

引用格式:贾俊.叙利亚Tishirine油田复杂碳酸盐岩储层有效性综合评价[J].油气藏评价与开发,2020,10(2):30-36.

JIA J. Comprehensive evaluation for effectiveness of complex carbonate reservoir: A case from Tishirine Oilfield in Syria[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 30-36.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.02.005

叙利亚 Tishirine 油田复杂碳酸盐岩储层 有效性综合评价

贾俊^{1,2}

(1.绵阳师范学院资源环境工程学院,四川 绵阳 621006;2.西南石油大学地球科学与技术学院,四川 成都610500)

摘要:储层有效性是制约油气藏高效开发的关键因素,也是储层评价的难点之一。叙利亚T油田C组、J组碳酸盐岩裂缝性油藏岩性、孔隙结构复杂,储集空间多样,基质孔隙高孔低渗,产量低。构造作用形成的裂缝对基质储层渗流能力改造明显,但裂缝有效性测井评价存在多解性,基质—裂缝型复杂碳酸盐岩储层有效性标准亟待建立。利用岩心、扫描电镜、压汞等分析化验资料标定测井曲线,结合多元回归方法,构建了包括岩性、物性、孔隙结构、测井响应、储层品质因子和流动指数等多参数的储层有效性综合评价标准,全面评价此类复杂碳酸盐岩储层,为油藏高效开发提供技术支撑。

关键词:Tishirine 油田;碳酸盐岩;双孔双渗;储层有效性;综合评价

中图分类号:TE31

文献标识码:A

Comprehensive evaluation for effectiveness of complex carbonate reservoir: A case from Tishirine Oilfield in Syria

JIA Jun^{1,2}

(1.School of Resource and Environmental Engineering, Mianyang Teachers' College, Mianyang, Sichuan 621006, China;

2.School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: Reservoir effectiveness is a key factor restricting the efficient development and also one of the difficulties in reservoir evaluation. Formation C and J of the T oilfield in Syria are carbonate fractured reservoirs. The diversified storing space, complex lithology, pore structure and other reservoir characteristics lead to high porosity and low permeability of matrix pore. Although fractures formed by tectonic action have improved reservoir's seepage capacity significantly, there still have great ambiguity in fracture effectiveness well logging interpretation. It is urgent to establish a criterion for the effectiveness of matrix-fracture complex carbonate reservoirs. According to the above problem, geology and rock physics analysis such as core observation, scanning electron microscopy (SEM) and mercury injection data are used to calibrate well logging. In combination with multivariate statistical method, the comprehensive evaluation standard of reservoir effectiveness, including the lithology, physical properties, pore structure characteristics, logging response and reservoir parameters like reservoir quality factor and flow index of different reservoir storing space, has been established. This study provides technical support for comprehensive evaluation and efficient development of such complex carbonate reservoirs.

Key words: Tishirine Oilfield carbonate, dual-porosity and dual-permeability, reservoir effectiveness, comprehensive evaluation

贾承造等^[1]研究认为,未来10~20年,非常规油气将扮演日益重要的角色,勘探开发将由常规储层转向致密油气、页岩气、火山岩等非常规储层^[2-3],储

层有效性成为制约油气藏有效开发的关键因素^[4-6]。叙利亚Tishirine油田C组、J组碳酸盐岩裂缝性储层包括泥晶灰岩、粒泥灰岩、泥灰岩、颗粒灰岩等不同

收稿日期:2019-04-16。

作者简介:贾俊(1982—),男,博士,助理研究员,从事岩石物理分析和地球物理勘探方面的研究。通讯地址:四川省绵阳市涪城区绵兴西路166号,邮政编码:621000。E-mail:e.cruiser@163.com

岩性;储集空间多样,基质孔隙、裂缝、裂缝—孔隙3种不同类型的储层同时发育,孔隙结构复杂。与国内同类型油藏相比,储层特征表现为基质孔隙发育,孔隙度普遍大于16%,但有效孔隙不发育导致渗流能力较低($K < 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),而构造作用形成的裂缝可显著改善储层渗流能力,有利于高产。鉴于储层岩性、储集空间类型、孔隙结构以及裂缝发育对储层有效性的影响尚不明确,有必要以地质资料为基础,配以岩石物理、测井和数学方法,探索建立储层有效性综合评价标准,指导油藏高效开发。

1 区域地质概况

Tishirine 油田(T油田)位于叙利亚东部油气产量较丰富的 Jbisseh 地区,其区域构造为一个大型背斜,区内断层以 NE-SW 向低幅度断层为主,大部分断层在晚白垩世到第三纪油气成藏期成为重要的油气运移通道。T油田属于海相沉积中的碳酸盐岩斜坡相沉积,第三纪的 Chilou(C组)和 Jaddala组(J组)地层形成于陆棚正常海相环境到受限的水下蒸发环境,其中C组属于潮坪相—浅海斜坡相,J组属于深海斜坡相。

