

塔里木盆地肖尔布拉克剖面走滑断裂带 内部结构及控储模式

马庆佑^{1,2,3}, 曾联波^{1,2}, 徐旭辉⁴, 曹自成³, 蒋华山³, 王海学⁵

[1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249;
3. 中国石化 西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 中国石化 石油物探技术研究院, 江苏 南京 211100;
5. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318]

摘要:选取塔里木盆地西北缘肖尔布拉克剖面出露的走滑断裂带为研究对象,通过详细观察描述、取样鉴定、地化分析等研究,刻画肖尔布拉克剖面走滑断裂带的内部结构,建立了该断裂带的控储模式,为塔里木盆地断溶体目标研究提供了地质模型。结果表明:肖尔布拉克剖面走滑断裂带近垂直切穿中寒武统沙依里克组与阿瓦塔格组,根据两盘地层对接关系判断其为右行走滑。断裂带内部发育由断层核与破碎带组成的“二元结构”,其中断层核主要由断层角砾岩带与方解石充填脉组成,角砾岩性与围岩一致,呈棱角-次棱角状,反映近源破碎、垮塌堆积形成。断层角砾岩被方解石胶结充填,方解石晶粒尺寸大小不等,越靠近角砾壁的方解石晶粒越细小,反映多期流体活动与改造形成。断层核内的方解石胶结物 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-8\text{‰} \sim -2\text{‰}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值普遍高于同沉积海水,稀土元素具有Ce明显负异常等特征,反映受到后期大气淡水改造。断层破碎带内裂缝较发育,大部分裂缝半开启或全开启,局部沿裂缝溶蚀形成扩大孔洞,少部分裂缝被方解石胶结充填。基于上述研究,初步建立了该断裂带内部结构的成因演化及控储模式:走滑断裂带初始剪切活动,引起中寒武统碳酸盐岩地层脆性剪切破裂,长期摩擦滑动后形成了无内聚力的角砾岩带及裂缝带,为高孔渗性储集层;大气淡水携带矿物质垂向运移至断裂带深部,在温度、压力改变后发生水-岩相互作用,形成大量方解石脉胶结充填,降低了断裂带早期的孔渗性能,最终形成多期改造后的溶洞-胶结型断裂带结构。

关键词:断层核;破碎带;内部结构;控储模式;走滑断裂;肖尔布拉克剖面;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Internal architecture of strike-slip fault zone and its control over reservoirs in the Xiaerbulake section, Tarim Basin

Ma Qingyou^{1,2,3}, Zeng Lianbo^{1,2}, Xu Xuhui⁴, Cao Zicheng³, Jiang Huashan³, Wang Haixue⁵

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 4. Geophysical Research Institute, SINOPEC, Nanjing, Jiangsu 211100, China; 5. School of Geosciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China]

Abstract: The fault zone outcropping the Xiaerbulake section in the northwest margin of Tarim Basin is selected to conduct detailed field investigation and description, sampling identification, geochemical analyses and other studies with the aim of establishing an architecture-reservoir model for a better geological description of fractured-vuggy reservoir bodies in the basin. The results show that the fault zone comprises right-lateral strike-slip faults (according to the juxtaposition relationship between the fault walls) and vertically cuts through the Middle Cambrian Shayilike and Awatage Formations. A dual structure of fault core and damage zone can be observed within the zone. The fault core is mainly composed of fault breccia with calcite veins. The angular and sub-angular shaped breccia is consistent with surrounding rocks in terms of lithology, indicating a possible damage-collapse-accumulation genesis of near-source

收稿日期:2020-12-24;修订日期:2021-12-10。

第一作者简介:马庆佑(1981—),男,副研究员,石油构造地质研究。E-mail:37337428@qq.com。

通讯作者简介:曾联波(1967—),男,博士、教授,裂缝性储层与非常规油气储层形成、分布及预测技术。E-mail:lbzeng@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(U21B2062);国家科技重大专项(2017ZX05005-002);中国石化科技部项目(P20062-2)。

material. The calcite particles in veins vary in size but tend to be finer toward the wall of breccia, indicating a multi-stage activities and reformation of fluids. With $\delta^{13}\text{C}$ values ranging from -8‰ to -2‰ , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values generally higher than those of synsedimentary seawater, and significant negative Ce anomalies in REE (rare earth elements) analyses, the calcite veins truthfully record the visit of a later atmospheric fresh water. Fractures are well developed in the damage zone, most fractures are half or fully open with enlarged caverns from dissolution occurring locally along the fractures, and some fractures are filled by calcite cement. Based on the above research, a model is set up to describe the genetic evolution of the internal architecture and its control over the reservoirs in the fault zone. It suggests that the initial shear activity of strike-slip fault zone led to a brittle shear fracturing of the Middle Cambrian carbonate stratum, which then experienced long-term friction and slide to form noncohesive breccia and fracture zone with highly porous and permeable reservoirs. However, this strike-slip fault zone with high-quality reservoirs was later degraded into a vug-cemented fault zone as a result of multi-stage activities of calcite cementation jointly triggered by materials brought by atmospheric fresh water migrated vertically from surface to the deep along the zone and changes in temperature and pressure.

Key words: fault core, damage zone, internal architecture, reservoir-controlling pattern, strike-slip fault, Xiaerbulake section, Tarim Basin

引用格式: 马庆佑, 曾联波, 徐旭辉, 等. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面走滑断裂带内部结构及控储模式[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 69-78. DOI: 10. 11743/ogg20220106.

Ma Qingyou, Zeng Lianbo, Xu Xuhui, et al. Internal architecture of strike-slip fault zone and its control over reservoirs in the Xiaerbulake section, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 69-78. DOI: 10. 11743/ogg20220106.

塔里木盆地多年来持续加强台盆区下古生界海相碳酸盐岩油气勘探, 在沙雅、卡塔克及巴楚三大古隆起的风化壳岩溶及礁滩相碳酸盐岩等领域取得了一系列油气突破^[1-3], 展示了盆地下古生界海相碳酸盐岩领域良好的油气勘探前景。2016年中国石化西北油田针对上奥陶统泥岩覆盖下的风化壳岩溶欠发育区, 转变勘探思路和目标类型, 在顺托果勒低隆发现了沿走滑断裂带分布的新类型油藏—顺北超深断溶体油藏^[4-6], 该油藏的特点是受小滑移距的走滑断裂体系控制, 走滑断裂带具有“控储、控藏、控富”的特征。随着顺北油田断溶体油藏的勘探开发实践深入, 近期也碰到了一些难题函待攻关解决, 其中对走滑断裂带内部结构如何精细刻画及准确预测^[7-9], 成为制约该领域钻井部署成功的关键要素之一。

