

引用格式:杨昕睿,尹艳树,王立鑫,等.塔里木盆地A地区奥陶系断控体内幕精细表征[J].油气地质与采收率,2023,30(6):45-53.

YANG Xinrui, YIN Yanshu, WANG Lixin, et al. Fine characterization of Ordovician inner fault-controlled bodies in area A of Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(6): 45-53.

塔里木盆地A地区奥陶系断控体内幕精细表征

杨昕睿,尹艳树,王立鑫,尚浩杰
(长江大学 地球科学学院,湖北 武汉 430199)

摘要:断控体储集空间类型多样、结构复杂,储层非均质性强,影响油气藏的勘探开发,准确刻画断控储集体内幕已成为断控体油气藏勘探开发的主要难点。综合地震、测井、录井等多种资料,建立断控体类洞穴的栅状结构模式,并通过地震多属性描述类洞穴的轮廓,自编程序将图像分析与数理统计充分结合,利用角砾带、簇间裂缝带的位置与宽度等参数界定类洞穴的核部与翼部区域,明确类洞穴不同部位的角砾带与簇间裂缝带的发育规模,实现类洞穴内幕角砾带、簇间裂缝带的精细刻画。研究结果表明,类洞穴内簇充填栅状结构由角砾带、簇间裂缝带和栅间基岩组成,且储集性能表现为:角砾带>簇间裂缝带>栅间基岩,角砾带与簇间裂缝带控制类洞穴的储集性。多簇的栅状结构决定储层分隔性及强非均质性;与平移段相比,挤压段栅状体走向发生逆时针偏移 10° ,拉分段栅状体走向发生逆时针偏移 16° 。综合走滑断裂类洞穴轮廓与类洞穴内幕等刻画,建立研究区断控体的空间分布模式,为下步断控体油气藏高效勘探开发提供地质依据。

关键词:碳酸盐岩;断控体;缝洞型储层;奥陶系;类洞穴;塔里木盆地

文章编号:1009-9603(2023)06-0045-09

DOI:10.13673/j.pgre.202304015

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Fine characterization of Ordovician inner fault-controlled bodies in area A of Tarim Basin

YANG Xinrui, YIN Yanshu, WANG Lixin, SHANG Haojie

(School of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430199, China)

Abstract: It is a major difficulty to accurately characterize the inner fault-controlled bodies in the exploration and development of fault-controlled oil and gas reservoirs because the fault-controlled bodies are diverse in reservoir space, complicated in structure, and highly heterogeneous in reservoir space, which affects the exploration and development of the oil and gas reservoirs. The seismic, logging, and other data are integrated and the inner breccia zones and intercluster fracture zones of caverns-like were finely characterized in this paper. The grid structure models of the fault-controlled bodies caverns-like were established and their contours were described with seismic multiple attributes; the image analysis was fully combined with mathematical statistics by a self-compiled program and the core and wing regions of the caverns-like were defined by the parameters such as the location and width of the breccia and intercluster fracture zones; the development scales of the breccia zones and intercluster fracture zones in different parts of caverns-like were determined. The results show that the cluster-filled grid structures of caverns-like are composed of the breccia zones, intercluster fracture zones, and intergrid matrix, and the reservoir properties of breccia zones is better than those of intercluster fracture zones, and they are better than those of the intergrid matrix. The breccia zones and intercluster fracture zones control the reservoir properties of caverns-like, and the multi-cluster grid structures determine the separateness and strong heterogeneity of the reservoirs. Compared with the translation sections, the grid strike bodies in the extrusion sections are counterclockwise offset by 10° , and those in the pull sections are counterclockwise offset by 16° . The spatial distribution models of fault-controlled bodies in this area are established by combining the strike-slip fault caverns-like contours and the inner caverns-like description,

收稿日期:2023-04-10。

作者简介:杨昕睿(1998—),男,四川广安人,在读硕士研究生,从事储层建模及油藏描述方面研究。E-mail:1021554764@qq.com。

which provides a geological basis for efficient exploration and development of other fault-controlled oil and gas reservoirs.

Key words: carbonate rock; fault-controlled body; fracture-cavity reservoir; Ordovician; cavern-like; Tarim Basin

塔里木盆地是典型的叠合盆地,塔河、顺北等古隆起、古斜坡是油气富集的有利区带,深层-超深层油气藏勘探取得了丰硕的成果。目前发现油气藏主要有2种认识:一种是断溶体油气藏,是以岩溶水沿断裂方向下渗或上涌对断裂破碎带进行溶蚀改造所形成的岩溶缝洞型储集体经油气充注所形成的油气藏^[1-3],如托甫台、顺南、塔北等断溶体油气藏的储层溶蚀作用强、储集空间规模较大且以大型溶洞为主^[4-9],多数井钻遇洞穴时会出现放空现象。另一种是断控体油气藏,是以走滑断裂作用控制的断裂破碎带所形成的断控缝洞型储集体经油气充注后所形成的油气藏,断裂—裂缝是储层发育的主要控制因素^[10];如顺北地区断控体油气藏的储层溶蚀作用相对较弱,以断裂破碎为主,断控体规模相对偏小,在钻井过程中放空现象较少;油气藏的分段、分隔现象更加明显^[11-12]。

