

深层碳酸盐岩断控岩溶储集体结构模式与表征方法

吕心瑞,孙建芳,李红凯,卜翠萍,邬兴威,夏东领

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206)

摘要:断控岩溶储集体是塔里木盆地深层重要的碳酸盐岩储层类型,受走滑断裂与岩溶作用影响,其形态多样,结构复杂,且非均质性极强。应用露头、钻井、岩心、测井和地震等资料,运用岩溶地质学、构造地质学、地球物理学、地质统计学和生产动态分析等理论方法,研究塔河油田主体区S80,S65,T705以及S99等典型单元奥陶系断控岩溶储集体特征,分析断控岩溶储集体的发育主控因素、结构类型及分布特征,建立此类储集体的地震预测与地质建模方法。研究结果表明:①塔河油田主体区典型单元奥陶系断控岩溶储集体是断裂破碎带内部及周边裂缝带溶蚀形成的具有不同空间结构的缝洞系统,其发育规模、形态和结构受断裂性质、样式、级别及溶蚀强度控制。②分析走滑断裂几何形态、力学性质及伴生构造特征,明确断控岩溶储集体主要发育直立状、正花状和负花状3种断裂类型,平面上呈现直线型、雁列型、X型、斜列型、马尾型及平行型6种结构模式。在断裂交叉、拐点、叠接部位和端部储集体更发育,岩溶发育规模与断裂级别呈正相关。同一走滑断裂上,不同性质断裂段的断控岩溶储集体特征不同。③地震分频反演属性结合断控岩溶发育规律构建综合约束概率体,基于目标方法模拟生成断控岩溶训练图像,建立的多元约束多点统计地质建模方法能够精细表征断控岩溶储集体的形态、规模及结构特征。④地质建模有效表征了储集体主要沿断裂发育,且距断裂越近,储集体越发育的特点,利用抽稀井钻遇的储集体厚度对模型进行验证,实钻符合率由71.6%提高到85.8%。

关键词:结构模式;表征方法;断控岩溶储集体;缝洞型油藏;深层碳酸盐岩储层;塔河油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Architectural patterns and characterization methods of fault-controlled karst reservoirs in deep carbonates

LYU Xinrui, SUN Jianfang, LI Hongkai, BU Cuiping, WU Xingwei, XIA Dongling

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: Fault-controlled karst reservoirs, recognized as important deep carbonate reservoirs in the Tarim Basin, exhibit diverse morphologies, complex architectures, and extremely strong heterogeneity under the influence of strike-slip faults and karstification. The study investigates the Ordovician fault-controlled karst reservoirs in typical units including S80, S65, T705, and S99 within the main production area of the Tahe oilfield, Tarim Basin, and examine the characteristics, primary controlling factors, architectural types, and spatial distribution of these reservoirs, using data from outcrop and core observations, drilling, logging, and seismic surveys, and guided by theories and methodologies including karstology, structural geology, geophysics, geostatistics, and production dynamic analysis. Accordingly, we develop methods for the seismic prediction and geological modeling of these reservoirs. The results indicate that the Ordovician fault-controlled karst reservoirs are fracture-cave systems with varying spatial architectures that are formed by the dissolution of fracture zones within and surrounding the zones of fracturing and faulting. The scales, morphologies, and architectures of these reservoirs are governed by the properties, styles, grades, and dissolution intensity of faults. An analysis of the geometry, mechanical properties, and associated structures of strike-slip faults reveals that the strike-slip faults within the Ordovician fault-controlled karst reservoirs primarily exhibit three morphologic types on profiles (i. e., vertical, positive flower, and negative flower structures) and six planar architectural patterns (i. e., linear, en echelon, X-shaped, oblique, horsetail, and parallel patterns). The reservoirs

收稿日期:2024-12-22;修回日期:2025-04-14。

第一作者简介:吕心瑞(1983—),男,博士、研究员,油气田开发。E-mail: lvxr_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05014-002,2016ZX05053-003);中国石化科技攻关项目(P20016,P21038-2)。

are better developed at the intersections, inflection points, overlapping parts, and ends of faults, with the karst scale positively correlated with the fault grade. Along the same strike-slip fault, fault-controlled karst reservoirs exhibit varying characteristics in fault segments with different properties. By employing attributes from spectral decomposition and seismic inversion combined with the developmental patterns of the fault-controlled karst reservoirs, we develop a comprehensive constrained probability volume (CPV), and training images of these reservoirs are generated through simulations with a target-based approach. In addition, a geological modeling method integrating multi-point statistics and multiple constraints is established, allowing for the fine-scale characterization of the morphologies, scales, and architectural characteristics of fault-controlled karst reservoirs. Geological modeling results effectively reveal that the reservoirs mainly occur along faults and are better developed in parts closer to faults. Validation against the reservoir thickness encountered by sparse wells indicates that the model established using the proposed method increases the drilling coincidence rate from 71.6% to 85.8%.

