

引用格式:郭鸣黎,陈凌,汪桂敏,等.SEC准则下缝洞型碳酸盐岩油藏储量评估及应用实例探究[J].油气藏评价与开发,2020,10(2):11-17.
GUO M L, CHEN L, WANG G M, et al. Inquiry into evaluation methods and its application for reserves of carbonate fractured-vuggy reservoirs under SEC rules[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 11-17.
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.02.002

SEC准则下缝洞型碳酸盐岩油藏储量评估 及应用实例探究

郭鸣黎¹,陈凌²,汪桂敏²,潜欢欢²

(1.中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083;2.中国石化西北油田分公司勘探开发研究院,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:碳酸盐岩缝洞型油藏储层发育受控因素复杂、非均质性强、储集岩类型多样,整个油藏储集单元内部存在洞穴、孔洞和裂缝等多种储集体类型,传统的单一参数体系描述制约了对地下地质体的精细描述。按照SEC准则如何建立科学的地质模型,确定证实面积、证实有效厚度、采收率等参数,估算原地量和技术可采量,确定证实未开发钻井数,预测未来油藏合理的证实储量挑战较大。以顺北油田某典型断裂带的SEC储量评估为实例,运用该地区成熟的储层预测技术,将该井区奥陶系油藏细分为三类储集体,即洞穴、孔洞和裂缝储集体,分别计算其原地量。在证实储量评估时采用静态法、类比法和动态法等多种评估方法相结合,一方面对已开发井的动态规律运用递减法进行评估,对比其实际递减与预测递减验证其合理性,另一方面从断溶体的展布规律判断其未开发井位的证实级别可靠性,同时从投产后的实际产量变化验证预测的可信度。该应用实例初步形成了一套针对此类油藏SEC储量评估的技术和方法,对保证此类油藏SEC储量评估的合理性具有指导和借鉴意义。

关键词:SEC;证实储量;缝洞型碳酸盐岩;可靠技术;评估方法

中图分类号:TE155

文献标识码:A

Inquiry into evaluation methods and its application for reserves of carbonate fractured-vuggy reservoirs under SEC rules

GUO Mingli¹, CHEN Ling², WANG Guiming², QIAN Huanhuan²

(1.Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China;

2.Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Carbonate fractured-vuggy reservoir is the most complex reservoir type in the world because of its complex controlled factors, strong heterogeneity and diverse reservoir rock types. There are many reservoir types such as caves, holes and fractures in the whole reservoir unit. The traditional description of single parameter system restricts the detailed description of underground geological bodies. According to the standards of SEC proved reserves, how to establish a scientific geological model, determine the parameters such as proved area, proved effective thickness and recovery rate, estimate various levels of geological reserves and technical recoverable reserves, confirm the number of undeveloped wells, and predict the reasonable proved reserves in the future is facing a great challenge. Therefore, the SEC reserve evaluation of a typical fault zone in Shunbei Oilfield is taken as an example, and the Ordovician reservoir in this well area is subdivided into three types, namely cavern reservoir, hole reservoir and fracture reservoir, to calculate the geological reserves respectively by using the mature reservoir prediction technology in this area. When confirming reserve evaluation, by combining a variety of the evaluation methods, such as static proved reserves evaluation method, analogy method and dynamic method, on the one hand, evaluating the dynamic rules of the developed wells to contrast its actual diminishing and forecast for verifying its rationality; on the other hand, confirming the reliability of the position of undeveloped wells by the judgment of distribution rule of fault-karst reservoir, and verifying the reliability of the forecast by the actual production changes after putting on production. Finally, a set of techniques and methods for SEC reserve evaluation of such reservoirs is formed, which has guiding and reference significance for ensuring the rationality of evaluation.

