

塔里木盆地顺北地区不同断裂带油气充注能力 表征研究与实践

胡文革^{1,2,3}

(1. 中国石化西北油田分公司,新疆乌鲁木齐830011; 2. 中国石化石油勘探开发研究院,北京100083;
3. 中国石化碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室,新疆乌鲁木齐830011)

摘要:沿走滑断裂带分布的中、下奥陶统碳酸盐岩油气藏,是塔里木盆地顺北地区勘探开发的主要目标,其地质储量丰富,开发前景广阔。走滑断裂带不同部位油气充注效率差异性较大,如何精准评价与描述充注效率优势部位,加快规模增储上产,提升勘探开发效率与效益,已成为制约顺北地区高效勘探开发的关键。基于顺北地区1号和5号断裂带“断层-储层”关系研究,首次探讨了影响顺北走滑断裂带油气充注效率的主要因素,包括断裂带内部结构、局部应变强度和现今地应力的方向及大小,并据此提出了“充注体”概念,进而半定量评价了断裂带不同部位垂向油气输导强度。该评价方法目前已成功应用在顺北地区5号断裂带上,评价结果与实际生产数据高度吻合。该方法不仅为断裂带分段评价和油气垂向输导“高速通道”的描述提供了有力的理论支撑,而且对顺北地区快速规模增储、实现稀井高产具有重要意义。

关键词:充注效率;油气输导强度;充注体;溶解体油气藏;走滑断裂带;顺北地区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Study and practice of characterizing hydrocarbon charging capacity of different fault zones, Shunbei area, Tarim Basin

Hu Wenge^{1,2,3}

(1. Northwest Oilfield Company, PetroChina, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery for Carbonate Fracture-Cavity Reservoirs, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The Middle-Lower Ordovician carbonate reservoirs along strike-slip fault zones in the Shunbei area, Tarim Basin, are hydrocarbon bearing and have been the main targets of exploration and development for oil and gas. However, hydrocarbon charging efficiency at different parts of the zones varies greatly, posing challenge for accurately evaluating and describing the dominant parts of charging, which in turn determines the efficiency and scale of exploration and development in the Shunbei area. To tackle the problem, this study is focused on the relationship between the faults and reservoirs in two of the fault zones (No. 1 and 5) to discuss for the first time the main factors affecting the hydrocarbon charging efficiency in the zones that are reflected through the internal structure of the zones, the local strain intensity as well as the size and direction of the present in-situ stress. Based on the study, the concept of “charging body” is proposed and implemented to semi-quantitatively determine the vertical transport of hydrocarbons at different parts of the zones with results fitting well with the actual production data. This method not only provides strong theoretical support for segmental assessment of the zones and description of “high-speed channels” for vertical hydrocarbon migration, but also serves as a guidance to rapidly increasing reserves and promoting production with less wells in the Shunbei area.

Key words: hydrocarbon charging efficiency, hydrocarbon transport intensity, charging body, fault-vuggy reservoir, strike-slip fault zone, Shunbei area, Tarim Basin

收稿日期:2021-03-14;修订日期:2022-03-14。

第一作者简介:胡文革(1966—),男,博士、教授级高级工程师,油气藏开发。E-mail: huwg.xbsj@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技部项目(P20064-1)。

引用格式: 胡文革. 塔里木盆地顺北地区不同断裂带油气充注能力表征研究与实践[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 528-541. DOI: 10. 11743/ogg20220304.

Hu Wenge. Study and practice of characterizing hydrocarbon charging capacity of different fault zones, Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 528-541. DOI: 10. 11743/ogg20220304.

2015年以来,中国石化西北油田分公司在塔里木盆地顺北地区取得了良好的油气资源勘探成果,顺北1号断裂带整体建产,顺北2井获油气流,顺北5号断裂带多口钻井均获高产油气流,表明顺北地区具备巨大的油气潜力。实钻表明,顺北地区油气藏沿走滑断裂带分布,高产井大多集中在油气充注强、缝洞发育、裂缝渗透性强的部位^[1-6]。部署在顺北1号断裂带上的8口井生产测试显示,油气来源于井底之下200~300 m处,说明断裂带具有纵向输导能力,且油气主要来源于寒武系底部玉尔吐斯组烃源岩。顺北主体区不同规模的断裂带均有油气发现,取自不同钻井的原油密度与化学组分均相似,指示顺北主体区均具有良好的油气充注^[7-8]。然而,不同断裂带之间,或同一条断裂带上不同位置的钻井产液含水率差异显著,表明断裂带不同部位的油气充注具有非均一性,位于充注较强、含水率低部位的钻井往往获得高产。

油气沿断裂带垂向充注效率评价是钻井获得高产的前提,也是断裂带分段评价、优化井位的首要参考指标。顺北地区目的层地质条件复杂,控储控藏因素众多^[9-11],且处于开发初期。根据现有资料难以精确定优势充注位置,这已成为顺北高效开发所面临的一个重要问题。

本文借助多项地质研究成果及实钻井资料,在深刻认识顺北油气成藏体系的基础上,提出利用“充注体”概念来宏观评价断裂带充注能力,并厘定了影响顺北走滑断裂带油气充注效率的主要因素,据此建立了划分及评价断裂带不同部位充注能力的技术思路,为顺北下一步钻井部署提供了有力的理论支撑。

1 前沿概述

塔里木盆地顺北地区古生界中发育一系列走滑断裂带,目前已厘定出18条克拉通内走滑断裂带,其共同特征是在寒武系-中、下奥陶统中表现为直立高陡的断面,沿断面被切穿的多套碳酸盐岩层系发生强烈破碎,进而形成油气上移通道与储集空间,向下沟通寒武系玉尔吐斯组烃源岩,向上终止于上奥陶统泥岩盖层,形成了一套特殊的“藏下有源,下生上储”的短距离油气运移成藏体系(图1)。

顺北油气藏独特的油气运移特征决定了直立高陡走滑断裂是其核心的油气成藏要素^[12-14]。断裂带的垂向贯通程度直接影响了油气运移的效率。若断面向上切穿了所有地层,且每个层系的破碎程度都很高,则油气会畅通无阻地从烃源岩向上运移,并在中、下奥陶统中形成规模油气藏。而一旦断面受到致密盖层遮挡,或切穿地层时破碎不彻底,则油气运移势必会受阻。在油气田开发初期,由于资料有限,难以准确预测油气高效充注的部位,这对于“短距离运移近储”的碳酸盐岩缝洞型油藏以及“远运远储”的碎屑岩圈闭来说都是制约开发效果的核心问题。

前期塔河油田的开发实践表明,利用地震数据可以实现断裂构造样式及地层破碎程度的定量-半定量识别。在缺乏钻井资料的区块,地震数据可以作为缝洞型碳酸盐岩油气藏的主要评价工具。在塔北-顺北地区,中奥陶统顶界(T_1^+ 界面)是碳酸盐岩与泥岩盖层的分界线,也是塔河及顺北油气藏的区域盖层。在 T_1^+ 界面之下,未被改造的碳酸盐岩地层在地震剖面上通常表现为弱振幅的平整同相轴或杂乱特征,缝洞发育的部位则会形成显著的强能量体,而断裂带往往表现为同相轴错断、变形或“线状弱反射”,据此可以在地震剖面上识别出断裂体系的轮廓和样式。例如,借助地震振幅差异对顺北5号断裂带进行立体雕刻后(图2),可以直观表征断裂带的立体结构。其整体表现为沿着走向发育的一系列三维地质体,垂向上贯穿多个层系,但是样式各不相同。

借助地震立体雕刻手段,本文将“充注体”定义为:由同一条断裂带控制的,具有相同油源、相同储集体发育背景、纵横向输导能力的三维空间组合。如图3所示,“充注体”的构成要素有3个,即底部烃源岩、由断裂带构成的深层输导与调整系统和浅层储集油气的缝洞系统。划分“充注体”的目的是认识不同地层段间的充注条件差异,核心是判断断裂沟通油气的能力(如下切深度、纵向连续性等),意义是评价地层分段之间的油气输导能力,并优选地质甜点、实现快速突破。通过对“充注体”3个构成要素定量-半定量评价,可以在钻井部署前预测不同“充注体”的油气充注效果,进而制定评价方案,并在实施中滚动完善。本文基于顺北断裂体系的研究,重点探讨了断裂带的构造样式、内部结

