

塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶斜坡断控岩溶 储层特征及形成机制

韩长城¹, 林承焰¹, 鲁新便², 任丽华¹, 魏婷³, 张宪国¹, 段宏臻⁴

[1. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石化 西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 中国石油 新疆油田分公司 石西采油厂, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 中国石油集团测井有限公司 青海事业部, 甘肃 敦煌 736202]

摘要:随着塔河油田主体区潜山风化壳岩溶勘探开发的不断深入, 斜坡区的内幕岩溶储集层越来越受到人们的关注, 断裂对岩溶储集层的形成和分布具有重要控制作用。综合利用岩心、薄片、测井、钻井和地震资料, 在储集层类型基础上, 分析了断裂对岩溶储集层发育的控制作用及断控岩溶储集层分布规律, 探讨了断控岩溶储集层的形成机制和演化特征。断裂和岩溶储集层发育规模、期次存在着一定的耦合关系, 多期次继承发育的Ⅱ级和Ⅲ-1级断裂对岩溶储集层控制作用明显。平面上岩溶储集层沿断裂呈条带状分布, 垂向上储集层分布在距奥陶系一间房组顶部0~50和100 m~150 m范围内。深部岩溶储集层形成作用主要有大气淡水溶蚀作用、TSR(硫酸盐热化学还原反应)、热液溶蚀作用和混合溶蚀作用4种类型, 海西早期是断控岩溶储集层发育的主要时期。

关键词:断控岩溶储集层; 斜坡区; 断裂带; 奥陶系; 塔河油田

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Characterization and genesis of fault-controlled karst reservoirs in Ordovician carbonate karst slope of Tahe oilfield, Tarim Basin

Han Changcheng¹, Lin Chengyan¹, Lu Xinbian², Ren Lihua¹, Wei Ting³, Zhang Xianguo¹, Duan Hongzhen⁴

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

3. Shixi Oil Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China;

4. CNPC Logging Qinghai Business Division, Dunhuang, Gansu 736202, China)

Abstract: The internal karst reservoirs in the slope area of Tahe oilfield, Tarim Basin have attracted more and more attention as further exploration and development were carried out in the weathering crust karst reservoirs in the buried hills of the main blocks in the field. It is generally agreed that faults control the formation and distribution of karst reservoirs. Based on reservoir classification, the paper analyzed control effect of faults upon karst reservoirs and their distribution and discussed forming mechanism and evolving characteristics of the reservoirs through study of core, thin sections, logging and drilling as well as seismic data. A coupling relationship between extent and phases of development of faults and karst reservoirs was revealed during the analyses. Multi-phased and inherited faults of grade Ⅱ and Ⅲ-1 seemed to have a more prominent controlling effect upon the karst reservoirs. Horizontally, the reservoirs distributed as belts along faults; and vertically, they were observed to occur within intervals 0-50 m or 100-150 m below the top of the Ordovician Yijianfang Formation. The paper also suggested that these reservoirs were formed mainly by meteoric water dissolution, TSR (Thermochemical Sulfate Reduction), hydrothermal dissolution, and hybrid dissolution. The Early Hercynian was believed to be the main stage for the development of the fault-controlled karst reservoirs in the field.

Key words: fault-controlled karst reservoir, slope zone, fault zone, Ordovician, Tahe oilfield

碳酸盐岩储层是世界油气勘探的一个重要领域^[1]。塔里木盆地古生界蕴藏着丰富的油气资源, 其

中奥陶系是重要的含油层位^[2]。塔河油田是塔里木盆地已发现油气田中储量最大、产量最高的海相大型油

收稿日期: 2015-11-09; 修订日期: 2016-05-07。

第一作者简介: 韩长城(1984—), 男, 博士研究生, 碳酸盐岩油藏精细描述。E-mail: 517892849@qq.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05009-003); 国家自然科学基金项目(NO. 41602135); 中国石油大学(华东)研究生创新工程项目(YCXJ2016003)。

田^[3]。随着塔河油田主体区勘探程度的不断推进,前人对风化壳岩溶储集层开展了大量研究工作,并取得众多认识^[4-7]。近几年,塔河油田西南斜坡区的内幕岩溶储层勘探取得重大发现,逐步意识到岩溶缝洞的发育不仅仅局限于潜山风化壳区,内幕区在特定的地质背景下同样可以发育大规模的岩溶缝洞^[8]。塔河油田主体区奥陶系中、上统均已剥蚀殆尽,主要发生加里东期、海西期的表生岩溶作用^[9-10];而斜坡区主力产层之上覆盖了上奥陶统溶蚀性较差的泥岩与灰泥岩,一间房组(O_{2yj})只经历了非常短暂的暴露,未形成较大规模不整合,表生岩溶作用较弱,因而断控岩溶作用是斜坡区内内幕岩溶储集层发育的主要控制因素。

断裂与油气的关系一直是国内外学者关注的热点。尤其是碳酸盐岩中的断裂,不仅影响油气运移和成藏,而且对岩溶缝洞储层的形成和分布具有重要的控制作用^[11-12]。断裂作用贯穿了岩溶作用的整个过程^[13],断裂具有内部结构^[14-16],内部结构差异影响岩溶储层的形成和发育。认识岩溶储层的形成机制,对寻找斜坡区内内幕岩溶储层发育带和高效的勘探开发具有重要指导作用。结合岩心、薄片分析、测井和钻井资料,对塔河油田斜坡区储层类型和特征进行研究,总结了斜坡区断控岩溶储层特征及分布规律,探讨碳酸盐岩断控岩溶储层的形成机制,建立了断控岩溶储层构造演化模式。

1 地质概况

塔河油田位于阿克库勒凸起的西南部。阿克库勒凸起是在前震旦系变质岩基底上长期发育的一个向南倾伏的鼻状隆起。它经历了加里东期和海西期多次构造抬升运动和海平面变化,并受到后期构造运动的叠加改造作用。经历了震旦系-泥盆系的海

相沉积期、石炭系-三叠系的海陆交替相沉积期、三叠系及之后的陆相沉积期^[17]。奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层是主力储层,自下而上划分为下统蓬莱坝组(O_{1p})、中-下统鹰山组(O_{1-2y})、中统一间房组(O_{2yj})及上统恰尔巴克组(O_{3q})、良里塔格组(O_{3l})和桑塔木组(O_{3s})。