塔里木盆地A地区深层-超深层断控体油气藏埋深为7 200~8 800 m,主要分布于奥陶系鹰山组—一间房组。据估算,研究区18条主干走滑断裂油气资源量为 $17 \times 10^8 \text{ t}$ ^[13-14];截至2021年底,A地区已建成百万吨产能阵地^[13],显示了该类油气藏较大的勘探开发潜力。但在油藏开发过程中,存在地层压降快、能量不足、水窜严重以及主力储集体动用程度低等问题,其主要原因是断控体内幕发育复杂,预测断控体连通关系与实际情况存在较大的差异,导致油藏动用情况不清,剩余油挖潜效果变差,严重制约了油藏高效开发和调整。针对断控碳酸盐岩储层空间雕刻及量化描述,刘宝增等主要采用了正演、属性分析及相控反演的方法,描述储集体的空间分布^[15];李宗杰等提出了张量属性、振幅属性及其融合的方法来雕刻断控储集体^[16],马乃拜等通过正演与地震反射特征来刻画储集体分布^[17],常少英等通过波形分解、断裂检测、岩相反演等方法表征储集体构型^[18],刘军等通过结构张量、相干与蚂蚁体等地震属性描述储层^[19-22],田建华等基于井控多属性机器学习的方法来预测缝洞型储层^[23],但玲玲等基于神经网络的多信息融合的裂缝建模技术来刻画储层^[24],解慧等通过物理模拟实验与生产曲线等进行缝洞单元的快速识别、单井产能预测等^[25]。上述方法主要是采用地球物理技术对碳酸盐岩断控缝洞型储集体进行轮廓描述、孔洞预测,对油藏勘探开发均具有积极作用。但断控体内幕

非常复杂,孔洞内幕存在充填与隔层,对该类油藏开发,需要更加精细的断控体内幕精细刻画,揭示内部复杂结构特征以及连通关系。为此,以建立栅状结构模式为基础,采用地震属性描述轮廓,自编程序实现图像分析与数理统计相结合,以精细刻画其内幕,揭示断控体油藏的连通关系,为下步精细地质建模、油气藏剩余油分布和油气藏开发调整提供地质依据。

1 结构层次划分

基于野外露头资料,断控体一般由破碎带和基岩组成,其储集空间主要为断面空腔、角砾间孔隙、构造缝等3种类型,断面空腔通过角砾间孔隙与构造缝连通,储集体非均质性较强。借鉴塔河油田断溶体系划分方案^[26],结合研究区的走滑断裂体系发育特点及钻录井资料,将A地区断控体划分为走滑断裂体、断控体、类洞穴+裂缝孔洞、类洞穴内幕充填等4个层次(图1)。

1.1 走滑断裂体

在走滑断裂作用下,形成由断裂根部至顶部且呈下窄上宽“V”“Y”字型或花状型的大型断裂破碎带,该破碎带宽度在平面上达几百米至几千米,走向上延伸规模较大,延伸长度一般几十公里至几百公里。根据走滑断裂活动的应力作用,走滑断裂体又分为平移段、挤压段和拉分段。

1.2 断控体

断控体是走滑断裂体系的主要储集体部分,断控体内部由类洞穴+裂缝孔洞组成。断控体内部岩溶作用一般较弱,储集空间主要为断裂破碎形成的断面空腔、角砾间孔隙以及构造缝等,且三者相互连通,其规模较小,储集体非均质性强;为了区别断溶体内部大型洞穴以及小型溶蚀孔洞缝,将断控体内部破碎程度高、储集空间好、规模较大的区域定义为类洞穴(图1)。断控体是由多个类洞穴与周围裂缝孔洞组成。

1.3 类洞穴+裂缝孔洞

类洞穴的外围发育裂缝孔洞,裂缝孔洞的储集性能远弱于类洞穴的。通过类洞穴+裂缝孔洞的测井响应特征对比可知:类洞穴储集体深侧向电阻率为 $20 \sim 100 \Omega \cdot \text{m}$,声波时差相对增大 $10 \sim 20 \mu\text{s}/\text{ft}$,中子孔隙度比临近地层的高 $5\% \sim 10\%$,地层密度减

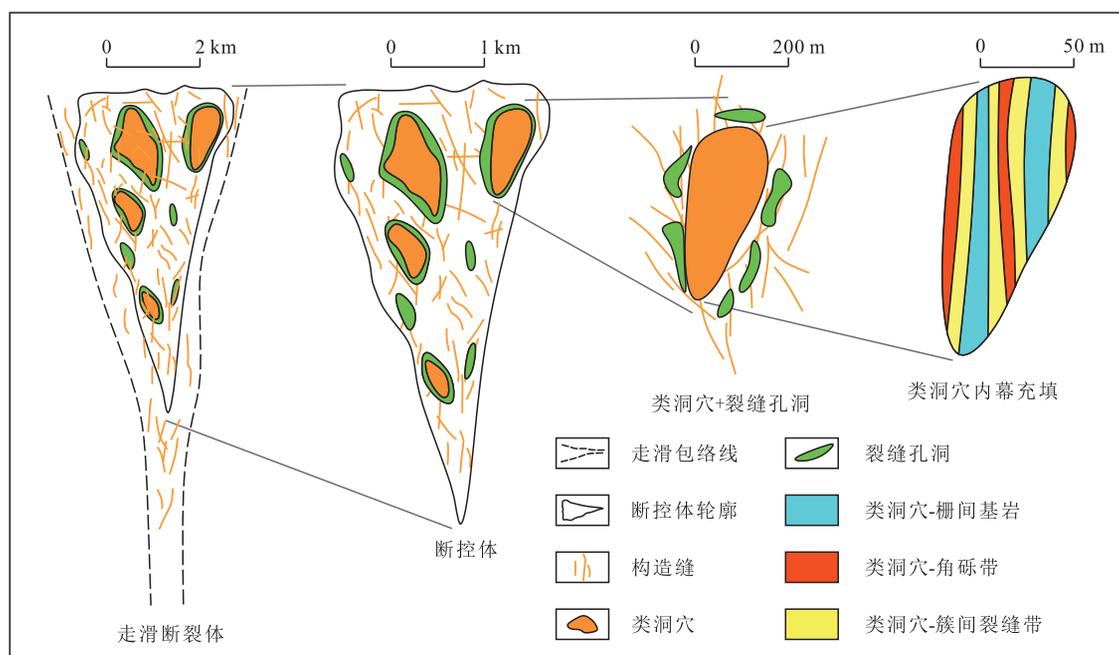


图1 断控体结构层次划分
Fig.1 Hierarchy of fault-controlled body

小,井径存在明显的扩径;类洞穴外围的裂缝孔洞储集体深侧向电阻率为 $50 \sim 600 \Omega \cdot m$,声波时差相对增大 $5 \sim 10 \mu s/ft$,中子孔隙度与地层密度曲线近于平直,扩径较明显;非储层基本是断控体外侧的基岩,电阻率大于 $500 \Omega \cdot m$,声波时差、中子孔隙度等变化均较小,属于致密地层;因此,储集性能表现为:类洞穴 > 裂缝孔洞 > 非储层。