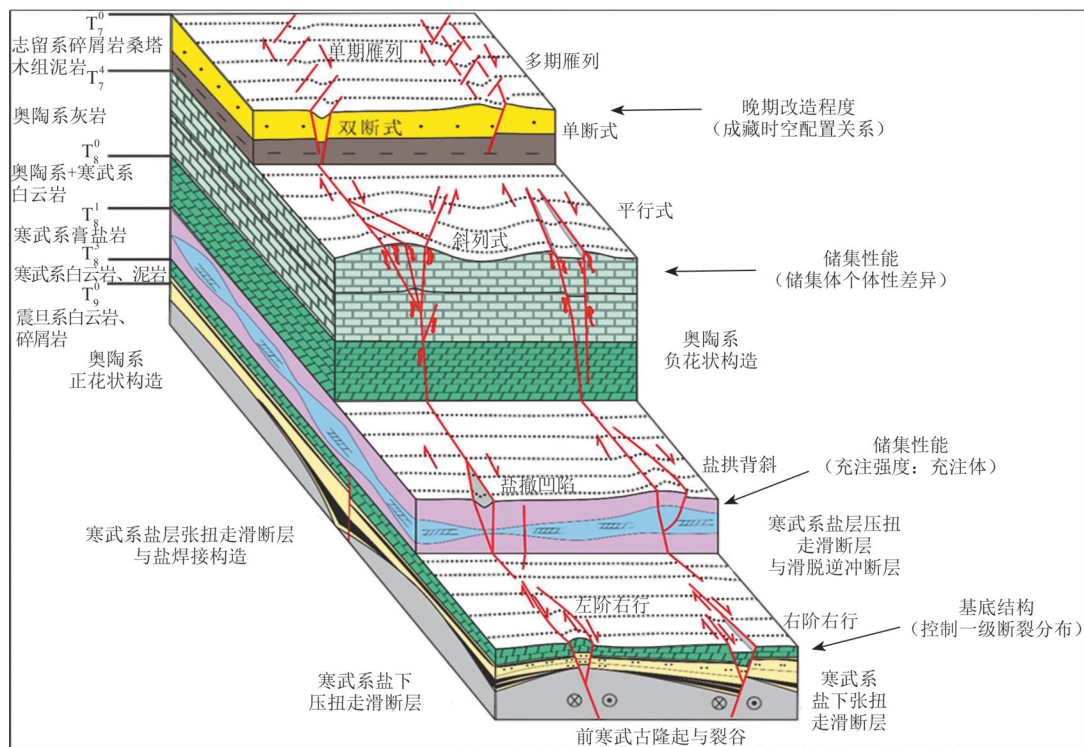


图1 塔里木盆地顺北地区断控油气藏剖面示意图

Fig. 1 Sketch map showing the fault-controlled reservoirs in the Shunbei area, Tarim Basin

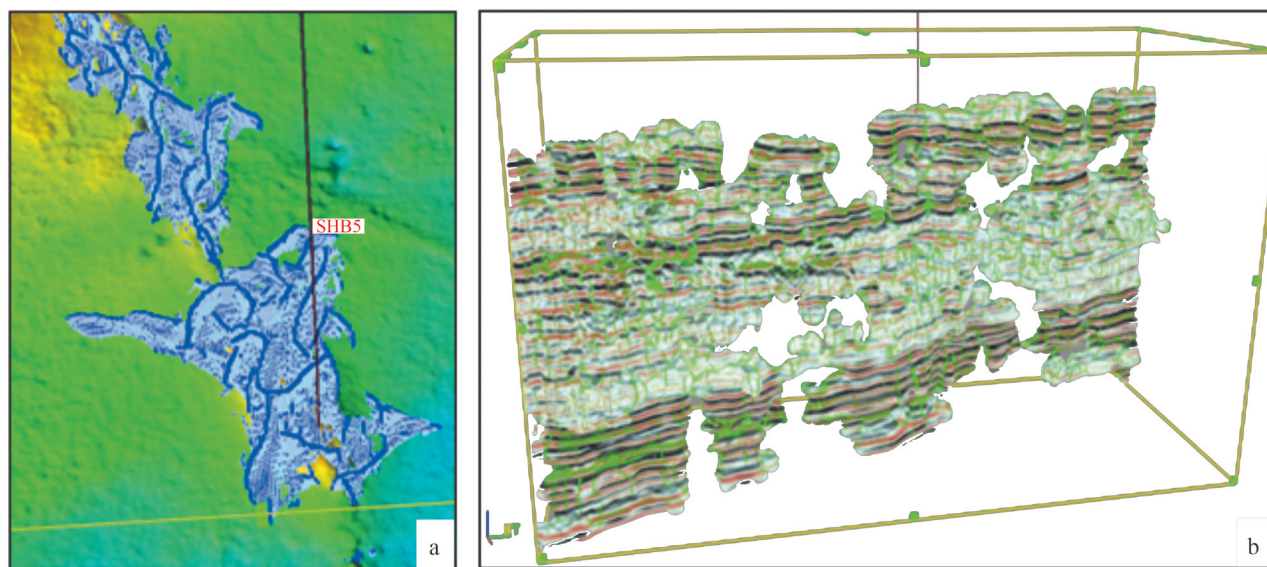


图2 塔里木盆地顺北5号断裂带北段振幅立体雕刻图

Fig. 2 Amplitude stereogram showing the northern part of No. 5 fault zone in the Shunbei area, Tarim Basin

a. 振幅平面图; b. 振幅剖面图

构以及现今地应力场对不同充注体油气输导能力的影响。

2 地质概况

顺北地区位于塔里木盆地顺托果勒低隆的北部，

处于阿瓦提、满加尔坳陷与沙雅隆起的结合部，区域构造位置有利，油源充足，是油气长期运移聚集的指向区。同时，该区寒武系生油岩和走滑通源断裂亦是短距离近储运聚的有利区^[15-17] (图4)。近年来，在研究区周边已经陆续发现托普台、跃参等多个海相油气藏。其中，跃参区块奥陶系已经建成了年产 20×10^4 t 产能阵地。

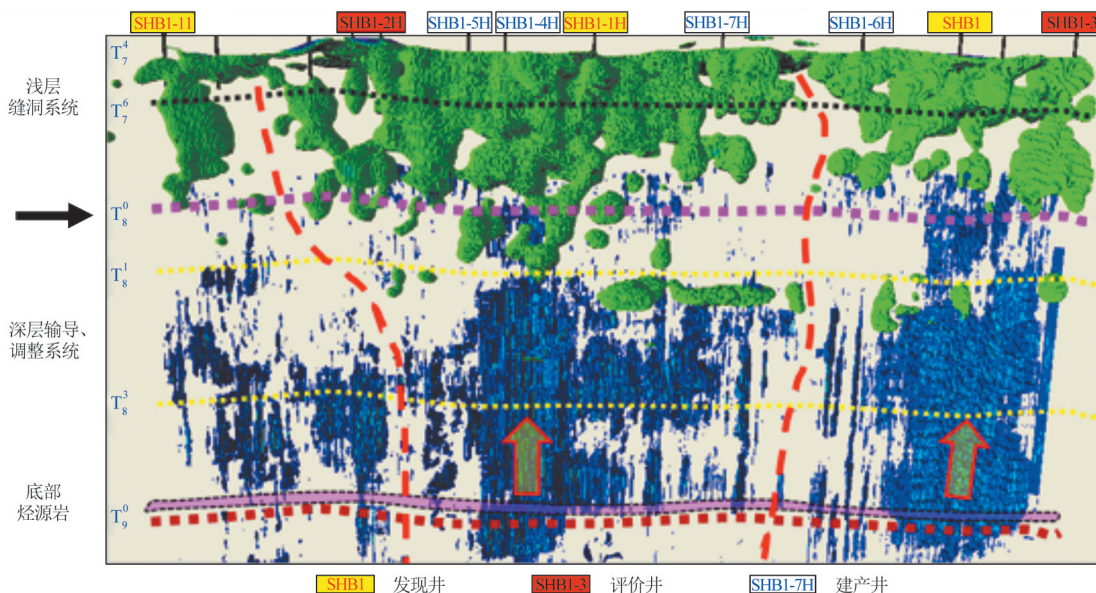


图3 塔里木盆地顺北1号断裂带充注体立体雕刻图

Fig. 3 3D engravings showing the charging bodies in No. 1 fault zone, Shunbei area, Tarim Basin

顺北主体区的油气富集层位是中下奥陶统一间房组与鹰山组,岩性以灰岩为主^[18-19]。早-中奥陶世,顺北区块位于台地相沉积环境,沉积了巨厚的碳酸盐岩。中奥陶世末,寒武系-奥陶系大型碳酸盐岩建造阶段结束。在近南北向构造应力作用下,地壳逐步抬升,塔北隆起地区形成一个北高南低的宽缓古隆起。顺北地区处于塔北隆起南部倾末端,形成了北东向及北西向的走滑断裂体系,断裂发育规模大,断穿层位多。断裂带及其附近的碳酸盐岩受构造应力作用发生破碎,形成了裂缝型储集体。加里东晚期-海西早期构造运动使得走滑断裂带进一步被改造,局部存在海西晚期热液溶蚀作用,形成以走滑断裂控制为主的多种成因叠加改造的裂缝-洞穴型储集体^[20-21]。

目前,顺北地区多条断裂带已开展油气生产。其中,已经实现基本控制的有顺北1号和5号断裂带。二者均向下断穿基底,在寒武系和中下奥陶统中表现为直立高陡的走滑断裂,在上奥陶统和志留系中以雁列正断层为主,纵向上具有分层差异破碎的特征(图5)。在 T_7^4 界面之上,顺北1号和顺北5号断裂带大致呈NE和NS-NW走向,在中国石化工区范围内长度分别为28 km和29 km^[6-10]。钻井均部署于断穿基底的北东向断裂带上,且均钻遇放空或出现大规模泥浆漏失,试采获得较高产量,表明钻遇了裂缝-洞穴型储层。顺北5井钻遇放空漏失,累计漏失1 313 m³,测试获高产,进一步证明顺北地区断裂控储、控藏及控富的特征。综合研究实钻井的钻井资料、岩心资料及成像测井资料等,确定顺北地区奥陶系储层类型为沿深大断裂发育

