

塔里木盆地塔河油田4区和6区奥陶系小尺度缝洞储集体概率识别方法

张娟^{1,2}, 杨敏², 谢润成³, 王明², 王虹², 罗紫薇³

[1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 10083; 2. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011;
3. 成都理工大学能源学院, 四川成都 610059]

摘要:塔河油田中、下奥陶统小尺度缝洞储集体类型多样,是未来油田开发的重要潜在目标,但储集空间复杂多变,导致常规测井响应特征混杂不清,储集类型识别难度大。根据钻录井特征、岩心、测井等资料对小尺度缝洞储集体类型进行了划分,通过测井信息交会优选了小尺度缝洞储集体的敏感测井信息,利用多元逐步判别原理,建立了小尺度缝洞类型判别函数方程;通过确定各类储集体母体后验概率识别界限,形成了概率约束下的小尺度缝洞储集体识别方法。结果显示,小尺度缝洞储层可划分为5类,分别为未充填溶洞型、砂泥砾充填溶洞型、裂缝-孔洞型、裂缝-孔隙型和溶孔-孔隙型;自然伽马、电阻率和密度是区分各类缝洞储层的最敏感的测井信号;这5类小尺度缝洞储层的临界概率识别界限分别为0.98,0.98,0.60,0.60和0.60。研究区裂缝-孔洞型、裂缝-孔隙型和溶洞型储层大量发育,但单井和平面间的发育程度存在明显差异,4区小尺度缝洞储集体较6区更为发育,垂向上呈现两期岩溶特征。小尺度缝洞识别方法体现了“逐级识别”思路,最大程度上避免了多重测井信息的混淆,能有效提高缝洞识别效果,为深入认识油田小尺度缝洞发育规律及开发潜力提供了有效方法。

关键词:常规测井;概率识别;小尺度缝洞储集体;奥陶系;塔河油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Probability-constrained identification of Ordovician small-scale fractured-vuggy reservoirs in Blocks 4-6, Tahe Oilfield, Tarim Basin

Zhang Juan^{1,2}, Yang Min², Xie Runcheng³, Wang Ming², Wang Hong², Luo Ziwei³

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

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

3. School of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Various types of small-scale fractured-vuggy reservoirs occur in the Middle-Lower Ordovician of Blocks 4-6 in the Tahe Oilfield, Tarim Basin, and have been considered as the most potential targets for future oilfield development in the area. However, these reservoirs are difficult to identify due to their complex storage space that induces confusing responses during conventional well logging. To tackle the problem, this study starts with classifying the reservoirs according to drilling and logging data as well as core observation, continues with identifying logging responses typical of the reservoirs based on crossplotting well logging parameters, setting up a discriminant function by using the multivariate stepwise discriminant principle and ends with establishing a method for identifying the reservoirs under probability constraints by determining the parent posterior probability identification limits of all types of reservoirs. The results shows that the reservoirs can be classified into five types: unfilled vug, vug filled with sand, clay and gravel, fracture-vug, fracture-pore and dissolved cave-pore types, which can be recognized respectively with critical probability identification limits of 0.98, 0.98, 0.60, 0.60 and 0.60. These reservoirs are sensitive to natural gamma, resistivity and density logging rays. The study suggests that reservoirs of fracture-vug, fracture-pore and cavern types are highly developed in the study area, but their development show great variation vertically in a single well and laterally in the study area. Block 4 develops more fractured-vug reservoirs than Block 6 and shows a vertical two-phase karstification. This identification

收稿日期:2021-07-06;修订日期:2021-11-30。

第一作者简介:张娟(1985—),女,博士研究生、副研究员,碳酸盐岩油藏地质。E-mail: 200603245@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41572130);中国石化西北油田分公司科研项目(KJ201920)。

method embodies well the idea of “step by step identification” and avoids the pitfall of confusing logging signals of these fractured-vuggy reservoirs. Using the method can effectively improve the identification of fractured-vuggy reservoirs, thus providing an effective way for a deeper understanding of the evolution and potential of the reservoirs.

Key words: conventional logging, probability recognition, small-scale fractured-vuggy reservoir, Ordovician, Tahe Oilfield, Tarim Basin

引用格式:张娟,杨敏,谢润成,等.塔里木盆地塔河油田4区和6区奥陶系小尺度缝洞储集体概率识别方法[J].石油与天然气地质,2022,43(1):219-228. DOI:10.11743/ogg20220118.

Zhang Juan, Yang Min, Xie Runcheng, et al. Probability-constrained identification of Ordovician small-scale fractured-vuggy reservoirs in Blocks 4-6, Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 219-228. DOI: 10.11743/ogg20220118.

塔河油田奥陶系油藏是中国典型的缝洞型碳酸盐岩油藏,与国内外其他碳酸盐岩油藏相比埋藏更深、储集类型多样^[1-2]。地震反射上既有串珠、强反射的溶洞体,也有不规则弱串珠、反射杂乱的小尺度缝洞储集体。储集体发育特征及展布规律差异大,储层连通状况复杂,堪称世界上最复杂的碳酸盐岩油藏^[3-4]。塔河油田早期的储集体识别及井位部署主要依靠振幅变化率,以“残丘匹配串珠、强地震反射”为主的规模缝洞体为开发对象^[5]。随着塔河油田奥陶系碳酸盐岩勘探开发程度的日益深入,“串珠、强反射”等强振幅能量特征的识别技术日趋成熟,剩余“串珠”的数量减少、规模变小,仅依靠地震识别的串珠缝洞体来认识潜力区、提高储量动用程度,已经不能满足开发挖潜的需要,勘探开发目标由“串珠”领域转移到“非串珠”领域势在必行^[6-7]。缝洞体的识别是认识储层发育规律的基础,针对大中型尺度的储集体已形成一些识别技术^[8-10],但随着油田开发的进一步深入,在小尺度缝洞储集体识别方面的研究无法满足油田精细开发的需求^[11]。小尺度缝洞的识别相对大尺度缝洞而言更加困难,大型溶洞在地震剖面和常规测井上的识别很容易,钻井过程中易发生漏失、钻具放空等现象^[12]。如何利用常规测井资料进行缝洞识别,一直以来都是油气开发研究中的难点^[13]。成像测井等特殊测井资料虽然在缝洞储层中具有较好的识别效果,但成本较高,不可能所有井都进行成像测井^[14]。目前国内外对小尺度缝洞最为直接的认识和描述主要依靠岩心观察,通过岩心与测井特征对比分析开展储层精细划分和识别,但对于未取心井,解释精度基本取决于研究者经验和掌握地质综合资料的详尽程度^[15]。

塔河油田4区、6区是奥陶系主力油藏,多尺度缝洞系统广泛发育,储层发育规律最为复杂^[16-17]。针对小尺度缝洞系统识别难度大的问题,提出采用岩心约束、缝洞测井信息深度挖掘和数学表征相融合的缝洞概率综合识别方法,为储层类型识别、纵横向小尺度缝

