

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

程洪^{1,2}, 张杰³, 张文彪³

(1. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059; 2. 中国石化 西北油田分公司 采油三厂, 新疆 阿克苏 842012;

3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:断溶体油藏是近年来塔里木盆地研究的热点和难点,断溶体储层内部的非均质性是制约开发效果的关键。以塔里木盆地塔河十区 TH10421 单元为例,基于测井及地震高频属性分析,将断溶体内部储集体划分为 4 类:洞穴型、溶蚀孔洞型、裂缝-孔洞型和裂缝型。其中洞穴型和溶蚀孔洞型是断溶体内部最主要的储集体类型,裂缝-孔洞型及裂缝型是大型洞穴发育的前期阶段和重要沟通条件。研究表明,断溶体的储集体从裂缝-孔洞-洞穴的发育过程体现了溶蚀程度由外到内逐渐增强,其中走滑断裂产生的多级裂缝是加速溶蚀的重要因素。断溶体内部每种储集体类型均对应不同的测井、地震响应特征,地震结构属性能够较为清晰的预测断溶体内部不同储集体的分布关系,进一步佐证了断溶体发育模式。该研究对深化断溶体形成过程的理解具有一定推动作用,也为此类油藏开发提供地质借鉴。

关键词:识别预测;发育模式;断溶体储层;塔河油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

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

Cheng Hong^{1,2}, Zhang Jie³, Zhang Wenbiao³

(1. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. The 3rd Oil Production Plant of Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Aksu, Xinjiang, 842012, China;

3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Faulted-karst carbonate reservoirs have been a focus of study in the Tahe oilfield in recent years. The heterogeneity of the reservoirs is a key issue that restricts their development. The TH10421 unit in the block 10 of the Tahe oilfield is taken as an example to classify the reservoirs based on logging data and high-frequency seismic attribute analysis. There are four types of reservoir as a result, namely the cavity type, dissolved pore or cavity type, fracture-cavity type, and fracture type, among which the first two are the most common reservoir types, and the last two, still at early stages of evolving into large-scale cavities, serve mainly as connection between reservoirs. The results show that the evolution of reservoirs from fractures to pores and then to cavities indicates a gradual increasing dissolution from outside to inside, and that multi-stage fractures caused by strike-slip faults facilitated the dissolution. Each reservoir type in the faulted-karst carbonates corresponds to specific log and seismic responses. Seismic texture attributes can be used to clearly predict the distribution of different types of reservoirs within, which will in turn further confirm the proposed development model of the reservoirs. The study helps to promote the understanding of the forming process of faulted-karst reservoirs and to provide a geological basis for their future development.

Key words: identification and prediction, development model, faulted-karst reservoir, Tahe oilfield, Tarim Basin

缝洞型碳酸盐岩油气藏是一种以大型岩溶洞穴为主要储集空间的油气藏,在世界范围内占有重要地位。

收稿日期:2018-10-08;修订日期:2020-08-03。

第一作者简介:程洪(1982—),男,博士研究生,高级工程师,碳酸盐岩缝洞型油藏开发。E-mail:16899612@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05053-02)。

中国缝洞型碳酸盐岩油藏主要分布在塔里木盆地奥陶系,经历了多期构造运动、岩溶改造,储集空间类型多样,包括洞穴、孔、缝及相互之间的组合,尺度差异大,形态极不规则。不同类型的储集空间其成因过程、表征方法及开发特征差异性很大^[1-4],而用于表征油气藏的岩心、测井和地震等资料所反映的储层精度也存在巨大差异,油藏描述难度极大,理清不同类型储集体的成因及发育模式,是提高油藏描述精度的重要途径。

断溶体油藏是近年在塔里木盆地发现的一种新类型油藏。断溶体油藏理论的提出有效指导了塔河外围地区、顺北地区、哈拉哈塘地区、塔中地区的勘探开发^[4]。但随着开发过程中一些低产井的出现以及注水、注气措施的失效,表明断溶体油藏内部有着极强的非均质性,对缝洞配置、连通模式等内部结构的认识仍不足,目前急需对断溶体内部结构进行解剖,并形成一套针对性的预测技术,以指导塔河外围、顺北和塔中等地区油气藏的科学勘探开发。

1 地质概况

塔河油田位于塔里木盆地北部沙雅隆起阿克库勒凸起的南部斜坡区,东部为草湖凹陷,东南部为满加尔坳陷,南部为顺托果勒隆起,西部为沙西凸起,北部为沙雅-轮台断隆。塔河油田奥陶系油藏是中国目前发现的最为特殊的一类大型碳酸盐岩油藏,其构造运动先后经历了加里东中期-喜马拉雅期等,在此基础上,形成了一系列不同级别、多期叠加的断裂系统(图1)^[5-7]。塔河油田十区 TH10421 单元位于阿克库勒凸起轴部西南翼(图1),区内发育一系列 NE 和 NW 向深大断裂带,是塔河外围地区发育断溶体油藏最典型的单元之一,主要目的层为中、下奥陶统鹰山组 and 一间房组,其中中、下奥陶统一间房组顶部界面(T_7^4)为典型的不整合面^[7],含油层段为一间房组顶面以下 0~300 m,溶洞、孔洞是主要的储油空间。该单元于 2003 年投产,共钻井 5 口,其中 1 口井因钻遇放空未获得测井曲线。该典型单元初产高峰期平均单井日产超过 100 t,但产量递减较快,截至目前 5 口井均因高含水关停,统计采出程度仅 15.2%,仍有大量的剩余油亟待挖潜,储层内部结构研究迫在眉睫。

