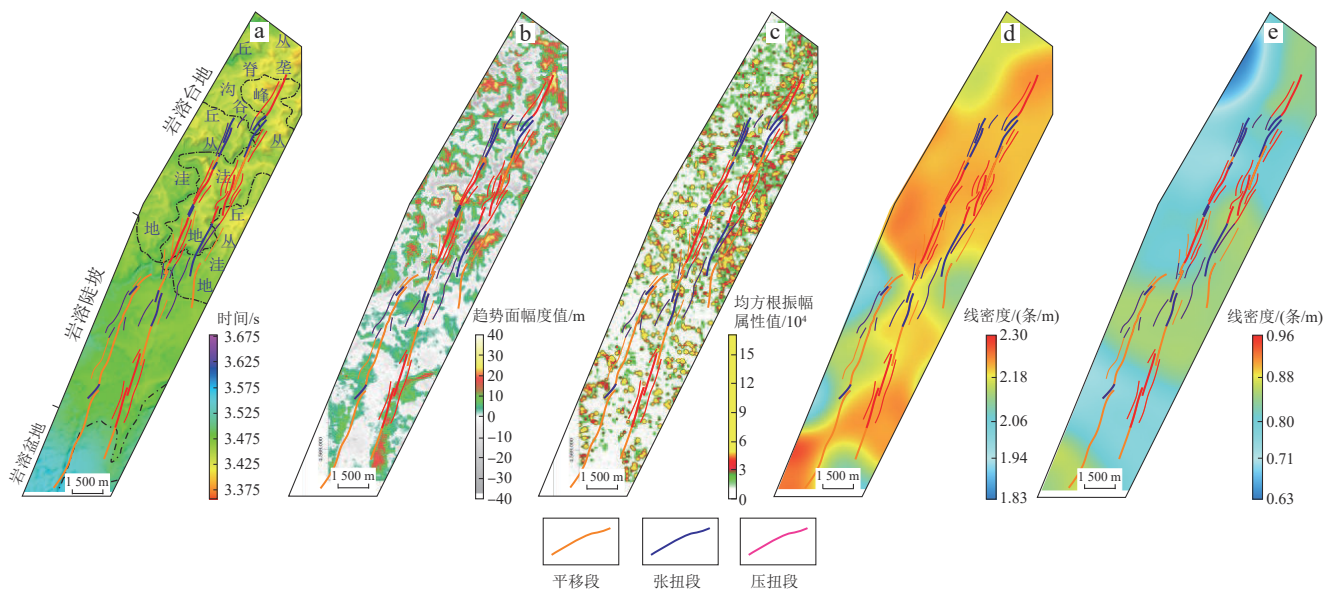


图8 塔河地区S80走滑断裂带溶蚀地貌、孔洞、裂缝分布特征

Fig. 8 Distributions of karst landforms, dissolution vugs, and fractures in the S80 strike-slip fault zone in Tahe area

a. 现今岩溶地貌;b. 现今残丘分布;c. 均方根振幅属性溶蚀孔洞分布;d. T_7^4 界面裂缝线密度;e. T_7^4 — T_7^6 地层裂缝线密度

T_7^4 : 中奥陶统一间房组顶界面; T_7^6 : 中-下奥陶统鹰山组下段顶界面

表3 塔河地区S80走滑断裂带断、缝、洞发育程度统计(井位位置见图1)

Table 3 Developmental statistics of the faults, fractures and vugs in the S80 strike-slip fault zone in Tahe area (see Fig. 1 for the well locations)

井位	地貌	暴露时间	距主干断裂位置	距主干断裂距离/m	位于主干断裂部位	分段	裂缝线密度/(条/m)		洞宽/m
							T ₇ ⁴ 界面	T ₇ ⁴ —T ₇ ⁶ 界面	
X1	高地	长	靠近	-257.45	东带北端	压扭段	2.25	0.86	3.00
X3	高地	长	紧邻	-182.45	中带北端	张扭段	2.20	0.78	23.00
X26	斜坡	中	远离	-468.29	中带北部	压扭段	2.19	0.76	2.35
X22	谷地	短	靠近	-223.84	东带南部	张扭段	2.13	0.83	5.00
X36	缓坡	中	紧邻	-216.63	西带北部	张扭段	2.16	0.75	13.00
X40	缓坡	中	靠近	-268.77	中带南部	平扭段	2.19	0.84	11.00