洞系统的成因及分布规律研究奠定良好基础。

1 小尺度缝洞特征

在岩溶地质背景下,流体沿早期裂缝溶蚀扩展,形成的由裂缝沟通的一系列具有一定储渗能力的小溶洞、溶孔群称为小尺度缝洞储集体^[18]。小尺度缝洞体孔洞直径在2~200 mm以内,地震尺度难以识别。塔河油田4区、6区发育多种尺度的缝洞储集体,通过对研究区钻井、录井、岩心和测井资料反映的多尺度缝洞信息综合挖掘,从储层的储渗性能品质出发,根据储渗空间组合、充填性质和测井响应特征将本区小缝洞储层划分为5类,基质型为非储层,孔隙、裂缝均不发育(图1)。

1) 未充填溶洞型储层

未充填溶洞主要指地震尺度不易识别,直径或者放空高度小于2 m的溶洞系统。此类缝洞体在岩心上无法被观察,只能根据钻井放空、漏失和测井曲线异常等特征进行识别。未充填溶洞在常规测井曲线常呈幅度异常增大或降低的特征,表现为深、浅侧向电阻率显著降低,声波时差和中子孔隙度明显增大,密度曲线急剧降低的特征,自然伽马曲线一般呈现低值,若局部充填少量泥质则自然伽马值会略微增大。

2) 砂泥砾充填溶洞型储层

本区常见有砂泥砾充填的溶洞,是因岩溶垮塌沉积而形成,被砂、泥或砾充填。常规测井曲线呈高伽马、低电阻和低密度特征。未被完全充填或压实程度不高的洞穴可具有一定储集性,密度越大,充填程度越高。

3) 裂缝-孔洞型储层

裂缝和孔洞相互沟通形成相对优质的储渗复合体,称为裂缝-孔洞型储层,该类储层一般岩心也很难钻取,岩心往往呈破碎状(破碎岩块可见裂缝面或孔洞,孔洞直径在2~100 mm),钻井时泥浆发生少量漏失,此类储层连续发育时漏失量变大。裂缝-孔洞型

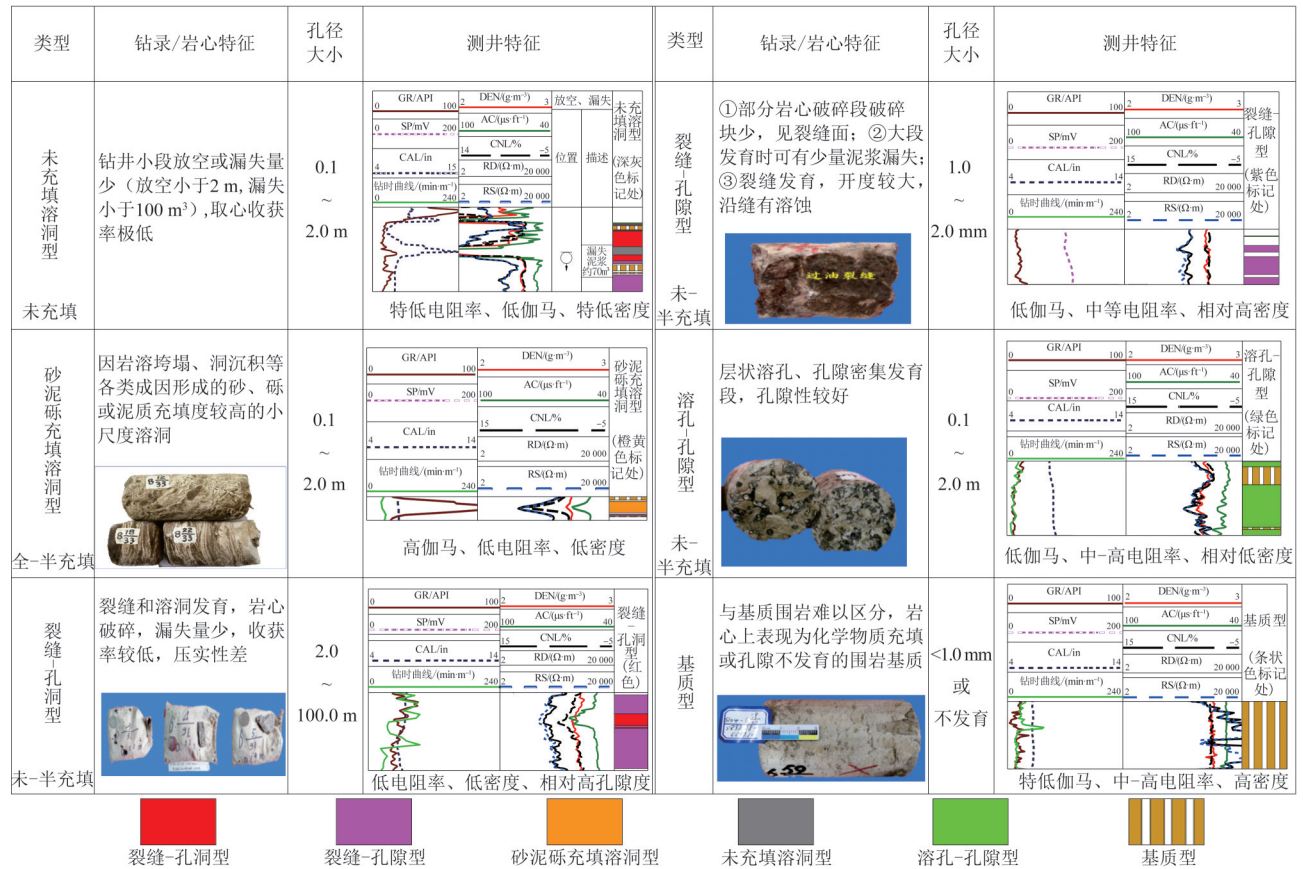


图1 塔河油田奥陶系小尺度缝洞体特征

Fig. 1 Characteristic chart board for Ordovician small-scale fractured-vuggy reservoirs, Tahe Oilfield

储层有效性较高,缝、洞发育,钻井时泥浆侵入明显,深浅侧向电阻明显降低,孔隙性变好。

4) 裂缝-孔隙型储层

裂缝-孔隙型储层中孔隙相对发育,裂缝和孔隙相伴生(孔径1~2 mm),岩心表现为裂缝-溶蚀孔、裂缝-溶蚀孔-次生溶蚀缝、网状缝-溶蚀孔等储-渗组合,裂缝大量发育时岩心可成破碎段,此类储层也具有较好的储、渗能力。裂缝-孔隙型储层在常规测井曲线上是较难识别的一种类型,声波时差曲线小幅度增大(不典型发育时可无明显变化),密度曲线微幅增大,自然伽马曲线无变化,电阻率曲线反应相对敏感,会呈一定幅度差降低,呈中等电阻率、相对高密度特征。

5) 溶孔-孔隙型储层

溶孔-孔隙型储集体是指碳酸盐岩储层中具有一定溶蚀孔洞、孔隙,岩心可见层状溶孔、斑状溶孔、云化灰岩晶间孔、化学充填小溶洞中的溶蚀孔。储集空间以较大的过油孔隙、孔洞组成(孔径1~2 mm),可发育少量的微裂缝。该类储集层具备一定的储集和渗、流能力,若与微裂缝系统匹配也可具有较高的产出潜力。该类型溶孔或孔隙较发育,测井曲线表现为中-高电