2 断溶体油藏储集体类型及测井识别

断溶体油藏是断裂带经过多期地表水岩溶或深部热液上涌溶蚀改造形成的油藏。断溶体油藏的形成主

要得益于多级次、多方位断裂的发育,断裂引发岩溶作用形成孔、洞、缝等多类型储集空间,极大的改善了致密碳酸盐岩储层的储集性能。根据不同储集空间的组合和结构特征,将其内部储集体分为洞穴型、溶蚀孔洞型、裂缝-孔洞型及裂缝型 4 种,各类型储集体间受岩溶发育过程控制,存在一定成因联系。

2.1 洞穴型储集体

洞穴型储集体通常形成于溶蚀过程末期,地表水或深部热液沿断裂溶蚀致密灰岩,溶蚀作用时间越长,形成大型洞穴的可能性越大^[8-10]。洞穴型储集体在后期改造过程中会发生充填,依据充填程度差异,又可进一步细分为未充填型洞穴和充填型洞穴。

未充填型洞穴,储集空间保存好,具备良好的储集和生产能力。在钻遇该类型储集体时通常会出现钻具放空、泥浆大量漏失等情况。常规测井曲线中的井径曲线通常会有明显的扩径现象;GR 曲线值较上下围岩略有增大或保持不变(一般小于 25 API);三孔隙度曲线与上下围岩地层相比变化剧烈;深浅双侧向电阻率测井值一般较低,通常小于 $150 \Omega \cdot m$ (图 2a)。

充填型洞穴,在流水和重力作用下,洞穴常被沉积物充填,充填物的成分通常较为复杂,以砂泥为主,通常会具有流水冲刷或重力分异作用形成的层理以及分选结构等特征,主要储集空间为粒间孔。常规测井曲线上,一般在泥质含量较高时出现井径曲线的扩径现象;自然伽马曲线值较上下围岩增大,最高可达 95 API;三孔隙度曲线与上覆、下伏地层相比有明显变化;深浅双侧向电阻率测井值较低,小于 $180 \Omega \cdot m$ (图 2b)。

2.2 溶蚀孔洞型储集体

大型洞穴周围通常存在溶蚀程度中等、规模大小不一、类似于碎屑岩储层的溶蚀孔洞。溶蚀孔洞型储集体就是溶蚀孔洞集中发育的部位。溶蚀孔洞的存在增大了地表水与碳酸盐岩的接触面积,扩大了溶蚀范围。因此,溶蚀孔洞型储集体与洞穴型储集体在空间分布上具有一定的相关性,洞穴型储集体往往发育在溶蚀孔洞发育程度较高的部位。

常规测井曲线上,溶蚀孔洞型储集体自然伽马曲线值较上下围岩略有增大;声波时差和中子测井值与围岩相比有小幅度增大,密度测井值为低值;深浅双侧向电阻率测井值一般较低,一般小于 $160 \Omega \cdot m$ (图 2c)。