Key words: architectural pattern, characterization method, fault-controlled karst reservoir, fractured-vuggy reservoir, deep carbonate reservoir, Tahe oilfield, Tarim Basin

引用格式: 吕心瑞, 孙建芳, 李红凯, 等. 深层碳酸盐岩断控岩溶储集体结构模式与表征方法[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 256–269. DOI: 10.11743/ogg20260117.

LYU Xinrui, SUN Jianfang, LI Hongkai, et al. Architectural patterns and characterization methods of fault-controlled karst reservoirs in deep carbonates[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 256–269. DOI: 10.11743/ogg20260117.

深层-超深层海相碳酸盐岩油气资源丰富,是中国能源接替的重要领域^[1]。中国先后在塔里木盆地和四川盆地发现了塔河、塔中、顺北、普光、元坝以及安岳等多个油气田,优质储层的埋藏深度下限也不断被突破^[2]。其中,塔河油田位于塔里木盆地北部沙雅隆起阿克库勒凸起中南段,是大型古生界海相碳酸盐岩油田,其奥陶系储层为典型的深层碳酸盐岩古岩溶缝洞型油藏,探明原油储量 13.8×10^8 t,埋深 5 500 ~ 7 000 m^[3-4]。在此类油藏中,断裂是流体运移的重要通道,受溶蚀作用影响,沿断裂多发育不同形态的岩溶缝洞储集体,成为油气聚集的理想场所,是勘探开发的重要目标^[5-7]。

研究表明,断控岩溶储集体的发育是构造-流体-岩溶多期耦合作用的结果,致密岩石在构造作用下产生裂缝,断裂及伴生裂缝为岩溶流体提供良好流动通道,易溶岩性矿物在风化淋滤、地层水及热液作用下被溶蚀,且溶蚀孔洞逐渐扩大,形成形状各异的储集空间,不同类型储集体沿断裂带分布,非均质性极强^[8-10]。针对塔里木盆地不同区块深层碳酸盐岩断控岩溶储集体的特点,众多学者开展相关研究,取得积极进展。塔河油田主体区缝洞储集体具有明显分带特征,基于岩溶成因分析,将古岩溶储层划分为表层岩溶带、渗流岩溶带及径流岩溶带等,其中渗流岩溶带主要发育渗流井、驻水洞及缝洞复合体,沿断裂发育的渗流井是连通表层岩溶带与径流岩溶带流体的通道,断裂对裂缝与溶洞的形成与分布具有控制作用^[11-14]。塔河油田西部储集体分布明显受断裂带控制,这类圈闭多

被称作断溶体,具有多个溶蚀带,研究表明岩溶作用与缝洞类型及分布具有密切的关系,溶蚀程度由外到内依次增强,由此建立了断溶体类型储层表征方法^[15-19]。哈拉哈塘和富满等地区存在大量非暴露岩溶缝洞储集体,受复杂断裂系统控制明显,明确断控区有利储层的分布规律,并提出走滑断裂分段性影响储层发育特征,断裂马尾段、斜列段和叠覆段储层最发育,而分支断层斜交段及线性段储层发育一般或较差^[20-26]。顺北地区受多期构造破坏作用影响,多种成因叠加改造,形成断控储集体,沿断裂面发育由空腔和裂缝带组成的缝洞集合体,具有走滑断裂栅状储集体结构模式,明确了其成因机制与主控因素^[10,27-30]。同时,根据断控岩溶储集体的特殊性,主要利用地震属性结合地质建模方法表征其形态及结构,如波阻抗反演结合梯度结构张量表征断控岩溶分布特征,采用基于目标、多点统计和深度学习等方法探索构建断控岩溶地质模型,并取得一定应用效果^[31-39]。这些认识和方法对于深层断控型油藏勘探与开发具有重要作用,目前部分区块已进入开发中、后期,提高采收率方法的实施对于储集体描述的准确性和精确性提出更高要求,需要在前期基础上进一步厘清断裂、裂缝与溶洞之间的相互关系,明确其成因演化过程与结构类型,揭示断控岩溶发育的主控因素与分布规律,建立精细断控岩溶储集体表征方法,为进一步提高开发效果奠定地质基础。

本文综合应用露头、钻井、岩心、测井和地震等资料,以岩溶地质学、构造地质学、地球物理学、地质统计

学和生产动态分析等理论方法为指导,以塔河油田主体区S80,S65,T705和S99等典型单元奥陶系储层为目标区,在断控岩溶储集体成因演化分析的基础上,研究其发育主控因素,明确断控岩溶储集体纵向及平面结构类型与分布;根据其发育主要受控于断裂的特征,以断控储集体结构模式为基础,研究分区带断控地质体训练图像的构建方法,建立融合地震属性与地质规律的储集体发育综合约束概率体,形成以综合概率体为约束的断控岩溶多点统计精细地质建模技术,刻画断控岩溶储集体形态及结构特征,提高了此类储层的表征精度。