目前国内外学者针对沉积岩中发育的断裂带的内部结构进行了大量研究工作, 也取得了丰富的成果认识。断裂不是一个简单的面, 而是有一定宽度且包含不同特征断层岩的“带”, 断裂带是在构造应力的作用下, 以两侧岩体发生明显位移及相应变形、经历多期构造运动和流体改造形成的复杂三维地质体, 结构上普遍发育断层核与破碎带^[10-13]。断层核是断裂两侧岩体位移最为集中的部位, 断层核吸收了断裂大部分位移, 发育滑动面和断层岩, 断层岩主要类型包括断层角砾岩、碎裂岩、断层泥、泥岩涂抹、胶结的断层岩以及不同

尺寸的透镜体。破碎带位于断层核两侧, 主要是断层形成过程中伴生的次级构造, 包括伴生褶皱构造、次级小断裂、变形带、裂缝等^[14-17]。断层核的渗透性因其内部充填物不同而表现出较大差异, 这是围岩与断层存在差异渗透性的根本原因。

总体来看, 目前国内外学者对碎屑岩中断裂带的内部结构特征研究相对成熟, 而由于碳酸盐岩本身的复杂性, 对碳酸盐岩断裂带的内部结构认识相对薄弱。受取心资料匮乏等情况限制, 塔里木盆地目前对走滑断裂带内部结构、控储模式与机理的研究还相对较少, 这给高产井的准确部署带来了不确定风险。本文挑选塔里木盆地西北缘肖尔布拉克剖面出露的走滑断裂带为研究对象, 通过详细的野外观察描述、取样鉴定、地球化学分析, 剖析了该断裂带的内部结构特征, 探讨了走滑断裂内部碳酸盐岩储集体的形成、改造过程, 以期对塔里木盆地下一步油气勘探实践及断溶体井位部署提供借鉴。

1 区域地质概况

塔里木盆地肖尔布拉克剖面(也称蓬莱坝剖面)位于阿克苏市西南约45 km处的阿克苏水泥厂附近, 构造位置隶属于柯坪断隆东段(图1), 是南天山造山带与塔里木盆地的过渡部位。柯坪断隆在早古生代处于

塔里木克拉通板块边缘,接收台地相碳酸盐岩夹滨海相碎屑岩沉积,因此肖尔布拉克剖面寒武系-奥陶系发育齐全、出露完整,自下而上出露下寒武统玉儿吐斯组(ϵ_{1y})、肖尔布拉克组(ϵ_{1x})、吾松格组(ϵ_{1w})、中寒武统沙依里克组(ϵ_{2s})、阿瓦塔格组(ϵ_{2a})、上寒武统下丘里塔格群(ϵ_{3ql})、下奥陶统蓬莱坝组(O_{1p})、中-下奥陶统鹰山组(O_{1-2y}),是研究塔里木盆地海相碳酸盐岩构造沉积的典型剖面。柯坪断隆在晚古生代-中生代作为复合前陆盆地的前缘隆起长期抬升剥蚀,普遍缺失上泥盆统-石炭系、三叠系-侏罗系等地层。柯坪断隆在新生代主要受南天山造山作用影响,沿中、下寒武统膏盐岩滑脱层逆冲推覆,发育近NEE走向3~6排不等的叠瓦状冲断构造,形成了现今南天山前陆冲断褶皱带的构造格局。

根据研究区 Google Earth 卫星图像显示(图1),肖尔布拉克剖面寒武系上、中、下三统的界线可较清晰地区分,且发育一条近SN向的右行主走滑断裂带(主沟),其两侧伴生多条次级走滑断裂带(次沟),分析主

要受控于柯坪断隆自N向S挤压推覆中产生的不平衡构造作用而形成,归属于柯坪断隆近SN向走滑断裂体系。本文研究的肖尔布拉克剖面走滑断裂为该主断裂带东侧的伴生次级断裂(次沟),主要出露于中寒武统沙依里克组、阿瓦塔格组,其余部分受地形条件观察不清或被掩盖,出露段长度约350 m,其起点、终点坐标分别为:起点 $N 40^{\circ} 55' 26.82''$, $E 79^{\circ} 53' 58.02''$; 终点 $N 40^{\circ} 55' 15.83''$, $E 79^{\circ} 53' 57.29''$ 。

2 走滑断裂带内部结构特征

2.1 断裂带宏观地质特征

该断裂带断面近直立,推测自震旦系向上断穿奥陶系,出露段地层为中寒武统沙依里克组、阿瓦塔格组(图2)。沙依里克组主要岩性为灰色薄层-中层状亮晶砂屑灰岩、块状藻屑灰岩、粉-细晶白云岩,地层产状为 $152^{\circ} \angle 58^{\circ}$;阿瓦塔格组主要岩性为红褐色泥-粉