Key words: SEC, proved reserves, carbonate fractured-vuggy rock, reliable technology, evaluation methods

收稿日期:2019-02-10。

第一作者简介:郭鸣黎(1972—),女,博士,高级工程师,主要从事储量评估和评价管理研究工作。通讯地址:北京市海淀区学院路31号,邮政编码:100083。E-mail:guoml.syky@sinopec.com

按照美国证券交易委员会(U.S. Securities and Exchange Commission,以下简称SEC)的要求,在其资本市场上上市的油气公司必须披露其SEC标准下的证实储量(已发现剩余经济可采储量)。随着油气勘探开发不断深入,缝洞型碳酸盐岩油藏逐渐成为中国石化油气公司重要的油气资源,作为上市公司,其SEC准则下的证实储量尤其要严格符合其披露规则要求,但是由于油藏地质特征的复杂性,难以采用常规的储量计算和评估方法。自中国石油、中国石化和中国海油三大公司在美国上市以来,国内从事储量研究的技术人员在不断学习和研究SEC准则和储量分类与定义^[1-3],但针对具体的某一特定的油气藏类型的评估方法很少有明确的成果介绍,而受勘探开发阶段不同、油气藏的复杂程度、经济条件和经营环境的不同等诸多因素的影响,探索出针对缝洞型碳酸盐岩油藏的储量评估技术与方法是一直困扰储量评估人员^[3-5]的难题所在。

本文以顺北油田某典型断裂带的SEC储量评估为实例,运用该地区成熟的储层预测技术,以振幅、能量体、相干体、反射特征等物探手段为主,结合地质、油藏研究的综合储层预测,将该井区奥陶系油藏细分为三类储集体,即洞穴、孔洞和裂缝储集体,分别计算其原地量。在证实储量评估时采用静态法、类比法和动态法等多种评估方法相结合,保证对披露的证实储量的合理性,探索性地形成了一套针对此类油藏SEC储量评估的技术和方法,对此类油藏SEC储量评估具有一定的指导和借鉴意义。

1 SEC储量评估过程及披露要求

SEC标准储量立足于从股民的利益出发,为确保投资者的风险最小,强调的是合理确定性的商业价值,因此,它的主要特点表现在合理的确定性、经济性与动态性。

1.1 证实储量的定义和分类

证实储量指在现行的经济和生产条件(主要指现行价格和成本)下,地质和工程资料合理可靠地证明未来可以从已知储集体中采出的油气估算量。根据开发状态又分为证实已开发和证实未开发两类:①证实已开发储量(Proved Developed Reserves),是指通过现有井,采用现有设备和操作方法,预期可采出的储量。②证实未开发储量(Proved Undeveloped

Reserves),是指在未钻井部位将来通过钻新井或从现有井中将来需要相对较大费用重新完井预期被采出的储量。

1.2 证实储量的评估方法和要求

基于对油气藏勘探开发阶段、资料掌握程度和认识程度的不同,采用的储量评估方法也不尽相同。勘探阶段、开发早期的油气藏(田)储量评估,常使用容积法和类比法;油气田正式投产后,随着生产动态资料(如产量和压力等)的增加,可适时转为动态法进行评估。

无论采用什么评估方法都应形成对油气藏的油气原地量、技术可采量和未来产量预测剖面的结果,结合经济参数和矿权年限,应用现金流法评估储量及其价值。

通过几种独立的方法得出相同或相近的结果,储量结果往往具有较高的可信度,同时可根据不同方法的计算结果及其差异划分不同级别储量(证实储量、概算储量和可能储量)。

2 缝洞型碳酸盐岩油藏的SEC评估储量存在的技术难点

依照SEC准则,要保证对披露的缝洞型碳酸盐岩油藏的证实储量未来更多的可能是正修正,而不是负修正,从概率法的角度意味着未来的产量预测要有90%的可能性等于或超过目前的预测值。

2.1 地质描述和量化难度大

与普通砂岩油藏相比,碳酸盐岩岩溶-缝洞型油藏储层发育受控因素复杂、非均质性强、储集岩类型多样,既有裂缝-溶蚀孔隙型储层,又有裂缝-溶洞型储层,堪称世界上最复杂的特殊油藏类型^[6-10]。如中国石化塔河油田奥陶系油藏属于岩溶-缝洞型块状油藏,基质孔渗极低。据大量岩心统计结果,87%的样品孔隙度小于1.0%,96%的样品渗透率小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,基本不具备储油能力。而裂缝和次生溶蚀孔、洞却相当发育,为油藏主要储集空间和渗流通道。塔河油田储集空间包括溶蚀孔、洞、缝,主要储层类型有裂缝型、裂缝-孔洞型、裂缝-溶洞型。但是裂缝和断裂的发育程度较国内外同类油田差,分布具有更强的非均质性。