的裂缝-洞穴型储层,储集空间类型可划分为破碎角砾带中发育的孔洞、构造破裂缝等^[20-21]。

3 研究资料与方法

顺北5号断裂带中段位于顺北主体区顺8三维工区内,其走向近南北,长度约为20 km,在中、下奥陶统-寒武系中直立高陡,地层整体破碎程度明显小于顺北1号断裂带与5号断裂带北段,在地震剖面上呈“线状弱反射+杂乱强反射”特征。中国石化西北油田分公司沿顺北5号断裂带中段部署了一系列开发井,大多以侧钻方式贯穿断面,随即酸压建产。本次研究选取顺北5号断裂带中段的4口典型井作为研究对象,包括SHBB4井、SHBB5井、SHBB6井和SHBB7井,另外选取顺北5号断裂带北段SHBB8井作为参照。

本文研究资料包括顺北5号断裂带中段的三维地震数据体、5口特征井的钻井、录井、测井及压恢试井资料,图件制作及三维地质建模工作均在Petrel软件中完成,地震剖面解释精度达到25 m/个,解释层位7个(T_7^4 , T_7^6 , T_7^8 , T_8^0 , T_8^1 , T_8^2 , T_8^3)。

4 研究结果

通过对顺北油气田多口钻井相关资料分析,发现直立高陡走滑断裂带的油气输导能力主要受3方面因素影响,即断裂构造样式、断裂带内部结构和现今地应力场。



图4 塔里木盆地顺托果勒地区断裂体系

Fig. 4 Distribution of fault systems in the Shuntogole area, Tarim Basin

a. 顺托果勒地区位置; b. 顺托果勒地区断裂分布

4.1 断裂带构造样式差异

顺北5号断裂的中段主要以左阶斜列展布(图6)。剖面上,顺北5号断裂带深层走滑断裂明显错断同相轴,局部可见串珠状强反射。在 T_4^1 界面(中奥陶统一间房组顶面)之上,顺北5号断裂浅层构造表现为雁列正断层。顺北5号断裂带在 T_4^1 界面发育的左阶斜列展布分段间的叠接区域主要为隆起构造,指示该系列走滑分段右行走滑。尽管顺北5号走滑断裂带在寒武系—中、下奥陶统中产状以直立高陡为主,但顺北5号断裂带构造样式在寒武系中表现出多样性,最明显的即为在中寒武统中(T_9^0 — T_8^1)发育滑脱/逆断层。

结合顺北地区寒武系的现今地应力场特征,发现5号断裂带在寒武系中处于走滑应力状态,即具备沿着走向发生水平错动的活动趋势。在这种应力状态下,最容易发生活动的是直立高陡断面,而滑脱逆断层的产状在走滑应力状态下保持了相对稳定,几乎不具有滑动的趋势。Zoback, Barton 和 Morris 等人认为,滑动趋势较大的断面或裂缝通常具有较强的水力输导能力,而处于稳定状态的断层则基本不具有渗透能力^[22-24]。因此,在中寒武统发育的滑脱/逆断层对于油气的运移很难起到输导作用,会导致油气的纵向输导不畅,而直立高陡穿过中寒武统的走滑断层是最理想的水力输导通道。

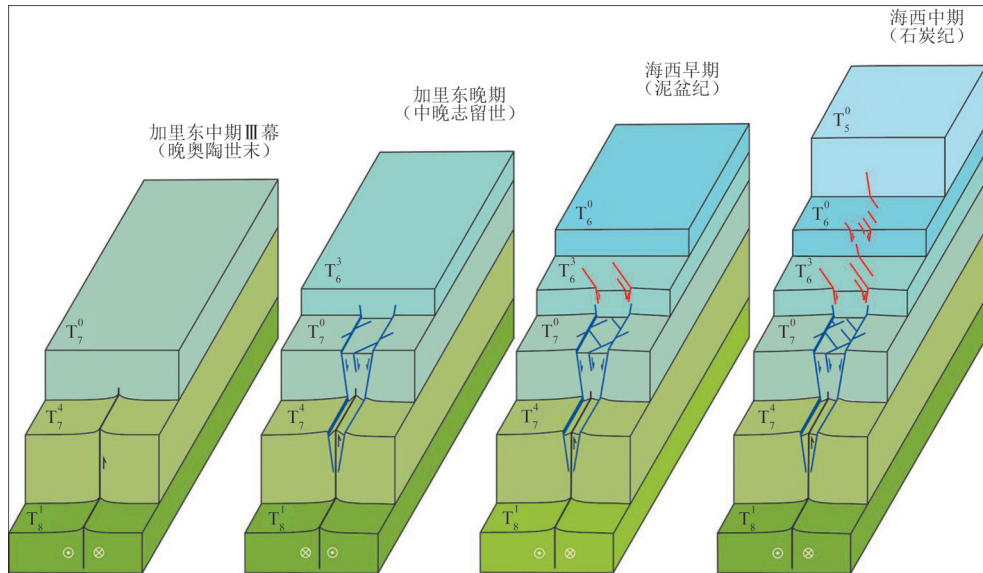


图5 塔里木盆地顺托果勒地区走滑断裂构造样式

Fig. 5 Structural patterns of strike-slip faults in the Shuntogole area, Tarim Basin

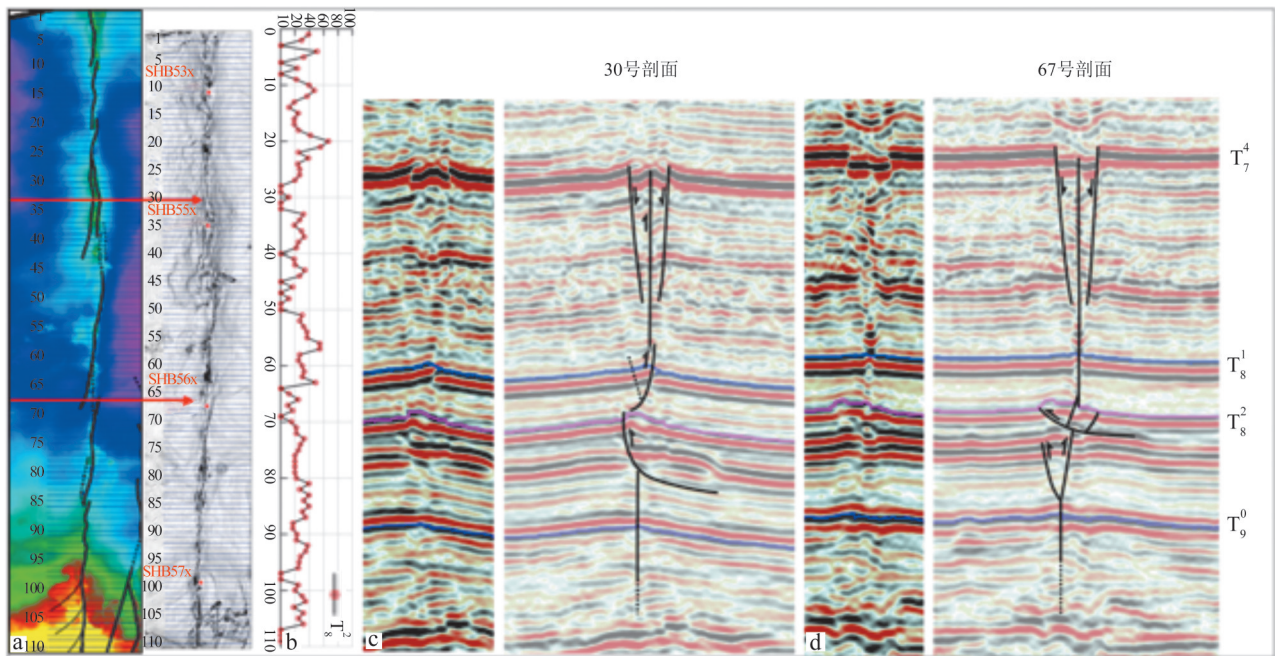


图6 塔里木盆地顺北5号断裂带中段构造样式解析结果

Fig. 6 Interpretation of structural style in the middle section of No. 5 fault zone in the Shunbei area, Tarim Basin

a. 构造分布与 T_8^0 界面平面相干图; b. T_8^0 界面垂向断距; c. 典型地震剖面(30号); d. 典型地震剖面(67号)

根据滑脱构造样式,尤其是上下盘错位的幅度,可以将其划分为A,B和C 3种类型(图7)。A型构造,尽管在强振幅同相轴中发育了逆冲断层,但仅仅是依靠同相轴的错动解释出铲式断面,上、下盘并未发生明显的位移,直立高陡的主断面甚至是基本连续的,这种情况下逆冲断层的发育并不影响垂向的输导功能。B型构造与A相似,区别是上、下盘的位移明显增大,逆冲断层上、下的直立断面也出现了明显的错动,如果逆冲