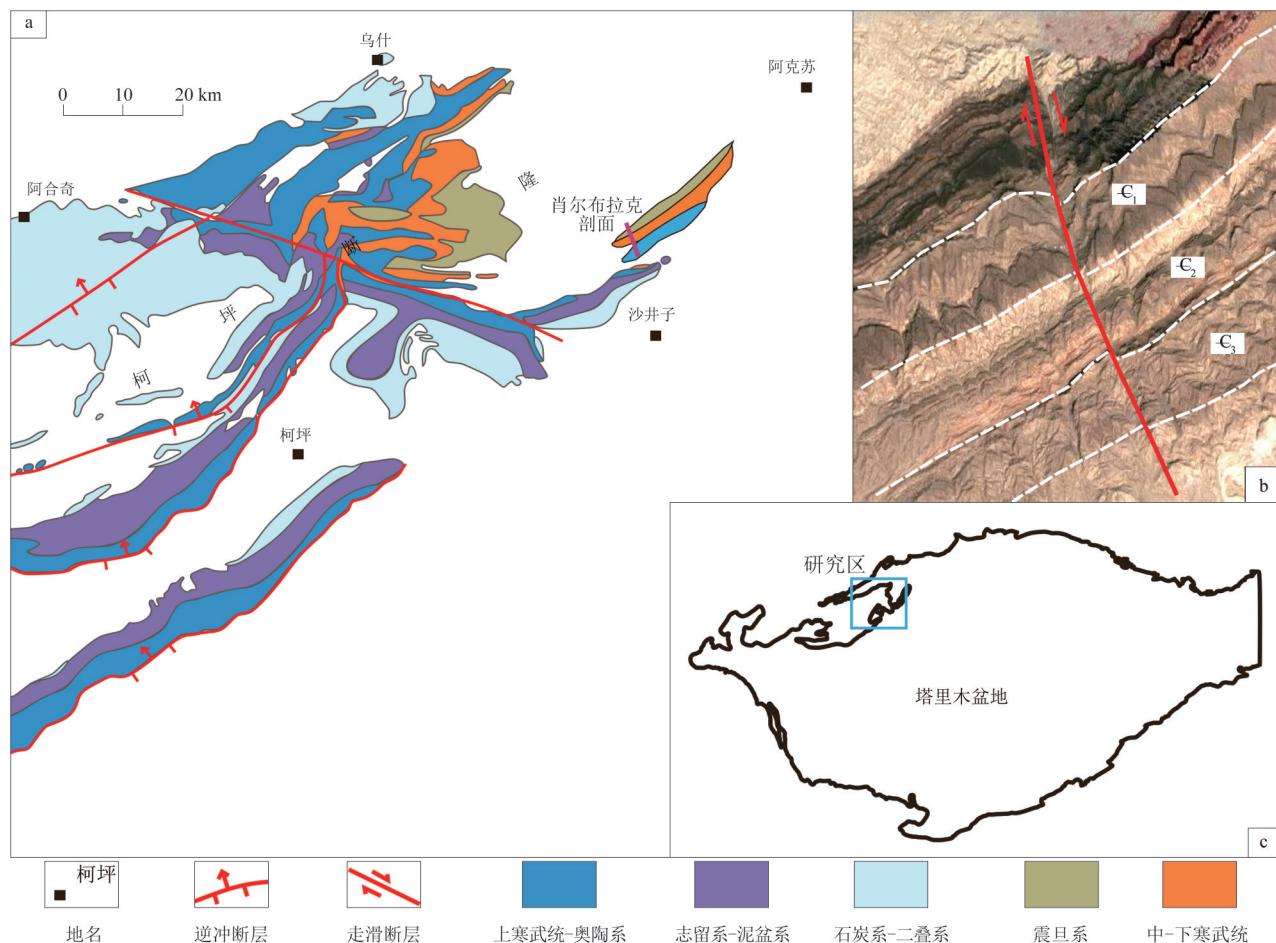


图1 塔里木盆地肖尔布拉克剖面区域概况

Fig. 1 Regional overview map of the Xiaerbulake section, Tarim Basin

a. 研究区地质简图; b. 研究区卫星图; c. 研究区构造位置

晶白云岩、膏质白云岩、含膏白云质夹藻屑灰岩。根据该断裂带主断面两侧沙依里克组、阿瓦塔格组界线的对接关系,判断其为右行走滑断裂带,垂向断距在30 m左右,水平滑移距受地形条件限制,未准确测量。

通过对该断裂带详细观察与测量后,认为其内部发育典型的“二元结构”,即发育断层核与破碎带(图2)。其中断层核具有多层结构,主要由断层角砾岩、方解石脉、钙华等组成,不同部位结构特征存在差异,结构较复杂,宽度在1.2~2.3 m;破碎带主要由围岩、裂缝

带、方解石脉等组成,宽度在2.8~4.5 m。肖尔布拉克剖面走滑断裂带整体以断层角砾岩、裂缝破碎带为基础,经过流体改造后被方解石脉胶结形成现今复合体。

2.2 断层核内部结构特征

该走滑断裂带不同位置断层核宽度存在差异,结构特征也略有不同,下文选择最具有代表性的观察点进行描述。该观察点位于寒武系中统阿瓦塔格组中,该处断层核宽度约2.1 m(图3a),主要由红褐色断层

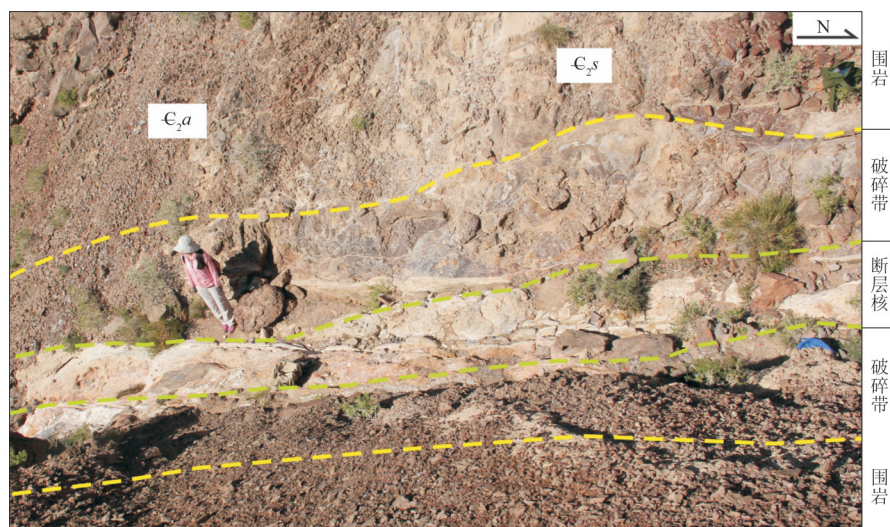


图2 塔里木盆地肖尔布拉克剖面出露的走滑断裂带宏观特征

Fig. 2 Macroscopic characteristics of the strike-slip fault zone outcropped in Xiaerbulake section, Tarim Basin

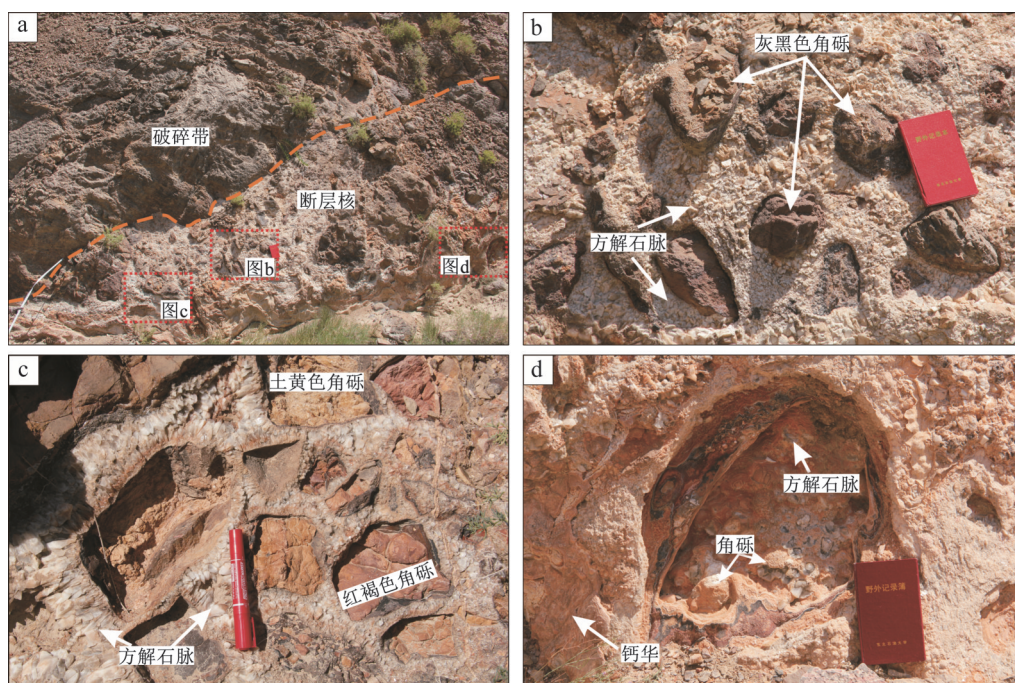


图3 塔里木盆地肖尔布拉克剖面走滑断裂带断层核结构特征(I)