1 成因演化与主控因素

1.1 成因演化过程

断裂活动导致裂缝发育,增强了地层渗透性,断裂及相关裂缝是岩溶发育的基础和关键,决定了流体流动的方向和路径,对岩溶储集体的形成和分布具有重要控制作用,实践也证明沿断裂带形成了不同类型的岩溶缝洞储集体,平面上呈条带状与平板状等^[7,16]。在区域构造作用下,形成沿断裂发育的脆性灰岩破碎带,岩溶水沿断裂产生下渗或上涌,断控岩溶储集体是破碎带内及周边裂缝带溶蚀形成的具有不同空间结构的缝洞系统。断控岩溶储集体演化过程包括断裂破碎带及派生裂缝的形成、溶蚀孔洞的形成、溶洞的形成以及溶洞进一步溶蚀扩大等阶段,根据成因差异,断控溶洞的形成包括断裂自身溶蚀扩大、断裂及伴生裂缝溶蚀和断裂及层理缝溶蚀等类型(图1)。

利用钻井、测井、地震以及动态分析等数据综合识别溶洞,结合岩溶成因分析及断裂分布特征,研究塔河油田奥陶系典型区块断控溶洞的发育规律。如S80单元为典型深大断裂控制的溶洞发育区:纵向上,27口井钻遇断控溶洞发育段,厚度总计196.5 m,50%以上的井钻遇2段以上溶洞储层,溶洞数量随深度的增加而减少,不整合面以下0~60 m深度范围内钻遇溶洞发育段21个、占总数的55.3%,不整合面以下60~130 m深度范围内钻遇溶洞15个、占总数的39.5%,不整合面以下大于130 m深度范围内的钻遇溶洞仅2个、占总数的5.2%;平面上,受多期构造运动及岩溶作用改造影响,大气淡水顺断裂溶蚀扩大形成溶洞,分布特征受断裂及古地貌控制明显,浅层溶洞主要分布在单元西部和中、南部,深层溶洞主要发育在东部深大断裂部位,中部储集体发育一般,由于溶洞遭受塌陷改造形成充填,断控溶洞与古暗河系统相互连通、交汇,构成了复杂的缝洞网络。

1.2 主控因素

综合分析野外露头 and 典型油藏解剖剖面得出,断裂性质、样式、级别以及溶蚀强度控制断控岩溶储集体的发育规模、形态和结构^[12-14,16,33,40-44]。

1.2.1 断裂性质

研究区存在大量的走滑断裂,是沿断裂走向两盘地层产生相对移动形成的,具有明显的分段性,表现为拉张、挤压和平移等性质,受不同性质断裂的控制,裂缝发育的范围和密度各异,发生溶蚀作用的程度及部位也不同(图2)。

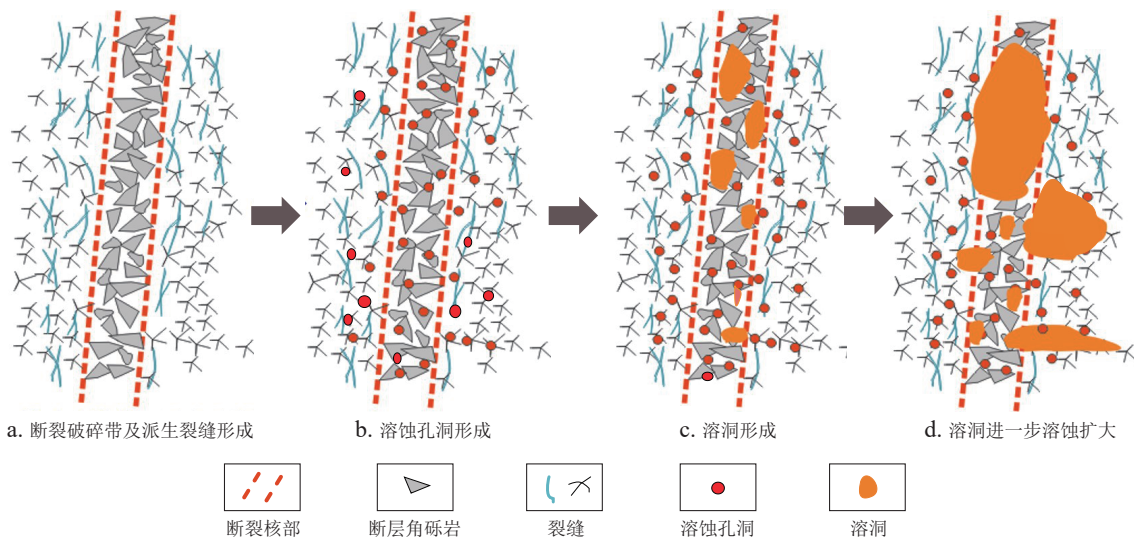


图1 断控岩溶储集体成因演化过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing the genetic evolution process of fault-controlled karst reservoirs