断层不具有水力输导能力,那么这种构造的垂向输导能力势必受到阻碍。C型构造是滑脱幅度最大的一种,滑脱断层的上、下盘已经大幅度错开,直立高陡的走滑断裂无法在垂向上连续贯通,这种构造的垂向输导能力很可能是最差的一种。

4.2 断裂带内部结构渗透能力差异

顺北油气田钻井多是以侧钻或水平井的方式贯穿

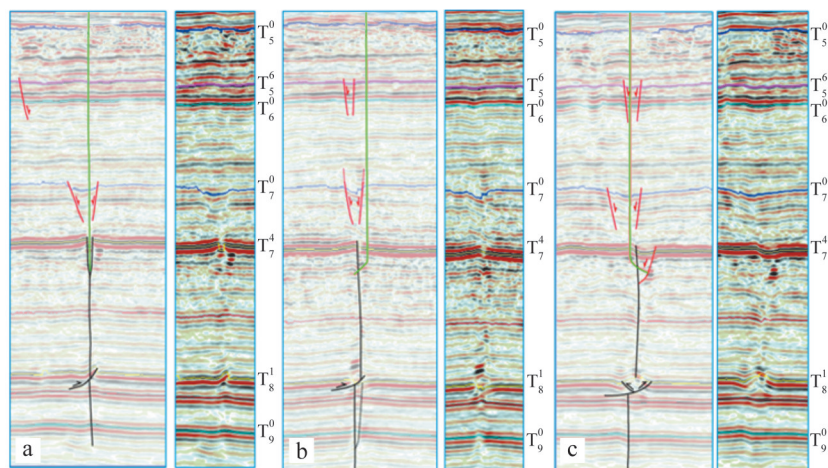


图7 塔里木盆地顺北5号断裂带中段滑脱构造样式分类结果

Fig. 7 Classification of decollement structure styles in the middle section of No. 5 fault zone in the Shunbei area, Tarim Basin

a. 铲式逆冲断层; b. 逆冲断层; c. 滑脱构造

断面,在钻遇主干断面或密集发育的节理带时,多发生放空或泥浆漏失现象。此时,若出现较高的气测异常,便表明钻遇了断裂带上具有较强油气输导能力的部位。反之,当钻遇断面而不发生放空或漏失,或虽发生小规模漏失但气测无异常时,指示钻遇的断面几乎没有渗流能力。基于多口钻井的测井资料分析,该现象本质上是由断裂带走向上内部结构差异性造成的。

沿断层走向部署在顺北5号断裂带不同位置的钻井通常会钻遇3种结构:破碎角砾发育的核带结构,裂缝密集分布的节理带和离散裂缝带,其水力输导能力依次减弱(图8)。

SHBB7井是部署在顺北5号断裂带中段的一口大斜度井,钻探目标为探索中、下奥陶统中发育的走滑断裂主断面。综合分析相干体与地震剖面资料可以发现,多个层位的同相轴在垂向上发生幅度几乎一致的错断或变形,由于错断部位振幅明显低于临近地层而显示出“线状弱反射”的特征。SHBB7井在7 928 m深处自西向东贯穿了断面,在该处漏失密度为 1.40 g/cm^3 的泥浆 25 m^3 。在7 928 m漏失点附近,电阻率曲线呈明显的“箱状+峰状+梳状”异常低值。与围岩相比电

阻率值下降幅度超过100倍,且曲线齿化率不高,对称性差,在7 850~7 880 m范围内明显不同步。此外,声波时差曲线在该部位也出现从低向高的明显波动。综合以上现象,说明该井在漏失点附近钻遇了破碎角砾异常发育的“核带结构”^[25-26]。该井随后酸压完井,试井表现出较典型的“定井储+表皮+径向复合+无限大储层”渗流特征,亦说明井筒附近起到导流作用的主要是破碎角砾和裂缝^[27-30]。该井产能较高且油压稳定,目前日产超过65 t,表明破碎角砾发育的核带结构具有较强的水力输导能力。

同理分析发现:SHBB6井与SHBB8井所钻遇的断裂带分别裂缝密集分布的节理带和离散裂缝带(图9),因而,SHBB6井、SHBB7井与SHBB8井在产能上具有显著差异(表1)。

4.3 现今地应力场对断层输导能力的影响

据此前的研究,在顺北地区中、下奥陶统中,顺北1号和顺北5号等断裂带均处于走滑应力状态,断面的产状与局部地应力场的耦合关系决定了断裂带的水力输导能力,可采用断面的滑移趋势系数对此进行预测。

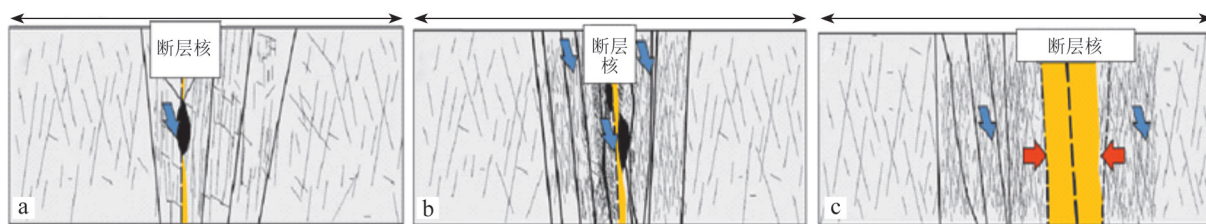


图8 塔里木盆地顺北5号断裂带钻井钻遇的3种结构示意图

Fig. 8 Three structures typically encountered during drilling in No. 5 fault zone in the Shunbei area, Tarim Basin

a. 节理带,分布范围达数十米; b. 核带结构,分布范围达数百米; c. 离散裂缝带,分布范围大于100 m

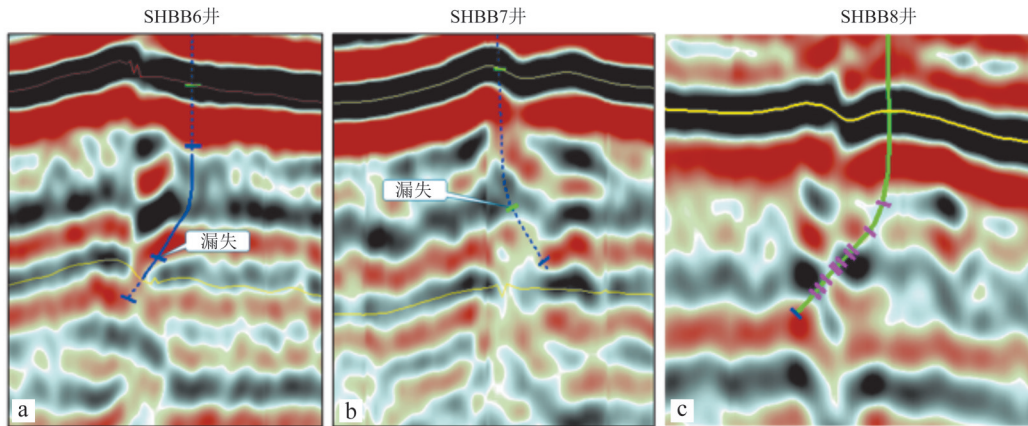


图9 塔里木盆地顺托果勒地区 SHBB6, SHBB7 和 SHBB8 井地震剖面

Fig. 9 Seismic profiles across wells SHBB6, SHBB7 and SHBB8 in the Shunbei area, Tarim Basin

表1 塔里木盆地顺托果勒地区 SHBB6, SHBB7 与 SHBB8 井产能统计

Table 1 Productivity statistics of wells SHBB6, SHBB7 and SHBB8 in the Shunbei area, Tarim Basin

井名	产液/(t·d ⁻¹)	产油/(t·d ⁻¹)	含水率/%
SHBB6	产水	—	—
SHBB7	70.8	66.2	0.6
SHBB8	27.7	27.6	2.6

滑移趋势是指作用于某一断裂面上的切应力(τ)与法向应力(σ_n)之比,滑移趋势系数越大,断裂面滑移(剪切破坏)的可能性越大。研究表明当该系数达到0.6时,即可发生初始滑移^[31-32]。其预测方法为,首先对已存在的断裂进行精细地质建模,然后分析目标层段在现今应力场作用下的滑移趋势。断裂的滑移可能性,取决于导致断裂再次活动的现今应力场最大水平主压应力方位和大小,当其方位与断裂走向夹角较小时,断裂更容易打开。

以 SHBB4 井为例,该井位于顺北5号断裂带中段的平移段。研究区内发育3条明显的主干断面(F1, F2 和 F3),在三维空间中呈现出左列排布的特征,以其中下部为根,发育出自下而上撒开的分枝子断裂,母子断裂的交线与主断裂走向一致(图10)。通过滑移趋势系数数值模拟仿真发现,在现今应力场作用下断裂的滑移趋势与其走向关系密切。产状变化较大的断裂,沿走向出现滑移系数高低明显波动的变化。有些分枝断裂,并未因为走向与最大水平应力方向一致而出现高滑移趋势的现象,其原因是应力场在断裂带内部发生扰动。整体而言,SHBB4井区多数断面位置的滑移趋势都大于0.35,其中滑动趋势最高,即对应油气输导能力最强的是分支断面F6(滑移趋势约为0.50)。