由于受到构造运动的不均衡抬升作用的影响,塔河地区形成了一个北东方向高,向南西方向倾伏的大型古生代鼻状隆起。东北部古生界受到强烈剥蚀,剥蚀厚度大。古生界各地层厚度大多向东北隆起区减薄,上奥陶统桑塔木组(O_{3s})、良里塔格组(O_{3l})和中奥陶统一间房组(O_{2yj})不整合尖灭线呈南西-北东向展布,西南斜坡区覆盖了较厚上奥陶统。断裂大量发育,在隆起部位的主体区,发育大量产状不规则、延伸较短的小断裂,而在斜坡覆盖区则发育大量北东与北西向中大型断裂,多成组成对发育,平面延伸长,断裂规模大,东西向断裂较少(图1)。

2 岩溶储集层类型及特征

塔河油田斜坡区奥陶系含油层系的储集岩主要为泥微晶灰岩、砂屑质泥微晶灰岩和亮晶颗粒灰岩。全直径样品的孔隙度为0.5%~2.5%,平均值为1.76%;渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu m^2$,属于低孔低渗储层。储层的非均质性极强,样品所测得的物性特征一般反映的是储层基质的特征。结合钻井、测井、岩心和薄片资料观察和研究,该区储层的储集空间主要为孔、洞和缝3类,并根据其组合类型将储层分为裂缝型、溶蚀孔洞型、裂缝-孔洞型和洞穴型4类。

2.1 裂缝型

裂缝是碳酸盐岩的重要储集空间,也是主要的渗流通道之一^[18]。根据裂缝成因,可以将裂缝分为构造

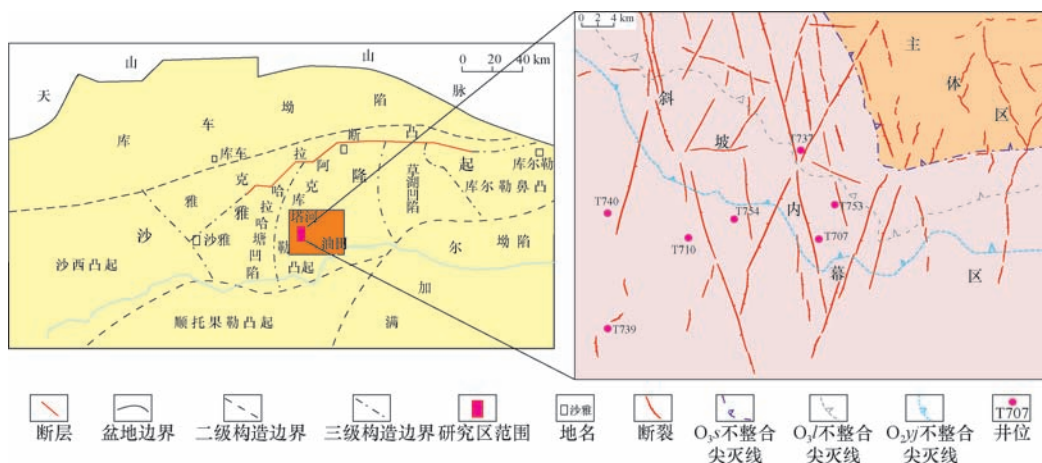


图1 塔河油田构造位置(a)及奥陶系顶面(T_7^4)断裂分布(b)

Fig. 1 Location map (a) and Distribution of faults on the top of the Ordovician (T_7^4) (b) in Tahe oilfield

缝、溶蚀缝和成岩缝 3 种主要类型^[19]。研究区裂缝较发育,但以构造缝为主。经历多期构造运动,受到多个方位应力场作用,应力交汇处可见多组不同角度交叉形成的网络状裂缝系统。早期裂缝多被方解石充填,晚期半充填或未充填(图 2a,b)。成像测井特征表现为深色的正弦曲线的高导特征(图 2c)。

2.2 溶蚀孔洞型

主要由直径为 0.15 ~ 1 cm,部分被泥质、方解石等半充填或未充填的孔洞组成,多密集、孤立发育(图

2d,e)。常规测井表现出密度略低,声波时差、中子增大和伽马降低特征,成像测井为分散的星点状或串珠状,颜色为暗色高导特征(图 2f)。一般是由碳酸盐岩原生孔隙经过次生溶蚀改造而形成的。

2.3 裂缝-孔洞型

孔洞和裂缝都发育,是该区常见的一种储层类型。孔洞是主要的储集空间(图 2g),裂缝不仅是储集空间同时还是流体的渗流通道。孔洞主要由沿裂缝溶蚀扩大的孔和小-中洞组成(图 2h)。深、浅双侧向电阻差