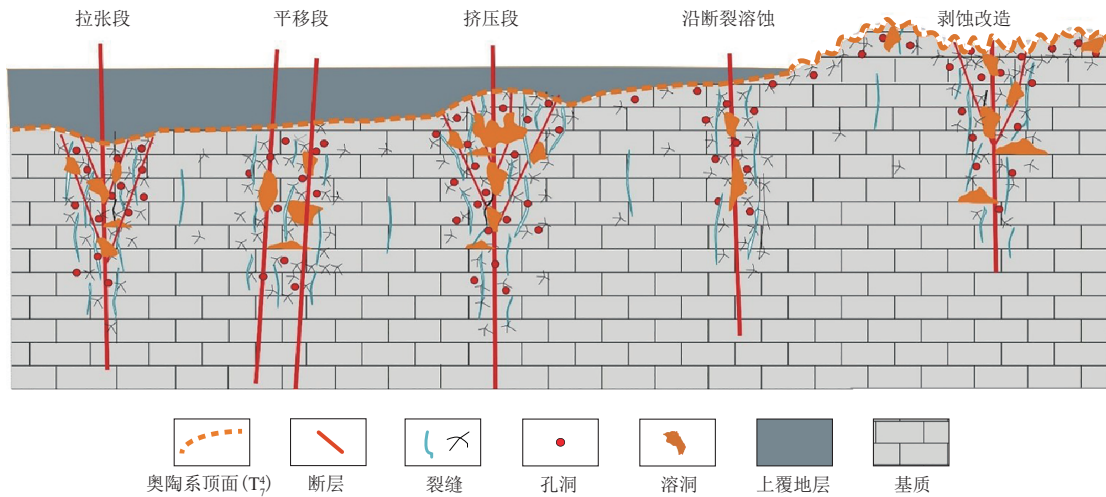


图2 塔河油田典型单元奥陶系走滑断裂分段特征及断控岩溶储集体发育特征

Fig. 2 Schematic diagram showing the segmented development of strike-slip faults and characteristics of corresponding Ordovician fault-controlled karst reservoirs in typical units of the Tahe oilfield

拉张断裂由溶洞、断层角砾岩和伴生高角度裂缝组成,剖面呈“V”字形,下窄上宽。张性断裂断面通常较陡,且由于受到拉张作用,断层开度大,易产生规模较大的垂向渗流岩溶作用,形成漏斗型断控岩溶储集体,表现为存在密集发育的裂缝带,断裂核部易发生溶蚀作用。

挤压断裂形成的断裂带宽度大,储集空间主要为岩石破碎所产生的缝洞,具有横向分带的特征,一般断层核中部岩石破裂严重,受淡水淋滤作用影响易形成大型溶洞,而断裂两侧岩石破裂程度逐渐减弱,裂缝形态由网状缝变为平行缝,且裂缝密度逐渐变小。

平移断裂具有向深部延伸的单一断面,呈近直立状,一般规模比较小,因断面陡直,倾角稍有变化就会造成断面倾向反转,导致断裂倾向多变,研究区内发育较多平行高陡断裂,空间上呈平行状分布特征,形成近于平行的断裂系统。

1.2.2 断裂样式

塔河油田奥陶系发育的走滑断裂在复杂地应力及多构造期次背景下,相互叠加,形成了结构复杂、形态多样的断裂样式,对断控岩溶发育产生影响。

研究发现塔河油田主体区典型单元的断裂平面上主要存在6种结构模式(图3),包括直线型、X型、平行型、斜列型、雁列型和马尾型。不同的断裂组合样式控制岩溶发育特征,断裂拐点与交叉部位、两侧、核部和端部裂缝发育密度较大,易形成溶洞。相比于线性断裂,断裂组合型裂缝和溶洞的发育范围明显较大。其中,斜列式结构多为断裂活动较弱区,主要发育断面平

直的直立状走滑断裂,平面上多呈直线状延伸。雁列式结构为主干断裂与派生断裂斜交形成,呈斜向错列展布。不同结构模式间断裂破碎带发育范围不同,断控储集体的发育特征也存在差异。总体上,溶洞的发育与典型断裂结构主要存在以下关系:雁列型平面结构的重叠部位、X型共轭与斜列型平面结构的交叉部位以及平行型与马尾型平面结构的分支端部和拐点处均易发育断控溶洞(图3)。

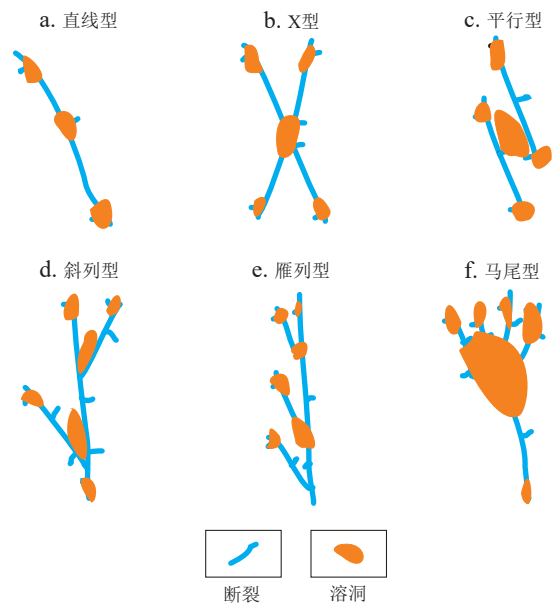


图3 塔河油田典型单元奥陶系不同断裂结构下的溶洞发育特征

Fig. 3 Karst caves corresponding to varying planar structural styles of the Ordovician strike-slip faults in typical units of the Tahe oilfield