由于油藏特有的储集类型,按储量计算标准,整

个油藏按统一的储集单元选取一套参数体系计算显然不能客观地反映油藏的本来面目,需要细化储层分类各自计算其原地量。如何采用容积法对方案部署井建立地质模型,确定证实面积、证实有效厚度、孔隙度、含油(气)饱和度、采收率等参数,估算原地量和技术可采量,确定证实开发钻井数,计算出合理的经济可采储量挑战较大。

2.2 SEC准则下的已开发和未开发储量评估难度大

一方面,对一个新发现缝洞型碳酸盐岩油藏,其方案部署井的储量一般采用容积法和类比法进行评估。目前业界普遍认为,缝洞型碳酸盐岩油藏的采收率低且变化大,在20%~45%不等。影响其动用和采收率的地质因素主要包括储层类型、基质渗透率、原油黏度、储层润湿程度和非均质性等。由于缝洞型碳酸盐岩油藏中不同孔隙和缝洞结构差异极大,加上裂缝的影响,导致流体的渗流差异性极大,最终动用和采收率很难判断和取值。

另一方面,对正式投产后的油田,随着生产动态资料(如产量和压力等)的增加,可适时转为动态法进行评估。针对已投产井所在不同的地质体位置、不同生产时间的动态特点,综合形成对技术可采的认识,合理预测未来产量的难度较大。

3 应用实例

以顺北油气田1号断裂带井区储量评估为例,初步探索一套此类油藏SEC储量评估的技术和方法。

3.1 勘探开发及探明储量申报简况

顺北油气田断裂整体格局为斜坡上的断裂系统,区域上可划分为顺南、顺北两大断裂带。2013年顺北1井奥陶系中统一间房组见到良好油气显示,2016年顺北1-1H井奥陶系中统一间房组获得高产,实现了顺北地区奥陶系油气突破,揭示了该地区奥陶系油气藏具较好的勘探开发前景。通过区域地质条件分析,储集体平面沿主断裂呈带状分布,剖面呈串珠状及杂乱反射,之后为了整体控制北东向主干断裂,分别部署顺北1-2H井、顺北1-3井评价南部强挤压段、北部拉分段储层发育及含油气性。在南北控制的基础上,在中部分段滚动开发井评价储集体规模及产能。

通过多井测试分析顺北1主干断裂带钻井均发

生漏失,主断裂以洞穴型储集体为主,属于常温常压超深断控裂缝-洞穴型油藏。

2016年顺北1井区奥陶系中统一间房组(O_{2y}J)上报国家探明原油地质储量1 386.36×10⁴ t,技术可采储量180.23×10⁴ t。

3.2 方案部署及提交上市情况

在前期评价的基础上,根据顺北1井区奥陶系储层发育特征、油气富集规律、油水分布关系,在开发井位部署中充分考虑地质背景、地球物理特征属性与产能关系,论证各井区的储层发育和油气富集有利模式,按照有利井区、有利模式部署井位。在有利储集体较发育的区域采用不规则井网,部署7口水平井,5口直井。根据7口老井的试采情况,预测顺北1井区奥陶系油藏产能建设方案累计动用地质储量1 386×10⁴ t,末期累产油156.96×10⁴ t,采出程度11.3%,含水率94%。基于SEC准则要求全部提交上市进行评估披露。

3.3 SEC储量评估过程和方法

3.3.1 应用测井、地震等可靠储层预测技术识别确定原地量

由于油藏特有的储集类型,按储量计算标准,整个油藏按统一的储集单元选取一套参数体系计算显然不能客观地反映油藏的本来面目。根据顺北1井区的构造特征,油水分布关系,油气藏类型特征,缝洞储层局部呈带状发育,非均质性非常强的特点,平面上把顺北1井区的奥陶系油藏划分为一个计算单元进行计算,纵向上将顺北1井区奥陶系油藏的计算单元内又分为三类储集体,即洞穴、孔洞和裂缝储集体,分别计算其原地量。这种方法在塔河油田相同类型碳酸盐油藏也得以使用^[11-14],具有一定的探索性,其中关键参数为含油面积、有效孔隙度、有效厚度和含油饱和度。