Fig. 3 Structural characteristics of fault core in strike-slip fault zone, Xiaerbulake section, Tarim Basin (I)

a. 断层核宏观特征;b. 稀疏角砾被方解石胶结;c. 密集角砾被方解石胶结;d. 断层核横截面近照

角砾岩及方解石脉胶结包裹组成。断层角砾岩较易识别,形状多不规则,多为球状或四方体状,颜色为灰黑色、红褐色及黄棕色等(图3b),尺寸变化较大,最小约为3 cm,最大可达50 cm左右。通过对断层角砾岩及围岩进行薄片鉴定与矿物全岩组分测试,结果显示均以白云石(含量>80%)为主,表明此处的断层角砾岩主要为围岩阿瓦塔格组白云岩在构造剪切作用下发生破裂形成。

断层角砾岩大部分被方解石或钙华等碳酸盐沉淀物所胶结包裹,在断层角砾岩发育相对稀疏的位置,空隙间发育的方解石脉规模较大(图3b),在断层角砾岩发育密集的位置,空隙间发育的方解石脉规模相对较小(图3c)。断层角砾岩与方解石脉体形成了小规模“三明治”结构,即中间为断层角砾岩,两侧充填胶结了解石脉体(图3d)。方解石晶粒大小约为2~4 mm不等,且具有定向性,越靠近角砾壁的方解石晶粒越细小,远离角砾壁的方解石晶粒逐渐增大,表明靠近角砾壁的方解石形成时间较早,方解石围绕角砾壁逐层沉淀生成。该断层核内部从两侧向中间,多层结构特征逐渐明显和复杂,下文将断层核中间部位细分为6层(图4a),来详细描述其内部结构特征。

第1层为灰褐色角砾岩(图4b,g),最厚约39 cm,角砾大小相差不大,约3 cm左右,岩性为亮晶藻屑灰岩,风化面颜色为灰黑色,角砾裂隙发育,充填晶粒状方解石。

第2层为晶簇状方解石脉(图4c,h),最厚约13 cm,可细化为若干个小层,单层厚约1~2 cm,肉眼可见晶间孔隙发育,断面缝隙大、物性较好,新鲜面颜色为白色透明状。

第3层为角砾岩与钙华混合层(图4d,i),最厚约50 cm,角砾大小不一,最小为1 cm,最大可达8~9 cm,成分为阿瓦塔格组红褐色泥质白云岩,为母岩破碎后产物。角砾被层间钙华胶结充填,包裹角砾的包壳厚度介于1.5~4.5 cm,可细分若干小层。

第4层为红褐色角砾岩层(图4e,j),最厚约48 cm,角砾混杂发育、大小不一,介于0.5~12 cm,主要为阿瓦塔格组砖红色角砾岩,含有少量灰色白云质灰岩角砾,角砾之间胶结物为砖红色白云质灰岩,部分角砾有一定的磨圆度,为次棱角状,角砾和包壳边缘处可呈弯曲层状。

第5层为巨晶方解石脉(图4f,k),最厚约14 cm,方解石晶粒尺寸较大,从壁外向中间晶体逐渐变小,两

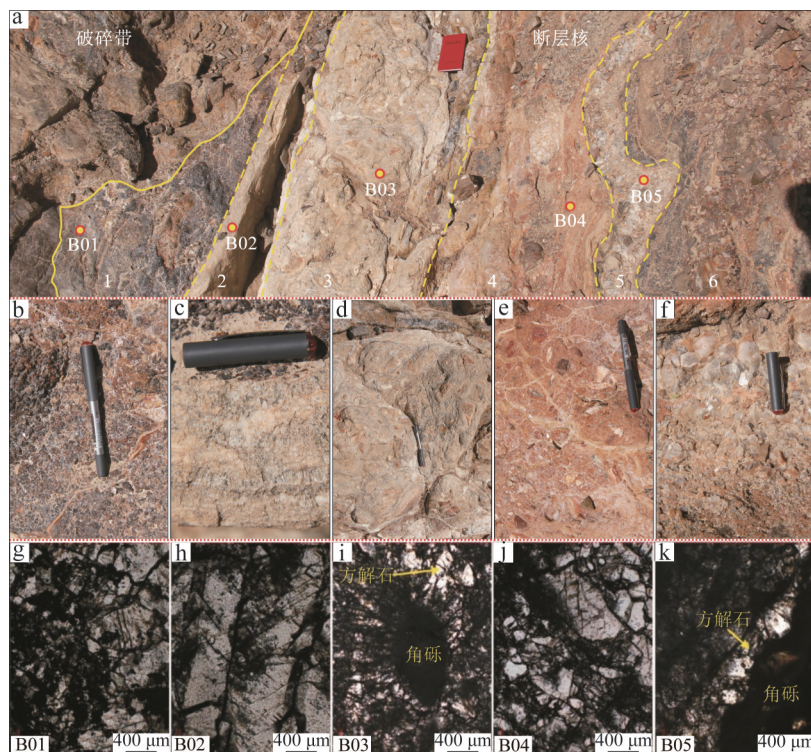


图4 塔里木盆地肖尔布拉克剖面走滑断裂带断层核结构特征(II)

Fig. 4 Structural characteristics of fault core in the strike-slip fault zone, Xiaoerbulake section, Tarim Basin (II)

a. 走滑断裂带典型的断层核内部结构;b. 灰褐色角砾岩,裂缝发育;c. 晶簇状方解石脉,晶间孔隙发育;d. 角砾与钙化混合层;
e. 红褐色角砾岩,裂缝发育;f. 巨晶方解石脉;g—k. 分别是b—f的岩石薄片照片