1.2.3 断裂级次

不同级别的断裂对岩溶发育控制作用不同,断裂级别影响岩溶储集体发育规模,二者呈正相关关系:断裂级别越高,岩溶影响范围越大,距主断裂的距离越远,裂缝和溶洞发育密度越小。

研究区主要发育NNE向,NNW向和WE向3组断裂,根据断裂发育规模,结合断裂性质、活动期次和垂向断开层位等将断裂分为4级。其中,一级断裂主要为主干断裂,主要是贯穿南北的NW-SE向断裂和中南部的NE-SW向断裂,平面延伸长度大于10 km,垂直断距大于50 m;二级断裂主要为主干断裂的伴生断裂,平面上延伸长度范围为5~10 km,垂直断距范围为30~50 m;三级断裂主要分布在一级和二级断裂两侧,平面上延伸长度范围为2~5 km,垂直断距小于30 m;四级断裂主要是晚期形成的逆断层,平面上延伸长度小于2 km,垂直断距较小。断裂对裂缝发育的控制范围大于对溶洞发育的控制范围,断裂规模越大,断层周围裂缝发育概率越高,且裂缝带宽度通常越宽,溶洞发育程度相对较高,即断裂规模越大,其裂缝和岩溶发育程度越高(图4)。通过观察与塔河油田奥陶系碳酸盐岩相似的塔北野外露头,并实测其逆走滑断层发现,无论是断层上盘还是下盘,随着距断层距离的增加,裂缝发育密度依次递减,且相对而言下盘的递减速度更快,反映了逆走滑断层的上盘裂缝较下盘更为发育^[35]。断层上、下盘的裂缝线密度发育范围较大,总体上在1.57~7.52条/m范围内变化,其中断层上盘裂缝线密度的变化范围为2.09~7.52条/m,下盘裂缝线密度的变化范围为1.57~5.82条/m。

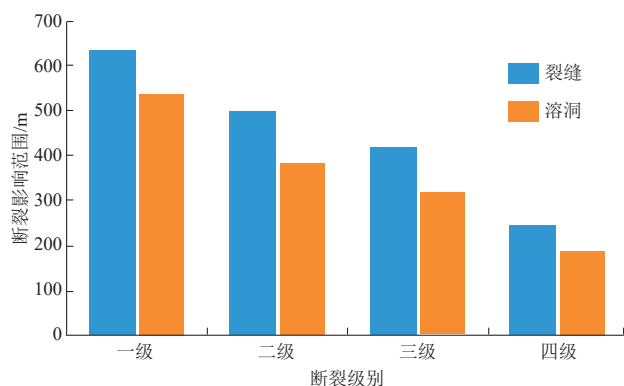


图4 塔河油田典型单元奥陶系不同级次断裂对裂缝和溶洞发育程度的控制

Fig. 4 Fracture and karst cave development under varying grades of the Ordovician faults in typical units of the Tahe oilfield

1.2.4 溶蚀强度

除断裂要素外,断裂溶蚀强度对储集体的发育规模和分布也发挥着重要作用,其通过控制岩溶规模和孔隙结构等,决定储集体类型和分布特征。在高溶蚀强度区,断裂带中的岩石发生强烈的溶解作用,从而形成大规模的溶洞、孔隙和裂缝,岩溶储集体的发育规模集中且较大,储层的连通性和渗透性通常较好;在低溶蚀强度区,断裂带的溶蚀作用较弱,形成的储集体规模较小且分散,储层的连通性和渗透性相对较差。塔河油田主体区断裂开启度高,多期活动,成为强径流水动力通道,溶蚀速率高,断裂溶蚀作用强烈,发育大量大型断控溶洞、溶蚀孔洞及溶蚀裂缝带,易形成复杂缝洞系统;外围部分区域断裂破碎带发育,水动力滞留明显,溶蚀速率低,溶蚀作用较弱,主要存在断面空腔、角砾间孔隙及构造缝等。

2 结构类型与分布特征

2.1 断裂类型与岩溶发育特征

根据塔河油田主体区典型单元奥陶系走滑断裂性质的不同,分析断裂几何形态、力学性质、应力背景及其伴生构造特征发现,主要存在直立状、正花状和负花状3种断裂类型。直立状走滑断裂具有近直立向深部延伸的单一断面,没有分支断裂,断裂带狭窄,规模较小,多呈平行状(图5a);花状构造是与走滑断裂水平运动伴生的类似花状的构造样式,由主干断裂和不同数量的派生断裂组合而成,其中主干断裂面陡直延伸至深部,派生断裂在两侧由浅部向深部聚敛,相交于主