阻率背景下相对低密度的特征。

2 多元概率缝洞识别

2.1 多参数交会缝洞识别法

利用常规测井资料识别致密碳酸盐岩中的低孔隙储层是具有较大难度的,尤其是用以识别这种致密背景地层中的小尺度缝洞储集体^[19]。碳酸盐岩地层具有多种储集空间,不同储集空间又具有多种充填组合类型,多重地质信息交叠,导致常规测井响应特征十分复杂,各尺度的缝洞储集体识别难度大^[20]。为突出不同缝、洞储层的测井响应特征,结合各类小尺度缝洞体间的岩性和物性差异,在深入分析反映小尺度缝洞储集体的侧向电阻率、密度、声波、中子等测井系列的电性响应特征基础上,开展了反映多尺度缝洞储集体的测井信息提取工作。由于密度和电阻率对缝洞储集空间及类型的分辨较为敏感,在前人研究基础上构建了密度比和深、浅电阻率比两个特征电性组合参数参与储层缝洞类型识别^[21]。

构建的特征组合测井参数定义如下。

1) 密度比 $DENR$

$$DENR = \frac{DEN(1 - V_{CL})}{DEN_G} \quad (1)$$

$$V_{CL} = \frac{(GR - GR_{min})}{(GR_{max} - GR_{min})} \quad (2)$$

式中: DEN 为密度测井值, g/cm^3 ; DEN_G 为骨架密度, g/cm^3 ; GR 为自然伽马, API; GR_{max} 为自然伽马最大值, API; GR_{min} 为自然伽马最小值, API。密度测井反映地层总孔隙度, 储层裂缝或孔洞越发育, 密度测井值相对岩石骨架密度减小越多, $DENR$ 值则越小。

2) 深、浅电阻率比 RX

$$RX = RD/RS \quad (3)$$

式中: RD 为深侧向电阻率值, $\Omega \cdot m$; RS 为浅侧向电阻率值, $\Omega \cdot m$ 。

缝洞发育层深、浅侧向电阻率之间的幅度差异比较明显, RX 值越大, 反映储层中溶蚀孔洞和裂缝越发育。该参数在不同的缝洞组合类型上可能会有电信息重合的可能, 在应用时需结合多测井信息协同进行储层类型识别。利用地质岩心约束能较准确地寻找到缝洞储集层在测井上独有或共有的测井信息, 针对这些敏感电信息建立缝洞储层综合识别方法是一种成熟的研究思路^[22]。本研究观察了塔河地区大量岩心, 岩心观察覆盖全区, 以岩心刻度的典型小尺度缝洞储集体为地质约束, 提取了 242 个典型样本层段的常规测井

信息, 利用多参数两两交会的方法, 对小尺度缝洞储集体进行电性细化和精细区分, 根据各类储集体所在图形位置差异确定其电性曲线分类界限(图 2)。

自然伽马与深侧向电阻率交会图版区分各类储集体较为明显, 电阻率值越高储层越致密。未充填溶洞型电阻率一般小于 $20 \Omega \cdot m$; 裂缝-孔洞型和砂泥砾充填溶洞型的电阻率值都较低, 一般小于 $100 \Omega \cdot m$; 裂缝-孔隙型电阻值变大, 介于 $100 \sim 400 \Omega \cdot m$; 溶孔-孔隙型由于缺乏裂缝沟通, 变得相对致密, 电阻率值介于 $300 \sim 1\,000 \Omega \cdot m$; 基质型电阻率值普遍高于 $1\,000 \Omega \cdot m$, 最高可达 $20\,000 \Omega \cdot m$ 。自然伽马测井可将不同岩石类型的储集层区分开, 砂泥砾充填溶洞型自然伽马值介于 $40 \sim 75$ API; 其他类型的自然伽马值变动一般在 20 API 附近, 溶孔-孔隙型自然伽马值集中在小于 10 API 范围内(图 2)。从各类储集体的密度或密度比分布区间来看, 基质型密度较高, 中位值在 $2.72 g/cm^3$, 溶孔-孔隙型、裂缝-孔隙型的密度比差异不大, 但密度差异较大, 这与两种储集类型储集空间大小有关。溶孔-孔隙型由于孔隙相对发育, 且存在较大的孔隙空间, 因此密度值相对较低, 密度值介于 $2.55 \sim 2.68 g/cm^3$ 。裂缝-孔洞型的密度比在 $0.70 \sim 0.95$, 砂泥砾充填溶洞型的密度比在 $0.50 \sim 0.80$, 基质型表现为较高的密度比, 普遍高于 0.90 。中子和声波时差测井对小尺度缝洞储集体的区分度较低。本区主要发育垂直和高角度

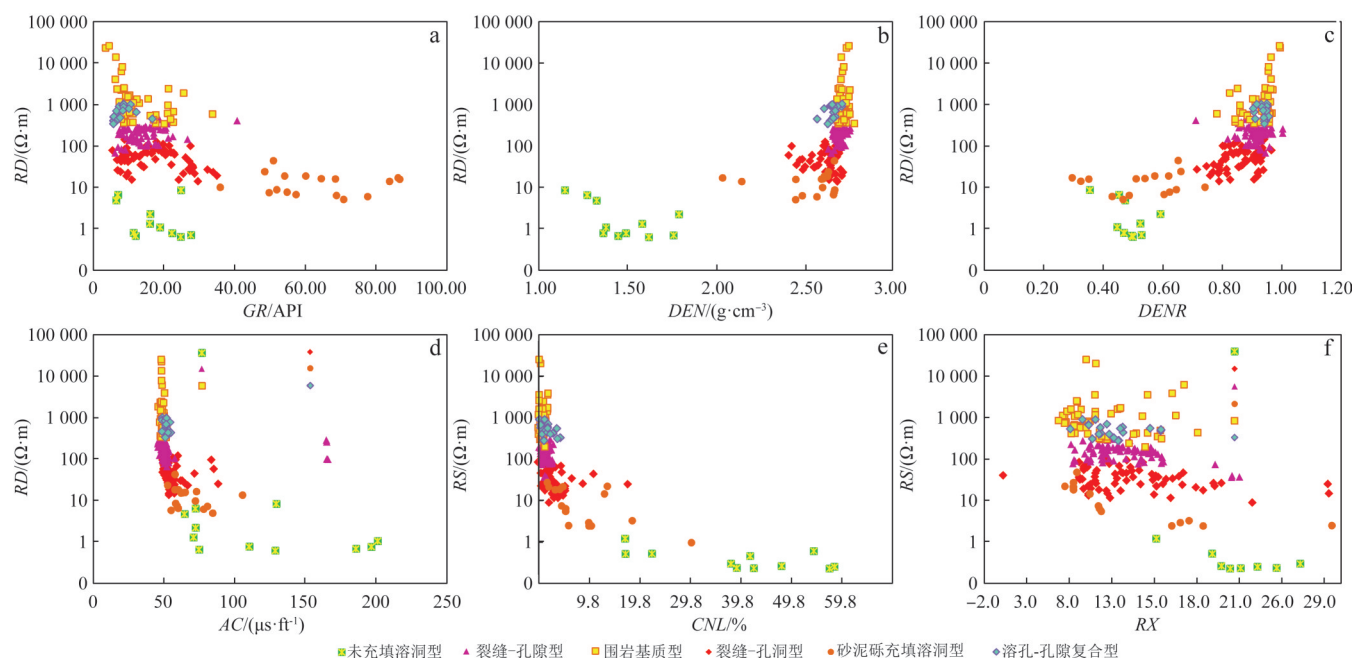


图 2 塔河油田奥陶系小尺度缝洞体测井参数两两交会图

Fig. 2 Pairwise cross plots of logging parameters of the Ordovician small-scale fractured-vuggy reservoirs, Tahe Oilfield

a. 自然伽马与深侧向电阻率电性交会图; b. 密度与深侧向电阻率电性交会图; c. 密度比与深侧向电阻率电性交会图; d. 声波时差与深侧向电阻率电性交会图; e. 中子孔隙度与浅侧向电阻率电性交会图; f. 深、浅电阻率比与浅侧向电阻率电性交会图