1.4 类洞穴内幕充填

1.4.1 单井类洞穴内幕解剖

在常规地震剖面上,规模相对较大的类洞穴在地震剖面呈串珠状形态的分布特征(图2),在能量梯度属性剖面上,均方根振幅表现为强振幅的“亮点”反射特征(图2a)。在钻井过程中,钻遇类洞穴主要表现为钻井液漏失和放空,如A47X井7 894.19和7 986.68 m漏失量分别为54.1和111.86 m^3 ,8 084.78 ~ 8 086.98 m发生放空、钻井液失返。在常规测井曲线上,类洞穴的深侧向电阻率迅速减小、声波时差增大(图2b),成像测井呈裂缝发育的特征,说明串珠状发育部位为有效储层(图2c);而在连接串珠处,曲线恢复正常。

在有效储层内部,储层发育也存在较大差异。断层角砾岩是走滑断裂带的主要充填物,角砾岩发育的角砾带以洞穴、裂缝为储集空间,储层物性好,宽度较为稳定。簇间裂缝带一般靠近角砾带发育区,主要发育水平或高角度裂缝,储层物性弱于角砾带。栅间基岩区裂缝发育较差,储层物性较差,声波时差与电阻率曲线基本上没有变化。总之,角

砾带、簇间裂缝带与栅间基岩间互发育(图2c),将此类储层结构定义为“栅状结构”。

1.4.2 类洞穴内幕充填模式

断控体的类洞穴不是一个完整的洞穴或者孔洞,在断裂、沉积演化过程中,类洞穴或者孔洞存在充填,也就是说类洞穴内幕存在储集空间与隔层。综合岩心、钻井、录井、成像等资料,在解剖单井类洞穴内幕充填的基础上,建立了类洞穴内幕的充填栅状结构模式(图3)。栅状结构角砾带发育区定义为簇,而栅间基岩-簇间裂缝带则定义为簇间。簇间裂缝带与簇间裂缝带之间存在栅间基岩,簇间裂缝带内部存在一个或者多个的角砾带,栅间基岩、簇间裂缝带发育的裂缝也是油气横向或者纵向运移的通道。通过研究区16口井的统计分析,簇的规模和发育频率在不同部位略有差异:在类洞穴核部,角砾带发育1.6段/100 m,宽度为8.4 m/100 m,平均宽度为5.4 m/100 m;在类洞穴边部,角砾带发育2.0段/100 m,宽度为7.6 m/100 m,平均宽度为3.8 m/100 m;说明类洞穴核部角砾带发育频次少,但单个的宽度较大,这与核部走滑断裂应力作用强、断层角砾岩充填作用强具有密切关系。

2 类洞穴的精细刻画

2.1 类洞穴轮廓刻画

类洞穴是断控体储层的主要组成部分,在断控体内存在多个类洞穴的叠置,类洞穴轮廓刻画是内

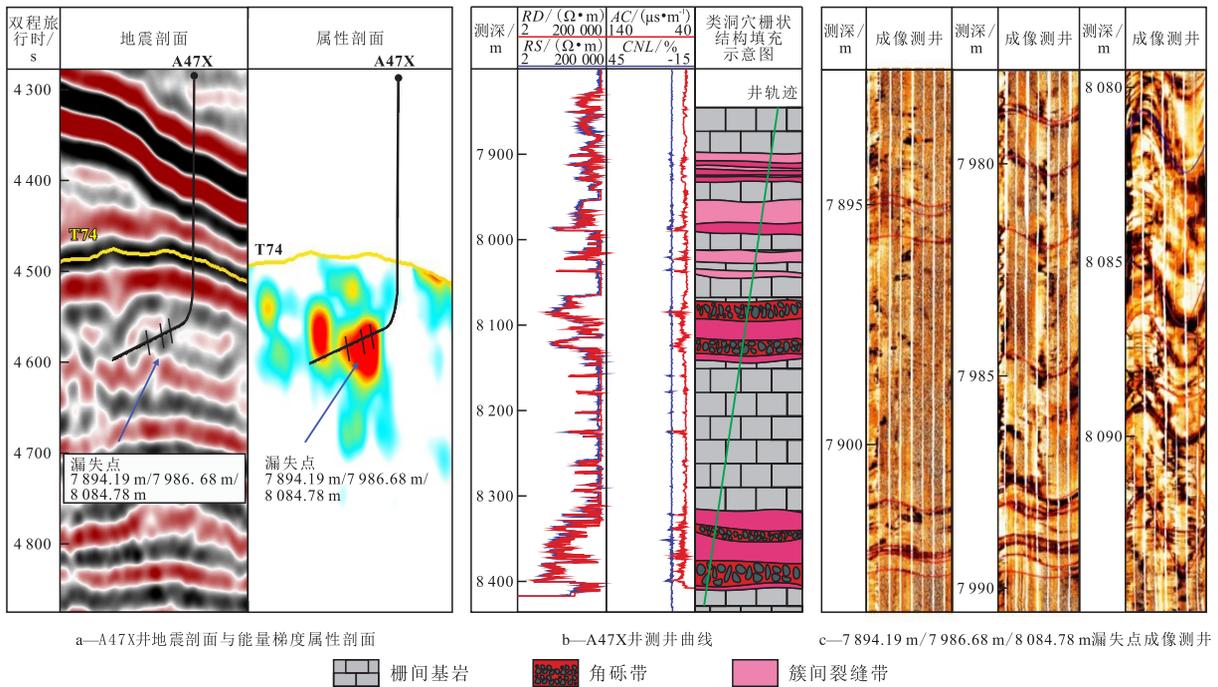


图2 单井类洞穴的识别与栅状模式的建立
Fig.2 Identification of single well caverns-like and establishment of grid model