5 讨论

5.1 直立高陡走滑断裂纵向油气充注能力评价方法

根据上述研究结果,本文首次提出“充注体”概念,并以此作为油气充注能力单元划分的依据。沿走滑断裂走向可以将一条断裂带进行分段,相邻两段之间油气的横向调整可忽略。由于不同段之间在构造样式、内部结构、产状和缝洞发育强度等方面存在差异,势必具有不同的油气垂向输导能力。某些部位纵向上贯通性强,油气充注强烈,是吸管状的油气“高速通道”。而某些部位由于纵向上贯通性差,或者膏盐层遮挡,油气充注强度相对较差。作为油气垂向输导通道的一个相对独立的三维地质体,本文定义其为一个“充注体”。例如顺北5号断裂带就是由多个“充注体”沿着走向排布组合而成,划分“充注体”旨在找到油气垂向输导的“高速通道”,进行地质甜点的预测,以提高钻井成功率并达到高产稳产的目标。

综合前期研究成果,针对顺北1号断裂带和顺北5号断裂带建立了充注体划分的评价技术思路(图11),借助地球物理手段直观展示走滑断裂不同区域宏观油气输导能力。

顺北5号断裂带中段可在顺8三维地震工区中识别出来,根据断裂的构造样式、重点构造层位的等高线变化以及局部应变强度,本文沿断裂带走向(20 km 范围内)划分出7个充注体,自南向北依次编号为C1—C7(图12)。充注体C1的主断面在三维空间中相对孤立,向北延伸距离较短,说明沿着断裂走向的油气横向调整缺乏物理通道。C1充注体纵向上切穿了3个重点层位,自上而下依次是 T_7^1 , T_7^6 和 T_8^0 。根据地形的局部应

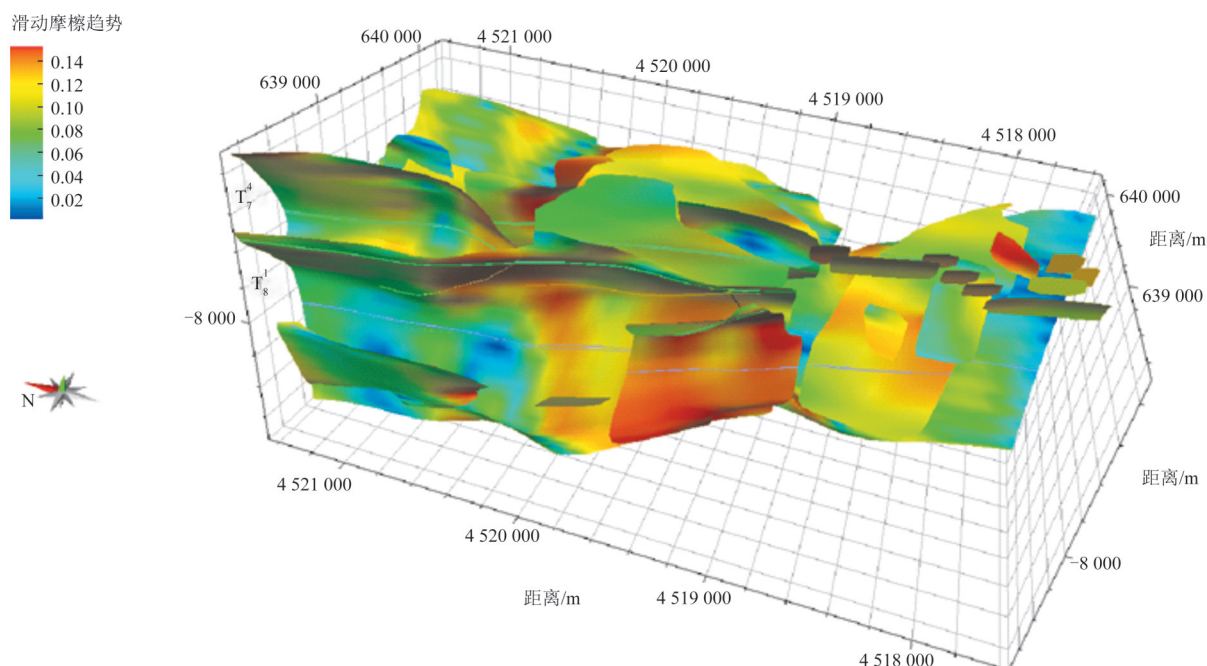


图10 塔里木盆地顺托果勒地区SHBB4井区储层断裂滑移趋势数模结果云图

Fig. 10 Cloud chart showing numerical simulation of fault slip tendency within reservoirs of SHBB4 well block in the Shuntogole area, Tarim Basin

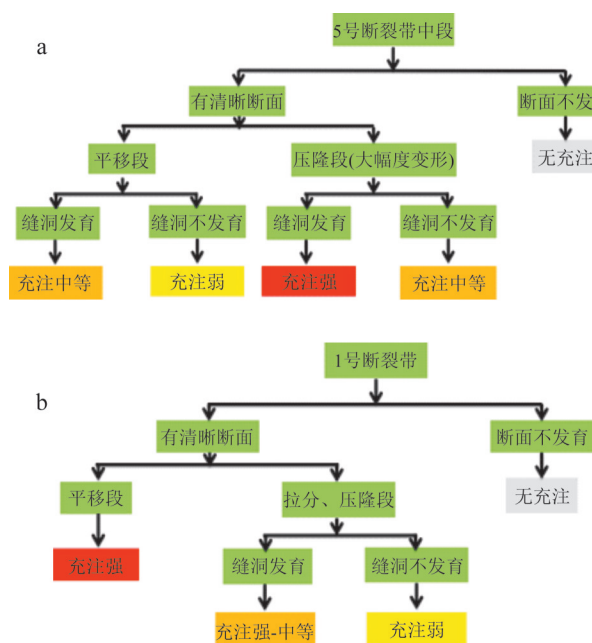


图11 充注体评价技术路线

Fig. 11 Flow chart for assessment of charging bodies
a. 顺北5号断裂带; b. 顺北1号断裂带

变强度可以看出,这三个层位自上而下依次为强隆起段、弱隆起段和平移段。与之形成鲜明对比的是靠近北端的充注体C6,断面规模与C1相似,自上而下切穿的3个层位均为压隆段,且 T_8^* 的压隆变形非常强烈,指示断层引起了该部位地层的强烈变形,理论上地层破碎更加严重。根据上文中提出的充注效率评价路线

(图11),在不考虑缝洞发育的前提下,充注体C6的油气充注效率应高于C1。

事实证明,这一评价与钻井实际生产情况完全吻合(表2)。目前隶属于充注体C6的钻井SHBB1始终保持高产,且含水率非常低,仅有0.52%,稳定生产时间超过两年。尽管油压和产量相比开井初期有一定下降,但这与加大了油嘴、改变了工作制度有直接关系。与之形成鲜明对比的是,隶属于充注体C1的钻井SHBB5,尽管开井初期高产,但压力和产能迅速下降,目前已处于关井憋压状态,说明油气的充注远不及C6充沛。验证了本文提出的划分方案的合理性与科学性。

以SHBA3井为例,该井位于顺北1号断裂带北端平移段。该井进入目的层后以小斜度贯穿了主干断面,钻入中、下奥陶统顶面深度约100 m处时,发生了放空和漏失,随后完井并获得高产。在浅层重点层位 T_7^* 、 T_8^* 和 T_9^* 构造图上(图13a—c),该井所处位置发育清晰的断面,地形等高线没有发生明显变形或错断,表明该位置为变形相对平缓的平移段。而在 T_8^* 和 T_9^* 两个深部层位上,观察到顺北1号断裂带的发育已经十分微弱,呈不连续状,但SHBA3井所处位置仍有明显相干显示,表明断裂在此处仍非常发育(图13e—g)。根据顺北1号断裂带充注体评价方法,综合多个层位的观察结果,认为SHBA3井处于一个孤立的、充注效率