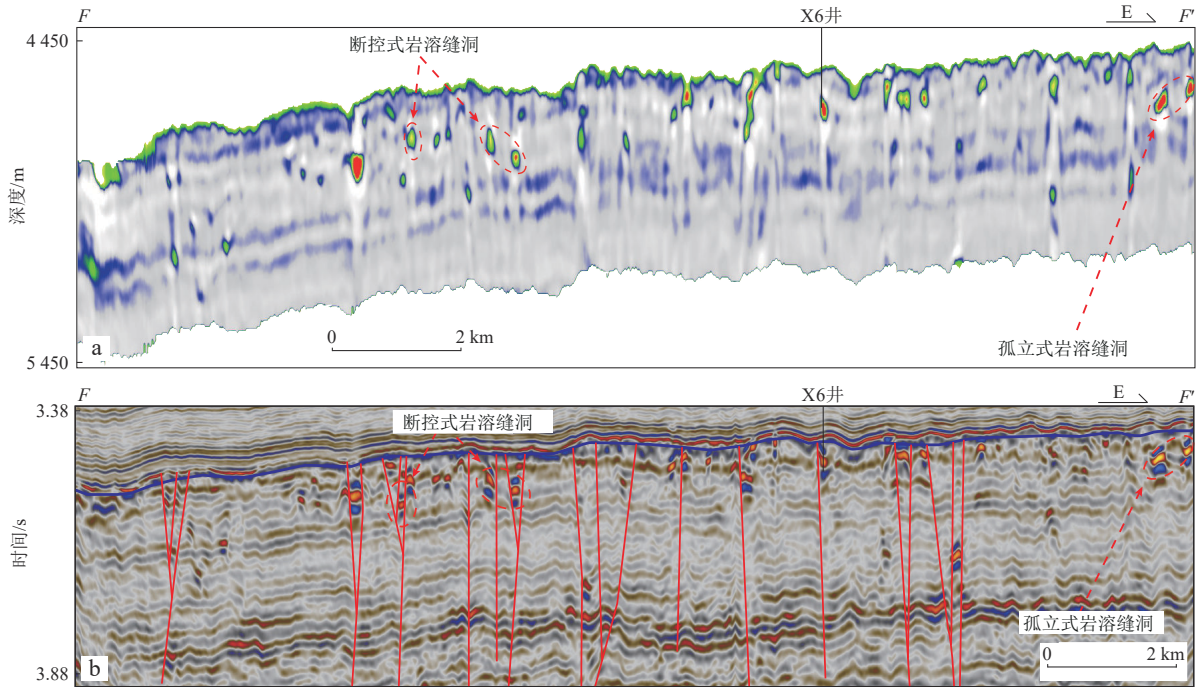


图9 塔河地区断控岩溶缝洞发育特征(剖面位置见图1b)

Fig. 9 Developmental characteristics of faulting-controlled karst fractures and vugs in Tahe area (see Fig. 1b for the section location)
a. 波阻抗剖面; b. 断裂解释地震剖面

离主干断裂带则出现少量散落式孤立岩溶缝洞,缝洞规模小,连通能力有限(图9b)。

在对走滑断裂构造解析的过程中可观察到,主干断裂对构造形态起到控制作用,但并不一定发育于地层起伏最大部位,分支断裂反而影响了地层的最大起伏程度(图8b,图9)。但就断裂活动所造成的地层破碎程度及裂缝发育规模来看,主干断裂具有明显的优势^[39, 76]。叠接段更是如此,无论压扭段还是张扭段,裂缝发育程度的高值区多集中在主干断裂或两侧叠接区边界断裂发育部位^[77]。因此,S80走滑断裂带主干断裂多表现为沿构造起伏最大部位两侧边缘分布,而S80走滑断裂带控制区域形成的溶蚀孔洞更多表现为沿走滑断裂带走向散落式分布于构造高部位两侧靠近

主干断裂的一边(图8c;表2)。通过优选围绕S80走滑断裂带常规测井曲线完整的15口井,利用单井含有裂缝线密度曲线的FMI资料作为基础数据,通过神经网络方法,进行单井裂缝线密度曲线的预测,再应用差值计算,便可对S80走滑断裂带周缘地层中的裂缝线密度进行预测。利用测井资料计算S80走滑断裂带周缘各井位奥陶系纵向上裂缝线密度发育情况后发现,压扭段在局部挤压应力下,浅层更易形成裂缝发育区,且平面上裂缝发育区面积分布广,然而随深度的增加,裂缝发育程度明显变弱。而张扭段在局部拉张作用的影响下,浅层裂缝发育程度虽不如挤压段高,但更易沿断裂带在纵向上形成稳定的裂缝发育带。平移段整体裂缝发育程度较低,仅在断裂端部的应力释放区存在一

定范围的裂缝高发区(图8d—e),这也与孔洞的空间发育程度相匹配。

4.2 走滑断裂带控储模式

综合断-缝特征、断裂分段性、断裂活动性和岩溶地貌4个方面主控因素对奥陶系储层的控制作用,依托三维地震数据,结合波阻抗反演结果,建立了该地区储层分布及其发育模式(图10)。走滑断裂沿走向,不同部位构造活动强度和岩石破碎程度明显不同,岩溶地貌的差异性也对储层的纵向发育程度有明显影响。如压扭段X16井和X25井在奥陶系顶界面的裂缝发育程度均较高,线密度可达2.3条/m,而X16井位于压扭段隆起核心部位,主干断裂NE向端部的应力释放区,裂缝在纵向上发育程度较高,且岩溶台地的峰丛洼地岩溶作用较强,进一步促进了裂缝纵向的延伸,有利于形成优质的缝洞型储层(图10a)。而X25井虽靠近