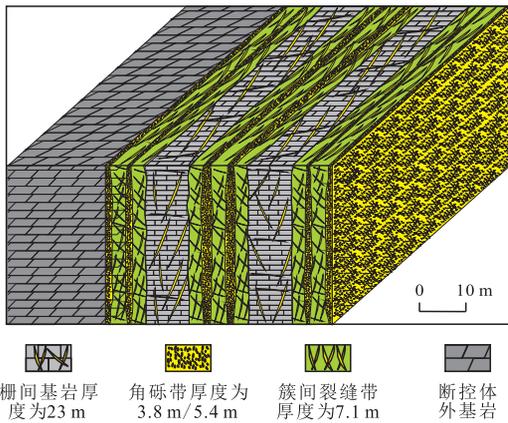


图3 类洞穴充填栅状结构模式
Fig.3 Model of filled grid structure of cavern-like

幕刻画的基础。采用地震属性截取的研究思路,利用多窗口倾角扫描、叠合能量梯度、结构平滑等属性开展类洞穴的识别、提取。目前研究区50口井共钻遇洞穴70个,厚度为5~35 m。

以井震结合的方式,通过地震属性的截取,建立类洞穴轮廓。其步骤包括:①通过多窗口倾角属性扫描,可以将走滑断裂带范围提取出来。②利用叠合能量梯度的相干变化率刻画类洞穴的轮廓。③利用结构平滑属性,不仅可以反映一些小洞穴,还可以消除一些误差。

将上述类洞穴轮廓放入地质网格中,把漏失点作为类洞穴的具体边界,并和漏失点所对应的属性值进行对比,确定类洞穴边界的阈值为0.46,提取类洞穴共49个。从纵向分布特征来看,浅部类洞穴

较深部更发育且连通性更好;在空间上,类洞穴主要集中在A-30H井区、A-25H和A-20H井区、A-10H井区。在A-30H和A-2H两口井之间,走滑断裂的表征不清晰,说明在两口井之间走滑断裂发育不明显,同样在两口井之间几乎没有类洞穴的发育,进一步说明类洞穴的发育受走滑断裂控制。

2.2 类洞穴内幕刻画

2.2.1 类洞穴内幕刻画的方法

类洞穴内幕为栅状结构特征,发育簇充填以及簇间充填,其储集体质量存在差异,也是影响注水开发的重要因素。由于利用地震属性刻画类洞穴内幕没有效果,本次主要通过钻井漏失资料、自编程实现图像分析和数理统计相结合的方法刻画类洞穴内幕,关键步骤包括:①建立模式。将每口井的漏失点进行统计、归纳,结合测井、岩心等资料,对钻遇的储层进行初步辨别,确定栅间基岩、簇间裂缝带以及角砾带的具体位置。针对类洞穴内幕多栅多簇的发育特点,先建立栅间基岩模式(图4a),再建立簇间裂缝带以及角砾带模式(图4b,4c)。②自编程实现图像分析与数理统计相结合,确立类洞穴中轴面。对于单个洞穴核部区域与翼部区域的具体划分,采取距离中轴面远近的方式,获取类洞穴某处距中轴面的垂直距离,判断其所处的区域。对于中轴面采取逐面逐线扫描的方式获得。首先,从类洞穴起始位置开始,按垂直走滑断裂带方向,获取类洞穴平行走滑断裂带的截面。其

次,对当前截面沿垂直方向,从上到下逐线扫描,从扫描到的线数据中,获取类洞穴每一点的坐标信息,即可得到当前线段中心点的坐标;将当前截面中所有中心点连接起来,即为当前截面的中轴线。再次,将类洞穴所有截面的中轴线连接起来,即为当前类洞穴的中轴面。③核部与翼部的划分与建立。以类洞穴内幕中心点为基准,进行核部与翼部的划分,确定核部与翼部的大致区域之后,即可根据其实际宽度进一步确定簇间裂缝带与角砾带的栅的数量及簇的数量。簇间裂缝带与角砾带的实际宽度在垂直方向与平行走滑断裂带方向并非恒定不变,而随类洞穴的变化而变化,当类洞穴的整体厚度由宽到窄逐渐收缩时,簇间裂缝带与角砾带的宽度也会由宽到窄逐渐收缩,当类洞穴的整体走势发生变化时,簇间裂缝带与角砾带的走势也会随类洞穴而变化。

2.2.2 类洞穴内幕裂缝带与角砾带刻画

类洞穴内幕簇间裂缝带与角砾带的刻画是整个断控体内幕表征的重点与难点。其刻画过程分2

步:第一,簇间裂缝带模式的刻画取决于裂缝带的相对位置参数和宽度参数。二者均不是固定不变的,而是随空间位置的变化而变化;在垂直走滑断裂带方向上,以类洞穴核心处确定的簇间裂缝带与中轴面的相对距离参数以及宽度参数为基准,对于平行走滑断裂带方向上任意截面(图4b),沿垂直走滑断裂带方向上类洞穴的实际宽度与该类洞穴核心处的最大宽度的比值,以该比值作为指数变换,然后与基准相对距离参数、宽度参数相乘,即可得到当前位置处的相对距离与宽度。第二,在已经完成栅间基岩-簇间裂缝带模式的基础上,刻画角砾带,该模式的建立类似于簇间裂缝带的刻画过程,根据角砾带发育频率与发育规模的统计,分析每一个类洞穴中角砾带栅和簇的数量,从而完成角砾带的刻画(图4c)。研究区建立的类洞穴内幕角砾带、簇间裂缝带与栅间基岩(图5)分布表明,A-30H,A-25H,A-26H等井的类洞穴内幕的角砾体与簇间裂缝带较发育,A-4H,A-6H井的类洞穴内幕的角砾体与簇间裂缝带发育相对较差。