C组地层埋藏深度介于600~700 m,平均厚度约250 m,矿物成分以方解石为主,占90%以上,局部含少量白云石、黏土矿物、微量黄铁矿、钾长石、斜长石以及石英等。J组地层平均埋深800 m,厚度介于417~500 m,矿物成分以泥晶方解石为主,含少量黏土(陆源泥质)、燧石等。两套储层基质孔隙高孔低渗,有效孔隙不发育。构造作用形成的裂缝使得碳酸盐岩基质孔隙型储层物性得到改善,裂缝的渗透率往往比基质渗透率高几个数量级。

2 储层类型

按成因和形态可将T油田目的层储集空间划分为基质孔隙和裂缝2大类(图1、图2、图3)。其中,灰岩储层孔隙类型以粒内孔隙、晶间微孔隙和粒内残余孔隙为主,其次是细小溶孔,这几类孔隙与超微裂隙共同组成基质孔隙。孔隙型储层在C组和J组均广泛发育,声波测井(AC)孔隙度反映岩石基质孔隙度,无轴伽马(CGR)曲线能较好地反映泥质含量,采用CGR-AC交会图能较好地划分孔隙型储层级别:

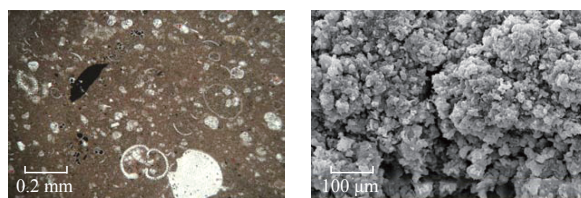


图1 基质孔隙类型
亮晶方解石和有机质充填后残余孔隙 (泥晶灰岩,埋深1 173.78 m,×50) 晶间微孔 (泥晶灰岩,T-295P,埋深896.7 m)

图1 基质孔隙类型

Fig. 1 Pore types of matrix

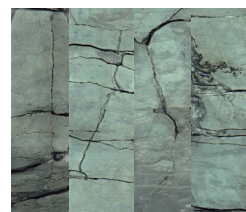


图2 不同产状构造裂缝

Fig. 2 Structural fractures with different occurrence

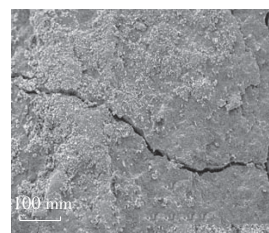


图3 微裂缝SEM照片(泥晶生物灰岩,埋深1 200.8 m)

Fig. 3 SEM image of micro fracture (Micritic biogenic limestone with burial depth of 1 200.8 m)

I类优质孔隙型储层具有低伽马、高声波时差的特点;II类孔隙型储层的声波时差虽为高值,但泥质含量较高,CGR值介于13~26 API;III类储层的泥质含量最大,CGR值均大于17 API。

研究区以构造缝为主,成岩作用形成的压溶缝(缝合线)次之,有少量层理、层面缝发育,其中构造缝对油气的储渗贡献大^[7],缝合线的缝宽一般为几毫米至几十毫米不等,且大部分被方解石、沥青质和泥质充填,对储层渗透性贡献较小。由于裂缝受发育规模、产状、充填矿物类型及充填情况的综合影响,依赖单一的常规测井手段评价裂缝有效性难度较大。通常情况下,大段构造裂缝发育段易形成I类裂缝型储层,声波测井出现周波跳跃,电阻率受流体的影响,出现尖峰,70%有中等以上的油气显示;大裂缝偶发但微裂缝发育段,形成II类储层,油气显示较好;由于裂缝的开启程度相对较小,微裂缝及压溶缝发育段为III类裂缝型储层,油气显示级别较低。

3 孔隙型储层有效性

3.1 岩性

T油田岩性主要为泥粒灰岩、粒泥灰岩、泥灰岩、颗粒灰岩,也见灰质云岩和硬石膏发育。硬石膏为非储集岩,从泥粒灰岩、粒泥灰岩、泥灰岩到颗粒灰岩,随着生物粒屑含量增多,颗粒灰岩和白云岩含量增大,粒径变粗,岩石结构由基质支撑转变为颗粒支撑,储层物性逐渐变好。

3.2 物性条件

储集、渗流能力是影响储层有效性的重要因素^[8-11]。相对于国内常见的低孔致密碳酸盐岩^[12-14],T油田基质孔隙发育,C组孔隙度分布在5%~30%,平均值为21.54%;J组岩心孔隙度分布在10%~30%,平均值为16.24%。但是,结合核磁共振分析结果,岩心T2谱大部分分布在10 ms左侧,孔隙以不可动的小孔和微孔为主,大孔欠发育,岩心孔隙度大部分为无效孔隙,有效孔隙度仅占6%。