2.3 裂缝-孔洞型储集体

裂缝-孔洞型储集体通常发育在溶蚀孔洞带的外围,属于溶蚀程度偏弱阶段的产物,裂缝与小型溶孔共

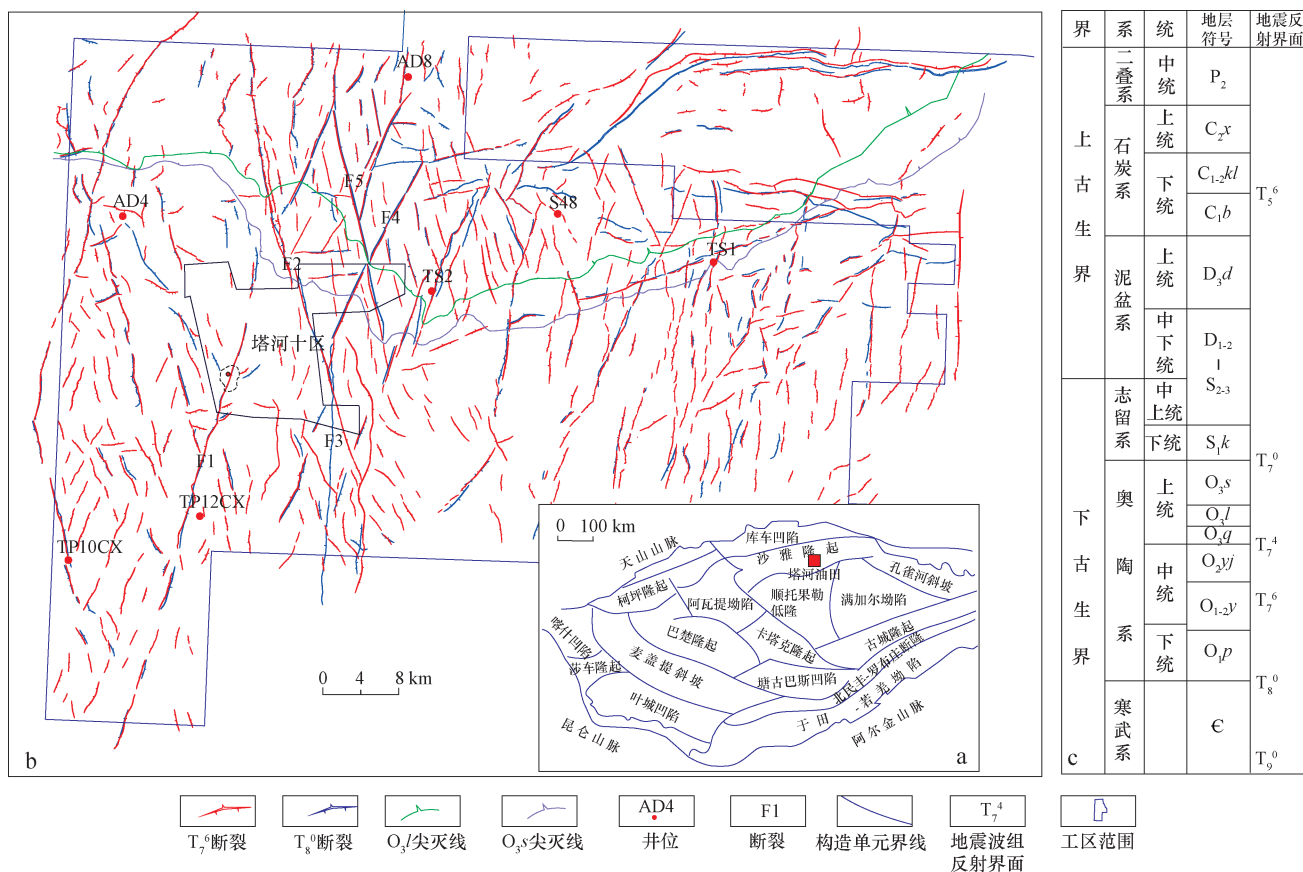


图1 塔里木盆地塔河油田构造位置(a)、大型主干断裂分布(b)及地层综合柱状图(c)^[5]

Fig.1 Structural location of (a), distribution of major faults in (b), and stratigraphic column of (c) the Tahe oilfield in the Tarim Basin^[5]

P₂. 中二叠统; C₂x. 上石炭统小海子组; C₁kl. 下石炭统卡拉沙依组; C₁b. 下石炭统巴楚组; D₃d. 上泥盆统东河塘组; D₁₋₂ - S₂₋₃. 中、下泥盆统一、上志留统; S₁k. 下志留统柯坪塔格组; O₃s. 上奥陶统桑塔木组; O₃l. 上奥陶统良里塔格组; O₃q. 上奥陶统恰尔巴克组; O₂yl. 中奥陶统一间房组; O₁₋₂y. 中、下奥陶统鹰山组; O₁p. 下奥陶统蓬莱坝组; ε. 寒武系; T₅⁶. 下石炭统标准灰岩(双峰灰岩)顶反射界面; T₇⁰. 奥陶系顶反射界面; T₇⁴. 中、下奥陶统一间房组顶反射界面; T₈⁰. 寒武系顶反射界面; T₉⁰. 震旦系顶反射界面; F1. TP12CX 断裂; F2. S99 断裂; F3. 兰尕断裂; F4. T708 断裂; F5. T707 断裂

生,裂缝-孔洞型储层既是有效的储集空间又是有效的连通通道。在常规测井曲线上,裂缝-孔洞型储集体测井响应总体比裂缝测井响应幅度稍大,具体表现在自然伽马曲线值与围岩近似,一般在5~13 API;声波时差和中子测井值与围岩相比略有增大,声波时差为50~55 μs/ft;中子一般在0.8%~4%;密度测井值相对较高,在2.58~2.67 g/cm³;深浅双侧向电阻率测井值一般较低,一般小于400 Ω·m(图2d)。

2.4 裂缝型储集体

裂缝型储集体往往发育在断溶体油藏的最外围,裂缝的形成与构造运动及断裂带的分布关系密切,裂缝的分布特征对岩溶储层发育有较强的控制作用。裂缝本身的孔隙空间较小,但却是大气淡水渗滤以及后期油藏开发的重要流动通道。

在常规测井响应中,裂缝型储集体自然伽马曲线

值与围岩近似,一般在5.7~15.1 API;声波时差和中子测井值与围岩相比略有增大,声波时差为48.5~58.6 μs/ft;中子一般在0~1%;密度测井值相对较高,在2.67~2.71 g/cm³;深浅双侧向电阻率测井值一般小于400 Ω·m(图2e)。

3 基于地震结构属性的断溶体分类预测

近年来,缝洞储集体地震预测技术取得了长足发展,形成了包括属性分析、波形分类、地球物理反演技术、多波多分量地震技术、频率差异分析技术及三维相干体技术等在内的系列技术,但从从实际应用情况看,基于叠后地震资料的缝洞体预测技术仍占据主流^[10-16]。本文断溶体储集体预测基于塔河十区叠后地震资料,采用地震结构(texture)反演方法有效预测了TH10421单元断溶体分布。