NNE向主干断裂,断裂活动性适中,但裂缝纵向延伸能力有限,顺断-缝系统在浅层可形成一定规模的缝洞型储层(图10c)。张扭段中X8井无论 T_7^4 界面还是 T_7^4 — T_7^6 界面裂缝发育程度均高,加之岩溶作用的改善,储层质量较高(图10d)。但X3井位于丘丛垄脊沟谷高部位且活动性较弱,古岩溶作用纵向发育能力不足,溶蚀孔洞相对发育较差(图10b)。平移段X15井无论是断-缝纵向发育能力,还是岩溶程度均较差,储层发育程度不足(图10e)。由此可见,断裂叠接段类型、断裂活动性强弱及断-缝纵向发育程度对奥陶系储层的形成奠定基础,岩溶作用可进一步改善储层质量。

5 结论

1) S80走滑断裂带平面上线性延伸距离长,规模大,整体呈NNE向展布。以 T_7^4 (中-下奥陶统顶界面)

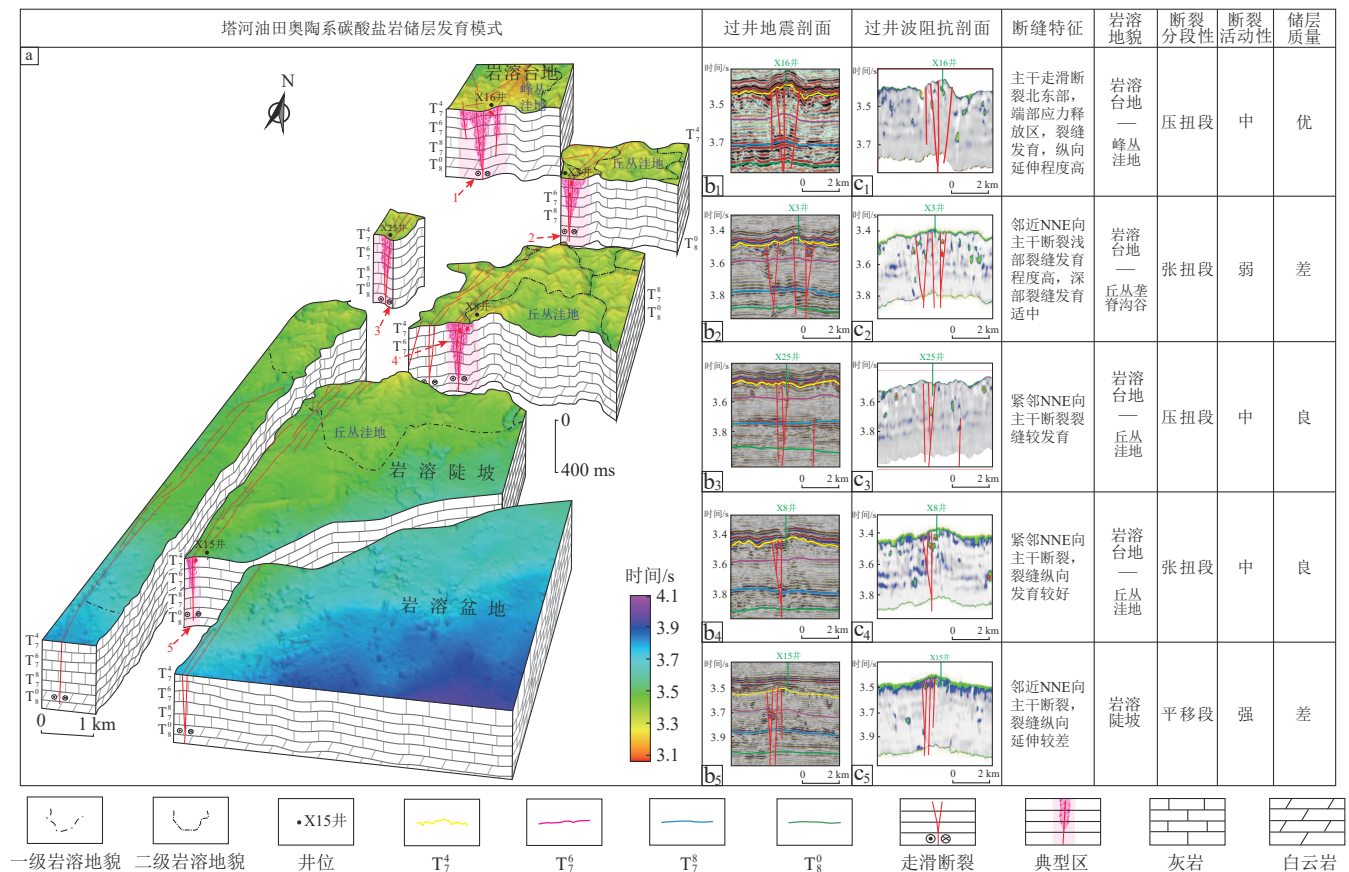


图10 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层发育模式

Fig. 10 Developmental model for the Ordovician carbonate reservoirs in the Tahe oilfield

a. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层发育模式; b₁. X16井过井地震解释剖面; c₁. X16井过井波阻抗解释剖面; b₂. X3井过井地震解释剖面; c₂. X3井过井波阻抗解释剖面; b₃. X25井过井地震解释剖面; c₃. X25井过井波阻抗解释剖面; b₄. X8井过井地震解释剖面; c₄. X8井过井波阻抗解释剖面; b₅. X15井过井地震解释剖面; c₅. X15井过井波阻抗解释剖面