1) 含油面积的圈定

边部油(气)井到含油(气)边界的距离过大时,可按照油(气)藏开发井距的1~1.5倍外推确定计算线,由此确定顺北1井区的计算范围。

碳酸盐岩洞穴型、孔洞型、裂缝型储层具有不同的储集、渗流和产能特点,根据实际钻井资料、测井评价、地震资料和试油结论,综合确定出洞穴型、裂缝-孔洞型、裂缝型储层的地震属性振幅变化率的下

限,主要采用振幅变化率地震属性阈值的方法分别圈定洞穴、孔洞、裂缝三类储集体的含油面积。

通过钻井统计顺北1井区所有完钻井(9口井)的不同储层振幅变化率值,做出与产能之间的相关关系图(图1),由图1可看出,9口井中属于洞穴型储层的有5口井,振幅变化率值大于20,初期产能大于140 m³/d;孔洞型储层有2口井,振幅变化率值小于20大于15,初期产能大于80 m³/d;裂缝型储层有2口井,振幅变化率值均大于15,2口井初期产能都小于80 m³/d。综上所述,裂缝阈值定为15,洞穴阈值定为20,孔洞型储层大多数与裂缝储层重叠。

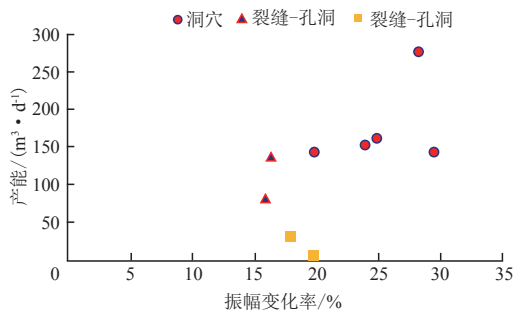


图1 顺北1井区振幅变化率-产能关系

Fig. 1 Relation between amplitude change rate and productivity of well area-1 in Shunbei oil-gas field

2) 有效厚度的圈定

本次奥陶系油藏储层厚度是以T₇⁴为顶,以计算底界为底(96.69 m),对研究区含油面积内的测井资料进行了处理,求取计算底界以上、T₇⁴面以下各单井地层的洞穴型、孔洞型、裂缝型储层有效厚度。

洞穴型有效厚度确定方法:对于发育有溶洞进行了测井并取得了数据的井,用测井解释的厚度作为单井单个洞穴的有效厚度,结合钻时曲线确定单井有效洞穴高度。

孔洞型、裂缝型有效厚度采用测井解释的孔洞和裂缝储层有效厚度。

根据上述方法确定单井钻遇洞穴厚度总和,除以各井钻井的地层厚度总和,得到洞穴的钻遇率,平均钻遇率(0.170 3)乘以计算底界(96.69 m)得到洞穴储层的平均有效厚度16.1 m。孔洞、裂缝储层的有效厚度,采用净毛比的方法计算得到,分别为19.7 m、60.2 m(表1、表2)。

3) 有效孔隙度的圈定

对顺北1井区在钻井过程中发生放空、漏失以及钻遇有大型洞穴的井,分别求出计算底界以上各口井洞穴的有效孔隙度,将各单井洞穴有效孔隙度与

表1 顺北1井区奥陶系油藏洞穴有效厚度

Table 1 Effective thickness of Ordovician reservoir of well area-1 in Shunbei oil-gas field

井区	井号	进T ₇ ⁴ 地层 进尺/m	洞穴储层 进尺/m	洞穴 钻遇率
顺北1	顺北1-2H	225.00	45.00	0.200 0
	顺北1-5H	218.50	7.00	0.032 0
	顺北1-6H	278.00	53.00	0.190 6
	顺北1-7H	526.00	136.00	0.258 6

表2 顺北1井区奥陶系气藏孔洞、裂缝有效厚度

Table 2 Effective thickness of holes and fractures in Ordovician gas reservoirs of well area-1 in Shunbei oil-gas field

井区	井号	孔洞储层		裂缝储层	
		有效厚度/mm	净毛比	有效厚度/mm	净毛比
顺北1	顺北1	0	0	63.9	0.674 8
顺北1	顺北2	31.1	0.328 4	91.6	0.967 4
	顺北1-3	8.4	0.088 7	25.0	0.264 0
	平均值	19.7	0.208 6	60.2	0.635 4