裂缝,纵波传播路径不受影响或影响较小,因此对本区各类小缝洞储集体反映不够灵敏。

2.2 小尺度缝洞多元逐步判别方程的建立

多参数的两两交会是深度挖掘反映小尺度缝洞敏感测井信息的基础,从各类参数两两交会分析来看自然伽马、电阻率、孔隙度测井及各类组合测井参数对不同尺度的缝洞体具有一定的识别能力,但由于常规测井系列众多,各测井系列的线性组合变量也各种各样,过多的测井参数并不能更好的反映各类缝洞储集体的差异。为此我们引入逐步判别方法,通过逐步判别方法可将引入的不重要变量剔除,通过变量的动态调整,最终只保留少量判别能力强的变量^[23-29]。

根据全区大量的岩心小尺度缝洞观察结果挑选了6大类,共计242个典型样本,其中裂缝-孔洞型样本64个,裂缝-孔隙型样本69个,砂泥砾充填溶洞样本16个,未充填溶洞型样本11个,溶孔-孔隙型23个,基质型59个。本次共引入了 $GR, AC, CNL, DEN, RD, RS, RX, DENR$ 共计8个参数。在引入测井参数时为了克服电阻率值变化大的效应,将电阻率均进行自然对数取值处理。6种识别类型分别用1-6的整数数字标识,将裂缝-孔洞型标识为“1”,裂缝-孔隙型标识为“2”,砂泥砾充填溶洞型标识为“3”,未充填溶洞型标识为“4”,溶孔-孔隙型标识为“5”,基质型标识为“6”。采用多元逐步判别原理,将引入的8个变量进行动态调整,最后优选出判别能力较显著的特征参数共4个:自然伽马(GR),密度比($DENR$),浅侧向电阻率的自然对数值($\ln RS$),深、浅电阻率比值(RX)。逐步判别结果显示,242个样本共识别正确223个,判别准确率为92.1%,通过判别函数的建立,各类小缝洞储集体得到了很好的区分,典则函数分布上界限比前述的交会图版更加清晰(图3)。典则函数是根据判别过程中Fisher判别系数建立的得分表达式,具体形式如下:

典则函数1:

$$F_1 = 0.337GR + 0.684\ln RS + 47.236DENR + 0.414RD/RS - 50.229 \quad (4)$$

典则函数2:

$$F_2 = 0.216GR - 0.856\ln RS + 17.420DENR + 0.028RD/RS - 14.656 \quad (5)$$

为了进一步提高判别精度,需要建立针对各类型的判别方程,根据判别分析过程中确定的贝叶斯得分系数进一步建立了本区小尺度缝洞储集体和基质的判别方程,具体方程形式如下:

裂缝-孔洞型:

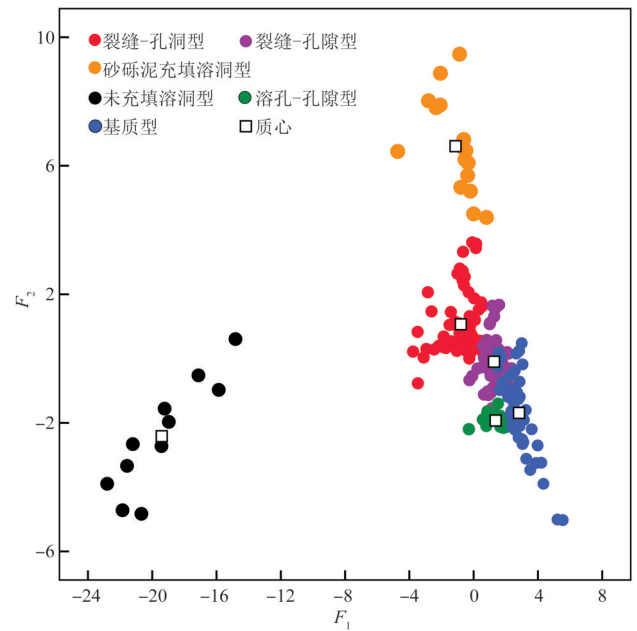


图3 塔河油田奥陶系各类小缝洞储集体典则函数分布

Fig. 3 Distribution diagram of canonical functions for various Ordovician small-scale fractured-vuggy reservoirs, Tahe Oilfield

$$Y_1 = 20.475GR + 10.973\ln RS + 2\,812.899DENR + 27.729RD/RS - 1\,426.902 \quad (6)$$

裂缝-孔隙型:

$$Y_2 = 20.930GR + 14.226\ln RS + 2\,879.849DENR + 28.729RD/RS - 1\,508.333 \quad (7)$$

砂泥砾充填溶洞型:

$$Y_3 = 21.567GR + 9.654\ln RS + 2\,843.581DENR + 28.046RD/RS - 1\,489.357 \quad (8)$$

未充填溶洞型:

$$Y_4 = 13.454GR + 3.433\ln RS + 1\,842.779DENR + 20.141RD/RS - 615.861 \quad (9)$$

溶孔-孔隙型:

$$Y_5 = 20.566GR + 16.756\ln RS + 2\,839.307DENR + 28.679RD/RS - 1\,481.049 \quad (10)$$

基质型:

$$Y_6 = 21.109GR + 18.357\ln RS + 2\,901.105DENR + 29.345RD/RS - 1\,555.245 \quad (11)$$

2.3 小尺度缝洞概率识别

完成判别函数方程的建立与求解后,需要对待判样本根据各母体的后验概率进行二次归类才能达到最佳的识别效果,因此需要对每类储集体的母体后验概率进行计算,最终结合每类储集体后验概率与其他储集类型的交会划定相应的概率识别界限,进而根据概率界限值来确定储集体类型。后验概率计算的原理如下^[30]:

将待判缝洞储集体 $X^*=[x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*]$ 代入函数判别式, 计算它归入每个类的判别函数 $F_k(X^*)$ 值 ($k=1, 2, \dots, g$), 然后计算各个判别函数的数值大小, 最大的判别函数值记为:

$$F_k(X^*) = \max_{1 \leq k \leq g} [F_k(X^*)] \quad (12)$$

式中: m 表示对缝洞信息敏感的测井曲线条数; x_m^* 表示第 m 条测井曲线的测井值; X^* 表示待判样本的测井信息集; k 表示缝洞储集体有 g 种类型; $F_k(X^*)$ 表示待判缝洞储集体归属于第 k 类的判别函数得分。