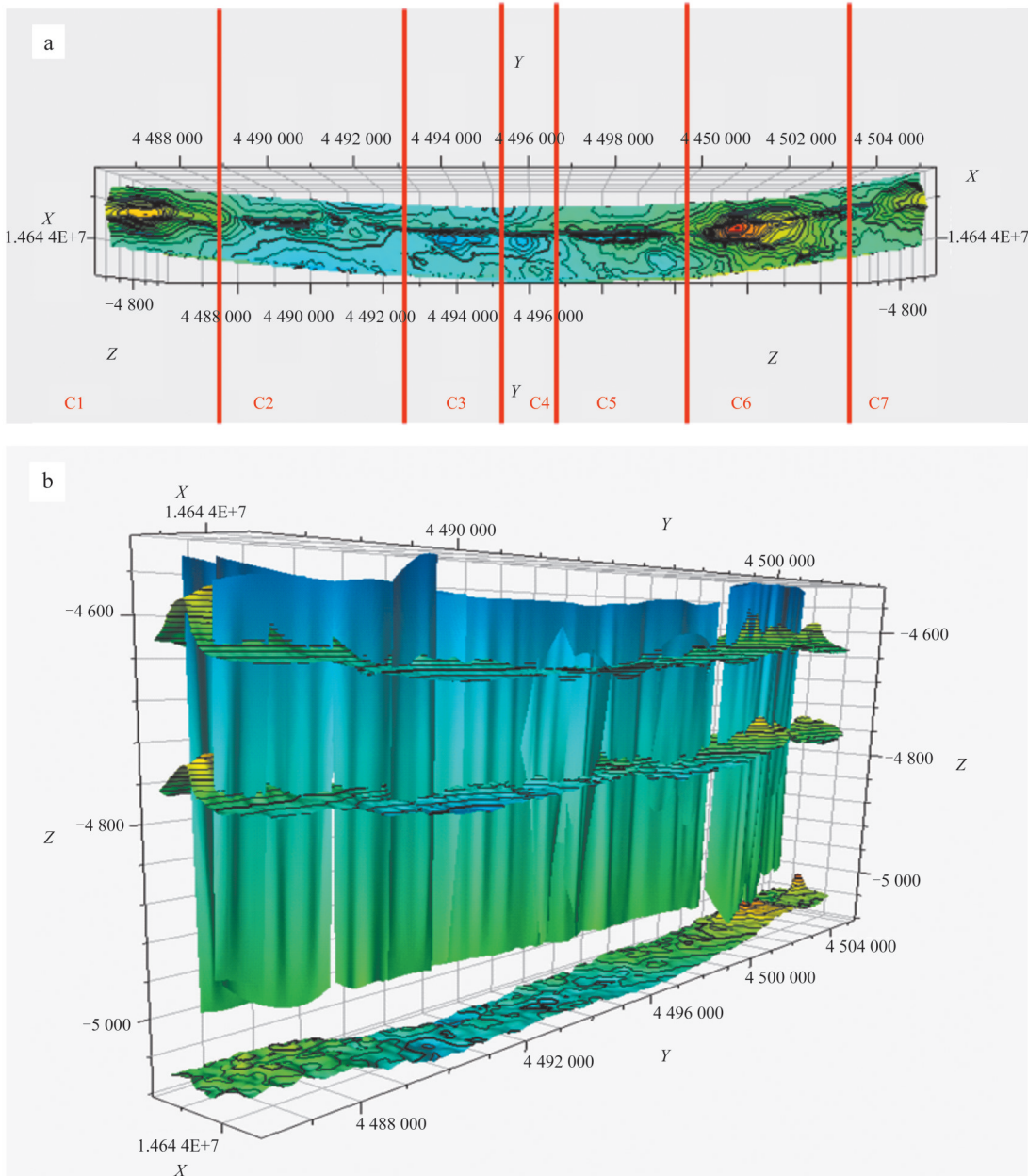


图 12 塔里木盆地顺北 5 号断裂带中段充注体模式

Fig. 12 Model of charging body in the middle section of No. 5 fault zone in Tarim Basin in the Shunbei area

a. 充注体划分方案; b. 充注体三维立体模型

表 2 塔里木盆地顺托果勒地区 SHBB1 井与 SHBB5 井产能统计

Table 2 Productivity statistics of wells SHBB1 and SHBB5 in the Shuntogole area, Tarim Basin

井名	充注体序号	初期产能						2020. 5. 1 产能				
		投产时间	油嘴口径/ mm	油压/ MPa	日产液量/ (t·d ⁻¹)	日产油量/ (t·d ⁻¹)	含水率/ %	油嘴口径/ mm	油压/ MPa	日产液量/ (t·d ⁻¹)	日产油量/ (t·d ⁻¹)	含水率/ %
SHBB5	C1	2019. 5. 13	8	9. 6	232. 6	232. 3	0. 11	2020. 3. 31 关井暂堵酸化, 2020. 4. 1 气举				
SHBB1	C6	2018. 4. 12	4	32. 0	113. 1	87. 0	23. 10	8	5. 21	57. 4	57. 1	0. 52

极高的充注体上。该井自 2016 年投产以来,一直高产稳产至今,目前日产油量超过 440 t,是顺北油气田的特高产井,强大的垂向充注能力是维持它持续高产的主要原因。

5.2 “充注体”地质模式合理性论证

“充注体”概念在本质上就是断裂带纵向上分层破碎的差异^[33-34],断裂形成过程中平面上分段逐渐愈合

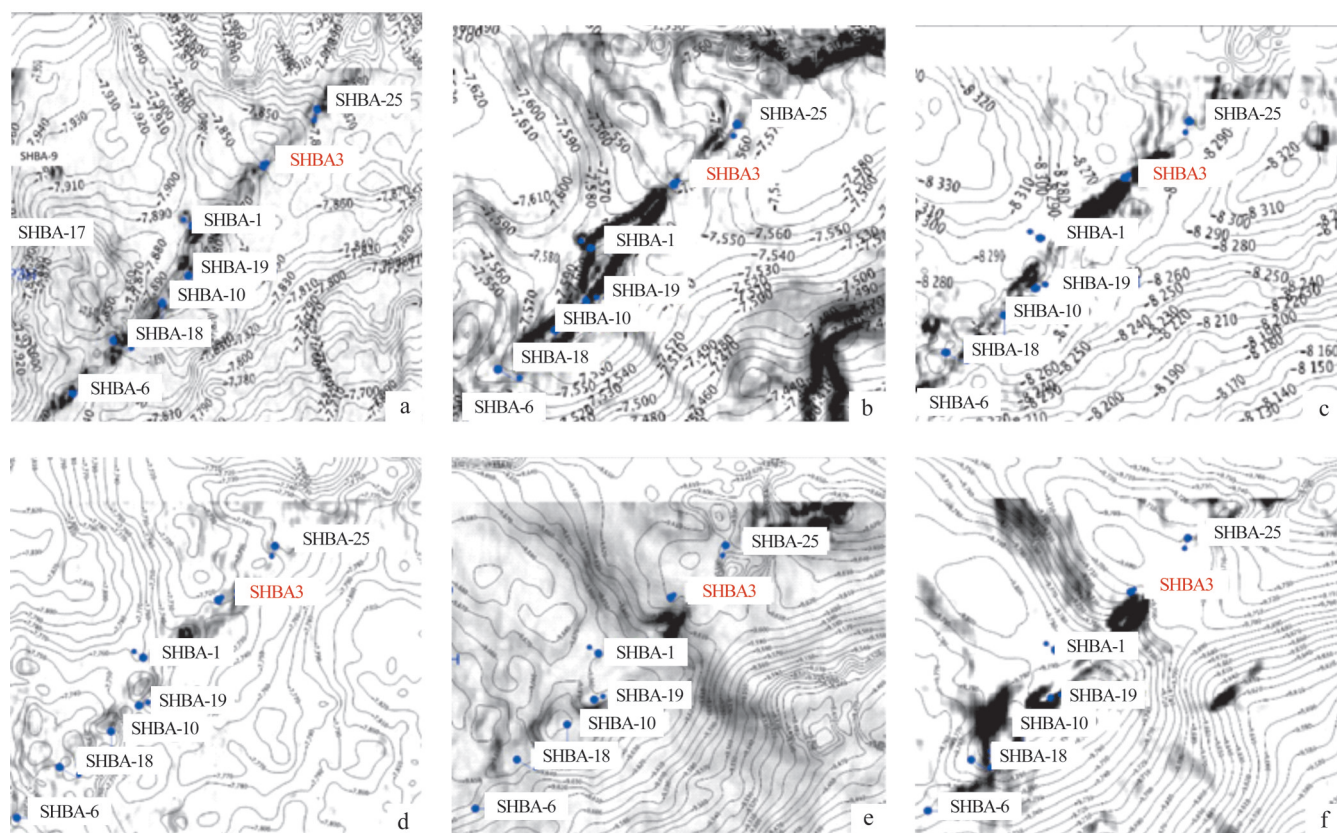


图13 塔里木盆地顺托果勒地区SHBA3井区奥陶系地震反射波深度构造

Fig. 13 Depth structure map of the seismic reflection wave in the Ordovician of SHBA3 well block in the Shuntogole area, Tarim Basin

a. T_7^4 反射界面等深线(m); b. T_6^6 反射界面等深线(m); c. T_8^8 反射界面等深线(m); d. T_9^9 反射界面等深线(m);

e. T_8^8 反射界面等深线(m); f. T_3^3 反射界面等深线(m)

的必然结果,是断裂带不同部位具有差异性水力输导能力的直接体现。在顺北地区,通过地震剖面相干体解释并结合实钻井的生产资料可以确定,断裂带垂向水力输导能力主控因素是断裂带内部结构,局部应变规模和现今地应力场作用。