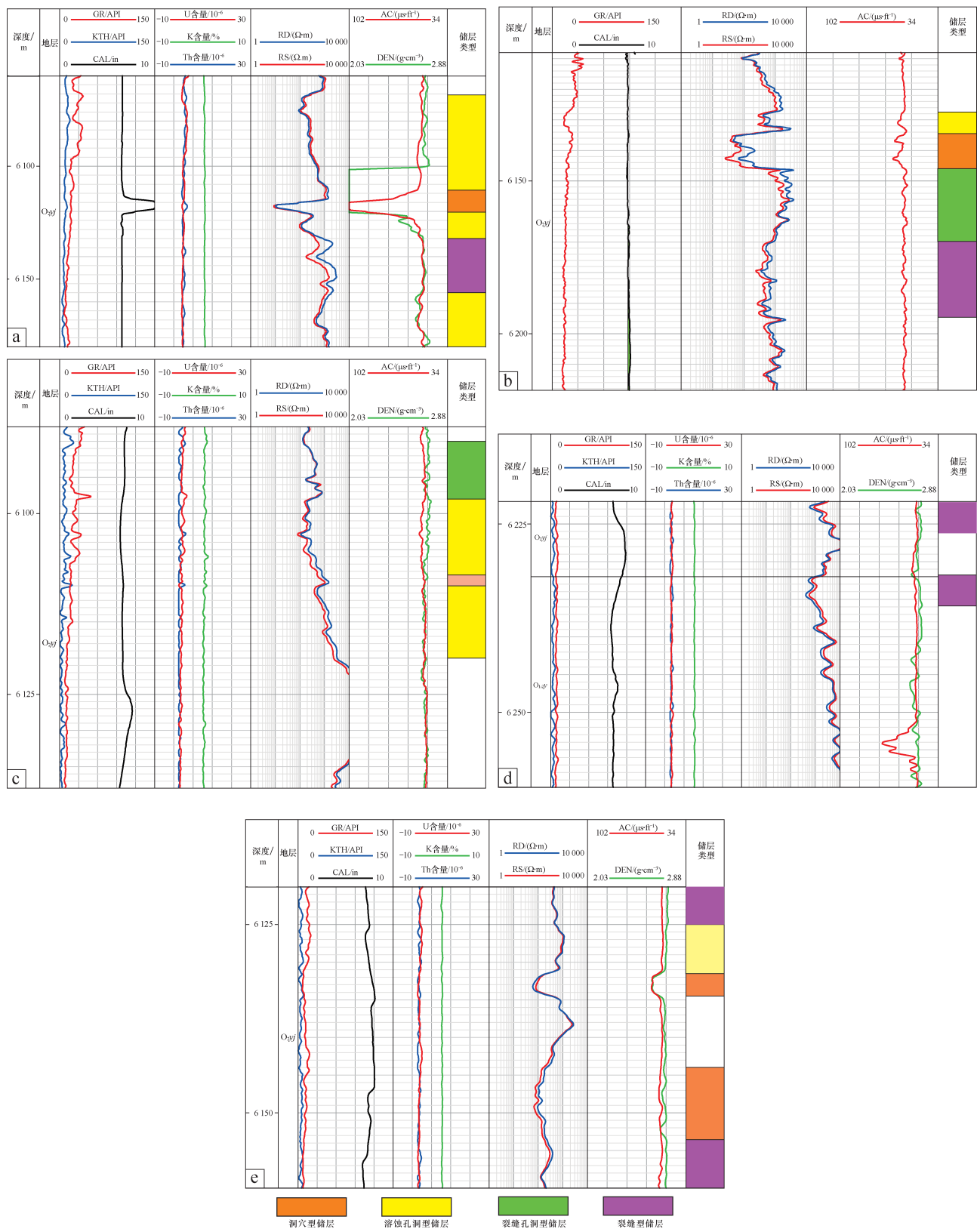


图 2 塔里木盆地断溶体油藏不同储集体类型测井响应特征

Fig. 2 Well log responses of different reservoir types in faulted-karst carbonates, Tarim Basin

a. 未充填洞穴型储层; b. 砂泥充填洞穴型储层; c. 溶蚀孔洞型储层;
d. 裂缝-孔洞型储层; e. 裂缝型储层

3.1 分类预测方法

地震结构属性是从地震反射波形的角度出发,将具有相似形态的地震波进行聚类分析的一种方法。该方法能够清晰刻画储层的外部形态,识别精度较高。本研究选用能够反映地质结构的波形属性^[17-22]。该属性最大的特点是考虑叠后地震剖面上的波形不只是地下某一点的反射特征,而是这一点周围一个带(如菲涅尔反射带)地震反射结构的综合响应,因此,基于波形的地震属性能够获取关于地质模式更加丰富的信息。

为应用该方法开展地震属性分析工作,将其程序编写到 Petrol 软件平台中作为插件,关键的操作步骤包括:①震资料主频分析;②地震资料去噪处理,即首先对地震资料进行适当的平滑处理;③根据储集体(断溶体内部结构)规模设置 3 个方向(X,Y,Z)的扫描范围;④提取能够反映断溶体特征的波形结构进行归一化处理,得到断溶体分类预测数据体;⑤通过对单井进行储层分类解释,依次统计标定每种储层类型所对应的地震结构反演属性门槛值,得到不同类型储集体对应的地震相。

3.2 断溶体发育特征

从塔河十区地震结构反演平面属性图(图 3)可见,本区发育北东-南西向断裂,且北东-南西向断裂延伸距离和发育规模较南西向偏大。从溶蚀孔洞的发育情况来看(图中亮色区域),具有明显的沿断裂分布的特征。本次研究目标区 TH10421 单元位于断裂交叉部位,受北东-南西双向应力控制,地层破裂严重,为碳酸盐岩溶蚀发育提供了优势场所,体现了断溶体油藏的特点。