T_7^4 . 中奥陶统一间房组顶界面; T_7^6 . 中-下奥陶统鹰山组下段顶界面; T_7^8 . 下奥陶统蓬莱坝组顶界面; T_8^0 . 上寒武统下丘里塔格组顶界面

为界垂向上可分为深、浅2套断裂体系,深层以走滑断裂花状构造样式为典型特征,局部受逆冲断裂改造,浅层则为受控于深部走滑断裂影响而形成的雁列式正断层。

2) 沿走向可将S80走滑断裂带分为西带、中带和东带,3个分带均具有直插基底震旦系的特点,3个分带整体具有纵向上由深层至浅层叠接段数量显著增多,规模明显增大、段宽增加,平面上具有由SW向NE张扭段规模减小、压扭段规模增强和平移段逐渐消失的特征。

3) S80走滑断裂带活动主要经历加里东中期、加里东晚期—海西早期、海西晚期和印支期—喜马拉雅早期4个阶段,其中以加里东中期和加里东晚期—海西早期活动为主,并具备“前两期左行,后两期右行”的走滑性质。活动强度具有“中带强、两侧弱”的特点。

4) 围绕S80走滑断裂带共发育洞穴型、复合型(裂缝-孔洞型、孔洞-裂缝型)以及裂缝型3类储层。溶蚀孔洞的发育与走滑断裂分段性和活动性关系密切,强活动性的压扭段和平移段、弱活动性张扭段的主干断裂周缘是溶蚀孔洞发育的有利部位。

5) 走滑断裂沿其走向,不同部位构造活动强度和岩石破碎程度明显不同,岩溶地貌的差异性也对储层的纵向发育程度有明显影响。断裂叠接段类型、断裂活动性强弱及断-缝纵向发育程度为奥陶系储层的形成奠定基础,岩溶作用可进一步改善储层质量。

参 考 文 献

- [1] 漆立新,李宗杰,吕海涛,等. 塔里木叠合盆地构造沉积演化与油气勘探[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
QI Lixin, LI Zongjie, LYU Haitao, et al. Tectonic sedimentary evolution and oil and gas exploration in the Tarim superimposed basin[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [2] 康玉柱. 中国古生代海相油气资源潜力巨大[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 699-706, 752.
KANG Yuzhu. Great hydrocarbon potential in the Paleozoic marine sequences in China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 699-706, 752.
- [3] 卫端,高志前,杨孝群,等. 塔里木盆地塔河地区中下奥陶统鹰山组碳酸盐岩层系内幕不整合识别特征[J]. 古地理学报, 2017, 19(3): 457-468.
WEI Duan, GAO Zhiqian, YANG Xiaoqun, et al. Identification methods and features of unconformity within carbonate successions of the Lower-Middle Ordovician Yingshan Formation in Tahe area, Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(3): 457-468.
- [4] 张长建,吕艳萍,马海陇,等. 塔河油田岩溶峡谷区伏流坍塌型古暗河缝洞系统[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(1): 9-17.
ZHANG Changjian, LYU Yanping, MA Hailong, et al. Fracture-cave system in collapsed underground paleo-river with subterranean flow in karst canyon area, Tahe oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(1): 9-17.
- [5] 李源,鲁新便,王莹莹,等. 塔河油田海西早期岩溶水文地貌特征及其演化[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 674-683.
LI Yuan, LU Xinbian, WANG Yingying, et al. Hydrogeomorphologic characterization and evolution of the Early Hercynian karstification in Tahe Oilfield, the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 674-683.
- [6] 汪彦,高济元,杨德彬,等. 海西早期大型树枝状岩溶暗河发育条件与地质模式——以塔里木盆地塔河油田B94井区为例[J]. 断块油气田, 2023, 30(5): 758-769.
WANG Yan, GAO Jiyuan, YANG Debin, et al. Development conditions and geological models of large dendritic karst conduit in early Hercynian: A case study of B94 well block of Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2023, 30(5): 758-769.
- [7] 吕艳萍,姜应兵,高济元,等. 塔河西部奥陶系古岩溶小流域的划分及其地质意义[J]. 断块油气田, 2021, 28(4): 440-445.
LYU Yanping, JIANG Yingbing, GAO Jiyuan, et al. The division of the Ordovician paleokarst small watershed in the west of Tahe and its geological significance[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(4): 440-445.
- [8] 张三,金强,乔贞,等. 塔河油田奥陶系构造差异演化及油气地质意义[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(3): 576-586.
ZHANG San, JIN Qiang, QIAO Zhen, et al. Differential tectonic evolution of the Ordovician and its significance in petroleum geology in main area of Tahe Oilfield [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(3): 576-586.
- [9] 徐中祥,马庆佑. 塔河油田奥陶系走滑断裂带分区差异变形特征与控储模式[J]. 海相油气地质, 2022, 27(2): 124-134.
XU Zhongxiang, MA Qingyou. Zonal differential deformation and reservoir control model of Ordovician strike-slip fault zone in Tahe Oilfield [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2022, 27(2): 124-134.
- [10] 胡文革. 塔里木盆地塔河油田潜山区古岩溶缝洞类型及其改造作用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 43-53.
HU Wenge. Paleokarst fracture-vug types and their reconstruction in buried hill area, Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 43-53.
- [11] 金强,张三,孙建芳,等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶相形成和演化[J]. 石油学报, 2020, 41(5): 513-525.
JIN Qiang, ZHANG San, SUN Jianfang, et al. Formation and evolution of karst facies of Ordovician carbonate in Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(5): 513-525.
- [12] 鲁新便,杨敏,汪彦,等. 塔里木盆地北部“层控”与“断控”型油藏特征——以塔河油田奥陶系油藏为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(4): 461-469.
LU Xinbian, YANG Min, WANG Yan, et al. Geological characteristics of “strata-bound” and “fault-controlled” reservoirs in the northern Tarim Basin: Taking the Ordovician reservoirs in