若计算的某类判别函数值大, 则将 X^* 就归入第 k 类。但为了提高判别效果, 还需计算待判样品 X^* 归入第几类的概率, 利用下式计算:

$$P_k = \frac{e^{F_k(X^*)}}{\sum_{i=1}^g e^{F_i(X^*)}} \quad (13)$$

式中: P_k 表示 X^* 归入第 k 类的后验概率。为避免计算过程中的“溢出”现象, 上式改写为:

$$P_k = \frac{\exp \{F_k(X^*) - \max_{1 \leq i \leq g} [F_i(X^*)]\}}{\sum_{r=1}^g \exp \{F_r(X^*) - \max_{1 \leq i \leq g} [F_i(X^*)]\}} \quad (14)$$

($k, r = 1, 2, \dots, g$)

通过上式可计算出待判缝洞储集体 X^* 的后验概率。实际运用后验概率归类需要考虑到实际样本集的适应性, 需要根据实际的储层样本确定各类缝洞储集体的概率识别界限。本次通过概率交会的方法确定了各类缝洞储集体和基质的概率界限, 裂缝-孔洞型的概率界限为 $P_1 > 0.60$, 裂缝-孔隙型的概率界限为 $P_2 > 0.60$, 砂泥砾充填溶洞型的概率界限 $P_3 > 0.98$, 未充填溶洞型的概率界限 $P_4 > 0.98$, 溶孔-孔隙型的概率界限 $P_5 > 0.60$, 基质型的概率界限 $P_6 > 0.50$ (图4)。通过计算待判缝洞储集体 X^* 的后验概率, 并与各类储集体临界概率进行比较, 确定待判缝洞体的类型归属。

2.4 小尺度缝洞概率识别结果分析

在各类储集体后验概率确定的基础上, 对本区单井开展了小缝洞体概率识别, 形成了6条概率曲线 (图5第9曲线道), 每条曲线代表了对应小缝洞储集体发育概率, 其中 P_1 曲线代表了归属裂缝-孔洞型的概率识别曲线, P_2 曲线代表了归属裂缝-孔隙型的概率识别曲线, P_3 代表了归属砂泥砾充填溶洞型的概率识别曲线, P_4 代表了未充填溶洞型的概率识别曲线, P_5 代表了溶孔-孔隙型的概率识别曲线, P_6 代表了归属围岩基质型的概率识别曲线。当待判缝洞储集体的后验概率值

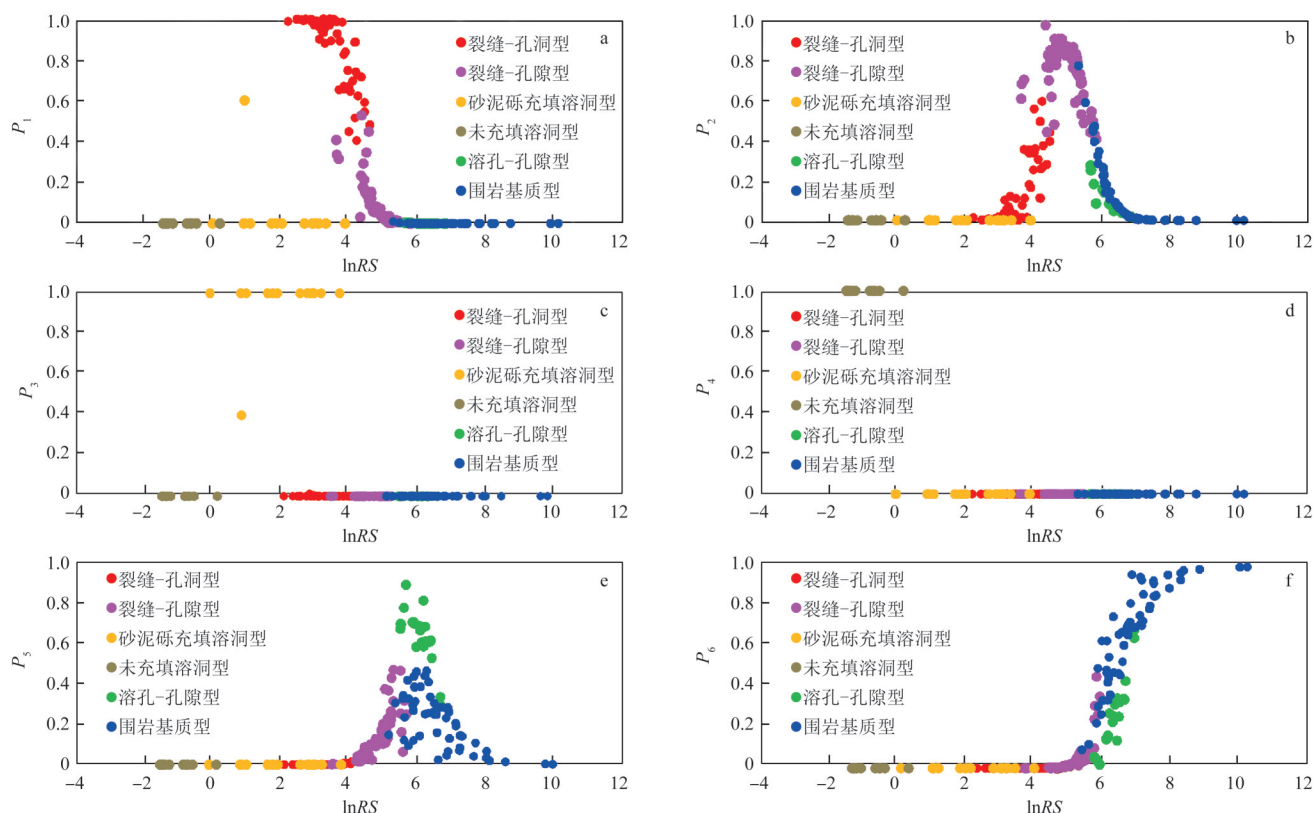


图4 塔河油田奥陶系各类缝洞储集体母体临界后验概率确定关系

Fig. 4 Discrimination diagrams showing the critical posterior probabilities of various types of fractured-vuggy reservoirs, Tahe Oilfield

高于某类缝洞体的临界概率值则判定为该类型。

塔河油田 TH-1 井第一次取心,从岩心底部往顶部观察(图 5 第 10 岩心图片道),在第一回次取心段中下部存在一段 1.7 m 厚的洞沉积砂岩,属于本次划分的砂泥砾充填溶洞型;砂岩顶部为岩心破碎段,破碎段中可见大量油迹,破碎形态不规则,反映小尺度缝洞发育,属于本次划分的裂缝-孔洞型;岩心上部见不规则裂缝面,缝面过油痕迹明显,基质中孔隙相对发育,属

于裂缝-孔隙型。统计了研究区 24 口井和邻区 10 口井的取心段深度位置,缝洞发育深度和位置,取心段概率识别缝洞厚度和位置,通过识别厚度与深度位置对比,缝洞识别结果与取心段缝洞位置的单井吻合率在 62.5 % ~ 100 %,平均为 92 %(图 6),表明本次建立的概率判别识别法对小尺度缝洞储层的识别是准确可靠的,可在塔河油田各油区推广应用。