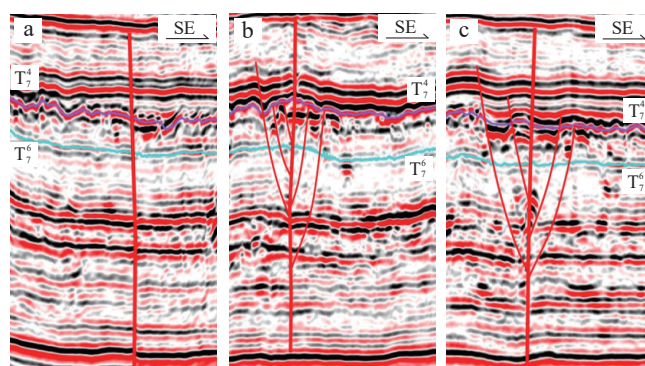


图5 塔河油田典型单元奥陶系走滑断裂不同构造样式地震剖面

Fig. 5 Varying structural styles of the Ordovician strike-slip faults in typical units of the Tahe oilfield

a. 直立状; b. 正花状; c. 负花状

干断裂,组成花状构造的断裂具有张剪或压剪性质,根据结构和力学性质的不同可分为正花状构造和负花状构造(图5b,c)。

2.1.1 直立状走滑断裂岩溶发育特征

研究区发育大量的直立状高陡断裂系统,空间上多呈平行分布。综合多学科资料对典型井T433井进行分析发现,该井钻至埋深5 608.6 m处出现井漏和井涌现象,据测井解释,上、下两部分分别为裂缝和溶洞储集体,孔隙度较好,地震剖面上沿断裂具多个串珠状反射特征,断控溶洞发育特征明显(图6a)。结合野外露头观察发现,直立状走滑断裂多为逆冲断裂的伴生断层,断层面附近裂缝较为发育,裂缝密集区更易形成溶洞,沿断裂形成线性近直立状廊道式溶洞,对断裂控制溶洞的认识,储层与露头基本一致(图6a')。

2.1.2 正花状走滑断裂岩溶发育特征

受压扭性应力作用形成的构造,主断裂在奥陶系上部形成多个向上分叉撒开的派生断裂,断层下部较陡,上部较缓,具有逆断的性质,向下聚敛于主断裂。主断裂与分支断裂间地层表现为凸面向上隆起的地垒式构造特征,正花状构造常见于走滑断裂上部形成的背形构造。压扭性断层上升盘逆冲易引起前缘褶皱,

在长轴背斜构造转折处发育张裂缝,易产生岩溶作用。通过对S67井段分析发现,该井在埋深5 559.0~5 585.0 m和5 589.0~5 595.5 m段均发育裂缝,在埋深5 586.0~5 588.0 m段发育溶洞,溶洞发育在裂缝层段中,与原始地震剖面反射特征具有良好对应关系(图6b)。挤压断裂形成的断裂带宽度较大,储集空间主要为岩石破碎产生的缝洞,一般断层核中部岩石破裂严重,受淡水淋滤作用易形成大型断控溶洞,岩石破裂程度向断裂两侧逐渐减弱,储集体由网状缝变变为平行缝,裂缝密度逐渐变小,溶洞发育规模也逐渐变小(图6b')。

2.1.3 负花状走滑断裂岩溶发育特征

受张扭性应力作用形成的构造,特点是断层向上分枝,多具有正断距,主干断裂与分支断裂间地层表现为凹面朝上的地堑特征,地堑内部地层平缓,浅部呈向斜形态。拉张型断裂储集体由溶洞、断层角砾岩和伴生裂缝组成,剖面下窄上宽,多呈“V”形。分析T615井典型井段,在埋深5 559.2~5 560.4 m段发育溶洞,在埋深5 569.5~5 571.1 m段发育裂缝,这与地震属性剖面溶洞发育特征相吻合(图6c)。张性断裂断面一般较陡,由于受拉张作用影响,断裂开度较大,易形成规模较大的垂向岩溶储集体(图6c')。