- the Tahe Oil Field as an example [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2018, 40(4): 461-469.
- [13] 江同文, 昌伦杰, 邓兴梁, 等. 断控碳酸盐岩油气藏开发地质认识与评价技术——以塔里木盆地为例[J]. *天然气工业*, 2021, 41(3): 1-9.
- JIANG Tongwen, CHANG Lunjie, DENG Xingliang, et al. Geological understanding and evaluation technology of fault controlled carbonate reservoir development: A case study of the Tarim Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(3): 1-9.
- [14] 云露, 邓尚. 塔里木盆地深层走滑断裂差异变形与控储控藏特征——以顺北油气田为例[J]. *石油学报*, 2022, 43(6): 770-787.
- YUN Lu, DENG Shang. Structural styles of deep strike-slip faults in Tarim Basin and the characteristics of their control on reservoir formation and hydrocarbon accumulation: A case study of Shunbei oil and gas field [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2022, 43(6): 770-787.
- [15] 漆立新, 云露. 塔里木盆地碳酸盐岩成藏模式与勘探实践[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 867-876.
- QI Lixin, YUN Lu. Carbonate reservoir forming model and exploration in Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2020, 42(5): 867-876.
- [16] 杨海军, 邓兴梁, 张银涛, 等. 塔里木盆地满深1井奥陶系超深断控碳酸盐岩油气藏勘探重大发现及意义[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(3): 13-23.
- YANG Haijun, DENG Xingliang, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance of exploration for Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs of Well Manshen 1 in Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 13-23.
- [17] 焦方正. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏体积开发实践与认识[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(3): 552-558.
- JIAO Fangzheng. Practice and knowledge of volumetric development of deep fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3): 552-558.
- [18] 马庆佑, 曾联波, 徐旭辉, 等. 塔河油田奥陶系走滑断裂体系特征及成因机制[J]. *地质学报*, 2023, 97(2): 496-506.
- MA Qingyou, ZENG Lianbo, XU Xuhui, et al. Characteristics and genetic mechanism of the strike-slip fault system in the Ordovician of the Tahe Oilfield [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(2): 496-506.
- [19] 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.
- LYU Haitao, ZHANG Shaonan, MA Qingyou. Classification and formation mechanism of fault systems in the central and northern Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2017, 39(4): 444-452.
- [20] 云露, 曹自成, 汪洋, 等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系深层储集体地质特征[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- YUN Lu, CAO Zicheng, WANG Yang, et al. Geological characteristics of Cambrian Ordovician deep reservoir in Tarim Basin [M]. Beijing: Science Press, 2023.
- [21] 贾承造, 魏国齐. 塔里木盆地构造特征与含油气性[J]. *科学通报*, 2002, 47(增刊1): 1-8.
- JIA Chengzao, WEI Guoqi. Tectonic characterization and hydrocarbons of the Tarim Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(S1): 1-8.
- [22] 宋兴国, 陈石, 杨明慧, 等. 塔里木盆地富满油田F₁₆断裂发育特征及其对油气分布的影响[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(3): 99-109.
- SONG Xingguo, CHEN Shi, YANG Minghui, et al. Development characteristics of F₁₆ fault in Fuman oilfield of Tarim Basin and its influence on oil and gas distribution [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(3): 99-109.
- [23] 李曰俊, 杨海军, 张光亚, 等. 重新划分塔里木盆地塔北隆起的次级构造单元[J]. *岩石学报*, 2012, 28(8): 2466-2478.
- LI Yuejun, YANG Haijun, ZHANG Guangya, et al. Redivision of the tectonic units of Tabei Rise in Tarim Basin, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 2466-2478.
- [24] 马庆佑, 吕海涛, 蒋华山, 等. 塔里木盆地台盆区构造单元划分方案[J]. *海相油气地质*, 2015, 20(1): 1-9.
- MA Qingyou, LYU Haitao, JIANG Huashan, et al. A division program of structural units in the Paleozoic platform-basin region, Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2015, 20(1): 1-9.
- [25] 林畅松, 李思田, 刘景彦, 等. 塔里木盆地古生代重要演化阶段的古构造格局与古地理演化[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 210-218.
- LIN Changsong, LI Sitian, LIU Jingyan, et al. Tectonic framework and paleogeographic evolution of the Tarim basin during the Paleozoic major evolutionary stages [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 210-218.
- [26] 漆立新. 塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(3): 38-51.
- QI Lixin. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shuntuoguole uplift, Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(3): 38-51.
- [27] 郭光辉, 李启明, 肖中尧, 等. 塔里木盆地古隆起演化特征及油气勘探[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 124-130.
- WU Guanghui, LI Qiming, XIAO Zhongyao, et al. The evolution characteristics of palaeo-uplifts in Tarim Basin and its exploration directions for oil and gas [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 124-130.
- [28] 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.
- [29] 罗平, 张静, 刘伟, 等. 中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征[J]. *地学前缘*, 2008, 15(1): 36-50.
- LUO Ping, ZHANG Jing, LIU Wei, et al. Characteristics of marine carbonate hydrocarbon reservoirs in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(1): 36-50.