受裂缝发育影响,研究区渗透率值分布范围较广,介于 $(0.01 \sim 1\ 000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,呈现基质低渗、裂缝高渗的双孔双渗特征(图4),基质孔隙度与渗透率呈正相关关系,储层储、渗能力主要受孔隙发育及孔隙结构影响,其中,C组、J组基质孔隙渗透率普遍小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率分别为 $0.76 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,当有构造裂缝发育时,储层表现异常高渗特征,渗透率最高可达 $1\ 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。采用流动带指标划分水力流动单元的方法^[15-17],分别计算了流动带指标(FZI)和储层品质因子(RQI),建立了储层的储、渗能力分类评价标准(表1)。

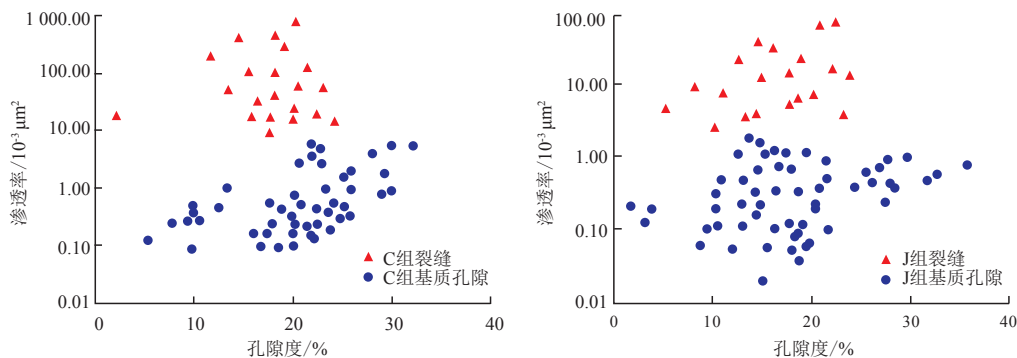


图4 C、J组地层岩心孔渗关系

Fig. 4 Relation between core porosity and permeability of formation C and J

表1 储、渗能力分类评价

Table 1 Classification evaluation of storage and seepage capacity

储层分类	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	流动单元指数	储层品质因子
I类	24.763	1.920	0.846	0.278
II类	22.084	0.945	0.730	0.207
III类	19.493	0.426	0.611	0.148
非储层	16.835	0.012	0.132	0.027

3.3 孔隙结构

吴松涛、张龙海等^[18-19]研究认为,孔隙、喉道类型以及它们的配合情况,与储集层的物理特性和储集性能有密切关系,孔隙结构是影响储层有效性的另一重要因素。分析研究区内67块岩样的压汞曲线,排驱压力分布范围0.696~38.3 MPa,中值压力为1.18~101.2 MPa,对应的中值半径为0.011~0.63 μm ,压汞参数分布范围大,反映储层非均质性强,孔喉结构复杂。依据曲线形态,按物性条件将孔隙结构分为4类,即I、II、III类储层(红、蓝、黄)和非储层(黑)。对压汞曲线进行Bessel函数和“J”函数处理^[20-21],评价储层孔隙结构有效性(表2、图5)。

I类储层排驱压力、中值压力低值,最大孔喉半径可达1.063 μm ,中值半径0.381 μm ,孔喉分布呈粗歪度,分选好。渗透率贡献值呈双峰特征,频带分布宽(0.1~0.75 μm),该类储层的有效孔隙达90%以上,测试能够获得高产工业油流。II类储层排驱压力增大至2.234 MPa,中值半径0.2 μm ,渗透率贡献值呈单峰态,孔喉半径分布范围收窄,分选较好,该类储层经过储层改造能够获得中到高产的工业油流。与I、II类储层相比,III类储层孔喉结构差,排

表2 岩心孔隙结构分类评价
Table 2 Classification evaluation of pore structure

压汞参 数	均值系 数XP	分选系 数CS	歪度系 数SK	变异系 数CC	饱和度中 值压力/ MPa	饱和度中 值半径/ μm	排驱 压力/ MPa	最大孔喉 半径/ μm	最大进汞 饱和度/ %	残留汞 饱和度/ %	视退汞 效率/ %	视孔喉 体积比	平均毛管 半径/ μm	综合物 性指数
I类	10.725	1.624	1.066	0.149	2.611	0.381	0.696	1.063	97.556	67.469	30.896	2.668	0.413	0.245
II类	11.202	1.280	1.697	0.116	3.751	0.200	2.234	0.351	94.544	57.666	38.478	1.798	0.159	0.151
III类	12.560	1.177	1.079	0.095	6.187	0.178	3.703	0.270	94.566	67.126	28.622	2.796	0.060	0.110
非储层	11.673	2.329	1.268	0.216	28.884	0.040	17.209	0.062	82.243	66.795	18.98	14.984	0.026	0.029