据实际井分析发现,研究区直立状走滑断裂的活

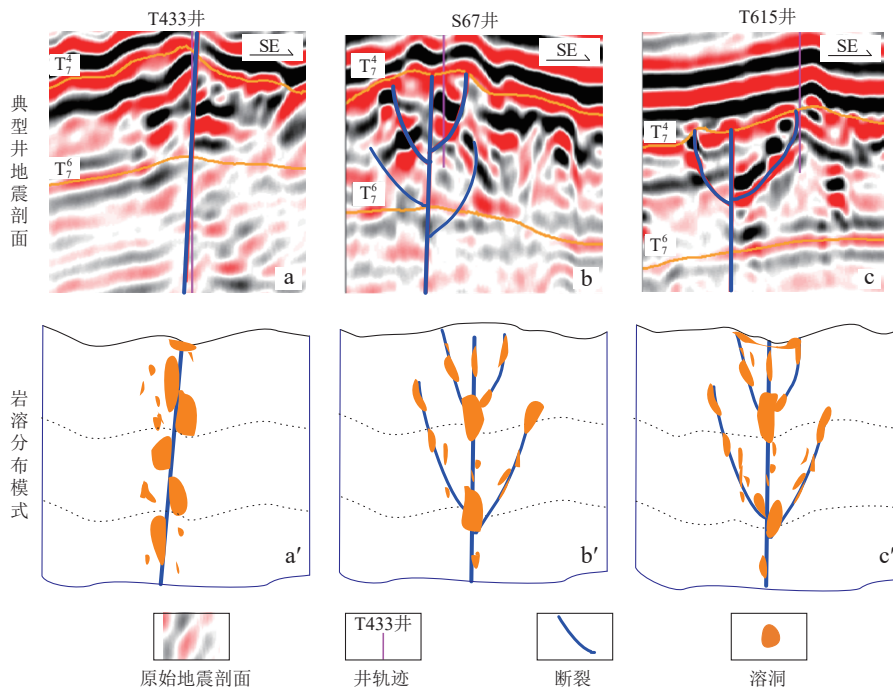


图6 塔河油田主体区典型单元奥陶系不同断裂构造样式与岩溶分布特征

Fig. 6 Varying structural styles of the Ordovician faults and corresponding karst cave distribution in typical units of the Tahe oilfield

a. 过T433井地震剖面; a'. 直立状断控溶洞分布模式; b. 过S67井地震剖面; b'. 正花状断控溶洞分布模式; c. 过T615井地震剖面; c'. 负花状断控溶洞分布模式

动盘、花状构造的分支端部以及主断裂与分支断裂的交叉部位均易发育溶洞。

2.2 断控岩溶储集体分布模式

断裂系统导致岩层发生破裂形成断裂破碎带,提升了储层基质的孔、渗物性,改善了储层的流体渗流能力,促进岩溶流体的运移,增大了岩溶作用范围,对储集体平面发育位置和分布起着重要作用。受不同特征断裂体系控制,缝洞体平面分布特征差异明显,主要与断裂规模、方向和平面组合样式有关。

结合研究区断裂带定量刻画与野外露头观测结果发现,断裂及伴生裂缝决定了岩溶储集体的分布:断裂规模越大,断层破碎带和岩溶储集体发育程度越高、范围越大,形成的溶洞数量越多,且断裂破碎带的平面发育范围一般大于断控岩溶的发育范围。在断裂形成演化过程中,不同断裂的交汇和叠置部位以及断裂端部是构造应力集中作用区,会受到较强应力作用,该处的岩石易产生严重的破碎和变形,生成大量构造裂缝。当构造运动再次发生时,受前期形成裂缝的影响,这些部位岩石的力学强度变小,已存在的构造裂缝再次变形和扩张,形成更大范围的断裂破碎带。这些断裂破碎带为岩溶流体提供优势渗流通道,形成岩溶水集中流动区,与可溶岩石大面积接触,使得裂缝不断溶蚀扩大,最终形成溶洞,这些区域也就成为岩溶储集体发育的有利部位。基于井-震识别结果,结合断控岩溶发育主控因素和6种平面构造样式,建立了塔河油田典型单元奥陶系走滑断裂控制的岩溶储集体分布模式(图7)。

3 断控岩溶精细表征

3.1 断控岩溶储集体地震预测

裂缝及断控储集体预测技术是业界研究热点,地震相干体和蚂蚁体等用于识别断裂带及次级断裂的效果较好,振幅类、频率类及相位类地震属性均可用于预测断控岩溶储集体的边界和内部特征^[45-46]。其中,在结构张量预测轮廓约束下反演波阻抗,利用单井统计获取波阻抗门槛值,分类刻画断控溶洞及孔洞类储集体形态,基于储集参数与波阻抗之间关系,可以获得表征储层孔隙度等的数据库^[47]。

以S80单元为例,采用基于AVF的分频反演方法对大尺度断控岩溶储集体进行预测,首先分析原始地震资料的有效频带范围,并根据其有效尺度进行分频,提取不同频率的振幅属性,获取不同频段的地震数据体,然后利用神经网络或者支持向量机方法对分频数据体进行计算,反演目标数据体,得到不同溶洞高度下振幅与频率的关系,并将其引入反演过程,构建地震波形与测井波阻抗曲线间的非线性映射关系,最终利用该映射关系,把各分频属性体作为输入,优选与目标曲线同一量纲的信息,合成反演数据体^[48]。如图8a所示,TK744井在地震剖面上钻遇典型的“串珠状”反射特征,且在溶洞位置发生放空漏失,测井响应以高声波时差为典型特征,选取该井反映速度(岩性与物性)变化趋势的声波时差曲线为训练目标,求取其与分频地震属性的映射关系,得到反映大型断控溶洞储集体发