侧为5 mm左右,壁侧为3 cm左右,表明越接近角砾壁,方解石重结晶沉淀时间较长。

第6层同第4层的性质一致。

2.3 破碎带内部结构特征

该断裂带的破碎带非常发育,破碎带由裂缝带、红褐色角砾岩、马牙状方解石脉体充填组成(图5a)。角砾岩保留了围岩的岩性和内部原始构造,是围岩坍塌后又被方解石脉充填胶结形成的,平行分布于断裂带内。大部分角砾由厚度3~10 cm的方解石薄壳包裹(图5b),方解石脉体顺断裂带断面、溶蚀壁和角砾边缘发育,局部可见与断裂带交切呈网状的方解石脉体,方解石晶粒大小约为2~5 mm,为透明马牙状巨晶方解石晶体(图5c)。破碎带内部分断层角砾岩被溶蚀改造,出现“负风化”地形特征,溶蚀凹槽内有无定形褐色碳酸钙残留物(图5d),滴酸有明显冒泡现象。

同时该破碎带还发育大量构造裂缝,裂缝呈密集的网状交叉组合排列,裂缝距离断层核越远,发育的数量越少。裂缝内出现方解石胶结充填现象,但未见被

溶蚀改造形成溶洞,因此裂缝呈现凸出的“正风化”地形特征。从断层核两侧破碎带发育特征来看,左侧发生的构造变形较强烈、破碎带宽度及破碎程度更大、伴生构造更多,因此认为左侧为主动盘。

3 走滑断裂带内部结构成因演化模式

3.1 断裂带不同部位物性分析

肖尔布拉克剖面断裂带岩性为碳酸盐岩,基质孔渗较差,主要储层类型为构造裂缝型、裂缝-孔洞型。由于断裂带样品的孔隙度很难直接测定,本次主要通过面孔率来间接反映物性变化。基于断裂带不同位置采集的样品制成铸体薄片后,通过Image J软件来计算铸体薄片的面孔率(表1),采样点分布见图5a所示。测试分析结果表明,断裂带基岩样品物性较差,面孔率仅0.69%,基本不具备孔渗条件。断裂破碎带面孔率在4.55%~6.82%,断层核部面孔率在5.20%~12.56%,不同部位稍有差异,整体表现出由断裂破碎带往断层核部方向,面孔率逐渐增大,反映出断裂带内

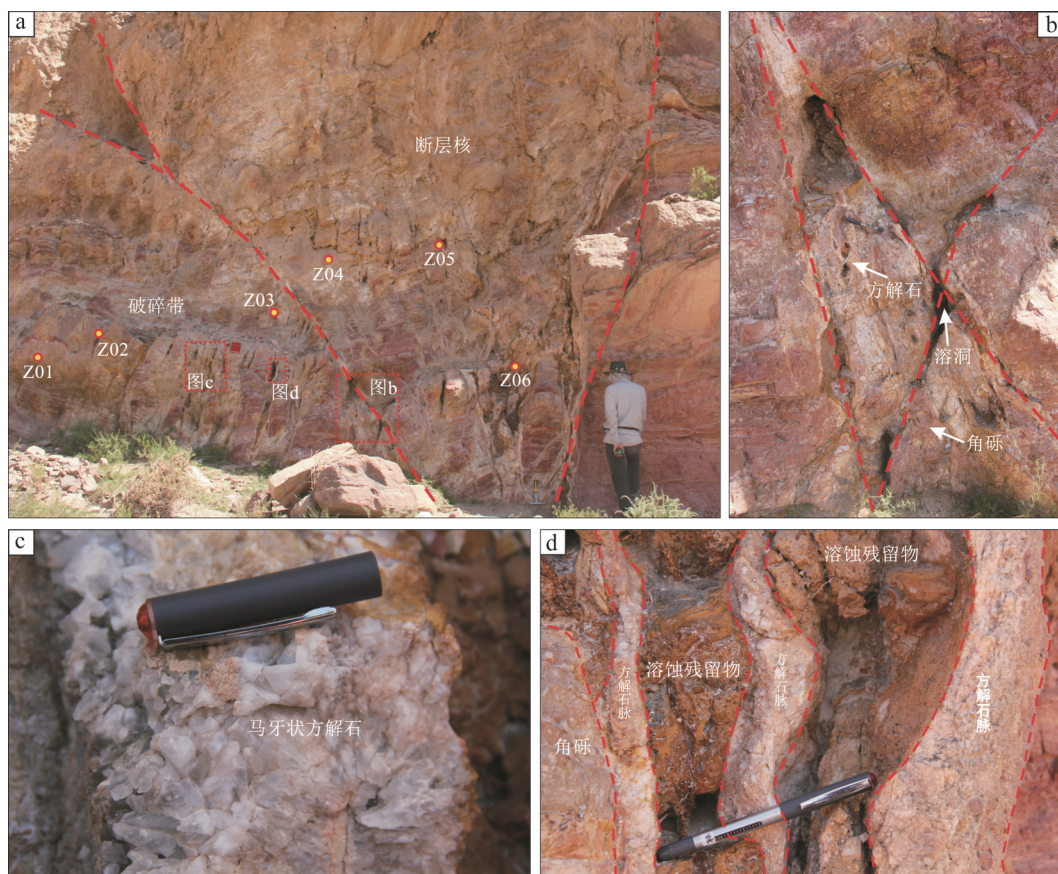


图5 塔里木盆地肖尔布拉克剖面走滑断裂带破碎带结构特征

Fig. 5 Structural characteristics of damage zone in the strike-slip fault zone, Xiaoerbulake section, Tarim Basin

a. 走滑断裂带横截面特征;b. 网状破碎带被方解石局部充填;c. 马牙状巨晶方解石脉;d. 破碎带被溶蚀现象

表 1 塔里木盆地肖尔布拉克剖面走滑断裂带储层物性分析
Table 1 Physical properties of samples from the strike-slip fault zone, Xiaerbulake section, Tarim Basin

样品编号	取样位置(见图 5)	面孔率/ %
Z01	基岩	0. 69
Z02	断层破碎带	4. 55
Z03	断层破碎带	6. 82
Z04	断层核带	5. 20
Z05	断层核带	8. 20
Z06	断层核带	12. 56

部结构对储层物性具有明显控制作用。

3.2 断裂带胶结物同位素与元素测试分析

断裂带内部流体主要为大气淡水和热液流体,通过地球化学测试分析的手段可帮助判断断裂带中流体的性质及来源^[18-19]。本次采集了肖尔布拉克剖面断裂带内的方解石胶结物,测定了其碳、氧、锶同位素及稀土元素组成(表 2;图 6)。

通常在浅层低温条件下,来自大气无机 CO₂ 溶解所产生 HCO₃⁻ 的 δ¹³C 值应接近于 0,肖尔布拉克剖面断裂带内的方解石胶结物 δ¹³C 值在 -9 ‰ ~ -3 ‰ (图 6a),其值均小于 0,表明这些方解石中的有机碳可能