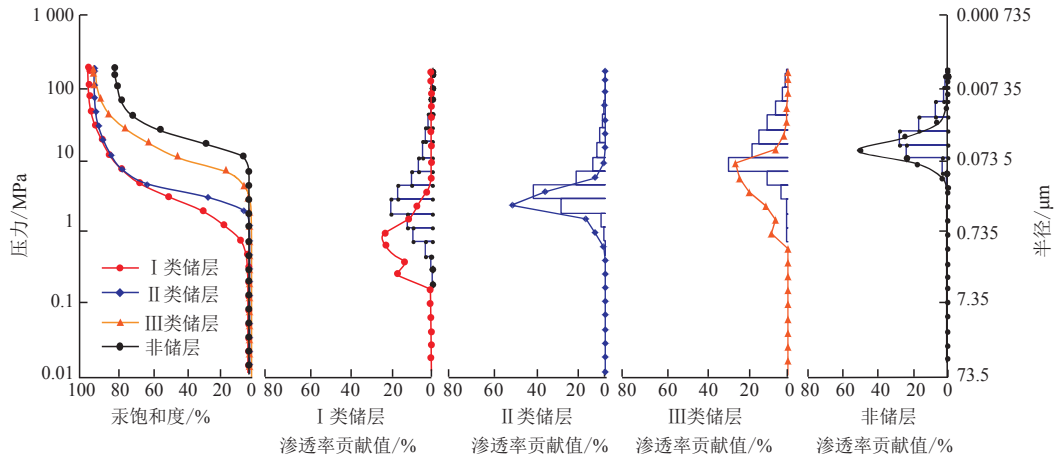


图5 不同类型储层毛管压力曲线

Fig. 5 Capillary pressure curves of different types of reservoirs

驱压力为 3.703 MPa, 中值压力 6.187 MPa, 孔喉半径分布在 0.074 ~ 0.273 μm, 中值半径 0.178 μm, 渗流能力较差, 此类储层虽经过改造产能仍然较低。

3.4 孔隙型储层有效性分类系数

将与渗透率正相关的有效孔隙度、主流喉道半径的乘积与渗透率负相关的启动压力梯度之商取对数, 计算储层有效性分类系数:

$$C = \ln \frac{(\varphi_e / \varphi_{e,max})(r_m / r_{m,max})}{P / P_{max}} \quad (1)$$

式中: C 为储层有效性分类系数; φ_e 为有效孔隙度, %; $\varphi_{e,max}$ 为最大有效孔隙度, %; r_m 为主流喉道半径, μm; $r_{m,max}$ 为最大主流喉道半径, μm; P 为启动压力梯度, MPa/m; P_{max} 为最大启动压力梯度, MPa/m。

结果表明, 整体上储层有效性分类系数与渗透率有较好的相关性, 随着渗透率的增大, 分类系数随之增大且具有明显的分类性, 即非储层分类系数低于 -2.8, II类至 I类储层分类系数分别大于 -0.8 和 5。

4 裂缝型储层有效性

基质储集空间有效孔隙不发育, 孔隙结构复杂,

裂缝对改善储层渗流能力, 提高产能具有重要意义。基于 26 口井岩心、薄片、扫描电镜等分析资料获取了研究区裂缝发育特征。T 油田 C 组裂缝走向主要为 NE 和 NW 向, 裂缝的倾角多介于 30° ~ 70°; J 组裂缝的走向相对单一, 集中在 NNE 向 15° 左右, 裂缝倾角普遍较高, 主要为 60° 以上的斜交缝和高角度缝; 成像测井开启裂缝线密度统计结果表明, C 组平均裂缝线密度为 0.4 条/m, J 组裂缝相对发育, 线密度为 0.8 条/m。

童亨茂^[22]研究表明, 成像测井能直观反映裂缝的产状、充填和延伸情况, 但数据来源有限; 常用的双侧向幅度差、三孔隙度法受裂缝充填物、充填程度以及裂缝产状影响, 评价复杂裂缝有效性往往具有多解性。高震等^[23]认为, 常规测井因其纵向分辨率的限制只能给出具有平均意义的裂缝参数。此外, 常规测井资料中对于裂缝识别干扰信息较多, 针对性相对较差。因此, 研究采用加权多元参数来评价裂缝有效性^[24]。首先, 提取对裂缝响应明显的 8 项常规测井参数, 即井径参数 $ABS(CAL_c - CAL)$ 、光电吸收截面指数 (PE)、声波时差 (AC)、补偿中子 (CNL)、补偿密度 (DEN)、双侧向电阻率参数 $ABS(R_T - R_{X0})/R_T$ 、 $ABS(R_T/R_{X0} - 1)$ 、 $10^{ABS(R_T - R_{X0})}$, 其中 R_T 、 R_{X0} 分别为深、浅