从塔河十区东西方向穿过 TH10421 单元的地震结构反演剖面(图 4)可见,花状结构底部深大断裂直通基底(图 4a),在走滑过程中,深大断裂内部的应力从底部到顶部逐步释放,延伸到 T_7^4 顶部形成较宽的断裂带,内部分布着较多断距不明显的次级小断裂,呈现出正花状构造特征。本次地质建模的缝洞单元恰位于花状构造的顶部,单元内部的断裂分布为表层淡水溶蚀提供了有利通道,再辅以西晚期构造抬升剥蚀,形成了现今 T_7^4 不整合面以及下覆缝洞储集单元。

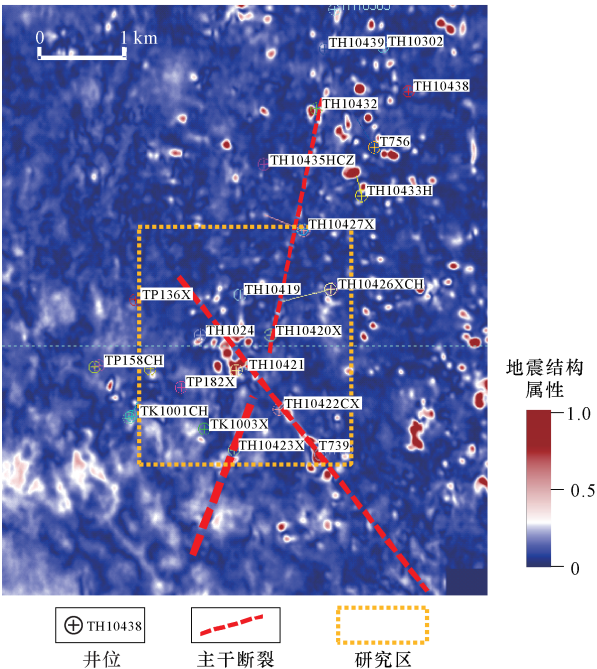


图 3 塔里木盆地塔河十区 TH10421 单元地震结构反演平面属性反映断溶体沿断裂分布特征
Fig.3 Distribution of faulted karst reservoirs along faults reflected by the plane attributes of seismic structural inversion in the TH10421 unit of the block 10 in the Tarim Basin

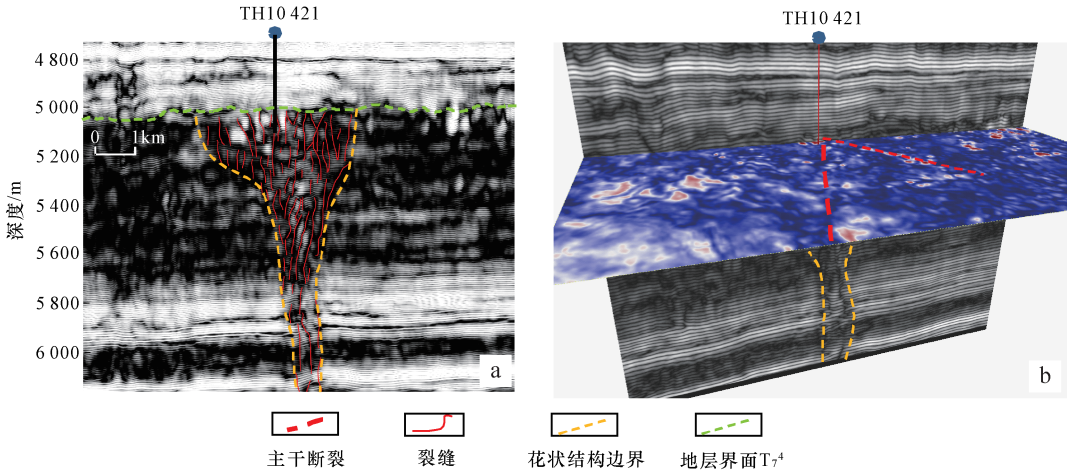


图 4 塔里木盆地塔河十区走滑断裂形成的花状结构与“断溶体”组合关系
Fig.4 Combination of flower-like structures and faulted karsts in the block 10 of the Tahe oilfield, Tarim Basin
a. TH10421 单元断裂剖面;b. TH10421 单元断溶体圈闭与断裂组合