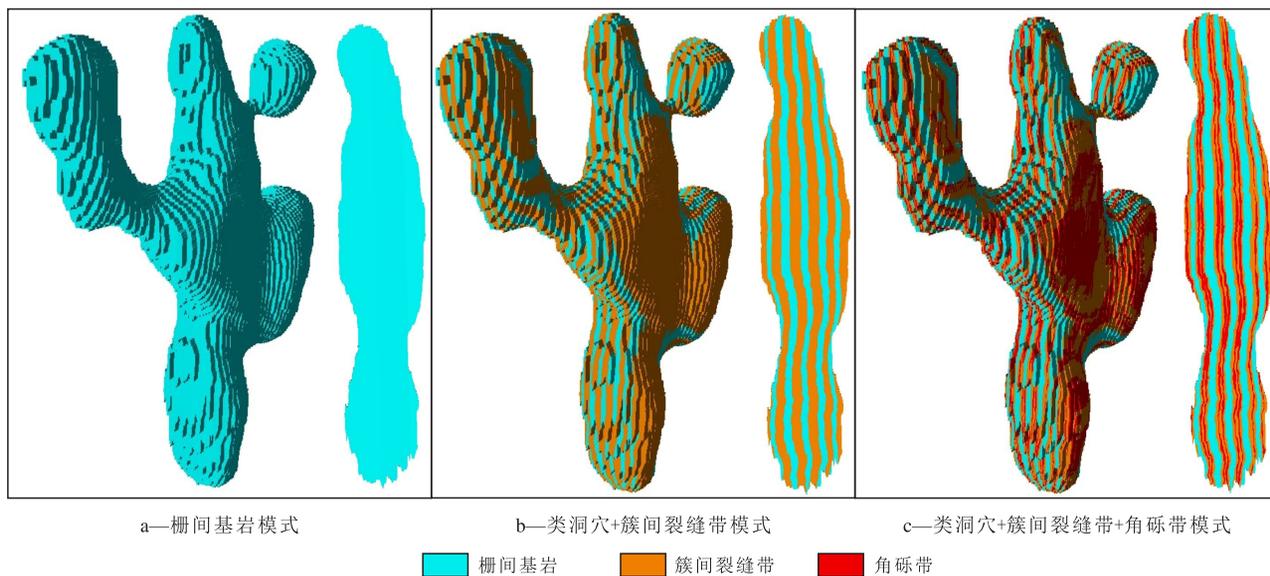


图4 类洞穴内幕栅状体模式及截面

Fig.4 Inner grid models and sections of caverns-like

2.3 类洞穴簇走向调整

通过应力场分析,研究区走滑断裂带挤压段主要受压扭作用,以形成正向隆起构造为特征;拉分段主要受张扭作用,以形成负向构造为特征。由于平移段、挤压段与拉分段所受的应力场有差异,各段的类洞穴簇充填体的走向与断裂方向也存在差异;因此,在刻画类洞穴的内幕时,应充分考虑不同段的应力场方向,计算出挤压段与拉分段应力场与簇充填体走向偏移角度。计算结果表明:平移段的

类洞穴簇充填体的走向与断裂方向一致;挤压段与平移段相比,其栅状体走向发生逆时针偏移10°;拉分段与平移段相比,栅状体走向发生逆时针偏移16°(图6)。因此,对于挤压段与拉分段的栅状体的走向调整,应逐个进行类洞穴走向调整,以过类洞穴核心点垂直方向为旋转轴,在栅间基岩模型的基础上,对簇间裂缝带和角砾带进行逆时针旋转调整角度,得到不同段预测的内洞穴的簇充填走向与分布特征符合实际情况。

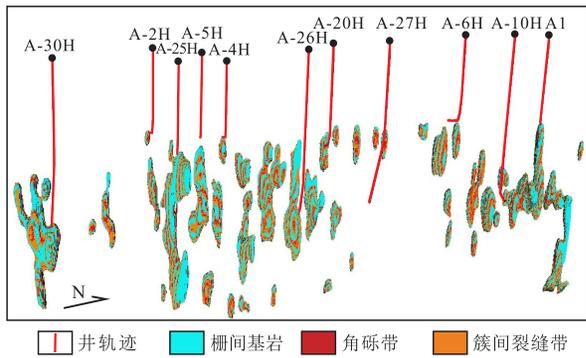


图5 类洞穴内幕角砾带、簇间裂缝带与栅间基岩分布

Fig.5 Distribution of inner breccia zones, intercluster fracture zones, and intergrid matrix of caverns-like

3 断控体空间分布特征

综合上述的走滑断裂体类洞穴轮廓与类洞穴内幕刻画等,建立研究区断控体的空间分布模式(图7)。AA'剖面与BB'剖面断控体类洞穴簇间裂缝带与角砾带呈高角度的直立分布(图7b,7c),上部与下部的类洞穴分布存在明显的差异:AA'剖面上部的类洞穴弱于下部的类洞穴;BB'剖面类洞穴的角砾带、簇间裂缝带主要发育于上部,上部的断控体储集性好。图7a展示了断控体上部类洞穴、裂缝孔洞等内幕的平面分布,A-26H与A-10H等井的

储集体较发育,在A-27H—A-6H井之间储集体发育较差。图7d的断控体模型包含断裂带的断面、裂缝孔洞、类洞穴内幕的簇间裂缝带与角砾带等,类洞穴以及类洞穴内幕的簇间裂缝带、角砾带比较发育的区域是靠近奥陶系中上部的储层,除了与走滑断裂作用有关之外,还与碳酸盐岩的沉积、淋滤和溶蚀作用具有密切关系。裂缝孔洞也主要发育于奥陶系中上部,与类洞穴内部构成碳酸盐岩断控体,是目前油气藏发现的主要储层类型。裂缝孔洞还发育于奥陶系下部,呈条带状展布,与走滑断裂的样式较吻合;这也揭示奥陶系中下部裂缝孔洞型储层还有较大的勘探潜力。