表 2 塔里木盆地肖尔布拉克剖面走滑断裂带方解石胶结物碳、氧、锶同位素组成

Table 2 Isotopic composition of carbon, oxygen and strontium in calcite cements from the strike-slip fault zone, Xiaerbulake section, Tarim Basin

样品编号	取样位置 (见图 5)	岩性	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	δ ¹³ C (PDB)/‰	δ ¹⁸ O (PDB)/‰
B01	断层核	晶粒状方解石	0. 7103 6	-6. 39	-11. 75
B02	断层核	晶簇状方解石	0. 7101 9	-4. 16	-13. 26
B03	断层核	钙华	0. 7102 4	-3. 94	-12. 44
B04	断层核	白色细晶方解石	0. 7102 5	-3. 80	-12. 23
B05	断层核	白色巨晶方解石	0. 7100 4	-5. 26	-8. 88
B06	破碎带	晶粒状方解石	0. 7102 8	-4. 13	-12. 20
B07	破碎带	马牙状巨晶方解石	0. 7093 2	-7. 99	-10. 26
B08	破碎带	钙华	0. 7102 9	-3. 30	-11. 43

不同程度地混合了有机质氧化作用所产生的有机碳,比如由于大气淡水输入土壤有机质、或者大气淡水注入引起细菌繁殖进而导致烃类氧化等因素引起的。同时该断裂带内方解石胶结物的 δ¹⁸O 值在 -14 ‰ ~ -8 ‰ (图 6a),低 δ¹⁸O 值的方解石可以是低温低盐度的大气淡水成因,也可以是高温盆地流体或热液流体成因,具有成因多解性,因此还需要结合其他同位素或元素来综合分析。

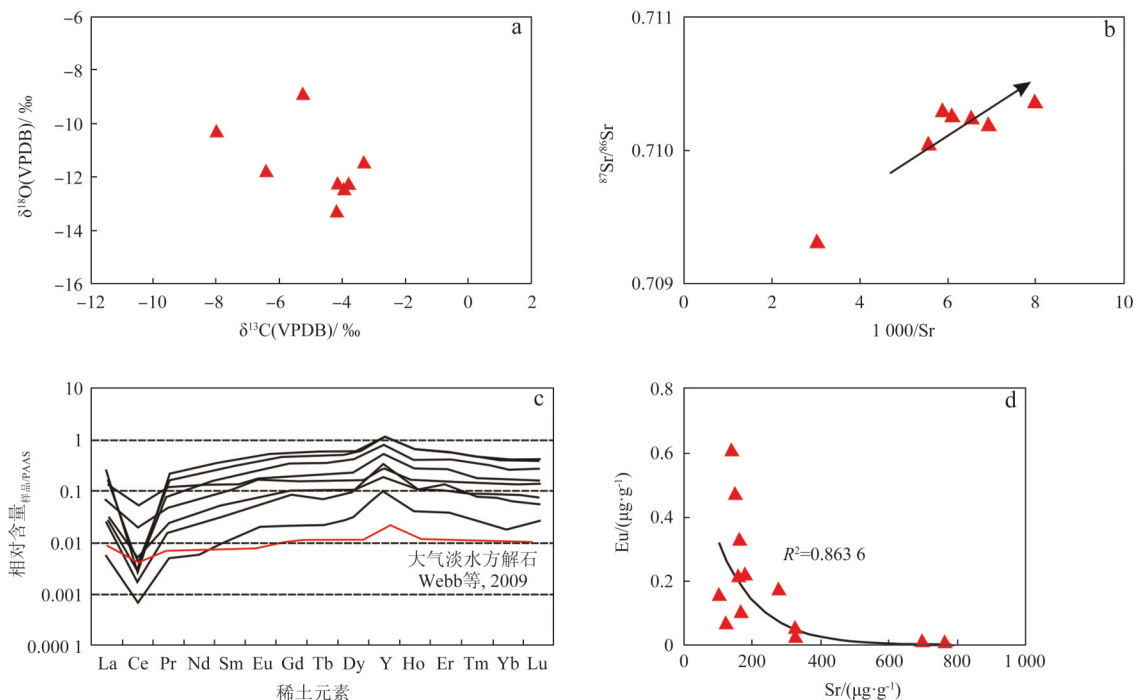


图 6 塔里木盆地肖尔布拉克剖面走滑断裂带方解石胶结物碳、氧、锶同位素及稀土元素分析

Fig. 6 Carbon, oxygen, strontium isotope and rare earth element analyses of calcite cement from the strike-slip fault zone, Xiaerbulake section, Tarim Basin

a. 碳、氧同位素分析; b. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值与 Sr 含量相关性; c. 稀土元素配分模式; d. Eu 含量与 Sr 含量相关性

海水的锶同位素组成主要受壳源和幔源两个来源锶控制^[19-20],壳源锶主要为大陆古老岩石风化锶,幔源锶(均值约0.703)主要来自洋中脊热液系统,海水锶是这两个来源锶的混合产物,根据全球数据统计海水锶均值为0.709 1。陆源碎屑矿物中⁸⁷Rb的含量较高,经 β -衰变生成⁸⁷Sr,因此陆源碎屑岩石通常具有较高的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值,但是其Sr含量较低。海相碳酸盐岩主要成分为CaCO₃,Sr²⁺与Ca²⁺的离子半径接近,可以置换CaCO₃中的Ca²⁺,因此海相碳酸盐岩中的Sr含量较高,其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值与海水接近。肖尔布拉克剖面断裂带内的方解石胶结物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值均略大于0.710 0,普遍高于同沉积海水(约0.709 1),但Sr含量(104~328 $\mu\text{g/g}$)偏低,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值与Sr含量具有负相关性(图6b),因此认为形成肖尔布拉克剖面走滑断裂内的方解石胶结物的流体是流经浅部碎屑岩的大气淡水。

稀土元素中Ce和Eu具有很强的变价性,对氧化-还原环境十分敏感,成岩期矿物中的Ce和Eu异常通常被作为判断成岩环境和成岩流体物化条件的标志^[21-27]。在氧化环境中,Ce³⁺因不断被氧化成相对难溶的Ce⁴⁺离子并迁移至沉积物中而贫化,水体出现Ce负异常;在还原环境中,Ce³⁺与其他稀土元素化学行为相

似,因此不会出现稀土元素分异,此时水体会略有轻微的Ce负异常或无异常。肖尔布拉克剖面断裂带内的方解石胶结物稀土元素配分模式与大气淡水相似,Ce具有明显负异常特征(图6c),Eu未显示明显的异常,且Eu含量与Sr含量具有很好的相关性, R^2 为0.863 6(图6d),这表明 δEu 可能更大程度受碎屑岩来源流体的影响。

综上分析结果表明,肖尔布拉克剖面断裂带主要受大气淡水的改造作用,导致自生矿物方解石的大量生成和沉积,使早期形成的断层角砾岩不断发生溶蚀-胶结,最终形成现今的断裂带内部结构。