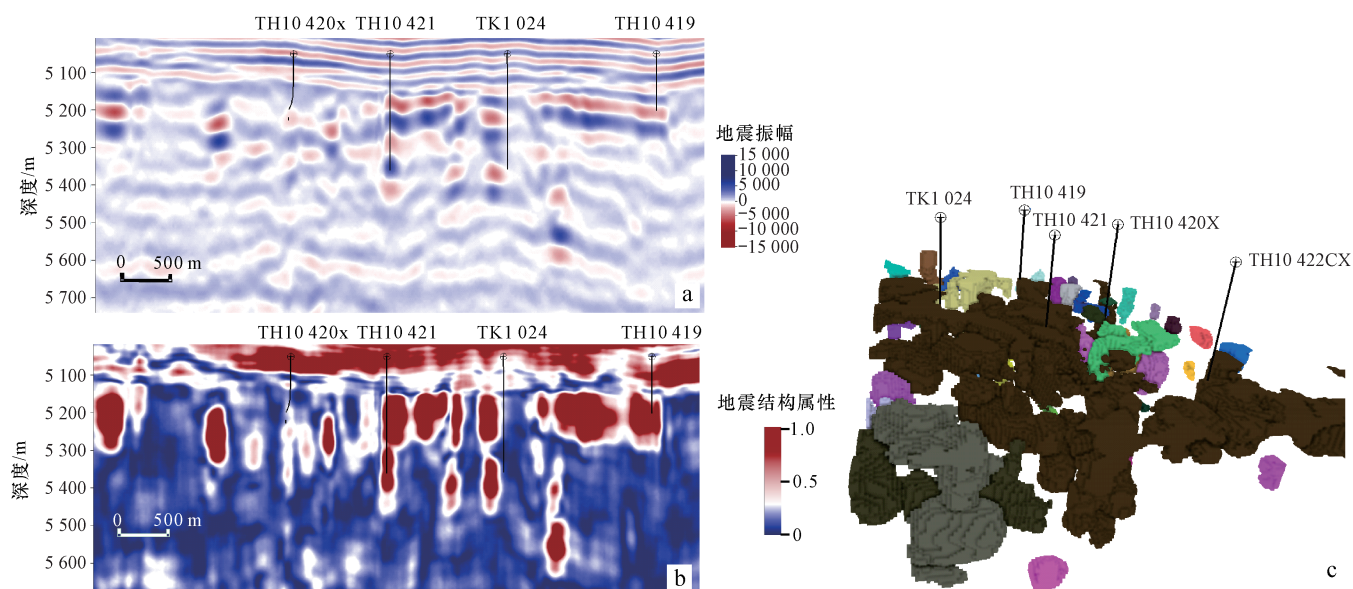


图5 塔里木盆地塔河十区 TH10421 单元断溶体发育特征

Fig. 5 Development features of faulted karsts in the TH10421 unit of the block 10 in the Tahe oilfield

a. 缝洞发育振幅反射特征; b. 地震结构反演缝洞特征; c. 断溶体特征三维雕刻

从断溶体地震振幅剖面 and 结构反演剖面可以发现(图5),断溶体在形成过程中受溶蚀程度的强弱影响,存在一定的分带性,从洞主体到边部能量呈渐变特征,说明断溶体油藏内部不同部位溶蚀程度存在差异。

3.3 断溶体发育模式

从断溶体油藏预测结果可以发现,断溶体油藏4种类型储集体之间的发育部位存在一定联系,呈现洞穴型储集体、溶蚀孔洞型储集体、裂缝-孔洞型储集体-裂缝型储集体由内及外依次发育的模式(图6),这与其成因是相关联的。断裂是表层淡水或深部热液流通通道^[23-27],溶蚀作用首先发生在地层破裂程度高、裂缝分布密集的区域,形成规模较大、储渗能力好的洞穴型储集体;随着应力减弱、裂缝密度降低,溶蚀作用减弱,以密集分布的溶蚀孔洞发育为主,其储渗能力较好,分布在洞穴型储集体的外围,成为溶蚀孔洞型储集体;随着应力依次减弱,裂缝分布密度降低,溶蚀能力也越来越弱,形成最外围分布的裂缝-孔洞型储集体,其储集能力中等,连通性较好;最后,是分布于整个致密灰岩背景下大量的构造裂缝,具有较高的渗透能力,主要起沟通通道的作用。

3.4 运用效果

在断溶体油藏不同类型储集体发育模式的指导下,利用地震结构反演成果(图7a),建立 TH10421 单

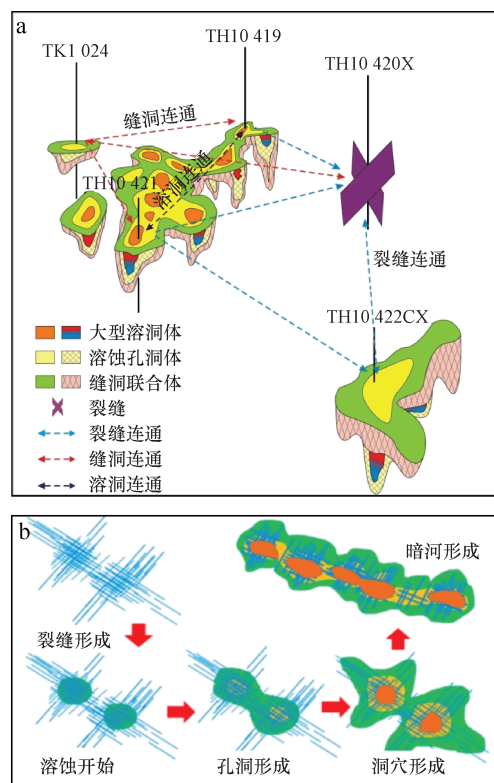


图6 塔里木盆地塔河十区 TH10421 单元“断溶体”储层发育演化模式

Fig. 6 Development and evolution models of faulted-karst reservoirs in the TH10421 unit of the block 10 in the Tarim Basin