侧向电阻率,ABS是求绝对值运算;2项成像测井参数,包括裂缝面密度(AFDEN)和校正裂缝线密度(FDEN_C)以及层厚(H)共11个参数。对所有参数归一化处理,以消除量纲差异,然后选取常规、成像测井和地质资料完备的8口井作为关键井,通过多元回归分析获取各参数的权系数 V_i : $V_{FDEN_C}=0.253$, $V_{AFEN}=0.244$, $V_{ABS(CAL-CAL)}=0.074$, $V_{PE}=0.082$, $V_{AC}=0.076$, $V_{CNL}=0.068$, $V_{DEN}=0.079$, $V_{H}=0.059$, $V_{ABS(R_{w-R_o})/R_o}=0.026$, $V_{ABS(R_o/R_{w-1})}=0.025$, $V_{10^{ABS(R_{w-R_o})}}=0.014$ 。在裂缝发育层段,提取上述各参数,归一化后分别乘以“权”系数并累加,即为该层段裂缝的有效性评价系数 F :

$$F = \sum_{i=1}^n V_i X_i \quad (2)$$

式中: F 为有效评价系数; X_i 为归一化后的表征裂缝性质的参数; V_i 为“权”系数。

依据地质资料及测试结果标定裂缝的有效性评价系数计算结果,确定裂缝发育评价标准:评价系数 >0.4 为I类;评价系数 $0.25 \sim 0.4$ 为II类;评价系数 $0.13 \sim 0.25$ 为III类。T-224H井856~970 m井段共有4段裂缝发育(图6),其中960~962.4 m、967~969.5 m井段井径有小幅扩径,三孔隙和双侧向无明显指示,

FMI成像测井显示高角度斜交裂缝发育,裂缝密度大、连通性好,相交、几何^[25]、随机校正裂缝密度值^[26]均为高值,裂缝有效性评价系数 >0.5 ,为I类裂缝发育层段;858~866.2 m、869.2~871.3 m井段在863 m处井径扩径,成像测井显示有裂缝发育,产状多为低角度斜交缝,张开度、连通性和裂缝密度均不及下部960~970 m裂缝发育段,裂缝有效性评价系数介于 $0.28 \sim 0.4$,为II类裂缝发育段。相关井段试油和钻井漏失数据与裂缝有效性评价结果相吻合,该井816~1121 m井段初期产油 $30.28 \text{ m}^3/\text{d}$,821~899 m钻进过程中泥浆漏失 $7.68 \text{ m}^3/\text{h}$,957~966 m泥浆漏失 $33.62 \text{ m}^3/\text{h}$,968~976 m漏失 $18.92 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

5 储层有效性综合评价

综合储层物性(孔隙度、渗透率),微观孔隙结构特征参数(排驱压力、喉道半径等),测井响应参数(密度、声波时差、中子、光电吸收截面指数、电阻率等)、孔隙型储层有效性分类系数(C)以及裂缝有效性评价系数(F)等不同参数的分类评价结果,构建了研究区不同类型储层有效性综合评价标准(表3)。其中,总