3.3 断裂带成因演化及控储模式

基于上述对断裂带内部结构、流体性质及来源的研究,建立了肖尔布拉克剖面走滑断裂带内部结构的成因演化及控储模式(图7),其形成演化主要分为3个阶段。

1) 裂缝型破碎带的“一元结构”

走滑断裂形成初期,在剪切构造应力作用下,容易引起碳酸盐岩地层的脆性剪切破裂,形成张性微裂隙、雁行式剪切裂缝等^[22](图7b),从而构成“一元结构”的

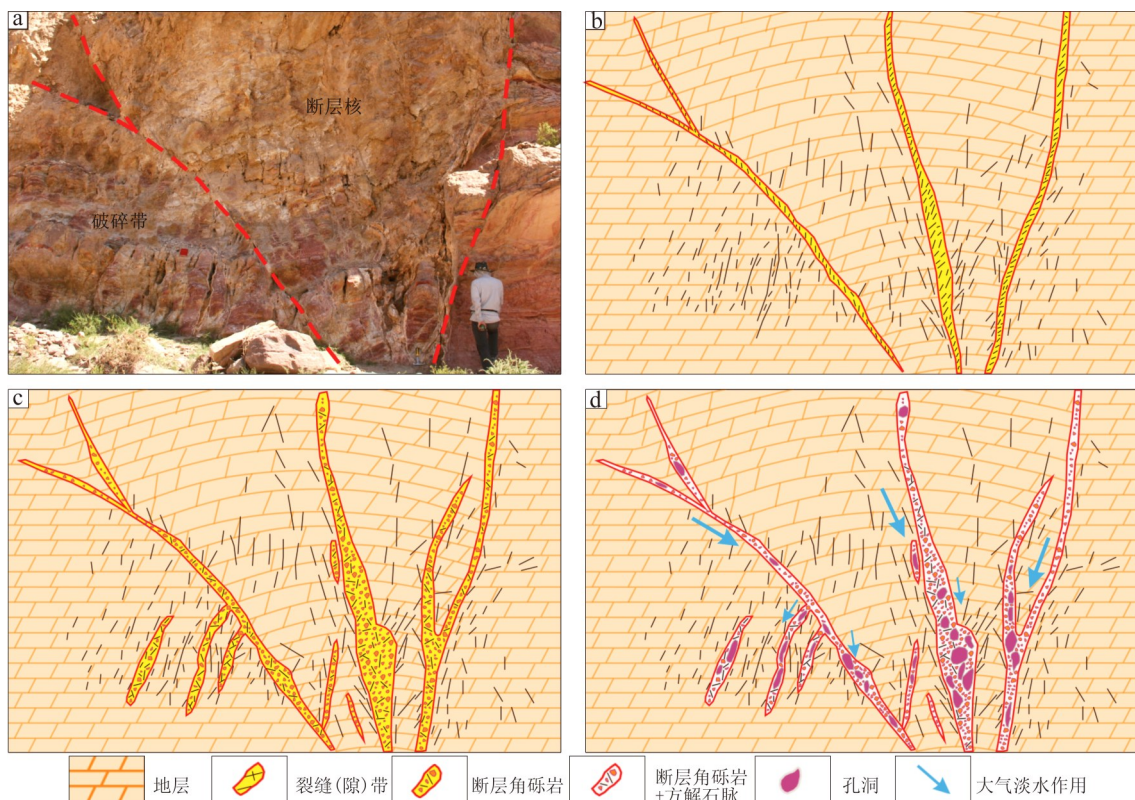


图7 塔里木盆地肖尔布拉克剖面走滑断裂带内部结构演化模式

Fig. 7 Evolution model of internal architecture of the strike-slip fault zone, Xiaoerbulake section, Tarim Basin

a. 走滑断裂带横截面特征;b. 裂缝型破碎带“一元结构”;c. 断层核+破碎带的典型“二元结构”;d. 方解石胶结+溶蚀改造型断裂带

裂缝型破碎带。此时的断裂带规模较小,仅发育初始裂缝带或断层滑动面,不发育明显的断层核。“一元结构”断裂带的滑动面或者裂缝破碎带孔渗性较两侧围岩明显高,构成当时断裂带内部的主要储集空间。

2) 断层核+破碎带的典型“二元结构”

在剪切构造应力持续作用下,断层累积活动量与位移量逐渐增加,早期形成的裂缝破碎带发生连接、贯通,形成一定规模的走滑断裂带,并且在应力集中区形成不连续的断层核^[10,28],从而演化为具有断层核+破碎带的“二元结构”断裂带(图7c)。断层核主要包括断层角砾岩、碎裂岩、透镜体等,破碎带的构造变形强度较断层核弱,主要发育大量裂缝。此时“二元结构”的断层核孔渗性较破碎带及两侧围岩明显高,该时期为断裂带内部储集空间最为发育的阶段。据上述铸体薄片采样分析,最大面孔率达12.56%,可能是该时期的产物。

3) 方解石胶结改造型断裂带

断裂带持续活动时,地表大气淡水沿走滑断裂带流过浅层碎屑岩地层,携带大量矿物质垂向渗流至深部寒武系碳酸盐岩地层中,由于深部与地表循环不畅,大气淡水往往封存于深部成为富含矿物质的地下流体。随着地下温度、压力的改变以及地下流体与断层岩的水-岩相互作用,地下流体所携带的大量矿物质在断层核内发生沉淀,沿着角砾岩壁向外侧结晶生长,形成方解石胶结物包裹在断层角砾岩周围(图7d)。方解石胶结充填作用对储集空间具有明显破坏性,导致断层核的孔渗性大幅度降低(如面孔率为5.2%),最终形成了肖尔布拉克剖面现今的溶洞-胶结型断裂带结构。

4 结论

1) 肖尔布拉克剖面走滑断裂带出露在中寒武统内,内部发育由断层核与破碎带组成的典型“二元结构”,其中断层核主要由断层角砾岩带与方解石充填脉组成,角砾岩性与围岩一致,呈棱角-次棱角状,反映断裂走滑剪切活动导致近源破碎、坍塌堆积形成。断层角砾岩被方解石胶结充填,方解石晶粒尺寸大小不等,越靠近角砾壁的方解石晶粒越细小,反映由多期流体活动与改造而形成。

2) 对断裂带内部的断层核而言,早期由于断裂剪切滑动形成无内聚力的角砾岩带及裂缝带,孔渗性能较好,而晚期受到大气淡水改造形成方解石脉胶结充填,孔渗性能将明显降低;对破碎带而言,早期裂缝带