基于概率的缝洞识别结果有助于认识研究区小尺

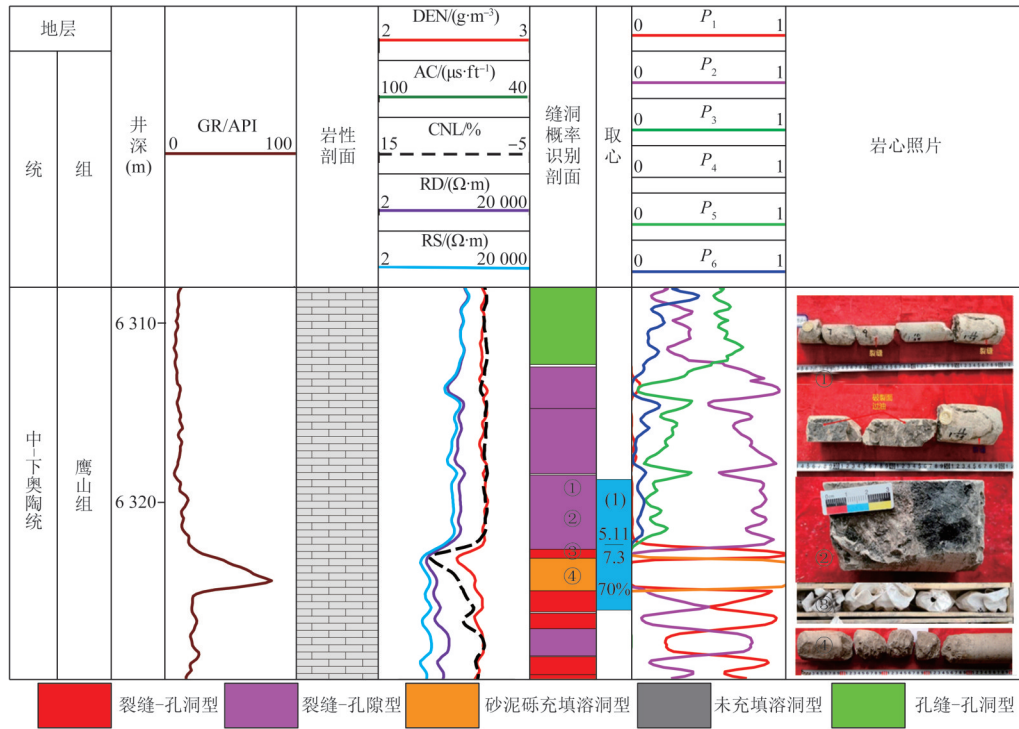


图 5 塔河油田 TH-1 井小尺度缝洞概率识别剖面

Fig. 5 Profile for probability-constrained identification of small-scale fractured-vuggy reservoirs for Well TH-1 in Tahe Oilfield
(取心进尺为 7.3 m,实际收获岩心 5.11 m,取心收获率为 70 %)

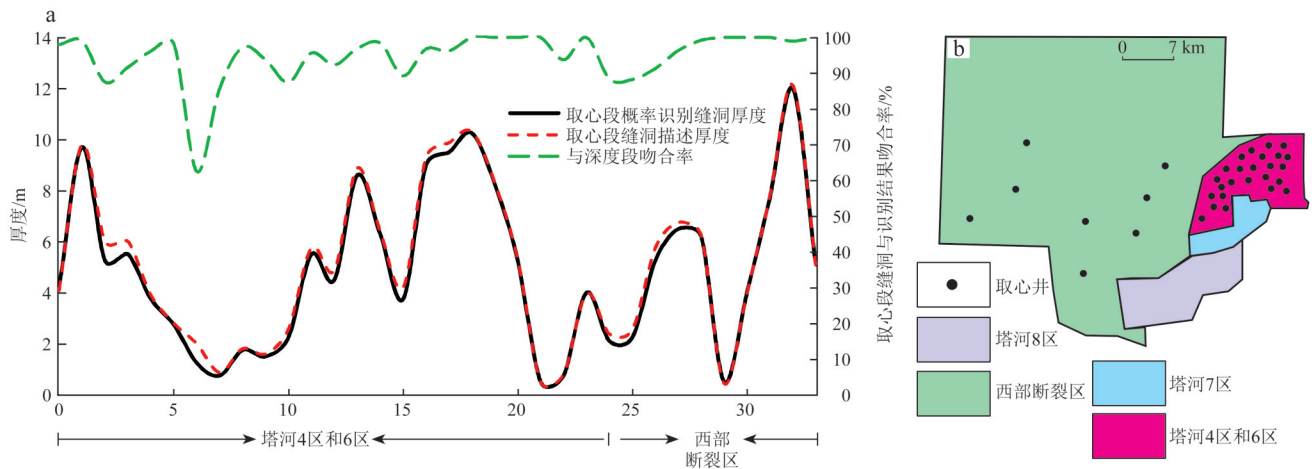


图 6 塔河油田奥陶系取心段岩心缝洞与概率识别结果对比(a)和取心井位置(b)

Fig. 6 Comparison of the fractured-vuggy reservoirs identified under probability constraints with that identified through core observation in Ordovician(a), and the location of the coring well for probability-constrained identification(b), Tahe Oilfield

度缝洞储层纵横向分布规律。基于以上方法,对全区单井进行了缝洞概率识别,图7是一条典型的任意覆盖全区的连井对比图,反映了研究区缝洞发育的整体规律。研究区裂缝-孔洞型、裂缝-孔隙型和溶洞型储层大量发育,但单井间、平面间的发育程度存在明显差异,4区小尺度缝洞储集体较6区更为发育。溶洞、孔洞发育段纵向上呈现明显的两段分布特征,距 T_7^4 界面深度50 m以内和深部105~175 m(甚至更深处)范围内都是溶洞、孔洞和裂缝主要发育段,反映了海西早期岩溶发育了两期岩溶,垂向上洞穴层、缝洞层呈上下两层产出趋势。靠近 T_7^4 不整合面附近70 m以内是溶孔-孔隙型储层主要发育区,此类储层的形成与表层岩溶作用有关。以上规律与钻井、录井和生产揭示的缝洞发育特征也是吻合的,表明该缝洞识别方法可以为全区的储层认识和精细开发提供帮助。

3 结论

1)塔河4区、6区小尺度缝洞储层划分为5类,包

括未充填溶洞型、砂泥砾充填溶洞型、裂缝-孔洞型、裂缝-孔隙型和孔隙-孔洞型储层。整体上缝洞储集体深侧向电阻率低于 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,孔隙-溶洞型和裂缝-孔隙型深侧向电阻率值明显高于裂缝-孔洞型和未充填溶洞型,自然伽马值随储集空间内部充填物变化而变化。相对优质的储集体(裂缝-孔洞型、裂缝-孔隙型和未充填溶洞型)孔隙性较好,常具有相对高的声波时差和中子孔隙度,密度相对较低。

2)裂缝-孔洞型、裂缝-孔隙型的概率识别界限均大于0.60,砂泥砾充填溶洞型和未充填溶洞型的概率识别界限均大于0.98,孔隙-孔洞型的概率识别界限大于0.60,缝洞识别结果与取心段缝洞位置的单井吻合率在62.5%~100%,平均为92%,概率约束的缝洞识别方法可在塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层中进行推广应用。