对应的有效厚度进行加权平均,得到单井油层平均有效孔隙度,再将各单井的平均有效孔隙度用其有效厚度进行加权平均,最终得到顺北1井区洞穴储层平均有效孔隙度。

孔洞型、裂缝型储层有效孔隙度分别采用基块孔隙度、溶洞孔隙度、裂缝孔隙度来描述。

基质孔隙度采用泥质校正的怀利公式:

$$\Phi_B = \frac{AC - TM}{(TF - TM)CP} - SH \frac{TSH - TM}{TF - TM} \quad (1)$$

式中: Φ_B 为基质孔隙度; AC 为声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; TM 、 TF 、 TSH 分别为岩石骨架、孔隙流体和泥质的声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; CP 为压实校正系数,取值为1; SH 为泥质含量。

裂缝孔隙度公式:

$$\Phi_F = \left(\frac{A_1}{R_s} + \frac{A_2}{R_0} + A_3 \right) R_{MF} \quad (2)$$

式中: Φ_F 为裂缝孔隙度; A_1 、 A_2 、 A_3 为常数,其取值依裂缝状态不同而不同; R_s 为浅侧向测井值, $\Omega \cdot \text{m}$; R_0 为深侧向测井值, $\Omega \cdot \text{m}$; R_{MF} 为泥浆滤液电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

总孔隙度采用中子、密度测井资料求得:

$$\Phi_T = \sqrt{\frac{\Phi_D^2 + \Phi_N^2}{2}} \quad (3)$$

式中: Φ_T 、 Φ_D 、 Φ_N 分别为总、密度和中子孔隙度。

由于总孔隙度是由基质、裂缝与溶蚀洞穴孔隙度共同组成,因而在确定了基质、裂缝和总孔隙度后,即可求出溶洞孔隙度:

$$\Phi_H = \Phi_T - \Phi_B - \Phi_F \quad (4)$$

式中: Φ_H 为溶洞孔隙度。

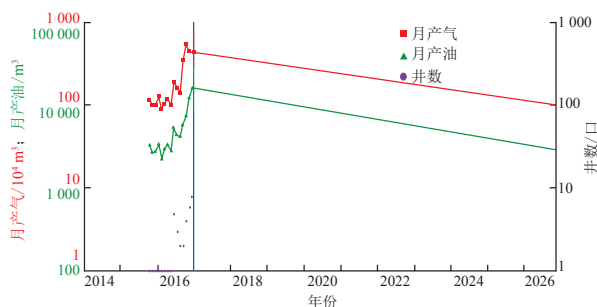


图2 顺北1井区已开发储量评估曲线

Fig. 2 Decline curve of proved developed reserves of No.1 well area in Shunbei Oilfield

需要根据SEC对证实面积的要求落实每口部署井的位置是否可以评为证实储量^[20-25]。

断裂贯穿断溶体内部,连续展布,为断溶体内部连通的主要通道。裂缝型储集体沿主干断裂连续分布,在断溶体内部具有储存油气和沟通溶洞型储集体作用。依据断裂发育深度层位、断裂性质、断裂分段特征及相应的地震反射类型,存在规模缝洞体优选垂向深断裂+串珠(杂乱反射)模式。排查潜力点12个,平均井距在0.7~1.2 km,方案依次进行井位部署。因此,已投产井和潜力井点均位于断溶体核心区,为证实储量(图3)。