断控体类洞穴的优劣控制了油气藏的规模与产量;类洞穴内部的栅状结构体现了较强的非均质性,角砾带与簇间裂缝带决定了类洞穴的储集性,栅间基岩是阻挡断控体油气藏渗流的主要因素。A-2H井钻遇类洞穴的角砾带,储集体物性好,单位压降产量为2 981 t/MPa, A-4H井钻遇了簇间裂缝带与栅间基岩之间过渡带,储集体物性相对较差,其单位压降产量为595 t/MPa;说明角砾带的储集优于簇间裂缝带与栅间基岩之间的过渡带,角砾带与簇间裂缝带是开发部署优选的区域,有利于提高油气藏采收率。

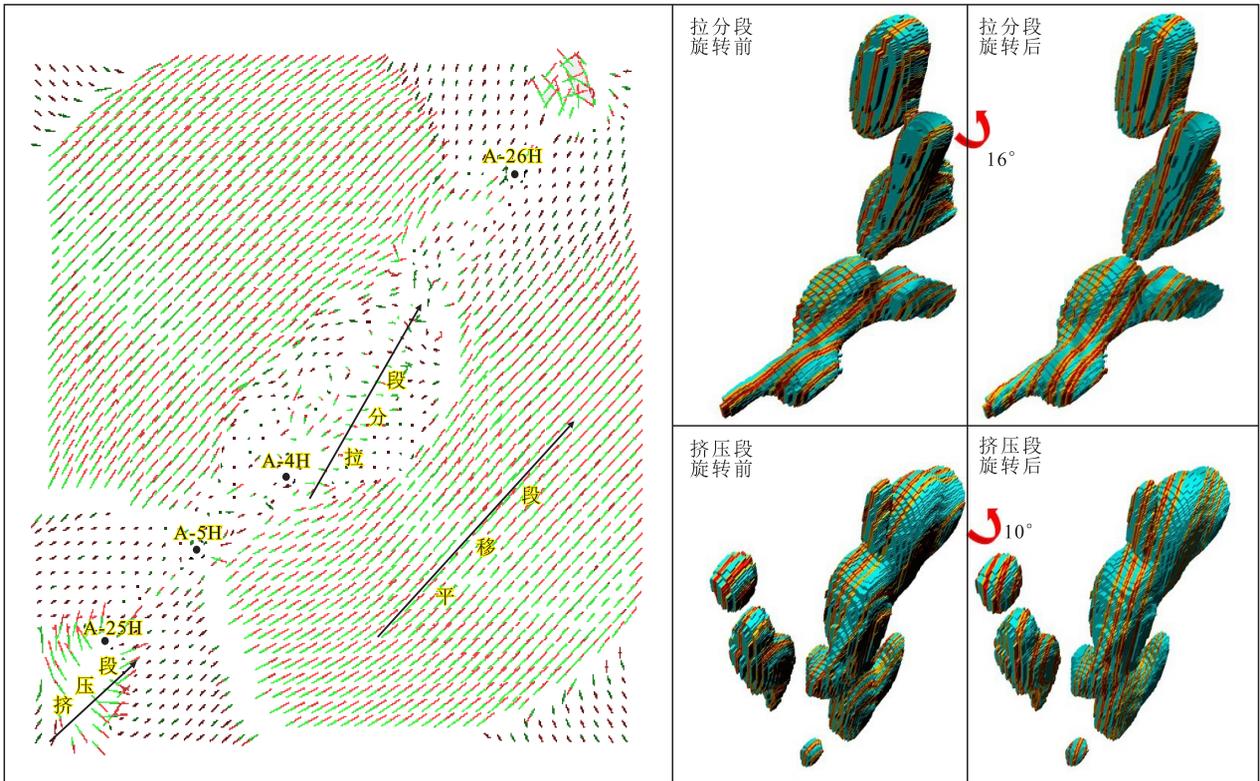


图6 走滑断裂拉分段与挤压段的类洞穴内部的簇走向的调整

Fig.6 Adjustment of cluster strikes of pull sections and extrusion sections of strike-slip fault in caverns-like