3)4区小尺度缝洞储集体较6区更为发育,溶洞、孔洞发育段纵向上呈现明显的两段分布特征,距 T_7^4 界面深度50 m以内和深部105~175 m(甚至更深处)范围内都是溶洞、孔洞、裂缝主要发育段,反映了海西早

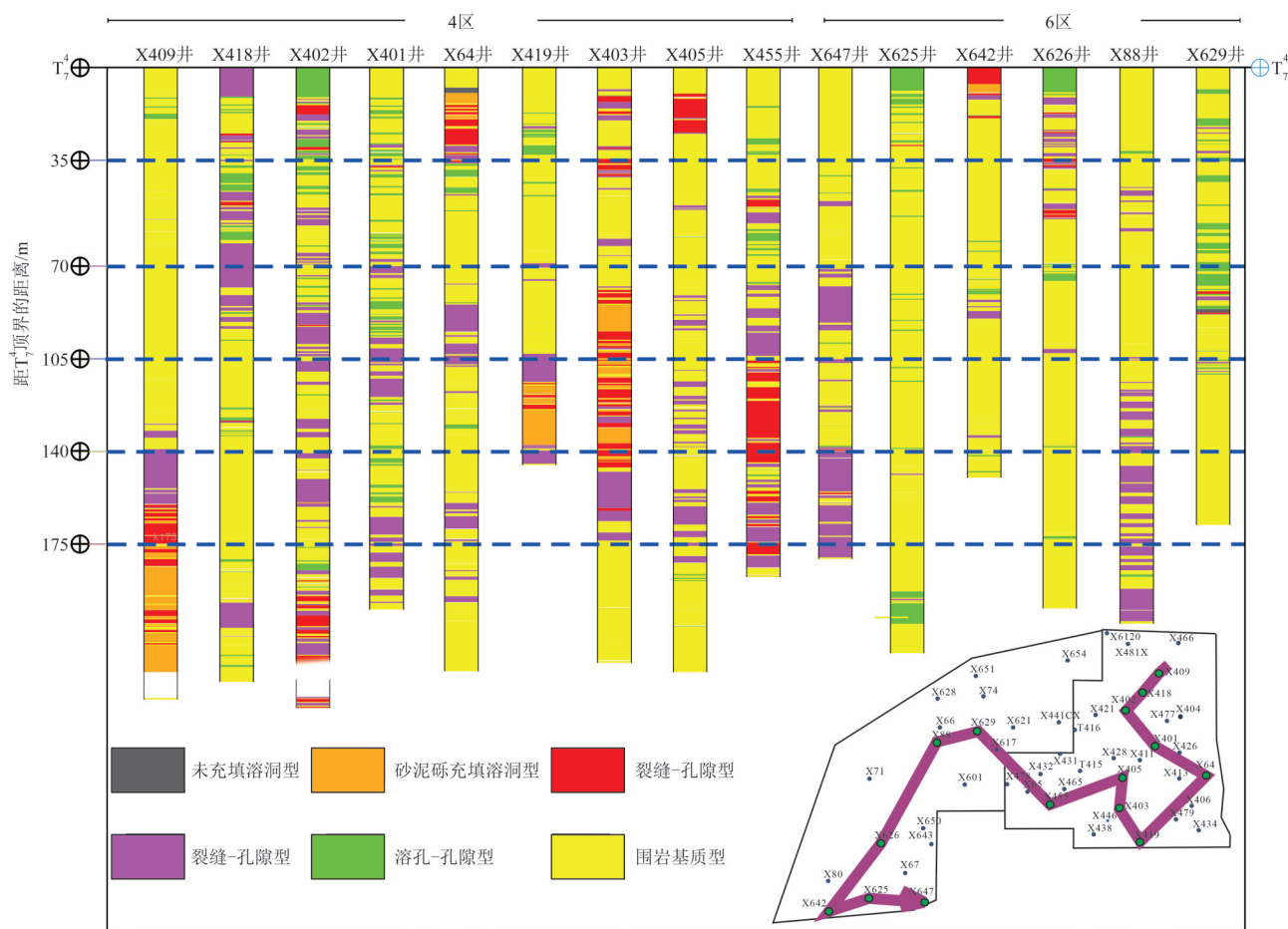


图7 塔河油田4区和6区小尺度缝洞连井对比剖面

Fig. 7 Correlation of small-scale fractured-vuggy reservoirs between wells in Blocks 4-6, Tahe Oilfield

期两期岩溶特征。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 毛鑫,钟建华,李勇,等.塔河油田奥陶系碳酸盐岩基质孔缝型储集体特征[J].石油勘探与开发,2014,41(6):681-689.
Mao Cui, Zhong Jianhua, Li Yong, et al. Ordovician carbonate rock matrix fractured-porous reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 681-689.
- [4] 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.
- [5] 万方,崔文彬,李士超. RMS提取技术在溶洞型碳酸盐岩储层地质建模中的应用[J].现代地质,2010,24(2):279-286, 293.
Wan Fang, Cui Wenbin, Li Shichao. The application of RMS extracting technology in geologic modeling on carbonate reservoir with cavern[J]. Geoscience, 2010, 24(2): 279-286, 293.
- [6] 龚洪林,姚清洲,牛雪梅,等.塔中西部奥陶系碳酸盐岩储层定量评价方法研究[J].新疆石油天然气,2020,16(1):1-3.
Gong Honglin, Yao Qingzhou, Niu Xuemei, et al. Method research of quantitative evaluation on Ordovician carbonate reservoirs in western Tazhong area of Tarim Basin[J]. Xinjiang Oil and Gas, 2020, 16(1): 1-3.
- [7] 李阳.塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(1):1-7.
Li Yang. Ordovician carbonate fracture-cavity reservoirs identification and quantitative characterization in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(1): 1-7.
- [8] 杨子川,李宗杰,窦慧媛.储层的地震识别模式分析及定量预测技术初探—以塔河油田碳酸盐岩储层为例[J].石油物探,2007,46(4):370-377.
Yang Zichuan, Li Zongjie, Dou Huiyuan. Seismic recognition model analysis and probe of quantitative reservoir prediction technology: Case study of carbonate reservoirs in Tahe oilfield. [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46(4): 370-377.
- [9] 王兆峰,陈鑫,王鹏,等.缝洞型碳酸盐岩储集体特征及预测—以A油田Pz段为例[J].石油与天然气地质,2012,33(3):459-466.
Wang Zhaofeng, Chen Xin, Wang Peng, et al. Characteristics and prediction of fracture-vag carbonate reservoirs: A case study of Pz member of A oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33 (3) : 459-466.
- [10] 吕心瑞,韩东,李红凯.缝洞型油藏储集体分类建模方法研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2018,40(1):68-77.
Lv Xinrui, Han Dong, Li Hongkai. Study on the classification and modeling of fracture-Vug oil deposits[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2018, 40(1) : 68-77.
- [11] 胡向阳,袁向春,侯加根,等.多尺度岩溶相控碳酸盐岩缝洞型油藏储集体建模方法[J].石油学报,2014,35(2):340-346.
Hu Xiangyang, Yuan Xiangchun, Hou Jiagen, et al. Modeling method of carbonate fractured-cavity reservoirs using multiscale karst facies-controlling [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35 (2) : 340-346.
- [12] 马骏骐,游利军,康毅力,等.缝洞性碳酸盐岩储层钻井液漏失预测地质-地球物理方法[J].钻采工艺,2010,33(3):90-93.
Ma Junqi, You Lijun, Kang Yili, etc. Geological-geophysical methods of prediction lost circulation in fractured/caved carbonate formation [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33 (3) : 90-93.
- [13] 雷均,马志武,董平川.塔中地区缝洞型储层的测井识别[J].石油天然气学报,2009,(3):231-234.
Lei Jun, Ma Zhiwu, Dong Pingchuan. Logging identification of fractured-vuggy reservoirs in Tazhong area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, (3): 231-234.
- [14] 陈钢花,胡琮,曾亚丽,等.基于BP神经网络的碳酸盐岩储层缝洞充填物测井识别方法[J].石油物探,2015,54(1):99-104.
Chen Ganghua, Hu Cong, Zeng Yali, et al. Logging identification method of fillings in fractures and caverns in carbonate reservoir based on BP neural network[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(1): 99-104.
- [15] 李隆新,常程,徐伟,等.数字岩心结合成像测井构建裂缝-孔洞型储层孔渗特征[J].天然气勘探与开发,2017,40(3):16-23.
Li Longxin, Chang Cheng, Xu Wei, et al. Reconstruction of porosity and permeability characteristics of fracture-vug reservoirs by using digital core together with imaging logging [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2017, 40(3): 16-23.
- [16] 侯加根,马晓强,刘钰铭,等.缝洞型碳酸盐岩储层多类多尺度建模方法研究:以塔河油田四区奥陶系油藏为例[J].地学前缘,2012,19(2):59-66.
Hou Jiagen, Ma Xiaoliang, Liu Yuming, et al. Modelling of carbonate fracture-vuggy reservoir: A case study of Ordovician reservoir of 4th block in Tahe Oilfield[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19 (2): 59-66.
- [17] 杨彦军.碳酸盐岩缝洞油藏储层、流体识别及评价技术研究—以塔河油田4、6区奥陶系为例[D].成都:成都理工大学,2007.
Yang Yanjun. Study on fluid identification and evaluation technology of carbonate fracture-vuggy reservoir: A case study of the Ordovician in Block 4, 6, Tahe Oilfield[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [18] 艾合买提江.塔河油田碳酸盐岩缝洞系统成因及模式研究