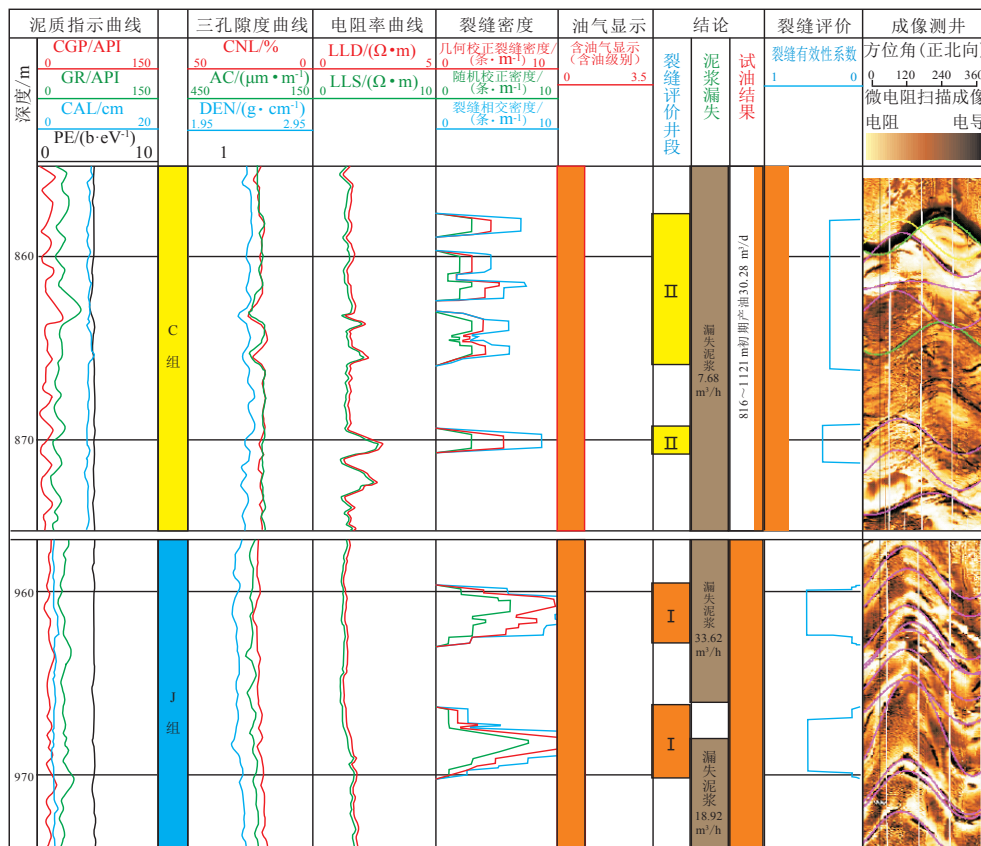


图6 T-224H井裂缝有效性加权多元参数评价结果

Fig. 6 Multi-parameter evaluation results for fracture effectiveness of well-T-224H

表3 叙利亚T油田C、J组储层有效性综合评价
Table 3 Comprehensive evaluation for reservoir effectiveness of formation C and J in T oilfield of Syria

储层分类	沉积微相	岩性	排驱压力/MPa	主流喉道半径/ μm	孔隙度/%			渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$		测井响应					品质因子	流动指数(FZI)	孔隙型储层有效性分类系数	裂缝型储层有效性评价系数
					总孔隙度	有效孔隙度	裂缝孔隙度	基质渗透率	总渗透率	CGR/API	AC/ $(\mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	DEN/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	CNL/%	RT/ $(\Omega\cdot\text{m})$				
I	潮间带、深缓坡相	颗粒灰岩、泥粒灰岩	<1.1	>0.58	≥ 29	≥ 16.5	≥ 0.04	≥ 40	≥ 45	≤ 10	≥ 295.2	≤ 2.30	≥ 30	≥ 3	≥ 1.174	≥ 2.875	5	0.4
					≥ 22	≥ 3.9	≥ 0.33	≥ 1.2	≥ 400	≤ 15	≥ 249.2	≤ 2.47	≥ 20	≥ 0.234	≥ 0.828			
					≥ 24	≥ 5.6	≥ 0.16	≥ 2.1	≥ 150	≤ 15	≥ 282	≤ 2.35	≥ 25	≥ 1.5	≥ 0.296	≥ 0.937		
II	潮间带、深缓坡相	泥粒灰岩、粒泥灰岩	1.1~8	0.15~0.58	≥ 25	≥ 13	≥ 0.02	≥ 22	≥ 26	≤ 20	≥ 282	≤ 2.43	≥ 28	≥ 2.5	≥ 0.938	≥ 2.814	-0.8	0.25~0.4
					≥ 20	≥ 3.5	≥ 0.28	≥ 0.82	≥ 250	≤ 21	≥ 246	≤ 2.48	≥ 19	≥ 0.204	≥ 0.815			
					≥ 22	≥ 5.3	≥ 0.13	≥ 1.4	≥ 100	≤ 21	≥ 275.5	≤ 2.37	≥ 23	≥ 1.2	≥ 0.252	≥ 0.894		
III	深缓坡相、外缓坡相	粒泥灰岩、8~39泥灰岩	0.07~0.15	≥ 22	≥ 8.5	≥ 0.01	≥ 12	≥ 15	≤ 30	≥ 262.4	≤ 2.45	≥ 22	≥ 2	≥ 0.739	≥ 2.618	-2.8	0.13~0.25	
				≥ 17.5	≥ 3.01	≥ 0.2	≥ 0.5	≥ 100	≤ 22	≥ 241	≤ 2.50	≥ 18	≥ 0.169	≥ 0.797				
				≥ 21	≥ 5.0	≥ 0.1	≥ 1.05	≥ 50	≤ 22	≥ 249.3	≤ 2.45	≥ 20	≥ 1.2	≥ 0.22	≥ 0.829			