a. TH10421 单元缝洞发育模式; b. 缝洞发育演化过程示意图

元不同类型储集体空间分布模型(图7c)。可以发现,该模型洞穴-溶蚀孔洞-裂缝孔洞带-外围裂缝带的

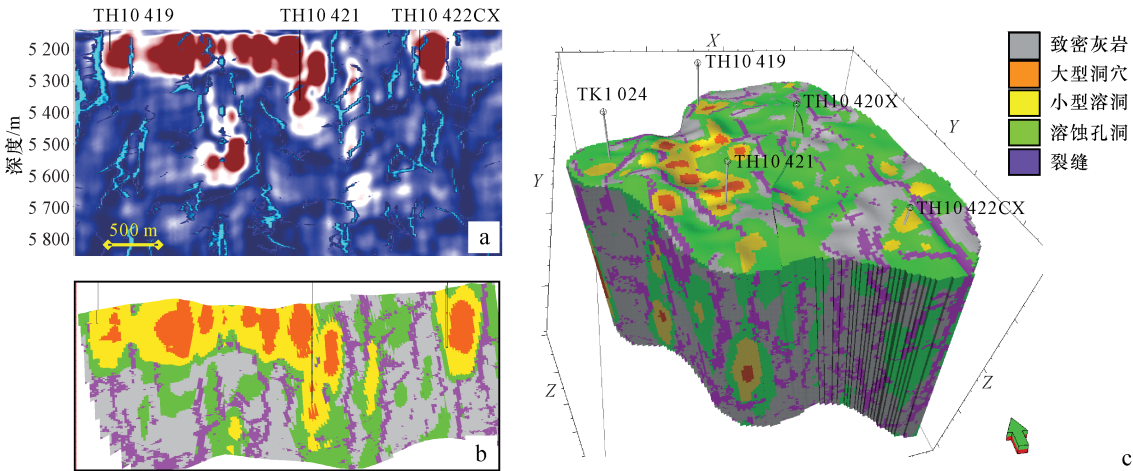


图 7 塔里木盆地塔河十区 TH10421 单元基于地震结构反演的“断溶体”储层缝洞模式

Fig. 7 Faulted-karst reservoir models based on seismic texture inversion of TH10421 fracture-cavity unit of the block 10 in the Tarim Basin
a. TH10421 单元缝洞发育模式;b. 缝洞发育演化过程示意图;c. 缝洞单元融合体

表 1 塔里木盆地 TH10421 单元 2016—2019 年
开发效果对比

Table 1 Comparison of the development of TH10421 unit in the Tarim Basin from 2016 to 2019

年度	单元累产油/ (10 ⁴ t)	单井产能/ (t·d ⁻¹)	含水率/ %	阶段采出程度/ %
2016	115.16	13.22	75.03	15.27
2017	117.43	20.70	67.38	15.63
2018	119.57	21.33	64.71	16.07
2019	121.27	22.48	63.65	16.36

接触关系清晰,储集体变化合理,其结果忠实于单井资料,三维空间变化符合缝洞溶蚀过程及发育模式。

该研究成果自 2016 年在 TH10421 单元运用以来,有效指导了单元的开发,尤其是注水注气、流场调整等工作的实施,单元实施一年后累产油增加 3.27×10^4 t,平均单井能力上升 7.48 t/d,综合含水下降 7.65%,采出程度上升 0.36%,开发效果显著改善(表 1)。

4 结论

- 1) 走滑断裂的花状构造顶部破碎严重,分布范围大,岩溶作用强,是优质断溶体储层形成的地质基础。
- 2) 在断裂控制的岩溶背景下,早期的裂缝破碎带在构造应力下扩大溶蚀,逐步演化形成断溶体的储层空间,建立了相应的断溶体发育模式。
- 3) 断溶体储层从核部到边部整体呈现出:溶蚀程度逐渐变弱、裂缝密度逐渐降低、物性逐渐变差的趋势。
- 4) 基于地震结构反演属性(Texture),通过断溶体发育模式约束,采用属性截断的方式建立了 4 种主要溶蚀相带的储集体分类模型,呈现出了相带渐变特征。

参 考 文 献

[1] 鲁新便. 塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏开发地质研究中的若干问题[J]. 石油实验地质, 2003, 25(5): 508-512.
Lu Xinbian. Several problems in study of development programine of Ordovician carbonate reservoirs in Tahe Oilfield, Tarim basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(5): 508-512.

[2] 胡文革, 鲁新便. 塔河碳酸盐岩缝洞型储集体的分类表征技术[C]. 陕西西安: 油气田勘探与开发国际会议, 2015.
Hu Wenge, Lu Xinbian. Characterization and classification of carbonate fractured-cavity reservoirs in Tahe Oilfield[C]. Xi'an: International Field Exploration and Development Conference, 2015.

[3] 李阳. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 115-121.
Li Yang. The theory and method for development of carbonate fractured-cavity reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 115-121.

[4] 陈新, 路鹏程, 彭传平, 等. 哈得逊油田奥陶系碳酸盐岩油藏模式探讨[J]. 石油地质与工程, 2017, 31(6): 61-64.
Chen Xin, Lu Pengcheng, Peng Chuanping, et al. Discussion of Ordovician carbonate reservoirs in the Hadexun oilfield[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2017, 31(6): 61-64.

[5] 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.

[6] 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]. 2008, 29(5): 565-573.