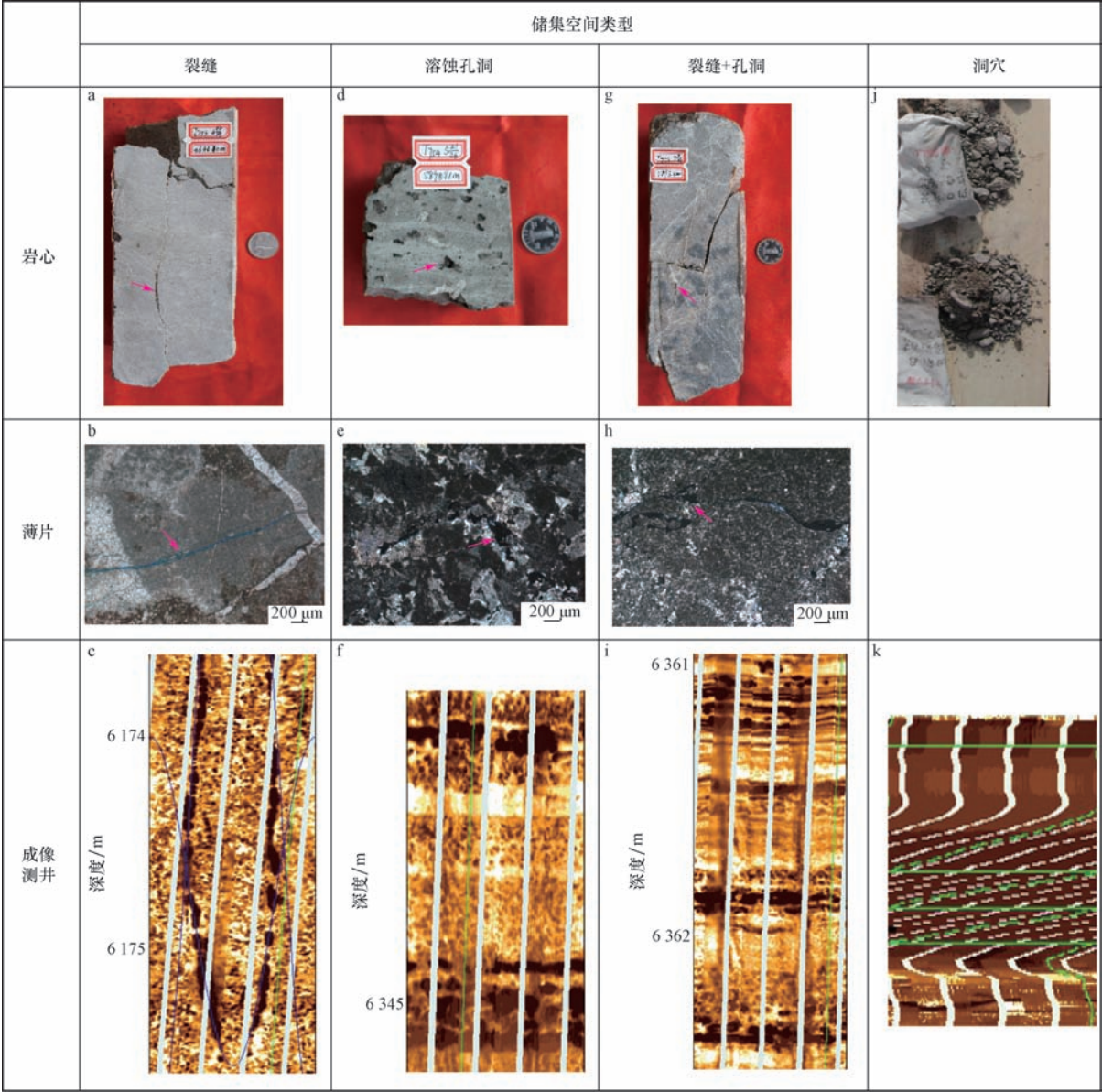


图 2 塔河油田斜坡区奥陶统储层空间类型

Fig. 2 Reservoir space types in the slope zone of Tahe oilfield

a. T737 井, O₂yj, 埋深 5 646.70 m, 网状缝发育, 充填-半充填; b. T710 井, O₂yj, 埋深 6 030.12 m, 生屑泥晶灰岩, 多期裂缝交错发育; c. T740 井, O₂yj, 埋深 6 173.48 ~ 6 175.61 m; d. T754 井, O₂yj, 埋深 5 898.91 m, 溶蚀孔洞发育, 未充填-半充填; e. T737, O₂yj, 埋深 6 064.12 m, 生物屑藻屑泥微晶灰岩溶蚀孔; f. T740 井, O₁₋₂yj, 埋深 6 341.20 ~ 6 345.80 m; g. T754 井, O₂yj, 埋深 5 896.48 m, 溶蚀孔洞-裂缝发育, 半充填-未充填; h. T737 井, O₂yj, 埋深 6 062.22 m, 含生屑泥微晶灰岩, 裂缝和溶蚀孔; i. T740 井, O₁₋₂yj, 埋深 6 360.91 ~ 6 362.68 m; j. T739 井, O₂yj, 埋深 6 082.80 m, 破碎角砾岩; k. T707 井, O₂yj, 埋深 5 750.00 ~ 5 760.00 m

异明显,密度、中子及声波时差3个孔隙度曲线相比基质段降低,但幅度不如洞穴型储层明显。成像测井表现为暗色斑点呈准层状分布,被暗色正弦曲线切割(图2i)。

2.4 洞穴型

多为直径大于 $100 \times 10^3 \mu\text{m}$ 的半充填或未充填溶蚀洞穴,可与裂缝组合,对储集空间的贡献最大。岩心多呈破碎状(图2j),但在钻井、测井和地震上具有明显特征:钻井过程中常见放空和严重泥浆漏失;电阻率值明显降低,深浅电阻率的正负幅值差较大;成像测井的波形基本被衰减掉,无法得到真实的结果(图2k),这种衰减也同时证明了大规模溶洞的存在;地震剖面上呈现“串珠状”反射特征。

3 断控岩溶储集层分布规律

塔河油田西南斜坡区处于构造低部位,一间房组(O_{2y})发生的加里东中期一幕岩溶为准同生岩溶作用,作用时间短,强度弱。岩溶作用主要发育在不整合面附近,对内幕区储层的贡献很少。上奥陶统覆盖在中-下奥陶统一间房组(O_{2y})和鹰山组(O_{1-2y})碳酸盐岩之上,岩性主要为泥岩、灰质泥岩和泥质灰岩等,泥质含量较高,溶蚀性差,厚度从几十米到数百米不等,最厚可达到500 m,阻挡了地表大气淡水的向下渗透。自加里东期运动到晚海西期运动,构造应力场方向发生了多次变换,斜坡区奥陶系发生了不同程度的变形,发育大量NNE-NNW向“X”型走滑断裂及其伴生断裂。

振幅变化率是一种只与振幅横向变化有关,而与振幅绝对值无关的地震属性^[20],在较纯的碳酸盐岩地层中,当有裂缝与溶洞发育时,其地震振幅值会发生变化。因此,振幅变化率大的地方是裂缝与溶洞等储集层的发育处,在属性图中表现为高亮颜色区。振幅变化率属性、断裂叠合图及钻井放空漏失叠合图中(图3),储层发育区多沿断裂走向展布,钻井过程中多数井发生放空漏失。统计的312口钻井中有126口井发生了放空漏失,放空漏失井占比达到40.4%。这些井多分布在断裂两侧,其中漏失量最大的T708井,达到1 166 m^3 ,因此该处岩溶储集层的发育明显受到断裂的控制。

断裂规模和期次对岩溶储集层的发育起着重要作用。较大规模断裂特别是多期次继承发育的断裂附近岩溶储集层发育。较小级别断裂其断裂带发育不完整,垂向延伸长度较短,对流体的运移较为不利;而断裂规模越大,破碎带越发育,有利于流体运移,岩溶储集层也越发育。断裂的不同部位位移量不同,其断裂带内部结构特征也发生变化,储集层发育情况也不同。断层的末端应力释放区发育一系列微裂隙,岩石破碎

较弱,仅发育一些裂缝型储层,而在断裂中部断距最大处易发育大型溶洞,如Th10231井位于一条NW向断裂的中部,钻至5 750.76 m发生放空漏失,放空段长75.24 m,泥浆漏失量1 787 m^3 ,发育大型溶洞。放空漏失井多分布在Ⅱ级和Ⅲ-1级断裂附近,断裂平面延伸长度较大,NE-NW走向,多形成于加里东中晚期,海西期继续活动,岩石受强烈挤压破碎,发育一定范围的断裂带,大型溶洞型储层发育,而延伸较短的Ⅲ-2级断裂很少有放空漏失井。因此,岩溶储集层多分布在NNE-NNW向断裂和少量近EW断裂附近,特别是一组NNE-NNW向大型“X”型走滑断裂(图4),放空漏失井大量分布,储层沿着断裂呈条带状展布。