孔隙度通过三孔隙度曲线交会法计算求得。采用岩心核磁共振分析数据标定核磁测井计算的束缚孔隙与常规测井交会分析,分别优选相关性最好的声波和补偿密度与束缚水孔隙度建立了孔隙型储层和裂缝型储层的束缚水孔隙度拟合公式,最后计算总孔隙度与束缚孔隙度的差值得到有效孔隙度;由于基质孔隙渗透率明显小于裂缝渗透率,根据物性分析结果,将岩心分析渗透率低于 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的岩心与对应的有效孔隙度拟合,建立了基质渗透率计算公式。

6 结论

1) T油田C、J组碳酸盐岩裂缝性油藏同时发育基质孔隙和裂缝双重储集空间,其中基质孔隙平均孔隙度超过16%,但渗透率普遍 $< 1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$;构造裂缝使得碳酸盐岩储层渗流能力得到改善,储层整体表现为基质高孔低渗、裂缝高渗的双孔双渗特征。

2) 以关键井薄片、扫描电镜和成像测井等资料综合标定裂缝响应敏感的测井参数,建立加权多元测井参数评价裂缝有效性,与测试、钻井资料认识一致,丰富了裂缝型储层有效性评价手段。

3) 构建了包含岩性、物性、孔隙结构、测井响应、储层品质因子和流动指数等多参数的储层有效性综合评价标准,可以指导裂缝—孔隙型碳酸盐岩油藏的高效开发。

参考文献

[1] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
JIA C Z, ZHENG M, ZHANG Y F. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,

39(2): 129-136.
[2] 戴金星,倪云燕,吴小奇.中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J].石油勘探与开发,2012,39(3):257-264.
DAI J X, NI Y Y, WU X Q. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.
[3] 邹才能,陶士振,侯连华,等.非常规油气地质学[M].北京:地质出版社,2014.
ZOU C N, TAO S Z, HOU L H, et al. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
[4] 汪勇,向奎,马立群,等.车排子凸起石炭系火山岩储层测井综合评价[J].特种油气藏,2018,25(2):9-10.
WANG Y, XIANG K, MA L Q, et al. Comprehensive logging evaluation of the carboniferous volcanic reservoir in Chepaizi Uplift[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(2): 9-10.
[5] 范文同,郑新华,袁仕俊,等.大北高陡构造地应力测井解释及致密砂岩储层有效性评价[J].工程地球物理学报,2014,11(1):66-70.
FAN W T, ZHENG X H, YUAN S J, et al. Exploration of earth stress logging and effectiveness evaluation of tight-sand reservoir in Dabei area with steep structure[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, 11(1): 66-70.
[6] 司马立强,姚军鹏,黄丹,等.合川气田须家河组低孔隙度低渗透率砂岩储层有效性测井评价[J].测井技术,2011,35(3):254-258.
SIMA L Q, YAO J P, HUANG D, et al. Effectiveness log evaluation of low porosity and low permeability sand reservoir in Xujiahe group of Hechuan Gas Field[J]. Well Logging Technology, 2011, 35(3): 254-258.
[7] 李虎,范存辉,秦启荣,等.川东北元坝中部地区须家河组致密储层裂缝特征及成因探讨[J].油气藏评价与开发,2018,8(2):1-6.
LI H, FAN C H, QIN Q R, et al. Fracture characteristics and its genesis of tight reservoir in Xujiahe formation of central Yuanba area in Sichuan basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(2): 1-6.
[8] 齐宝权,赵佐安,贺洪举,等.应用测井储层品质综合评价指数来判别储层的有效性——以四川盆地西部地区二叠系栖霞组为例[J].石油勘探与开发,2018,35(2):129-136.