断层内部结构和变形是影响沿断层流体输导能力的首要因素,在地表露头可观察到在输导能力较强部位,会出现明显流体汇集的现象^[35-36]。顺北奥陶系储层中实际断层内部结构十分复杂,非均质性较强。因此,在研究顺北奥陶系碳酸盐岩储层中走滑断层不同部位油气输导能力时必须考虑断层性质的复杂性。国内外学者通过地表露头观察,室内物理模型试验和数值模拟,已确定断层内部结构的复杂性和非均质性对流体流动能力和流动方向具有显著影响^[37-42],例如断层的连通、交叉、转向以及断面膨胀等^[43-45]。对断层内部结构和变形的研究主要集中在机械地质力学和断裂初始条件、断层内部及周边区域的几何结构、裂缝网络发育和和矿化作用^[46-48]。

2016年,瑞士学者Belgrano和Herweg为了研究沿断层走向的垂向导流能力差异性^[33],实地考察位于瑞

士阿尔卑斯山脉中部的格里姆塞尔山口。由于Gletsch和Transitgas隧道施工,在此处挖掘出一个具有活跃热液循环系统的韧性走滑断层体系-格里姆塞尔角砾岩断层(GBF)。在断层主干断面附近的破碎带中,具有不同程度的火成岩侵入和热液矿物沉淀,可直接为断层垂向岩浆流动研究提供证据。格里姆塞尔山口的浅成热液型矿化现象出现范围仅为GBF周边150 m范围内,流体流动范围被限制在断层核内部区域。两位学者通过实地研究发现,浅成热液型矿化现象部位存在流体垂向导流的“高速通道”,深部流体才有机会被输导到格里姆塞尔山口的地形高点处。通过对沿断层走向的矿化程度分析,流体垂向导流通道可划分为两个区域,Sidelhorn连接带和Grimsel Pass Gletsch区域(图14)。

在Sidelhorn连接带处,Sidelhorn北脊主要断层相互连接。由于剪切应力作用,断层发生膨胀,局部变形强烈,流体充注效果也更好^[43,45]。Odling, Burnside, Annunziatellis等人通过物理模型实验、数值模拟和露头观测都证明了在断层强烈变形处,流体存在垂向“管道”流动的现象^[38,42,49]。Grimsel Pass Gletsch区域主断

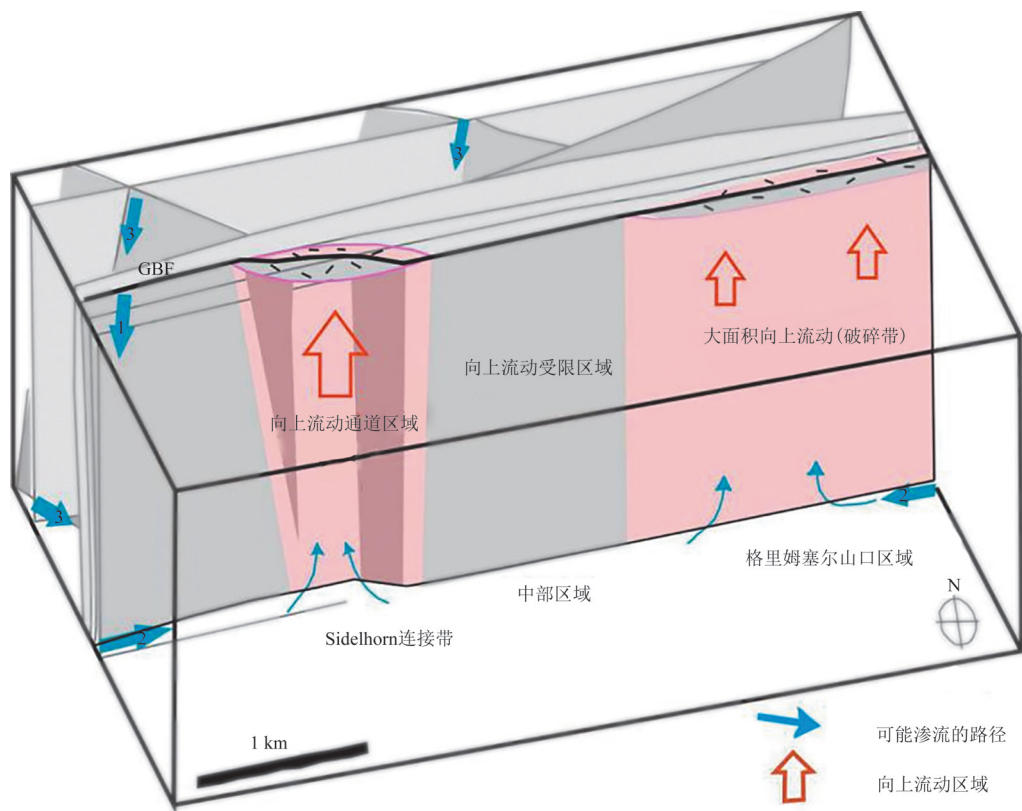


图14 格里姆塞尔山口构造和流体流动路径模型

Fig. 14 Conceptual model of the structures and fluid pathways at the Grimsel Pass

层无连接,无明显断层变形,次级结构频率较低,其矿化强度明显小于Sidelhorn连接带,矿化露头面积也较小。同时,Grimsel Pass Gletsch区域由于岩石脆性较大,存在大量的天然微裂缝,亦存在一定的流体充注。其成矿作用与破碎带中的离散次级断层和节理有关。与周围岩石相比,破碎带内存在的米级别的流动通道是流体流动的主要途径。在世界范围内,也有多处类似发现,即沿断层走向断层核和破碎带交替控制渗透性的现象^[50]。

通过瑞士阿尔卑斯山脉中部的格里姆塞尔山口地表露头和顺北奥陶系碳酸盐岩断溶体储集体的研究对比,发现无论在地表露头还是深部储层,垂向水力输导能力差异性的影响因素和变化规律相同,断层局部强变形形成的破碎角砾发育的核带结构水力输导能力最强,从而验证了断裂垂向水力输导能力可以采用充注体概念对其进行半定量的评价与描述。

6 结论

1) 基于地质认识和典型井资料,明确影响顺北走滑断裂带油气充注效率和纵向流体输导能力的主要因素包括断裂带内部结构、断裂带局部应变强度和现今

地应力场。

2) 顺北5号断裂带中段储层发育类型包括,破碎角砾发育的核带结构、裂缝密集分布的节理带和离散裂缝带。破碎角砾发育的核带结构水力输导能力最强,其强挤压隆起部位,断裂带垂向输导能力尤其强。

3) 断裂在现今地应力场作用下的滑动趋势直接影响断裂的流体输导能力,对于顺北地区高陡走滑断裂带,当最大水平主压应力方位与断裂走向夹角较小时,断裂流体输导能力更强。

4) 本文提出“充注体”概念,依据构造样式、内部结构、产状、缝洞发育强度等差异对断裂带不同位置的垂向油气输导能力进行半定量评价。可沿走滑断裂的走向对断裂带进行分段评价,以期寻找油气垂向输导的“高速通道”。