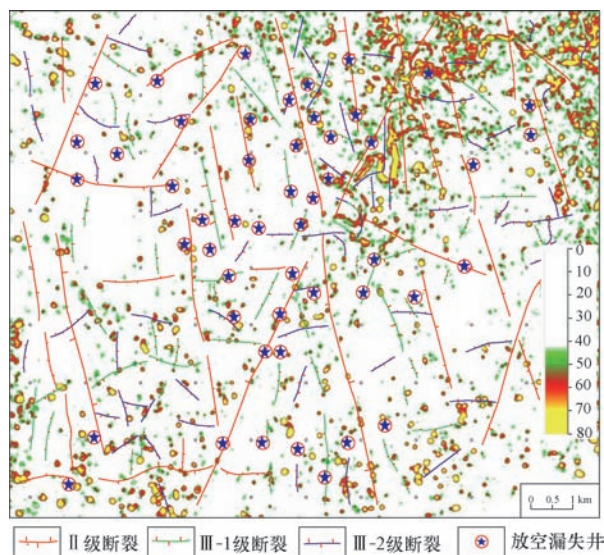


图3 塔河油田(T_7^0 之下30 ms)振幅变化率属性和断裂叠合图

Fig. 3 Overlay map of amplitude change rate attributes of Tahe oilfield (30 ms under T_7^0) and faults

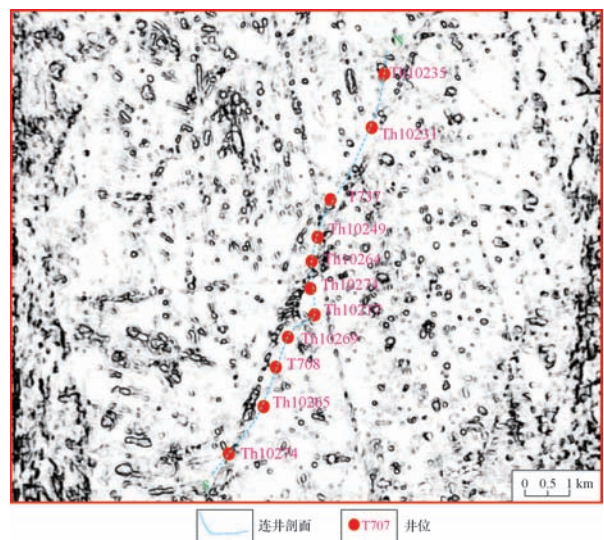


图4 塔河油田(T_7^0 之下30 ms)相干属性

Fig. 4 Coherence attributes of Tahe oilfield (30 ms under T_7^0)

从井剖面 and 均方根振幅属性连井剖面分析可知(图5),内幕区虽然上覆有较厚上奥陶统,岩溶储层依然很发育,但横向可对比性较差,多呈孤立状或短条带状分布规模较大,最大的溶洞达70 m。储集层类型主要为大型岩溶洞穴、溶蚀孔洞和裂缝。溶蚀洞穴的发育深度加大,如T737井和Th10249井距 T_7^4 不整合面200 m以上。溶蚀孔洞型、裂缝型和洞穴型储层均与断裂和裂缝有关,特别是大型洞穴都分布在断裂附近,并通过裂缝相互连通。

由于断裂的垂向沟通,岩溶作用不再仅仅发生在地表附近,岩溶储集层的纵向发育深度明显增加。在距 T_7^4 不整合面100 m以下仍有大量溶洞发育,岩溶储层发育深度大,横向没有暗河型水道稳定分布(图6)。流体沿着断裂在厚层灰岩中纵向运移,沿着上奥陶统与一间房组(O_3/O_{2y})、一间房组与鹰山组(O_{2y}/O_{1-2y})等不整合面发生横向流动,同时在岩性界面、低角度裂缝和断裂处也会发生横向溶蚀作用,形成溶蚀孔洞。断裂不仅是流体的主要运移通道,同时

由于构造抬升,形成断隆地貌,风化溶蚀作用较强,储集层发育。随着断裂的溶蚀扩大,形成大量落水洞,落水洞与地下暗河连通。

4 断控岩溶形成机制及演化

4.1 断控岩溶形成机制

碳酸盐岩断裂带是一个复杂的空间结构体,具有较好的孔隙度和渗透率,其物性特征对流体运移及岩溶作用发生具有重要的作用。国内外学者已经对断层包络体特征进行了大量研究,断层核根据断层岩的固结和非固结的特征,可划分为有粘结力的断层岩带和无粘结力的断层岩带两部分^[21]。Graham^[22]通过分析Venere盆地的一条断层的断裂带结构和物性的变化关系,从围岩-破碎带-断层核,裂缝密度逐渐增加,岩石破碎强度增强,孔隙度和渗透率呈先增高再降低的趋势。断裂产生大量伴生裂缝,断裂和裂缝不仅是流体重要的储集空间^[23],而且为大气淡水透过隔水层垂