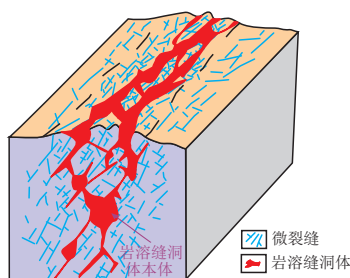


图3 顺北1井区断溶体概念模式

Fig. 3 Conceptual geology model of No.1 well area in Shunbei Oilfield

评估未开发储量新钻井12口,预测参数取值跟已开发正生产储量评估参数一致。①初始产量:取值69 t/d;②递减率:取13.9%。

从该断裂带单井目前递减率跟踪看初期7.3%左右,小于初期评估递减率13.9%,开发效果高于预期,反映了评估结果较为合理。

4 结论

1) 应用地震多参数储层预测成果,结合钻井、

测井、测试、试采和综合地质研究成果,细化对缝洞型碳酸盐岩油藏三种不同地质体表述,证实了研究成果的可信度和可重复性,符合SEC准则提倡的属于“可靠技术”的需要。

2) 根据SEC对证实储量的定义和披露要求,对于开发早期的油气藏,类比法和容积法的综合应用显得尤为重要,随开发程度不断推进,生产井递减规律的确定性方能逐渐增加。

3) 通过对未开发储量的评估结果要进行转已开发储量效果跟踪,如果证实储量出现核减,需要重新对地质体的描述和类比法的参数进行认识,通过对近几年顺北地区未开发井的跟踪发现,没有出现储量核减的迹象,验证了其储量评估技术方法的可靠性和推广借鉴意义。

参考文献

- 贾承造. 美国SEC油气储量评估方法[M]. 北京:石油工业出版社, 2004: 221-223.
JIA C Z. SEC estimation approach for oil and gas reserves[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 221-223.
- 王永祥, 张君峰, 段晓文. 中国油气资源/储量分类与管理体系统[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 645-651.
WANG Y X, ZHANG J F, DUAN X W. A classification and management system of petroleum resources/reserves in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 645-651.
- CRONQUIST C. 国外油气储量评估分级理论与应用指南[M]. 刘合年, 吴蕾, 罗凯, 译. 北京:石油工业出版社, 2004.
CRONQUIST C. Estimation and classification of reserves of crude oil, natural gas, and condensate[M]. LIU H N, WU L, LUO K, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- Petroleum Society of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. 油气储量评估方法: 第2版[M]. 王永祥, 张君峰, 毕海滨, 等, 译. 北京:石油工业出版社, 2012.
Petroleum Society of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Determination of oil and gas reserves: 2nd ed[M]. WANG Y X, ZHANG J F, BI H B, et al, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- 鲜强, 冯许魁, 刘永雷, 等. 塔中地区碳酸盐岩缝洞型储层叠前流体识别[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 196-204.
XIAN Q, FENG X K, LIU Y L, et al. Pre-stack fluid identification for fractured-vuggy carbonate reservoir in Tazhong area[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 196-204.
- 窦之林. 碳酸盐岩缝洞型油藏描述与与储量计算[J]. 石油实验地质, 2014, 36(1): 9-15.
DOU Z L. Description and reserves calculation of fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(1): 9-15.
- 肖阳, 何文, 罗慎超, 等. 缝洞单元类型快速识别方法[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(6): 120-126.
XIAO Y, HE W, LUO S C, et al. A fast recognition method of fractured-vuggy unit type[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(6): 120-126.
- 王晓畅, 张军, 李军, 等. 基于交会图决策树的缝洞体类型常