孔渗性能不如断层核,而晚期受大气淡水改造作用弱,形成的方解石胶结充填作用也弱,往往能保存下早期形成的裂缝型储集空间。整体而言,断裂核部要比断裂破碎带的储层物性好。

3) 肖尔布拉克剖面走滑断裂带的内部结构模型及成因演化模式,对研究盆地内碳酸盐岩走滑断裂带的变形特征及控储作用、对构建地质模型预测储层发育有利部位具有重要借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 翟晓先. 塔里木盆地塔河特大型油气田勘探实践与认识[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 323-331.
Zhai Xiaoxian. Exploration practice and experience of Tahe giant oil-and-gas field, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4): 323-331.
- [2] 金晓辉, 闫相宾, 李铁军, 等. 塔里木盆地油气勘探实践与发现规律探讨[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 45-52.
Jin Xiaohui, Yan Xiangbin, Li Tiejun, et al. A discussion on gas and oil exploration activities and discovery patterns in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 45-52.
- [3] 漆立新. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 771-779.
Qi Lixin. Exploration practice and prospects of giant carbonate field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 771-779.
- [4] 云露, 曹自成. 塔里木盆地顺南地区奥陶系油气富集与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 788-798.
Yun Lu, Cao Zicheng. Hydrocarbon enrichment pattern and exploration potential of the Ordovician in Shunnan area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 788-798.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 韩剑发, 苏洲, 陈立新, 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.
- [9] 程洪, 张杰, 张文彪. 断溶体储层类型识别、预测及发育模式探讨——以塔里木盆地塔河十区TH10421单元为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 996-1003.
- Cheng Hong, Zhang Jie, Zhang Wenbiao. Discussion on identification, prediction and development pattern of faulted-karst carbonate reservoirs: A case study of TH10421 fracture-cavity unit in block 10 of Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 996-1003.
- [10] Ingram G M, Urai J L. Top-seal leakage through faults and fractures: the role of mudrock properties[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1999, 158(1): 125-135.
- [11] Caine J S, Evans J P, Forster C B. Fault zone architecture and permeability structure[J]. Geology, 1996, 24(11): 1025-1028.
- [12] Evans J P, Forster C B, Goddard J V. Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones[J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19(11): 1393-1404.
- [13] 付晓飞, 许鹏, 魏长柱, 等. 张性断裂带内部结构特征及油气运移和保存研究[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 200-212.
- Fu Xiaofei, Xu Peng, Wei Changzhu, et al. Internal structure of normal fault zone and hydrocarbon migration and conservation[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(6): 200-212.
- [14] Chester F M, Logan J M. Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, California[J]. Pure and Applied Geophysics, 1986, 124(1-2): 79-106.
- [15] Meier S, Bauer J F, Philipp S L. Fault zone characteristics, fracture systems and permeability implications of Middle Triassic Muschelkalk in Southwest Germany[J]. Journal of Structural Geology, 2015, 70: 170-189.
- [16] Choi J, Yang S, Han S, et al. Fault zone evolution during Cenozoic tectonic inversion in SE Korea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 98: 167-177.
- [17] 孟令东, 付晓飞, 王雅春, 等. 徐家围子断陷火山岩断层带内部结构与封闭性[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 150-157.
- Meng Lingdong, Fu Xiaofei, Wang Yachun, et al. Internal structure and sealing properties of the volcanic fault zones in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 150-157.
- [18] 王起琮, 张阳, 肖玲. 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩成岩相碳、氧稳定同位素特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 652-657.
- Wang Qicong, Zhang Yang, Xiao Ling. Carbon and oxygen stable isotopic features of diagenetic facies of Ordovician carbonate rocks in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 652-657.
- [19] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 111-207.
- Huang Sijing. Diagenesis of carbonates[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 111-207.
- [20] 王利超, 胡文瑄, 王小林, 等. 白云岩化过程中镭含量变化及镭同位素分馏特征与意义[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 464-469.
- Wang Lichao, Hu Wenxuan, Wang Xiaolin, et al. Variation of Sr content and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope fractionation during dolomitization and their implications[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 464-469.
- [21] 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 810-819.
- Hu Wenxuan, Chen Qi, Wang Xiaolin, et al. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 810-819.
- [21] 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 810-819.
- Hu Wenxuan, Chen Qi, Wang Xiaolin, et al. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 810-819.
- [22] 李平平, 王淳, 邹华耀, 等. 团簇同位素在白云岩化流体恢复中的应用与局限性[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 738-746.
- Li Pingping, Wang Chun, Zou Huayao, et al. Application of clumped isotopes to restoration of dolomitizing fluids and its limitations[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 738-746.
- [23] 胡安平, 沈安江, 梁峰, 等. 激光铀铅同位素定年技术在塔里木盆地肖尔布拉克组储层孔隙演化研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 37-49.
- Hu Anping, Shen Anjiang, Liang Feng, et al. Application of laser in-situ U-Pb dating to reconstruct the reservoir porosity evolution in the Cambrian Xiaoerbulake Formation, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 37-49.
- [24] 刘嘉庆, 李忠, 颜梦珂, 等. 塔里木盆地塔中地区下奥陶统白云岩的成岩流体演化: 来自团簇同位素的证据[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 68-82.
- Liu Jiaqing, Li Zhong, Yan Mengke, et al. Diagenetic fluid evolution of dolomite the Lower Ordovician in Tazhong area, Tarim Basin: Clumped isotopic evidence[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 68-82.
- [25] 万友利, 王剑, 付修根, 等. 羌塘盆地南坳陷中侏罗统布曲组白云岩储层成因流体同位素地球化学示踪[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 189-200.
- Wan Youli, Wang Jian, Fu Xiugen, et al. Geochemical tracing of isotopic fluid of dolomite reservoir in the Middle Jurassic Buqu Formation in southern depression of Qiangtang Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 189-200.
- [26] 陈波, 张顺存, 孙国强, 等. 准噶尔盆地车拐斜坡区储层碳酸盐胶结物碳氧同位素特征及其成因[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(4): 101-106.
- Chen Bo, Zhang Shuncun, Sun Guoqiang, et al. Characteristics and formation mechanism of Carbonate cementation in Che-Guai slope area, Junggar Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 101-106.
- [27] 董庆民, 胡忠贵, 陈世悦, 等. 川东北地区长兴组-飞仙关组碳酸盐岩同位素地球化学响应及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1307-1320.
- Dong Qingmin, Hu Zhonggui, Chen Shiyue, et al. Isotope geochemical responses and their geological significance of Changxing-Feixianguan Formation carbonates, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1307-1320.
- [28] Mollema P N, Antonellini M. Development of strike-slip faults in the dolomites of the Sella Group, northern Italy[J]. Journal of Structural Geology, 1999, 21: 273-292.

(编辑 张亚雄)