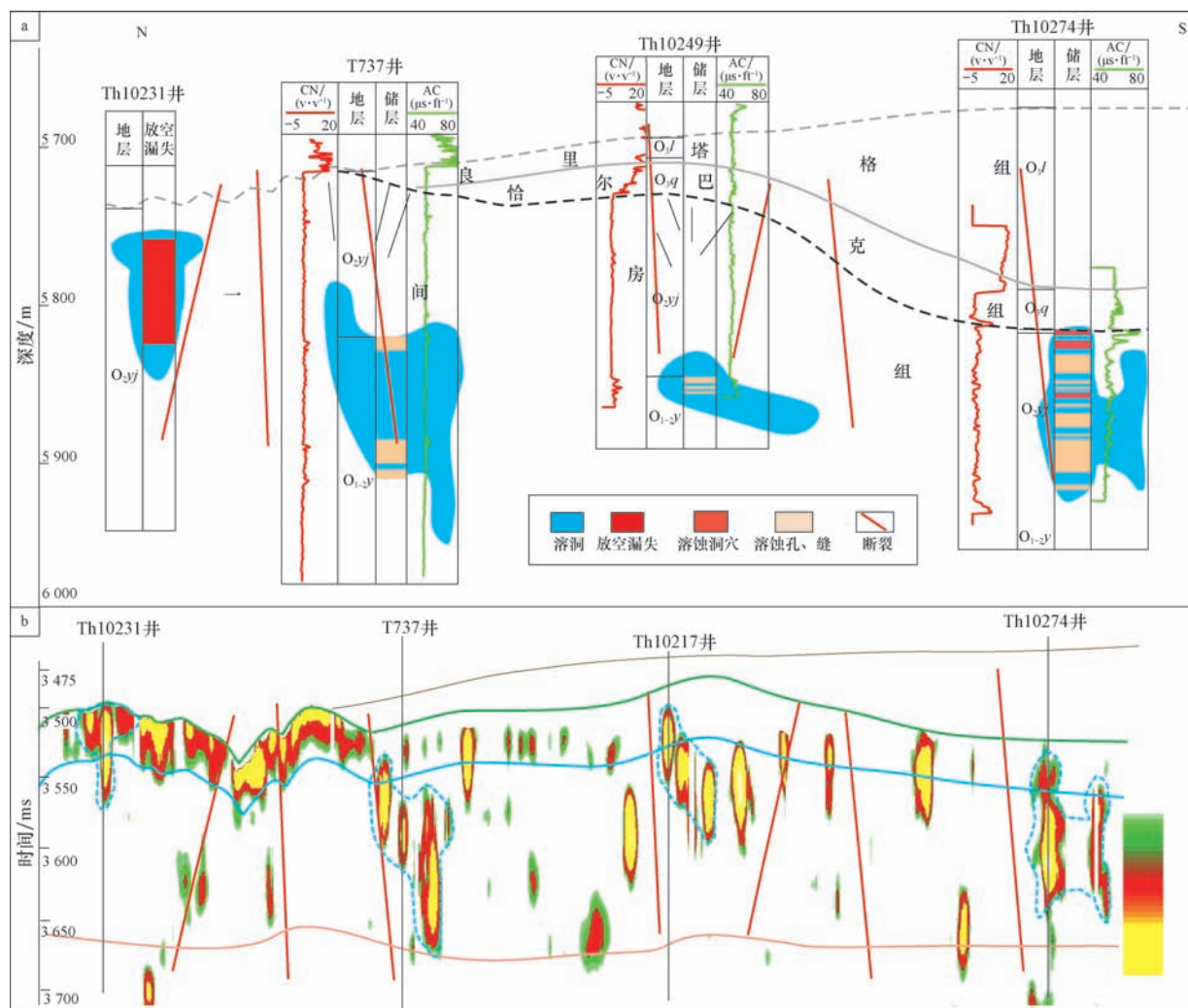


图5 塔河油田连井解释和地震属性剖面(平面见图4)

Fig. 5 Well-tie interpretation and seismic attributes profiles of Tahe oilfield (see Fig 4 for the plain view)

a. 测井储层解释连井剖面;b. 均方根振幅属性连井剖面

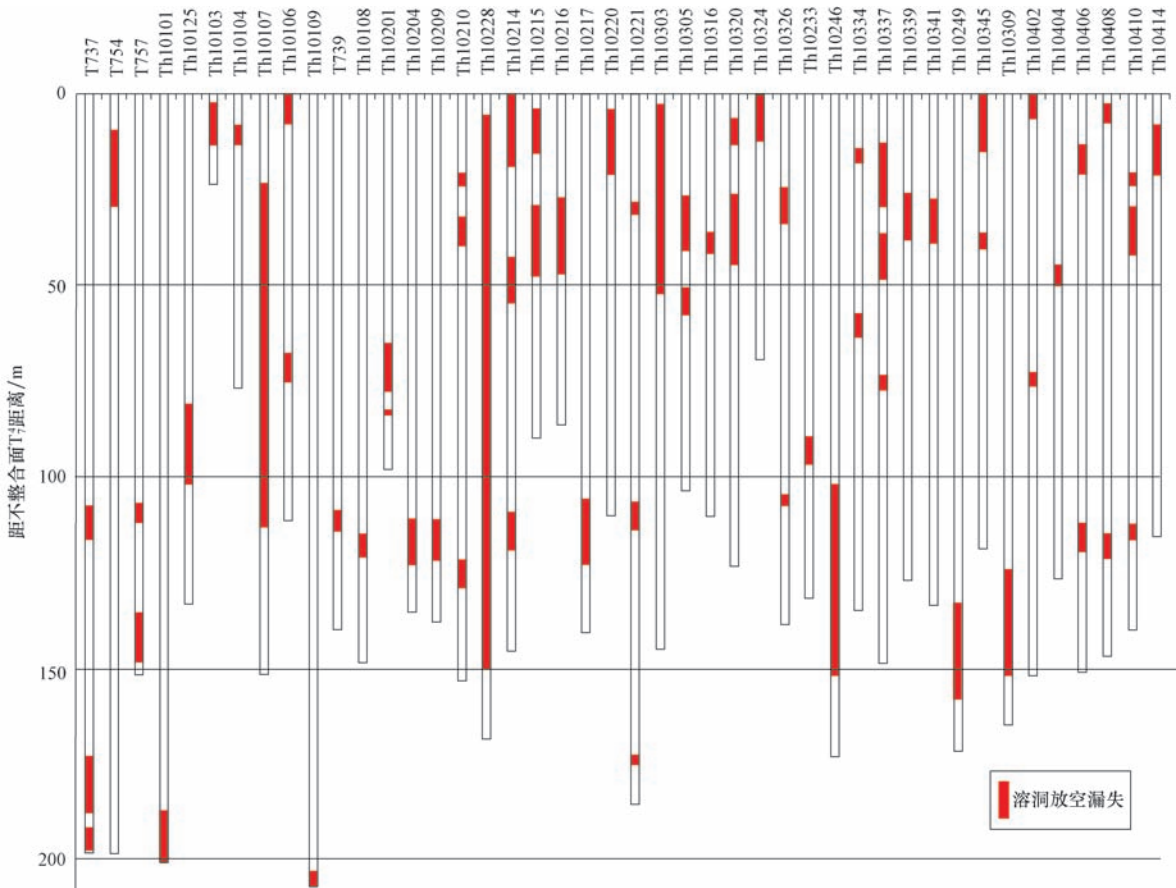


图 6 塔河油田西南斜坡区溶洞、放空漏失井段与不整合面关系

Fig. 6 Relationship between leakage well intervals penetrating caverns and unconformity surfaces in the southwest slope zone of Tahe oilfield