- 霞组为例[J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 27-29.
- QI B Q, ZHAO Z A, HE H J, et al. Reservoir effectiveness evaluation based on comprehensive reservoir quality evaluation indexes of well logging: A case study on the Permian Qixia Fm in the western Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(2): 27-29.
- [9] 邵维志, 解经宇, 迟秀荣, 等. 低孔隙度低渗透率岩石孔隙度与渗透率关系研究[J]. 测井技术, 2013, 37(2): 150-153.
- SHAO W Z, XIE J Y, CHI X R, et al. On the relation of porosity and permeability in low porosity and low permeability rock[J]. *Well Logging Technology*, 2013, 37(2): 150-153.
- [10] 李明, 戚楠, 陈朝兵, 等. 甘谷驿油田L2区特低渗透层非均质性及其对油层分布的影响[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(2): 1-6.
- LI M, QI N, CHEN C B, et al. Extra-low permeability reservoir heterogeneity and its effect on the distribution of reservoirs in L2 area of Ganguyi Oilfield[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2019, 9(2): 1-6.
- [11] 赫志兵, 汪忠浩, 张娟, 等. 低孔低渗储层产能评价方法——以东濮凹陷卫城油田为例[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(6): 81-86.
- HE Z B, WANG Z H, ZHANG J, et al. A method of productivity evaluation in low porosity and low permeability reservoirs——By taking Weicheng Oilfield in Dongpu Depression for example[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(6): 81-86.
- [12] 王国亭, 程立华, 孟德伟, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系古岩溶型碳酸盐岩致密储层特征. 形成机理与天然气富集潜力[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 685-695.
- WANG G T, CHENG L H, MENG D W, et al. Characterization and formation of the Ordovician tight paleokarst carbonates in the eastern Ordos Basin and its gas accumulation[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 685-695.
- [13] 魏新善, 陈洪德, 张道锋, 等. 致密碳酸盐岩储集层特征与天然气勘探潜力——以鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东部奥陶系马家沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 319-329.
- WEI X S, CHEN H D, ZHANG D F, et al. Gas exploration potential of tight carbonate reservoirs: A case study of Ordovician Majiagou Formation in the eastern Yi-Shan slope, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(3): 319-329.
- [14] 熊金玉, 李思田, 唐玄, 等. 湖相碳酸盐岩致密储层有机质赋存状态与孔隙演化微观机理[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 756-765.
- XIONG J Y, LI S T, TANG X, et al. Organic matter occurrence and microscopic mechanism of pore formation in the lacustrine tight carbonate reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(5): 756-765.
- [15] 任颖, 孙卫, 张茜, 等. 低渗透储层不同流动单元可动流体赋存特征及生产动态分析——以鄂尔多斯盆地姬堰地区长6段储层为例[J]. 地质与勘探, 2016, 52(5): 974-984.
- REN Y, SUN W, ZHANG X, et al. Characteristics of movable fluids and study of production performance in different flow units of low-permeability reservoirs: An example from the Chang 6 block of the Jiyuan Oilfield in Ordos Basin[J]. *Geology and Exploration*, 2016, 52(5): 974-984.
- [16] 高伟, 王允诚, 刘宏. 流动单元划分方法的讨论与研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(6): 37-40.
- GAO W, WANG Y C, LIU H, et al. The discussion and study on the division methods of flow unit[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2009, 31(6): 37-40.
- [17] ABBASZADEH M, FUJI H, FUJIMOTO F. Permeability prediction by hydraulic flow units——theory and applications[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1996, 11(4): 263-271.
- [18] 吴松涛, 朱如凯, 李勋, 等. 致密储层孔隙结构表征技术有效性评价与应用[J]. 地学前缘, 2018, 25(2): 191-202.
- WU S T, ZHU R K, LI X, et al. Evaluation and application of porous structure characterization technologies in unconventional tight reservoirs[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 191-203.
- [19] 张龙海, 周灿灿, 刘国强, 等. 孔隙结构对低孔低渗储集层电性及测井解释评价的影响[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 671-675.
- ZHANG L H, ZHOU C C, LIU G Q, et al. Influence of pore structures on electric properties and well logging evaluation in low porosity and permeability reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(6): 671-675.
- [20] 赵行, 贾春生, 彭小龙, 等. 储层岩石平均毛管压力J函数研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(20): 47-50.
- ZHAO X, JIA C S, PENG X L, et al. Study on the rock average capillary pressure J function[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(20): 47-50.
- [21] 胡勇, 于兴河, 陈恭洋, 等. 平均毛管压力函数分类及其在流体饱和度计算中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 733-738.
- HU Y, YU X H, CHEN G Y, et al. Classification of the average capillary pressure function and its application in calculating fluid saturation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 733-738.
- [22] 童亨茂. 成像测井资料在构造裂缝预测和评价中的应用[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 60-61.
- TONG H M. Application of imaging well logging data in prediction of structural fracture[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(9): 60-61.
- [23] 高霞, 谢庆宾. 储层裂缝识别与评价方法新进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1460-1465.
- GAO X, XIE Q B. Advances in identification and evaluation of fracture[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(5): 1460-1465.
- [24] 孙建孟, 刘坤, 王艳, 等. 泥页岩储层裂缝识别与有效性评价研究[J]. 测井技术, 2015, 39(5): 613-614.
- SUN J M, LIU K, WANG Y, et al. Fracture identification and effectiveness evaluation research of shale reservoir[J]. *Well Logging Technology*, 2015, 39(5): 613-614.
- [25] 唐佳伟. 成像测井资料处理与裂缝识别方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- TANG J W. Image logging data processing and fracture identification methods research[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [26] SHACKLETON N J, BERGER A, PELTIER W R. An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP site 677[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1990, 81: 251-261.