- [D]. 东营:中国石油大学(华东),2009.
- Ahemaitijiang. Study on the genesis and model of carbonate fracture-cavity system in Tahe Oilfield [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2009.
- [19] 王洪求,杨午阳,刘伟方,等. 利用缝洞储层双重孔隙的岩石物理分析技术进行流体识别研究—以塔里木盆地A区块碳酸盐岩储层为例[C]//中国地球物理2013—第二十分会场论文集. 昆明:中国地球物理学会,2013.
- Wang Hongqiu, Yang Wuyang, Liu Weifang, et al. Study on fluid identification using petrophysical analysis technology of double pores in fracture-cavity reservoir: A case study of carbonate reservoir in Block A, Tarim Basin [C]// Proceedings of China Geophysics 2013 – 20th conference. Kunming: Chinese Geophysics Society, 2013.
- [20] 王青,李国平,赵新民. 复杂储集空间储集层测井解释方法研究[J]. 测井技术, 2003, 27(5): 389–393.
- Wang Qing, Li Guoping, Zhao Xinmin. On log interpretation method for complex pore structure reservoirs [J]. Well Logging Technology, 2003, 27(5): 389–393.
- [21] 赵军龙,巩泽文,李甘,等. 碳酸盐岩裂缝性储层测井识别及评价技术综述与展望[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2): 39–43.
- Zhao Junlong, Gong Zewen, Li Gan, et al. A review and perspective of identifying and evaluating the logging technology of fractured carbonate reservoir [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(2): 39–43.
- [22] 李政宏,张立强,陈曦,等. 缝洞型碳酸盐岩储层测井识别—以塔中东部良里塔格组良二段为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(12): 1805–1814.
- Li Zhenghong, Zhang Liqiang, Chen Xi, et al. Logging identification of fractured-vuggy carbonate reservoirs: Case study from the second section of Lianglitage Formation in the eastern part of Ta-zhong area [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(12): 1805–1814.
- [23] 赵裕辉,胡建中,鲁新便,等. 碳酸盐岩缝洞型储集体识别与体积估算[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 720–724.
- Zhao Yuhui, Hu Jianzhong, Lu Xinbian, et al. Identification of carbonate fractured-vuggy reservoir and volume estimation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(5): 720–724.
- [24] 吕心瑞,孙建芳,邬兴威,等. 缝洞型碳酸盐岩油藏储层结构表征方法——以塔里木盆地塔河S67单元奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 728–737.
- Lyu Xinrui, Sun Jianfang, Wu Xingwei, et al. Internal architecture characterization of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on the Ordovician reservoirs, Tahe Unit S67, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 728–737.
- [25] 邓光校,胡文革,王震. 碳酸盐岩缝洞储集体分尺度量化表征[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 232–237.
- Deng Guangxiao, Hu Wenge, Wang Zhen. Quantitative characterization of fractured-vuggy carbonate reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 232–237.
- [26] 刘晶晶,毛毳,魏荷花,等. 塔河油田奥陶系缝洞充填序列及其测井响应[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(1): 46–52.
- Liu Jingjing, Mao Cui, Wei Hehua, et al. Ordovician fracture-cavity filling sequence and its logging responses in Tahe oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(1): 46–52.
- [27] 张金才,范鑫,黄志文,等. 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组储层各向异性地应力评价方法[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 963–972.
- Zhang Jincai, Fan Xin, Huang Zhiwen, et al. Assessment of anisotropic in-situ stresses in the Upper Triassic Xujiahe Formation reservoirs in Western Sichuan Depression of the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 963–972.
- [28] 罗勇,谭佳,杨晓海,等. 准噶尔盆地南缘近地表方位各向异性特征及地震成像[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(1): 100–106.
- Luo Yong, Tan Jia, Yang Xiaohai, et al. Near-surface azimuthal anisotropy and seismic imaging in the southern margin of Junggar basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(1): 100–106.
- [29] 牛栓文,韩学辉,支乐菲,等. 应用“两步”法识别广利油田沙四段储层流体性质[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3117–3122.
- Niu Suanwen, Han Xuehui, Zhi Lefei, et al. A fluid property identification method in Es⁴ reservoir of Guangli Oilfield with the “two step” method [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 3117–3122.
- [30] 张兵,刘财,郭志奇,等. 基于统计岩石物理模型的各向异性页岩储层参数反演[J]. 地球物理学报, 2018, 61(6): 2601–2617.
- Zhang Bing, Liu Cai, Guo Zhiqi, et al. Probabilistic reservoir parameters inversion for anisotropic shale using a statistical rock physics model [J]. Journal of Geophysics, 2018, 61(6): 2601–2617.

(编辑 张亚雄)