直下渗创造了有利条件。断裂破碎带增加了水 - 岩的接触面积,增大了地下水的溶蚀范围,改善了碳酸盐岩的渗流作用,使溶蚀作用增强^[24]。

断裂延伸至地表,成为流体运移通道。地表大气淡水顺着断裂带透过上奥陶统向下运移,外界 CO₂ 和大气淡水不断补充,致使岩溶作用持续进行。断裂交叉部位受到多期不同方向的应力作用,岩石破碎强烈,裂缝更为发育,水体流动更顺畅,岩溶作用强烈,因此多发育较大规模的溶蚀洞穴型储层,如厅堂洞穴等。岩层界面是流体横向运移的有利路径,可以形成横向溶洞。

在前人研究的基础上,将断控岩溶储集层溶蚀作用划分为 4 种类型(图 7)。第一种是地表大气淡水在重力作用下,沿着高孔渗的断裂破碎带快速下渗,透过隔水层,进入奥陶系碳酸盐岩地层中,酸性的 CO₂ - H₂O 溶液与周围碳酸盐岩发生溶蚀作用。由于断裂的沟通,外界有机质氧化和生物呼吸产生的 CO₂ 不断补充,流体中的 H₂CO₃ 维持平衡,溶解作用可以持续进行,裂缝溶蚀扩大,进而形成大型溶洞。这类溶洞较为常见。第二种是热液溶蚀作用。火山活动产生大量热液,富含 CO₂ 的热液沿断裂上升过程中逐渐冷却,CO₂ 溶解其中提高了碳酸盐岩的溶解作用。通过流体包裹

体测温 and 地球化学证据证明了塔里木盆地热液流体活动普遍存在^[25]。二叠纪末的海西晚期运动,整个塔

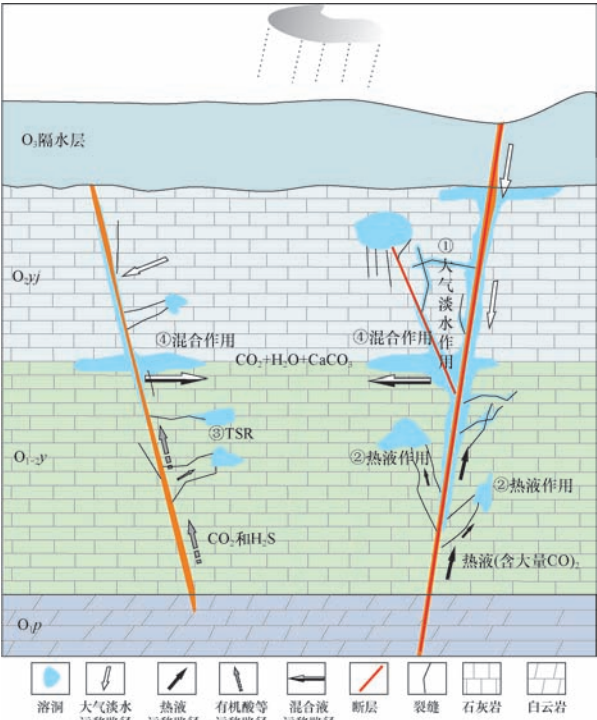


图 7 断控岩溶储集层形成机制

Fig. 7 Forming mechanism of fault-controlled karst reservoirs

里木盆地广泛存在岩浆火山活动^[26],热液对碳酸盐岩储层具有改造作用^[27]。第三种是烃类与硫酸盐岩在热动力条件驱动下发生化学反应(TSR),产生酸性流体进行的溶蚀改造作用。TSR产生大量 CO_2 和 H_2S ,硫化氢溶于水形成氢硫酸,具有强烈的腐蚀性,加速了碳酸盐岩的溶蚀,形成孔隙性的海绵状孔洞体系。塔河油田天然气中高含硫与TSR有关。四川盆地普光气田深部碳酸盐岩优质储层是 H_2S 与 CO_2 等酸性流体对碳酸盐岩强烈的溶蚀改造作用形成的^[28]。第四种是混合溶蚀作用。大气淡水下渗,热液、 H_2S 与 CO_2 等上移,深成的 CO_2 - H_2S -承压水与大气淡水混合后溶蚀作用增强。断裂作用使碳酸盐岩岩层发生破碎,深部流体沿着破碎岩间裂缝网络运移,并对裂缝不断溶蚀,裂缝宽度明显增加,往往会扩大至原始宽度的几倍甚至几十倍;随着溶蚀的进行,裂缝相互沟通,形成一个纵向连通的溶蚀孔洞。两条或多条断裂交汇部位岩石破碎严重,流体流通较畅,溶蚀作用较强,形成溶蚀扩大缝或小型溶蚀孔洞。地层流体纵向运移,在遇到岩性界面、不整合面、低角度裂缝和断裂时会发生横向溶蚀,随着溶蚀的进行,会形成较大的横向溶洞。

4.2 断控岩溶演化模式

加里东中期一幕岩溶作用发生于一间房组(O_2y)沉积末期^[29],塔里木盆地发生区域性挤压构造运动^[30],阿克库勒凸起距板块碰撞边缘较远,受构造运动影响相对较弱,断裂发育较少,发生短暂的准同生岩溶作用,作用时间短,储层规模较小(图8a)。

良里塔格组为缓坡-台地碳酸盐沉积,发育砂屑滩、鲕粒滩、砾屑滩、生屑滩、泥晶灰岩、泥灰岩和粒屑泥晶灰岩七种沉积微相。随着海平面的波动,较高地貌的礁滩复合体暴露在大水淡水环境中,发生选择性溶蚀,形成溶蚀孔隙。礁滩复合体在经历了较弱的压实与固结等成岩作用后,于加里东中期二幕时期整体抬升暴露地表,发生非选择性溶蚀和充填作用,形成大量溶蚀孔洞。

加里东中期三幕岩溶作用发生于桑塔木组(O_3s)沉积末期^[30],阿克库勒凸起锥形形成。受N-S向的区域应力场作用,NE向,NW向与近E-W向断裂形成。东北剥蚀区暴露发生表生岩溶作用,西南部的构造低部位,一间房组(O_2y)上覆上奥陶统溶蚀性较差,表生岩溶作用不发育。但大气淡水通过断裂下渗到碳酸盐岩地层中进行溶蚀,断控岩溶储集层初步形成。发育程度较低,为一些小型孤立溶蚀洞穴和溶缝,顺断裂走向分布(图8b)。