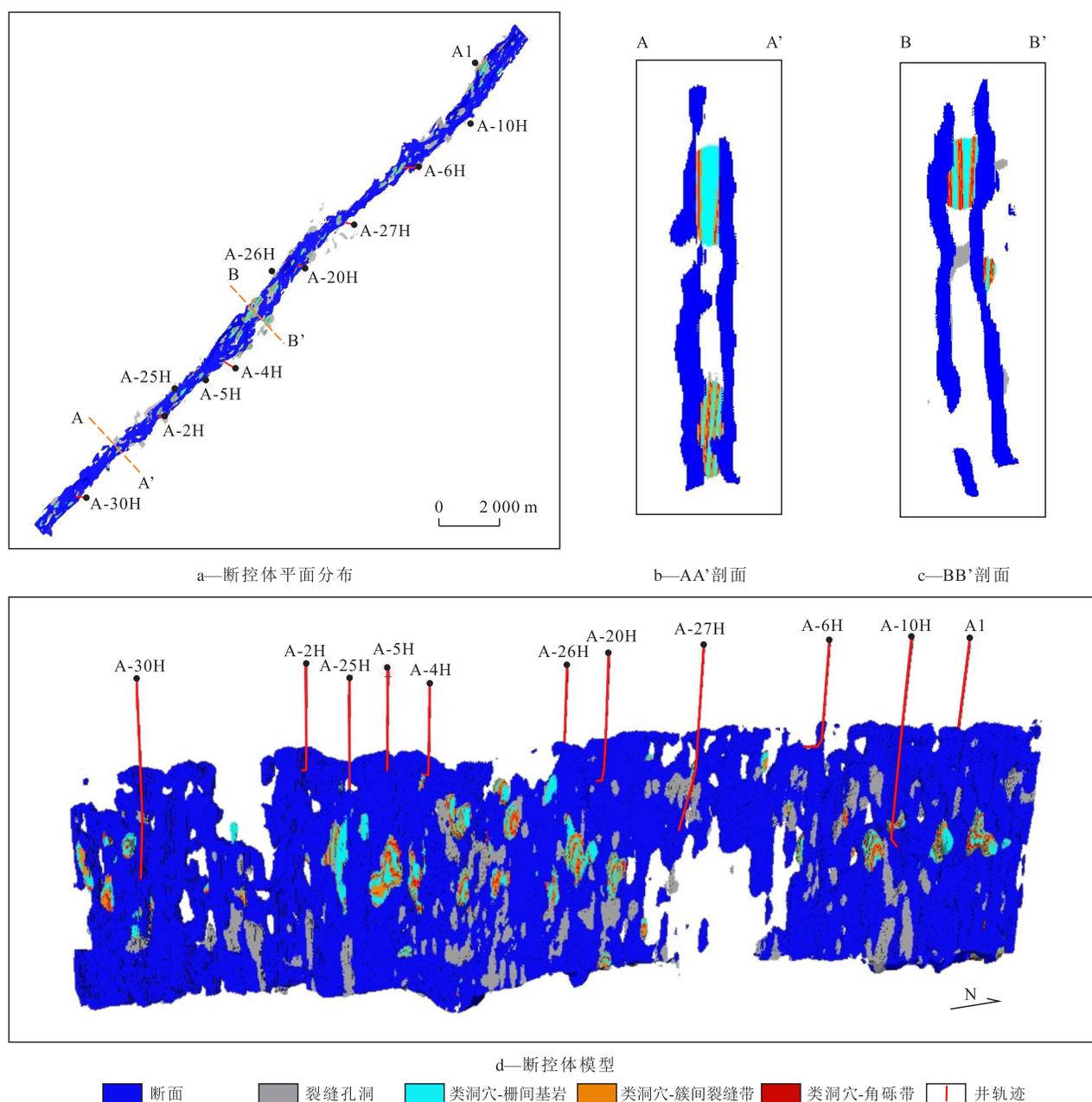


图7 A区断控体及其内幕刻画图
Fig.7 Fault-controlled body in area A and its inner depiction

4 结论

断控体的洞穴不是一个完整的洞,类洞穴内簇充填栅状结构模式说明该洞是由角砾带、簇间裂缝带与栅间基岩组成,角砾带与簇间裂缝带的发育优劣控制了类洞穴的储集性。倾角扫描、能量梯度、结构平滑等多种参数具有识别、刻画、平滑类洞穴轮廓的作用,多属性值与漏失量的对比关系确定类洞穴边界的门槛值为0.46,较好地显示类洞穴轮廓。自编写程序实现图像分析与数理统计相结合,从动态的角度分析核部与翼部的区域,刻画

了类洞穴内幕的角砾带、簇间裂缝带以及栅间基岩。挤压段与平移段相比,其栅状体走向发生逆时针偏移10°;拉分段与平移段相比,栅状体走向发生逆时针偏移16°。角砾带与簇间裂缝带是类洞穴的储集空间,栅间基岩对油气藏流体起到分隔和遮挡作用。

参考文献

[1] 程洪,汪彦,鲁新便.塔河地区深层碳酸盐岩断溶体圈闭类型及特征[J].石油学报,2020,41(3):301-309.
CHENG Hong, WANG Yan, LU Xinbian. Classifications and characteristics of deep carbonate fault-karst trap in Tahe area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(3): 301-309.

- [2] 吕艳萍,罗君兰,王炯,等.塔河油田典型碳酸盐岩断溶体发育模式[J].西安石油大学学报:自然科学版,2021,36(1):20-26.
LÜ Yanping, LUO Junlan, WANG Jiong, et al. Development mode of typical carbonate fault-affected karst system in Tahe Oilfield [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2021, 36(1): 20-26.
- [3] 常媛,贾鹏飞.塔里木盆地塔中地区连续型碳酸盐岩油气藏地质特征及形成原因[J].大庆石油地质与开发,2022,41(2):11-15.
CHANG Yuan, JIA Pengfei. Geological characteristics and forming cause of the continuous carbonate reservoirs in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(2): 11-15.
- [4] 刘军,陈强路,王鹏,等.塔里木盆地顺南地区中下奥陶统碳酸盐岩储层特征与主控因素[J].石油实验地质,2021,43(1):23-33.
LIU Jun, CHEN Qianglu, WANG Peng, et al. Characteristics and main controlling factors of carbonate reservoirs in the middle and lower Ordovician in Shunnan area of the Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1): 23-33.
- [5] 唐军,何泽,申威,等.对标产能的碳酸盐岩储集层测井分类评价——以塔里木盆地托甫台地区一间房组为例[J].新疆石油地质,2023,44(1):112-118.
TANG Jun, HE Ze, SHEN Wei, et al. Logging classification and evaluation of carbonate reservoir with benchmark productivity: taking Yijianfang Formation in Tuofutai area of Tarim Basin as an example [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(1): 112-118.
- [6] 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 carbonate fault solution reservoirs in the Tahe area [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347-355.
- [7] 陈雨霖,唐军.新疆塔里木盆地托甫台地区碳酸盐岩储层缝洞测井评价[J].工程地球物理学报,2022,19(5):689-698.
CHEN Yulin, TANG Jun. Fracture cavity logging evaluation of carbonate reservoirs in Tuofutai area, Tarim Basin, Xinjiang [J]. Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(5): 689-698.
- [8] 丁志文,汪如军,陈方方,等.断溶体油气藏成因、成藏及油气富集规律——以塔里木盆地哈拉哈塘油田塔河南岸地区奥陶系为例[J].石油勘探与开发,2020,47(2):286-296.
DING Zhiwen, WANG Rujun, CHEN Fangfang, et al. Origin, hydrocarbon accumulation and oil-gas enrichment of fault-karst carbonate reservoirs: A case study of Ordovician carbonate reservoirs in South Tahe area of Halahatang oilfield, Tarim Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 286-296.
- [9] 祝渭平,孙东,姚清洲,等.塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气富集规律[J].特种油气藏,2021,28(2):41-48.
ZHU Weiping, SUN Dong, YAO Qingzhou, et al. The law of hydrocarbon accumulation in carbonate reservoirs in Halahatang area, Tarim [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(2): 41-48.
- [10] 朱立华,马灵伟,白英哲,等.顺北超深断控体地震多信息约束速度建模[J].石油物探,2019,58(6):864-873.
ZHU Lihua, MA Lingwei, BAI Yingzhe, et al. Velocity modeling of an ultra-deep fault controlled reservoir Shunbei area, China, using a multi-information constraint [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(6): 864-873.
- [11] 张文彪,段太忠,赵华伟,等.断控岩溶体系空间结构差异性三维建模——以顺北1号断裂带为例[J].科学技术与工程,2021,21(28):12 094-12 108.
ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, ZHAO Huawei, et al. Spatial structure differences and 3D modeling of fault controlled karst systems: taking the Shunbei No. 1 fault zone as an example [J]. Science and Technology and Engineering, 2021, 21(28): 12 094-12 108.
- [12] 刘宝增.塔里木盆地顺北地区油气差异聚集主控因素分析——以顺北1号、顺北5号走滑断裂带为例[J].中国石油勘探,2020,25(3):83-94.
LIU Baozeng. Analysis of main controlling factors of oil and gas differential accumulation in Shunbei area, Tarim Basin: taking Shunbei No. 1 and No. 5 strike slip fault zones as examples [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 83-94.
- [13] 马永生,蔡勋育,云露,等.塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J].石油勘探与开发,2022,49(1):1-17.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 1-17.
- [14] 张煜,李海英,陈修平,等.塔里木盆地顺北地区超深断控缝洞型油气藏地质-工程一体化实践与成效[J].石油与天然气地质,2022,43(6):1 466-1 480.
ZHANG Yu, LI Haiying, CHEN Xiuping, et al. Practice and effect of geology-engineering integration in the development of ultra-deep fault-controlled fractured-vuggy oil/gas reservoirs, Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1 466-1 480.
- [15] 刘宝增,漆立新,李宗杰,等.顺北地区超深层断溶体储层空间雕刻及量化描述技术[J].石油学报,2020,41(4):412-421.
LIU Baozeng, QI Lixin, LI Zongjie, et al. Spatial characterization and quantitative description technology for ultra-deep fault-karst reservoirs in the Shunbei area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 412-421.
- [16] 李宗杰,杨子川,李海英,等.顺北沙漠区超深断溶体油气藏三维地震勘探关键技术[J].石油物探,2020,59(2):283-285.
LI Zongjie, YANG Zichuan, LI Haiying, et al. Three-dimensional seismic exploration method for ultra-deep fault-related dissolution reservoirs in the Shunbei desert area [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(2): 283-285.
- [17] 马乃拜,金圣林,杨瑞召,等.塔里木盆地顺北地区断溶体地震反射特征与识别[J].石油地球物理勘探,2019,54(2):399-403.