- [30] 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.
- [31] 何登发, 马永生, 蔡勋育, 等. 中国西部海相盆地地质结构控制油气分布的比较研究[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1037-1057.
- HE Dengfa, MA Yongsheng, CAI Xunyu, et al. Comparison study on controls of geologic structural framework upon hydrocarbon distribution of marine basins in western China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(4): 1037-1057.
- [32] 何登发, 孙方原, 何金有, 等. 温宿北—野云沟断裂的构造几何学与运动学特征及塔北隆起的成因机制[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 917-934.
- HE Dengfa, SUN Fangyuan, HE Jinyou, et al. Geometry and kinematics of Wensubei-Yeyungou fault and its implication for the genetic mechanism of North Tarim uplift[J]. *Geology in China*, 2011, 38(4): 917-934.
- [33] LIU Jingyan, STEEL R J, LIN Changsong, et al. Geomorphology control on the development of reservoir depositional systems, Devonian Donghetang Formation in the Tabei Uplift of the Tarim Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 38(1): 177-194.
- [34] 汤良杰. 略论塔里木盆地主要构造运动[J]. 石油实验地质, 1997, 19(2): 108-114.
- TANG Liangjie. An approach to major tectogenesis of Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 1997, 19(2): 108-114.
- [35] WU Jun, FAN Tailiang, GOMEZ-RIVAS E, et al. Impact of diagenesis on the pore evolution and sealing capacity of carbonate cap rocks in the Tarim Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2022, 106(12): 2471-2511.
- [36] ZENG Hongliu, WANG Guizhong, JANSON X, et al. Characterizing seismic bright spots in deeply buried, Ordovician Paleokarst strata, Central Tabei uplift, Tarim Basin, Western China[J]. *Geophysics*, 2011, 76(4): B127-B137.
- [37] 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.
- [38] 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): 218-228.
- 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): 218-228.
- [39] 郭光辉, 马兵山, 韩剑发, 等. 塔里木克拉通盆地中部走滑断裂形成与发育机制[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 510-520.
- WU Guanghui, MA Bingshan, HAN Jianfa, et al. Origin and growth mechanisms of strike-slip faults in the central Tarim cratonic basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 510-520.
- [40] 张娟, 谢润成, 杨敏, 等. 塔河油田主体区下奥陶统小尺度缝洞体形成机制与分布预测[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 51-64.
- ZHANG Juan, XIE Runcheng, YANG Min, et al. Formation mechanism and distribution prediction of fine-fracture pores in the Lower Ordovician in Tahe Oilfield [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(4): 51-64.
- [41] 严威, 王兴志, 张廷山, 等. 塔河油田加里东中期第Ⅲ幕岩溶作用[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 411-416.
- YAN Wei, WANG Xingzhi, ZHANG Tingshan, et al. Investigations of the karst during the Episode III of the mid-Caledonian in the Tahe Oilfield [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(3): 411-416.
- [42] 马德波, 崔文娟, 陶小晚, 等. 塔北隆起轮南低凸起断裂构造特征与形成演化[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(5): 647-657.
- MA Debo, CUI Wenjuan, TAO Xiaowan, et al. Structural characteristics and evolution process of faults in the Lunnan low uplift, Tabei Uplift in the Tarim Basin, NW China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(5): 647-657.
- [43] 金强, 田飞. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞结构研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 15-21.
- JIN Qiang, TIAN Fei. Investigation of fracture-cave constructions of karsted cabonate reservoirs of Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(5): 15-21.
- [44] 云露, 蒋华山. 塔河油田成藏条件与富集规律[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 768-775.
- YUN Lu, JIANG Huashan. Hydrocarbon accumulation conditions and enrichment rules in Tahe Oilfield [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(6): 768-775.
- [45] 周铂文, 陈红汉, 云露, 等. 塔里木盆地顺北地区下古生界走滑断裂带断距分段差异与断层宽度关系[J]. 地球科学, 2022, 47(2): 437-451.
- ZHOU Bowen, CHEN Honghan, YUN Lu, et al. The relationship between fault displacement and damage zone width of the Paleozoic strike-slip faults in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Earth Science*, 2022, 47(2): 437-451.
- [46] 贾承造, 马德波, 袁敬一, 等. 塔里木盆地走滑断裂构造特征、形成演化与成因机制[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 81-91.
- JIA Chengzao, MA Debo, YUAN Jingyi, et al. Structural characteristics, formation & evolution and genetic mechanisms of strike-slip faults in the Tarim Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 81-91.
- [47] 韩剑发, 苏洲, 陈利新, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力[J]. 石油学报, 2019, 40(11): 1296-1310.
- HAN Jianfa, SU Zhou, CHEN Lixin, et al. Reservoir-controlling and accumulation-controlling of strike-slip faults and exploration potential in the platform of Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*,