海西早期岩溶作用发生在泥盆纪(S)沉积末期。区域应力场为NW-SE向,断裂活动强烈,形成了一

系列NNW向,NW向和NE向断裂和褶皱。塔河主体区强烈抬升,泥盆系、志留系、上奥陶统及部分中下奥陶统遭受快速剥蚀^[10]。东北部隆起区发育表生岩溶储集层及部分断控储层。西南覆盖区发育大量大型断裂,断裂沟通地表,地表水通过断裂及裂缝进入中-下奥陶统灰岩地层进行溶蚀。断裂发育深度加深,岩溶储集层在断裂附近发育,岩溶作用强度增强,主要溶蚀作用类型为第一、第三和第四种。发育保存较好的大型溶蚀洞穴型、溶蚀孔洞型和裂缝型储层,顺断裂带分布,受断裂控制作用明显。该期是断控岩溶储集层形成的最主要时期^[31](图8c)。

二叠纪末的海西晚期,研究区继续抬升,断裂规模较大,切割深度加大,部分断裂继续活动,上穿地表。该时期整个塔里木盆地广泛存在火山岩浆活动。岩溶作用对上两期的储层进行溶蚀扩张改造,储层规模变大,同时该时期发育由岩浆热液溶蚀作用形成的缝洞储层(图8d)。

构造运动产生的断裂期次和断控岩溶储集层发育的规模与期次存在着一定的耦合关系。加里东中期断控岩溶储集层发育相对较弱,海西早期是岩溶储集层

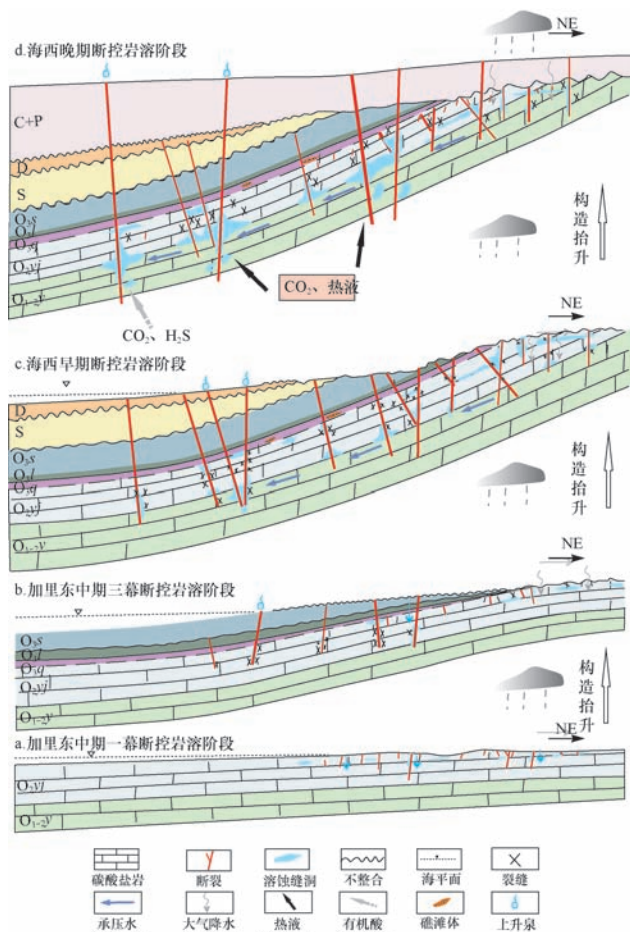


图8 塔河油田斜坡区断控岩溶演化模式

Fig. 8 Evolution model of fault-controlled karst reservoirs in the slope area of Tahe oilfield

发育的主要时期,海西晚期构造运动对前期岩溶进行了改造。随着构造演化的进行,断裂逐渐增多,规模增大,垂向延伸加深,相应地,断控岩溶储集层发育增强,多期断裂导致多期岩溶储集层形成,后期岩溶对前期储层进行扩大与改造,形成了现今复杂的断控岩溶储集层系统。

5 结论

1) 结合岩心、薄片分析、测井和钻井资料,将塔河油田斜坡区储层分为裂缝型、溶蚀孔洞型、裂缝-孔洞型和洞穴型4类,以裂缝-孔洞型和洞穴型储层为主。

2) 断裂的规模、期次及断裂是否断至地表是断控岩溶储集层发育的主要影响因素。溶蚀孔洞和洞穴均与断裂和裂缝有关,特别是大型洞穴均分布在断裂附近,并通过断裂和裂缝相互连通。岩溶储集层的垂向发育深度加深,主要分布距一间房组(O_2y_1)顶面250 m范围内。断裂交叉部位受到多期不同方向的应力作用,岩溶作用强烈,多发育较大规模的溶蚀洞穴。

3) 深部岩溶储集层溶蚀作用主要有大气淡水溶蚀作用、TSR(硫酸盐热化学还原反应)、热液溶蚀作用和混合溶蚀作用4种类型。加里东中期断控岩溶储集层发育相对较弱,海西早期是断控岩溶储集层形成的最主要时期,海西晚期构造运动对前期岩溶进行了溶蚀改造。