参 考 文 献

- [1] 赵锐, 赵腾, 李慧莉, 等. 塔里木盆地顺北油气田断控缝洞型储层特征与主控因素[J]. 特种油气藏, 2019, 26(5): 8-13.
Zhao Rui, Zhao Teng, Li Huili, et al. Fault-controlled fracture-cavity reservoir characterization and main-controlling factors in the Shunbei hydrocarbon field of Tarim Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(5): 8-13.
- [2] 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): 38-48.
- 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): 38-48.
- [3] 胡文革. 塔河碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术及攻关方向[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(2): 1-10.
- Hu Wenge. Development technology and research direction of fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 1-10.
- [4] 林波, 云露, 李海英, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断层空间结构及其油气关系[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1344-1353.
- Lin Bo, Yun Lu, Li Haiying, et al. Spatial structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault and its relationship with oil and gas reservoirs in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1344-1353.
- [5] 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 small-scale intraplate strike-slip faults: A case of the Middle-North segment of Shunbei No. 5 Fault in Tarim Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 1006-1018.
- [6] 韩俊, 况安鹏, 能源, 等. 顺北5号走滑断裂带纵向分层结构及其油气地质意义[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 152-160.
- Han Jun, Kuang Anpeng, Neng Yuan, et al. Vertical layered structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault zone and its significance on hydrocarbon accumulation[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 152-160.
- [7] 罗明霞, 夏永涛, 邵小明, 等. 塔里木盆地顺北油气田不同层系原油地球化学特征对比及成因分析[J]. 石油实验地质, 2019, 41(6): 849-854.
- Luo Mingxia, Xia Yongtao, Shao Xiaoming, et al. Geochemical characteristics and origin of oil from different strata in Shunbei oil and gas field, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(6): 849-854.
- [8] 谷茸, 云露, 朱秀香, 等. 塔里木盆地顺北油田油气来源研究[J]. 石油实验地质, 2020, 42(2): 248-254+262.
- Gu Rong, Yun Lu, Zhu Xiuxiang, et al. Oil and gas sources in Shunbei Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(2): 248-254+262.
- [9] 曹自成, 路清华, 顾忆, 等. 塔里木盆地顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 975-984.
- Cao Zicheng, Lu Qinghua, Gu Yi, et al. Characteristics of Ordovician reservoirs in Shunbei 1 and 5 fault zones, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 975-984.
- [10] 云露. 顺北地区奥陶系超深断溶体油气成藏条件[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 136-142.
- Yun Lu. Hydrocarbon accumulation of ultra-deep Ordovician fault-karst reservoirs in Shunbei area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 136-142.
- [11] 韩强, 云露, 蒋华山, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系油气充注过程分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 645-658.
- Han Qiang, Yun Lu, Jiang Huashan, et al. Marine oil and gas filling and accumulation process in the North of Shuntuoguole area in Northern Tarim Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3): 645-658.
- [12] 吕海涛, 韩俊, 张继标, 等. 塔里木盆地顺北地区超深碳酸盐岩断溶体发育特征与形成机制[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 14-22.
- Lü Haitao, Han Jun, Zhang Jibiao, et al. Development characteristics and formation mechanism of ultra-deep carbonate fault-dissolution body in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1): 14-22.
- [13] 瞿长, 赵锐, 李慧莉, 等. 塔里木盆地顺北5断裂带储集体地震反射与产能特征分析[J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 68-74.
- Qu Chang, Zhao Rui, Li Huili, et al. Seismic reflection and productivity of reservoirs in the Fault-Zone 5 of Shunbei, Tarim Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(1): 68-74.
- [14] 文山师, 李海英, 洪才均, 等. 顺北油田断溶体储层地震响应特征及描述技术[J]. 断块油气田, 2020, 27(1): 45-49.
- Wen Shanshi, Li Haiying, Hong Caijun, et al. Technology of seismic response characteristics and description of fault-karst reservoir in Shunbei Oilfield[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(1): 45-49.
- [15] 赵锐, 赵腾, 李慧莉, 等. 塔里木盆地顺托果勒地区中下奥陶统鹰山组与一间房组沉积相与旋回地层[J]. 东北石油大学学报, 2019, 43(4): 1-16+139.
- Zhao Rui, Zhao Teng, Li Huili, et al. Sedimentary facies and cyclic stratigraphy of Yingshan and Yijianfang Formations of Lower-Middle Ordovician in Shuntuoguole area, Tarim Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(4): 1-16+139.
- [16] 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.
- [17] 邓尚, 李慧莉, 韩俊, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 990-998+1073.
- Deng Shang, Li Huili, Han Jun, et al. Characteristics of the central segment of Shunbei 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin and its geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 990-998+1073.
- [18] 程传捷, 于炳松, 武重阳, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系一间房组碳酸盐岩成岩相研究[J]. 石油实验地质, 2020, 42(1): 42-52.
- Cheng Chuanjie, Yu Bingsong, Wu Chongyang, et al. Diagenetic facies of carbonate rocks in Yijianfang Formation, Shunbei area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(1): 42-52.
- [19] 陈菁萍, 赵腾, 肖重阳, 等. 塔里木盆地顺北地区中下奥陶统走滑断裂差异成岩作用[J]. 东北石油大学学报, 2020, 44(5): 23-34+58+6.
- Chen Jingping, Zhao Teng, Xiao Chongyang, et al. Differential diagenesis of Ordovician strike slip faults in Shunbei area of Tarim Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2020, 44(5): 23-34+58+6.
- [20] 隋欢, 张哨楠. 塔里木盆地顺北一号断裂带奥陶系一间房组碳酸盐岩储层主控因素研究[C]//第十五届全国古地理学及沉积学学术会议摘要集. 成都: 中国矿物岩石地球化学学会, 2018.
- Sui Huan, Zhang Shaonan. Research on main control factors of carbonate reservoir of Ordovician Yijianfang Formation in Shunbei 1 fault zone, Tarim Basin[C]// Summary of the 15th National Conference on paleogeography and Sedimentology. Chengdu: Chinese Society for Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2018.
- [21] 李映涛, 漆立新, 张哨楠, 等. 塔里木盆地顺北地区中一下奥

- 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 Petroli Sinica, 2019, 40(12): 1470-1484.
- [22] Zoback M D. Reservoir geomechanics: Cambridge [M]. Cambridge University Press, 2007: 449-450.
- [23] Barton C A, Zoback M D, Moos D. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock[J]. Geology, 1995, 23(8): 683-686.
- [24] Morris A, Ferrill D A, Henderson D B. Slip-tendency analysis and fault reactivation[J]. Geology, 1996, 24(3): 275-278.
- [25] 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(1): 102-111.
- Qi Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 102-111.
- [26] 胡再元, 孙东, 胡圆圆, 等. 断裂系统对碳酸盐岩储层的控制作用——以塔里木盆地塔中Ⅲ区奥陶系为例[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(S1): 97-108.
- Hu Zaiyuan, Sun Dong, Hu Yuanyuan, et al. Control effect of fracture system on carbonate reservoir — Taking Ordovician system in Tazhong Ⅲ area of Tarim Basin as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(S1): 97-108.
- [27] 刘宝增. 塔里木盆地顺北地区油气差异聚集主控因素分析——以顺北1号、顺北5号走滑断裂带为例[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 83-95.
- Liu Baozeng. Analysis of main controlling factors of oil and gas differential accumulation in Shunbei area, Tarim Basin-taking Shunbei No. 1 and No. 5 strike slip fault zones as examples[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 83-95.
- [28] 曹厚臻, 何丽娟, 张林友. 塔里木克拉通形成以来的背景热史研究[J]. 地球物理学报, 2019, 62(1): 236-247.
- Cao Houzhen, He Lijuan, Zhang Linyou. Inversion of background thermal history since the formation of the Tarim Craton[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(1): 236-247.
- [29] 黄诚. 叠合盆地内部小尺度走滑断裂幕式活动特征及次期判别——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.
- [30] 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 Shuntuogule area of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 831-839.
- [31] Byerlee J. Friction of rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116(4-5): 615-626.
- [32] Ferrill D A, Morris A P, Hennings P H, et al. Faulting and fracturing in shale and self-sourced reservoirs: Introduction[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(11): 2161-2164.
- [33] Belgrano T M, Herwegh M, Berger A. Inherited structural controls on fault geometry, architecture and hydrothermal activity: An example from Grimsel Pass, Switzerland[J]. Swiss Journal of Geosciences, 2016, 109(3): 345-364.
- [34] Baietto A, Perello P, Cadoppi P, et al. Alpine tectonic evolution and thermal water circulations of the Argentera Massif (South-Western Alps)[J]. Swiss Journal of Geosciences, 2009, 102(2): 223-245.
- [35] Caine J S, Evans J P, Forster C B. Fault zone architecture and permeability structure[J]. Geology, 1996, 24(11): 1025-1028.
- [36] 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.
- [37] Faulkner D R, Jackson C A L, Lunn R J, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(11): 1557-1575.
- [38] Burnside N M, Shipton Z K, Dockrill B, et al. Man-made versus natural CO₂ leakage: A 400 k. y. history of an analogue for engineered geological storage of CO₂[J]. Geology, 2013, 41(4): 471-474.
- [39] Ben, Dockrill, Shipton Z K. Structural controls on leakage from a natural CO₂ geologic storage site: Central Utah, U. S. A. [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(11): 1768-1782.
- [40] Walker R J, Holdsworth R E, Armitage P J, et al. Fault zone permeability structure evolution in basalts[J]. Geology, 2012, 41(1): 59-62.
- [41] Eichhubl P, Davatz N C, Becker S P. Structural and diagenetic control of fluid migration and cementation along the Moab fault, Utah[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(5): 653-681.
- [42] Annunziatellis A, Beaubien S E, Bigi S, et al. Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Lateral caldera (central Italy): Implications for CO₂ geological storage[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008, 2(3): 353-372.
- [43] Sibson R H. Brecciation processes in fault zones: Inferences from earthquake rupturing[J]. Pure & Applied Geophysics, 1986, 124(1): 159-175.
- [44] Perello P, Marini L, Martinotti G, et al. The thermal circuits of the Argentera Massif (western Alps, Italy): An example of low-enthalpy geothermal resources controlled by Neogene alpine tectonics[J]. Eclogae Geologicae Helveticae, 2001, 94(1): 75-94.
- [45] Micklethwaite S, Ford A, Witt W, et al. The where and how of faults, fluids and permeability—insights from fault stepovers, scaling properties and gold mineralisation[J]. Geofluids, 2015, 15(1-2): 240-251.
- [46] Crider J G. The initiation of brittle faults in crystalline rock[J]. Journal of Structural Geology, 2015, 77: 159-174.
- [47] Tripp G I, Vearncombe J R. Fault/fracture density and mineralization: A contouring method for targeting in gold exploration[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(6-7): 1087-1108.
- [48] Soden A M, Shipton Z K, Lunn R J, et al. Brittle structures focused on subtle crustal heterogeneities: Implications for flow in fractured rocks[J]. Journal of the Geological Society, 2014, 171(4): 509-524.
- [49] Odling N E, Harris S D, Knipe R J. Permeability scaling properties of fault damage zones in siliclastic rocks[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(9): 1727-1747.
- [50] Laubach S E, Eichhubl P, Hargrove P, et al. Fault core and damage zone fracture attributes vary along strike owing to interaction of fracture growth, quartz accumulation, and differing sandstone composition[J]. Journal of Structural Geology, 2014, 68: 207-226.