- 2019, 40(11): 1296-1310.
- [48] 汪如军, 王轩, 邓兴梁, 等. 走滑断裂对碳酸盐岩储层和油气藏的控制作用——以塔里木盆地北部坳陷为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 10-20.
- WANG Rujun, WANG Xuan, DENG Xingliang, et al. Control effect of strike-slip faults on carbonate reservoirs and hydrocarbon accumulation: A case study of the northern depression in the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 10-20.
- [49] 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(增刊1): 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 Industry, 2015, 26(S1): 109-120.
- [50] DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(1): 109-137.
- [51] 金峰, 朱秀香, 余一欣, 等. 塔里木盆地顺北地区13号走滑断裂带发育特征[J]. 大地构造与成矿学, 2023, 47(1): 54-65.
- JIN Feng, ZHU Xiuxiang, YU Yixin, et al. Structural geometry and evolution of the No. 13 strike-slip fault zone in the Shunbei area, Tarim Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2023, 47(1): 54-65.
- [52] 曾韬, 凡睿, 夏文谦, 等. 四川盆地东部走滑断裂识别与特征分析及形成演化: 以涪陵地区为例[J]. 地学前缘, 2023, 30(3): 366-385.
- ZENG Tao, FAN Rui, XIA Wenqian, et al. Formation and evolution of strike-slip fault zones in the eastern Sichuan Basin and identification and characterization of the fault zones: A case study of the Fuling area[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(3): 366-385.
- [53] HAN Xiaoying, TANG Liangjie, DENG Shang, et al. Spatial characteristics and controlling factors of the strike-slip fault zones in the northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin: Insight from 3D seismic data[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2020, 94(2): 516-529.
- [54] 张三, 金强, 史今雄, 等. 塔北地区奥陶系地下河溶洞充填规律与储集性能[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1582-1594.
- ZHANG San, JIN Qiang, SHI Jinxiong, et al. Filling patterns and reservoir property of the Ordovician buried-river karst caves in the Tabei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1582-1594.
- [55] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合-联合成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743-752.
- HE Zhiliang, PENG Shoutao, ZHANG Tao. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 743-752.
- [56] 李坤. 阿克库勒凸起构造特征及含油气性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006: 41-50.
- LI Kun. Study on the tectonic characterization and hydrocarbon capacity of the Akekule uplift[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006: 41-50.
- [57] 许志琴, 李思田, 张建新, 等. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 1-22.
- XU Zhiqin, LI Sitian, ZHANG Jianxin, et al. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim Block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 1-22.
- [58] 王清华. 塔里木盆地17号走滑断裂带北段差异变形与演化特征[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1136-1145.
- WANG Qinghua. Differential deformation and evolution characteristics of the No. 17 strike-slip fault zone in the Tarim Basin[J]. Geoscience, 2023, 37(5): 1136-1145.
- [59] 王珍, 唐大卿, 康志江, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂带中北段发育特征及控藏作用[J]. 地球科学, 2023, 48(11): 4117-4134.
- WANG Zhen, TANG Daqing, KANG Zhijiang, et al. Development characteristics and its role in controlling oil and gas accumulation of mid-north part of Shunbei No. 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(11): 4117-4134.
- [60] 韩长城. 塔河油田奥陶系断控岩溶储集体特征及分布规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- HAN Changcheng. Study on characteristics and distribution of Ordovician fault-controlled reservoirs in Tahe Oilfield[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2017.
- [61] 张小兵, 吕海涛, 赵锡奎, 等. 塔河油田中下奥陶统顶面古构造演化及油气关系[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 233-238.
- ZHANG Xiaobing, LYU Haitao, ZHAO Xikui, et al. Paleostuctural evolution of Lower-Middle Ordovician top and its relationship with hydrocarbon in Tahe Oil Field[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(3): 233-238.
- [62] 史今雄. 塔河油田断裂对奥陶系碳酸盐岩缝洞储集体控制作用研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020: 67-70.
- SHI Jinxiong. Study on controlling effects of faults and fractures on Ordovician carbonate fracture-cavity bodies in Tahe Oilfield[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020: 67-70.
- [63] 张涛. 塔里木盆地阿克库勒凸起奥陶系岩溶型储层形成与保持研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 33-36.
- ZHANG Tao. The study on the formation and preservation of karstic reservoir of Ordovician in Akekule Uplift, Tarim Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012: 33-36.
- [64] 张文彪, 张亚雄, 段太忠, 等. 塔里木盆地塔河油田托甫台区奥陶系碳酸盐岩断溶体系层序建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 207-218. doi: 10.11743/ogg20220117.
- ZHANG Wenbiao, ZHANG Yaxiong, DUAN Taizhong, et al. Hierarchy modeling of the Ordovician fault-karst carbonate reservoir in Tuoputai area, Tahe oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 207-218. doi: 10.11743/ogg20220117.