参 考 文 献

- [1] 金之钧,蔡立国.中国海相油气勘探前景、主要问题与对策[J].石油与天然气地质,2006,27(6):722-730.
Jin Zhijun, Cai Ligu. Exploration prospects, problems and strategies of marine oil and gas in china[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 722-730.
- [2] 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.
- [3] 翟晓先,云露.塔里木盆地塔河大型油田地质特征及勘探思路回顾[J].石油与天然气地质,2008,29(5):565-573.
Zhai Xiaoxian, Yun Lu. Geology of giant Tahe Oilfield and a review of exploration thinking in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 565-573.
- [4] 万云,刘存革,刘洪,等.塔河油田奥陶系多期岩溶作用的识别标志[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(5):6-11.
Wan Yun, Liu Cunge, Liu Hong, et al. Identification signs of multi-phase karstification of Ordovician reservoir in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(5): 6-11.
- [5] 杨雪飞,王兴志,唐浩,等.塔河油田12区海西早期岩溶作用[J].地质科技情报,2013,32(2):77-83.
Yang Xuefei, Wang Xingzhi, Tang Hao, et al. Investigation of the early Hercynian paleokarst in the block 12 of Tahe Oilfield, Northern Tarim Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(2): 77-83.
- [6] 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.
- [7] 鲁新便,蔡忠贤.缝洞型碳酸盐岩油藏古溶洞系统与油气开发-以塔河碳酸盐岩溶洞型油藏为例[J].石油与天然气地质,2010,31(1):22-27.
Lu Xinbian, Cai Zhongxian. A study of the paleo-cavern system in fractured-vuggy carbonate reservoirs and oil/gas development-taking the reservoirs in Tahe Oilfield as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 22-27.
- [8] 赵文智,沈安江,潘文庆,等.碳酸盐岩岩溶储层类型研究及对勘探的指导意义-以塔里木盆地岩溶储层为例[J].岩石学报,2013,29(9):3213-3222.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Pan Wenqing, et al. A research on carbonate karst reservoirs classification and its implication on hydrocarbon exploration: Cases studies from Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9): 3213-3222.
- [9] 李会军,丁勇,周新桂,等.塔河油田奥陶系海西早期、加里东中期岩溶对比研究[J].地质评论,2012,56(3):413-425.
Li Huijun, Ding Yong, Zhou Xingui, et al. Study on Hercynian and Middle Caledonian karstification of Ordovician in the Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Geological Review, 2012, 56(3): 413-425.
- [10] 张涛,蔡希源.塔河地区加里东中期古岩溶作用及分布模式[J].地质学报,2007,81(8):1125-1134.
Zhang Tao, Cai Xiyuan. Caledonian Paleo-karstification and its characteristics in Tahe area, Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8): 1125-1134.
- [11] 兰晓东,吕修祥,朱炎铭,等.走滑断裂与盖层复合成藏模式-以塔中东部中古51井区鹰山组为例[J].石油与天然气地质,2014,35(1):107-115.
Lan Xiaodong, Lv Xiuxiang, Zhu Yanming, et al. Hydrocarbon accumulation pattern jointly controlled by strike-slip faults and cap rocks: a case from Yingshan Formation in ZG-51 wellblock of eastern Tazhong area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 107-115.
- [12] 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. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347-355.
- [13] 屈泰来,郭光辉,刘加良,等.碳酸盐岩断裂相分类特征-以新疆塔里木盆地柯坪露头为例[J].地球学报,2011,32(5):541-548.
Qu Tailai, Guo Guanghui, Liu Jialiang, et al. The classification and characteristics of carbonate fault facies: a case study of the outcrop of Kalpin area, Tarim basin in Xinjiang[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2011, 32(5): 541-548.
- [14] Bonson C G, Childs C, Walsh J J, et al. Geometric and kinematic con-

- trols on the internal structure of a large normal fault in massive limestones: The Maghlaq Fault, Malta[J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29(2): 336 - 354.
- [15] Bastesen E, Braathen A, Nøttveit H, et al. Extensional fault cores in micritic carbonate - case studies from the Gulf of Corinth, Greece [J]. *Journal of Structural Geology*, 2009, 31(4): 403 - 420.
- [16] 陈伟, 吴智平, 侯峰, 等. 断裂带内部结构特征及其与油气运聚关系[J]. *石油学报*, 2010, 31(5): 774 - 780.
- Chen Wei, Wu Zhiping, Hou Feng, et al. Internal structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(5): 774 - 780.
- [17] 邓小江, 李国蓉, 徐国强, 等. 塔河油田南部中奥陶统一间房组沉积相精细划分[J]. *石油学报*, 2008, 29(1): 35 - 40.
- Deng Xiaojiang, Li Guorong, Xu Guoqiang, et al. Sedimentary facies division of Yijiangfang formation in the middle Ordovician of the southern Tahe Oilfield [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(1): 35 - 40.
- [18] 倪新锋, 杨海军, 沈安江, 等. 塔北地区奥陶系灰岩段裂缝特征及其对岩溶储层的控制[J]. *石油学报*, 2010, 31(6): 933 - 940.
- Ni Xinfeng, Yang Haijun, Shen Anjiang, et al. Characteristics of Ordovician limestone fractures in the northern Tarim Basin and their controlling effects on karst reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(6): 933 - 940.
- [19] 郭光辉, 李建军, 卢玉红. 塔中 I 号断裂带奥陶系灰岩裂缝特征探讨[J]. *石油学报*, 1999, 20(4): 19 - 23.
- Wu Guanghui, Li Jianjun, Lu Yuhong. The fracture characteristics of Ordovician limestone in Tazhong NO. 1 fault belt [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1999, 20(4): 19 - 23.
- [20] 刘群, 李海英, 邓光校. 地震断裂检测技术在塔河油田南部碳酸盐岩储层及油藏预测中的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(2): 202 - 206.
- Liu Qun, Li Haiying, Deng Guangxiao. Application of seismic fault detection to carbonate reservoir prediction in southern Tahe oilfield [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(2): 202 - 206.
- [21] Sibson R H. Fault rocks and fault mechanisms [J]. *Journal of Geology Society of London*, 1977, (3): 191 - 213.
- [22] Graham B, Antonellini M, Aydin A. Formation and growth of normal faults in carbonates within a compressive environment [J]. *Geology*, 2003, 31(1): 11 - 14.
- [23] 吕修祥, 杨宁, 周新源, 等. 塔里木盆地断裂活动对奥陶系碳酸盐岩储层的影响[J]. *中国科学*, 2008, 38(增 I): 48 - 54.
- Lv Xiuxiang, Yang Ning, Zhou Xinyuan, et al. The influence of fault activity on the Ordovician carbonate reservoir in Tarim Basin [J]. *Science in China (Series D: Earth Science)*: 2008, 38 (Suppl I): 48 - 54.
- [24] 李会军, 丁勇, 周新桂, 等. 塔河油田奥陶系海西早期、加里东中期岩溶对比研究[J]. *地质论评*, 2012, 56(3): 413 - 425.
- Li Huijun, Ding Yong, Zhou Xingui, et al. Study on Hercynian and Middle Caledonian karstification of Ordovician in the Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. *Geological Review*, 2012, 56(3): 413 - 425.
- [25] 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J]. *地质学报*, 2006, 80(2): 245 - 253.
- Jin Zhijun, Zhu Dongya, Hu Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoirs beds in the Tarim basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(2): 245 - 253.
- [26] 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.
- [27] 刘伟, 黄擎宇, 王坤, 等. 塔里木盆地热液特点及其对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. *天然气工业*, 2016, 36(3): 14 - 20.
- Liu Wei, Huang Qingyu, Wang Kun, et al. Characteristics of hydrothermal activity in the Tarim basin and its reworking effect on carbonate reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(3): 14 - 20.
- [28] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR 对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2182 - 2194.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: an important type of deep-buried high-quality carbonate reservoirs in Sichuan basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2182 - 2194.
- [29] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(1): 1 - 12.
- Qi Lixin, Yun Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe Oilfield [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(1): 1 - 12.
- [30] 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 Yanshan, 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.
- [31] 周文, 李秀华, 金文辉, 等. 塔河奥陶系油藏断裂对古岩溶的控制作用[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2339 - 2348.
- Zhou Wen, Li Xiuhua, Jin Wenhui, et al. The control action of fault to paleokarst in view of Ordovician reservoirs in Tahe area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2339 - 2348.

(编辑 董立)