- 规测井识别方法——以塔河油田奥陶系为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 805-812.
- WANG X C, ZHANG J, LI J, et al. Conventional logging identification of fracture-vug complex types data based on crossplots-decision tree: A case study from the Ordovician in Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 805-812.
- [9] 王金锋. 塔河油田缝洞型储层中洞穴充填程度半定量分析[J]. 石油地质与工程, 2017, 31(2): 44-47.
- WANG J F. Half quantitative analysis of filling degree in caved type reservoir of fractured-vuggy reservoirs in Tahe oilfield[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2017, 31(2): 44-47.
- [10] 刘遥, 荣元帅, 杨敏. 碳酸盐岩缝洞型油藏缝洞单元储量精细分类评价[J]. 石油实验地质, 2018, 40(3): 431-438.
- LIU Y, RONG Y S, YANG M. Detailed classification and evaluation of reserves in fracture-cavity units for carbonate fracture-cavity reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(3): 431-438.
- [11] 金强, 田飞, 张宏方. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞单元综合评价[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 272-279.
- JIN Q, TIAN F, ZHANG H F. Comprehensive evaluation of fracture-cave units in karst carbonates in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3): 272-279.
- [12] 荣元帅, 胡文革, 蒲万芬, 等. 塔河油田碳酸盐岩油藏缝洞分隔性研究[J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 599-605.
- RONG Y S, HU W G, PU W F, et al. Separation of fractures and cavities in carbonate reservoirs in the Tahe Oil Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 599-605.
- [13] 鲁新便, 荣元帅, 李小波, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏注采井网构建及开发意义——以塔河油田为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 658-664.
- LU X B, RONG Y S, LI X B, et al. Construction of injection-production well pattern in fractured-vuggy carbonate reservoir and its development significance: A case study from Tahe oilfield in Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 658-664.
- [14] 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 R, ZHAO T, LI H L, 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.
- [15] 尹洪军, 邢翠巧, 计秉玉, 等. 大尺度溶洞发育的缝洞型油藏试井解释模型研究[J]. 特种油气藏, 2018, 25(5): 84-88.
- YIN H J, XING C Q, JI B Y, et al. Well test interpretation model for fracture-cavity reservoir with well-developed large-scale caves[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(5): 84-88.
- [16] 朱桂良, 孙建芳, 刘中春. 塔河油田缝洞型油藏气驱动用储量计算方法[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 436-442.
- ZHU G L, SUN J F, LIU Z C. An approach to calculate developed reserves in gas drive fractured-vuggy reservoirs in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 436-442.
- [17] 吕心瑞, 李红凯, 魏荷花, 等. 碳酸盐岩储层多尺度缝洞体分类表征——以塔河油田S80单元奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 813-821.
- LYU X R, LI H K, WEI H H, et al. Classification and characterization method for multi-scale fractured-vuggy reservoir zones in carbonate reservoirs: An example from Ordovician reservoirs in Tahe oilfield S80 unit[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 813-821.
- [18] 袁晓宇, 李映涛, 张峭楠, 等. 塔西南玉北地区鹰山组缝洞型储层裂缝检测技术及应用[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 394-401.
- YUAN X Y, LI Y T, ZHANG S N, et al. Technique and application of fracture detection in fracture-cavity reservoirs in Yingshan Formation, Yubei area, southwestern Tarim[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3): 394-401.
- [19] 张娟, 鲍典, 杨敏, 等. 塔河油田西部古暗河缝洞结构特征及控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(4): 33-39.
- ZHANG J, BAO D, YANG M, et al. Analysis on fracture-cave structure characteristics and its controlling factor of palaeo-subterranean rivers in the western Tahe Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(4): 33-39.
- [20] CURRIE S M, ILK D, BLASINGAME T A, et al. Application of the "continuous estimation of ultimate recovery" methodology to estimate reserves in unconventional reservoirs[C]// paper SPE-138155-MS presented at the Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, 19-21 October 2010, Calgary, Alberta, Canada.
- [21] LYFORD P A, CIBICH W H, CHIPPERFIELD S T, et al. Development and application of an improved workflow for developed reserve forecasting[C]// paper SPE-133768-MS presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 18-20 October 2010, Brisbane, Queensland, Australia.
- [22] 王树华, 魏萍. SEC储量动态评估与分析[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 93-94.
- WANG S H, WEI P. SEC reserves dynamic evaluation and analysis[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 93-94.
- [23] 薛国勤, 余强, 赵创业, 等. SEC准则递减曲线法在储量评估中的应用——以王集油田为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(5): 531-534.
- XUE G Q, YU Q, ZHAO C Y, et al. Application of diminishing curve method in SEC standard evaluation of oil and gas reserves: A case study in Wangji Oil Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(5): 531-534.
- [24] 李倩, 狄帮让, 魏建新. 基于稀疏约束反演谱分解的缝洞储层叠后数据去噪应用效果分析[J]. 石油物探, 2017, 56(5): 684-693.
- LI Q, DI B R, WEI J X, et al. Application of denoising method based on sparse constrained inverse spectral decomposition in poststack seismic data of cave-fractured reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(5): 684-693.
- [25] 曹建文, 夏日元, 张庆玉, 等. 潮湿环境下典型碳酸盐岩缝洞系统充填模式探讨[J]. 石油实验地质, 2016, 38(1): 56-62.
- CAO J W, XIA R Y, ZHANG Q Y, et al. Typical filling models of a fractured-vuggy system in carbonate rocks under a moist environment[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(1): 56-62.