[7] 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.
- [8] 赵雪凤, 朱光有, 刘钦甫, 等. 深部海相碳酸盐岩储层孔隙发育的主控因素研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 514–521.
- Zhao Xuefeng, Zhu Guangyou, Liu Qinfu, et al. Main control factors of pore development in deep marine carbonate reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 514–521.
- [9] 熊钰, 叶海峰, 蔡明金, 等. 大尺度串联双缝洞碳酸盐岩油藏的应力响应分析[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(2): 22–29.
- Xiong Yu, Ye Haifeng, Cai Mingjin, et al. Pressure response analysis of large scale series double fracture-cavity carbonate reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(2): 22–29.
- [10] 汪周华, 肖阳, 郭平, 等. 缝洞型碳酸盐岩气藏高温高压气水两相渗流特征[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(2): 47–52.
- Wang Zhouhua, Xiao Yang, Guo Ping, et al. Gas-water flowing characteristics under high temperature and high pressure in fractured-cavity carbonate gas reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(2): 47–52.
- [11] Billi A, Valle A, Brilli M, et al. Fracture-controlled fluid circulation and dissolutional weathering in sinkhole-prone carbonate rocks from central Italy[J]. Journal of Structural Geology, 2007, 29(3): 385–395.
- [12] 郑和荣, 刘春燕, 吴茂炳, 等. 塔里木盆地奥陶系颗粒石灰岩埋藏溶蚀作用[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 9–15.
- Zheng Herong, Liu Chunyan, Wu Maobing, et al. Burial dissolution of Ordovician granule limestone in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 9–15.
- [13] 王光强, 周小康, 朱焕. 沉积相结合地球物理属性预测碳酸盐岩储层[J]. 石油地质与工程, 2017, 31(1): 48–51.
- Wang Guangqiang, Zhou Xiaokang, Zhu Huan. Prediction of carbonate rock reservoir by combination of sedimentary facies and geophysical attributes[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2017, 31(1): 48–51.
- [14] 许晓凤. 基于岩相类型的碳酸盐岩储层预测方法研究[J]. 石油地质与工程, 2017, 31(2): 17–21.
- Xu Xiaofeng. Reservoir prediction of carbonate rocks based on lithofacies classification[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2017, 31(2): 17–21.
- [15] 巫波, 刘遥, 荣元帅, 等. 蚂蚁追踪技术在缝洞型油藏裂缝预测中的应用[J]. 断块油田, 2014, 21(4): 453–457.
- Wu Bo, Liu Yao, Rong Yuanshuai, et al. Application of ant tracking technology in fracture prediction of fracture-vuggy reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(4): 453–457.
- [16] 孟伟. 碳酸盐岩岩溶缝洞型油气藏勘探开发关键技术: 以塔河油田为例[J]. 海相油气地质, 2006, 11(4): 48–53.
- Meng Wei. The key technologies for exploration and development of fractured/cavemed karst reservoirs: A case of Tahe Oil Field, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(4): 48–53.
- [17] 郭臣, 解慧, 聂延波, 等. 塔河碳酸盐岩缝洞型油藏超稠油注氮气实验研究[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(4): 22–26.
- Guo Chen, Xie Hui, Nie Yanbo, et al. Research on nitrogen gas injection in super heavy oil of Tahe carbonate fracture-cave type reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(4): 22–26.
- [18] 田亮, 李佳玲, 袁飞宇, 等. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏定量化注水技术研究[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(2): 86–89.
- Tian Liang, Li Jialing, Yuan Feiyu, et al. Quantitative water injection of fractured-cavity oil reservoir in carbonate rocks in Tahe oilfield[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2018, 32(2): 86–89.
- [19] 张文博, 金强, 徐守余, 等. 塔北奥陶系露头古溶洞充填特征及其油气储层意义[J]. 特种油气藏, 2012, 19(3): 50–54.
- Zhang Wenbo, Jin Qiang, Xu Shouyu, et al. Paleo-cavern filling characteristics and hydrocarbon reservoir implication in the Ordovician outcrops in northern Tarim Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(3): 50–54.
- [20] 温志新, 王红漫, 漆立新, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层预测研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 94–100.
- Wen Zhixin, Wang Hongman, Qi Lixin, et al. Research on the prediction of Ordovician carbonate reservoir of fissure-cave type in the Tahe Oilfield[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1): 94–100.
- [21] 韩革华, 漆立新, 李宗杰, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 860–870.
- Han Gehua, Qi Lixin, Li Zongjie, et al. Prediction of the Ordovician fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 860–870.
- [22] 姚清洲, 孟祥霞, 张虎权, 等. 地震趋势异常识别技术及其在碳酸盐岩缝洞型储层预测中的应用——以塔里木盆地英买2井区为例[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 101–106.
- Yao Qingzhou, Meng Xiangxia, Zhang Huquan, et al. Principles and application of a seismic trend anomaly diagnostic technique[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 101–106.
- [23] Gao D. Volume texture extraction for 3D seismic visualization and interpretation[J]. Geophysics, 2003, 68(4): 1294–1302.
- [24] Gao D. Structure-oriented texture model regression: Application to seismic structure visualization and interpretation[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2006, 25(1): 3541.
- [25] Gao D. Application of three-dimensional seismic texture analysis with special reference to deep-marine facies discrimination and interpretation: Offshore Angola, west Africa[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(12): 1665–1683.
- [26] Gao D. Latest developments in seismic texture analysis for subsurface structure, facies, and reservoir characterization: A review[J]. Geophysics, 2011, 76(2): W1–W13.
- [27] 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 carbonate reservoirs of Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 15–21.