- [65] 李兵, 邓尚, 李王鹏, 等. 塔里木盆地塔河地区走滑断裂体系活动特征与油气地质意义[J]. 特种油气藏, 2019, 26(4): 45-51.
LI Bing, DENG Shang, LI Wangpeng, et al. Strike-Slip fault system activity and hydrocarbon geology understanding in Tahe of Tarim Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(4): 45-51.
- [66] 李源, 鲁新便, 蔡忠贤, 等. 塔河油田海西早期古水文地貌特征及其对洞穴发育的控制[J]. 石油学报, 2016, 37(8): 1011-1020.
LI Yuan, LU Xinbian, CAI Zhongxian, et al. Hydrogeomorphologic characteristics and its controlling caves in Hercynian, Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(8): 1011-1020.
- [67] 徐嘉宏, 康志宏, 蓝茜茜. 塔河奥陶系油藏岩溶储层类型、洞穴结构和发育模式: 以塔河油田7区T615缝洞单元为例[J]. 现代地质, 2020, 34(6): 1181-1192.
XU Jiahong, KANG Zhihong, LAN Xixi. Karst reservoir type, cave structure and genetic model of Ordovician Tahe reservoirs: Case study of fracture-cavity unit T615 in Tahe Oilfield 7 Block [J]. Geoscience, 2020, 34(6): 1181-1192.
- [68] 史江涛, 郝君明, 王小雷. 塔河地区奥陶系鹰山组储层特征及其主控因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 348-362.
SHI Jiangtao, HAO Junming, WANG Xiaolei. Reservoir characteristics and controlling factors of Lower-Middle Ordovician Yingshan Formation in Tahe area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 348-362.
- [69] 康志宏, 戎意民, 魏历灵, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶储集体类型及划分方法研究[J]. 现代地质, 2014, 28(5): 986-994.
KANG Zhihong, RONG Yimin, WEI Liling, et al. Approach to karst reservoir types and classification of Ordovician carbonate in Tahe Oilfield [J]. Geoscience, 2014, 28(5): 986-994.
- [70] 王清华, 杨海军, 李勇, 等. 塔里木盆地富满大型碳酸盐岩油气聚集区走滑断裂控储模式[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 239-251.
WANG Qinghua, YANG Haijun, LI Yong, et al. Control of strike-slip fault on the large carbonate reservoir in Fuman, Tarim Basin—A reservoir model [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 239-251.
- [71] 陈华鑫, 康志宏, 康志江. 塔河油田碳酸盐岩油藏古岩溶洞穴层状结构与形成机理[J]. 现代地质, 2022, 36(2): 695-708.
CHEN Huaxin, KANG Zhihong, KANG Zhijiang. Stratified structure and formation mechanism of paleokarst cave in carbonate reservoir of Tahe Oilfield [J]. Geoscience, 2022, 36(2): 695-708.
- [72] 金强, 康逊, 田飞. 塔河油田奥陶系古岩溶径流带缝洞化学充填物成因和分布[J]. 石油学报, 2015, 36(7): 791-798, 836.
JIN Qiang, KANG Xun, TIAN Fei. Genesis of chemical fillings in fracture-caves in paleo-karst runoff zone in Ordovician and their distributions in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 791-798, 836.
- [73] 田飞, 金强, 李阳, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型储层小型缝洞及其充填物测井识别[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 900-908.
TIAN Fei, JIN Qiang, LI Yang, et al. Identification of small fracture-vugs and their fillings through log interpretation in fractured-vuggy Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 900-908.
- [74] 金燕林, 张慧涛, 刘遥, 等. 塔河油田层控岩溶型储集体发育特征及典型岩溶模式探讨[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 125-134.
JIN Yanlin, ZHANG Huitao, LIU Yao, et al. Reservoir development characteristics and karst models for the “strata bound” karst reservoirs in the Tahe Oilfield [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 125-134.
- [75] 王萍, 袁向春, 李江龙, 等. 塔河油田4区古地貌对储层分布的影响[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 382-387.
WANG Ping, YUAN Xiangchun, LI Jianglong, et al. Control of paleogeomorphology on reservoir distribution in Block 4 of Tahe Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 382-387.
- [76] 黄诚. 叠合盆地内部小尺度走滑断裂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(3): 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 Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(3): 379-389.
- [77] 曾联波, 毛哲, 刘国平, 等. 走滑断层对裂缝分布的控制——来自离散元数值模拟的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(1): 152-171.
ZENG Lianbo, MAO Zhe, LIU Guoping, et al. Controls of strike-slip fault on fractures: Insight from 3D discrete element simulation [J]. Science China Earth Sciences, 2024, 54(1): 152-171.

(编辑 许 诺)