- MA Naibai, JIN Shenglin, YANG Ruizhao, et al. Seismic response characteristics and identification of fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(2): 399-403.
- [18] 常少英,崔仕提,曹鹏,等.碳酸盐岩断溶体构型地震表征关键技术及应用[J].*海相油气地质*,2022,27(2):192-201.
CHANG Shaoying, CUI Shiti, CAO Peng, et al. Key techniques and applications of seismic characterization of carbonate fault-karst configuration [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2022, 27(2): 192-201.
- [19] 刘军,李伟,龚伟,等.顺北地区超深断控储集体地震识别与描述[J].*新疆石油地质*,2021,42(2):238-245.
LIU Jun, LI Wei, GONG Wei, et al. Seismic identification and description of ultra deep fault controlled reservoirs in the Shunbei region [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(2): 238-245.
- [20] 文山师,李海英,洪才均,等.顺北油田断溶体储层地震响应特征及描述技术[J].*断块油气田*,2020,27(1):45-49.
WEN Shanshi, LI Haiying, HONG Caijun, et al. Seismic response characteristics and description techniques of fault solution reservoirs in Shunbei Oilfield [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(1): 45-49.
- [21] 胡文革.塔河碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术及攻关方向[J].*油气藏评价与开发*, 2020, 10(2): 1-10.
HU Wenge. Development technology and research direction of fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(2): 1-10.
- [22] 张立安,王少鹏,张岚,等.通过地质建模剖析古潜山碳酸盐岩裂缝性储层地质特征[J].*油气藏评价与开发*, 2021, 11(5): 688-693.
ZHANG Li'an, WANG Shaopeng, ZHANG Lan, et al. Analysis on geological characteristics of fractured carbonate reservoir in buried-hill by geological modeling [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(5): 688-693.
- [23] 田建华,朱博华,卢志强,等.基于井控多属性机器学习的缝洞型储层预测方法[J].*油气地质与采收率*,2023,30(1):86-92.
TIAN Jianhua, ZHU Bohua, LU Zhiqiang, et al. Fracture-cavity reservoir prediction based on well-controlled multi-attribute machine learning [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(1): 86-92.
- [24] 但玲玲,史长林,文佳涛,等.多信息融合裂缝建模技术在碳酸盐岩双重介质油藏开发中的应用[J].*油气地质与采收率*,2022,29(1):46-51.
DAN Lingling, SHI Changlin, WEN Jiatao, et al. Application of multi-information fusion modeling technology for fractures in dual-medium carbonate reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(1): 46-51.
- [25] 解慧,赵进,郭臣,等.基于优选地震参数的缝洞型油藏单井产能预测模型[J].*油气地质与采收率*,2022,29(4):150-158.
XIE Hui, ZHAO Jin, GUO Chen, et al. Well productivity prediction model for fracture-cavity reservoirs based on optimized seismic parameters [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(4): 150-158.
- [26] 张文彪,张亚雄,段太忠,等.塔里木盆地塔河油田托甫台区奥陶系碳酸盐岩断溶体系层次建模方法[J].*石油与天然气地质*,2022,43(1):207-217.
ZHANG Wenbiao, ZHANG Yaxiong, DUAN Taizhong, et al. Hierarchy modeling of the Ordovician fault-karst carbonate reservoir in Tuoputai area, Tahe oilfield, Tarim Basin, NW China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 207-217.

编辑 单体珍