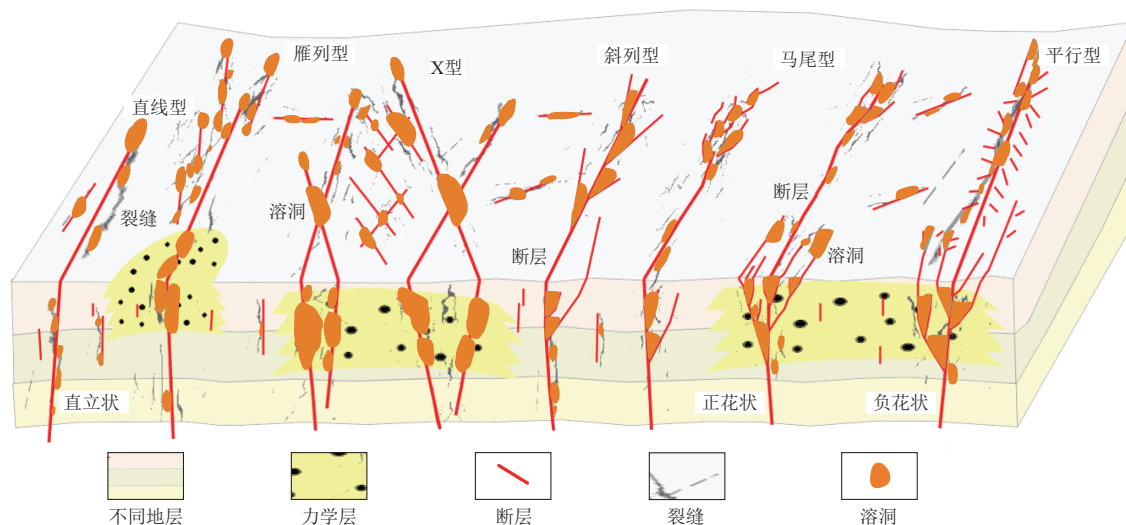


图7 塔河油田典型单元奥陶系断裂平面样式与溶洞发育模式示意图

Fig. 7 Planar distribution styles of the Ordovician strike-slip faults in typical units of the Tahe oilfield and corresponding developmental patterns of karst caves

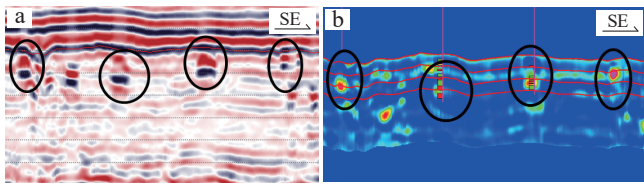


图8 塔河油田典型单元奥陶系大型断控岩溶储集体预测

Fig. 8 Prediction of the large-scale fault-controlled karst reservoirs of the Ordovician in typical units of the Tahe oilfield

a. 地震反射特征剖面;b. 断控溶洞地震频反演预测剖面

(图中黑色圆圈表示断控溶洞发育处。)

育的地震属性预测数据体(图8b)。

3.2 综合约束概率体构建

基于优选的表征断控岩溶储集体发育特征的地震属性,通过统计单井识别的断控岩溶储集体响应频率与井旁道地震属性的关系,建立地震属性不同值对应的溶洞发育概率,对所形成的统计图进行趋势拟合,将上述关系转化为数学关系式,多呈现出非线性统计规律,通过关系式计算将相关的地震属性转化为发育概率,形成基于地震属性的断控岩溶发育概率体(图9a)。因断控岩溶储集体形成主要受断裂的影响,概率体的构建主要考虑储集体发育可能性与到断裂距离的关系。基于断控岩溶缝洞分布规律研究成果,统计研究区断控岩溶发育频率与到断层距离的关系,构建反映断控岩溶发育可能性的概率体(图9b)。基于概率体对断控岩溶发育特征进行分析发现,到断裂距离越近,断控溶洞的发育概率越高,在断裂交汇处发育概率更高,与实际断控岩溶发育模式认识一致。

断控岩溶发育概率体的构建方法与过程存在一定的不确定性,且成因约束的概率体相对于地震响应转化的概率体更为主观,受到多点地质统计协同约束建模算法的影响,模拟过程无法应用多个概率体作为协同约束条件,因此在不同类型储集体建模过程中,需要对每类储集体的发育概率进行有效融合,构建包含多元信息的综合约束概率体,充分发挥岩溶地质成因和地震属性信息对不同类型储集体建模的协同约束作用。

根据待融合概率数据特点,采用概率累乘方法中的PR(Permanence of ratios)模型进行融合,该模型假设充分考虑了不同数据来源间的独立性,并确保变量间的比例关系保持相对稳定,无论是否已知信息D1,信息D2对事件A的增长贡献是相同的,能够剔除数据间的叠合冗余,构建综合概率体^[49]。其一般性公式如下:

$$P(R|S_1, \dots, S_n) = \frac{\left(\frac{P(R)}{1 - P(R)} \right) \left(\frac{1 - P(R)}{P(R)} \right)^{\sum_{i=1}^n \tau_i}}{\left(\frac{P(R)}{1 - P(R)} \right) \left(\frac{1 - P(R)}{P(R)} \right)^{n-1} + \prod_{i=1}^n \left(\frac{1 - P(R|S_i)}{P(R|S_i)} \right)^{\tau_i}} \quad (1)$$

式中: n 为条件概率数量,个; S_n 代表第 n 个控制因素; S_i 代表第 i 个控制因素; $P(R)$ 为建模区块溶洞发育的先验概率; $P(R|S_i)$ 为 S_i 对应的条件概率; τ_i 为 S_i 的独立贡献度, $\tau_i = 1 - \rho(S_1, S_2, \dots, S_i)$, 表示 S_i 与数据 $S_1, S_2, \dots, S_{i-1}$ 的相关系数,代表了 S_i 对前面数据的依赖程度。

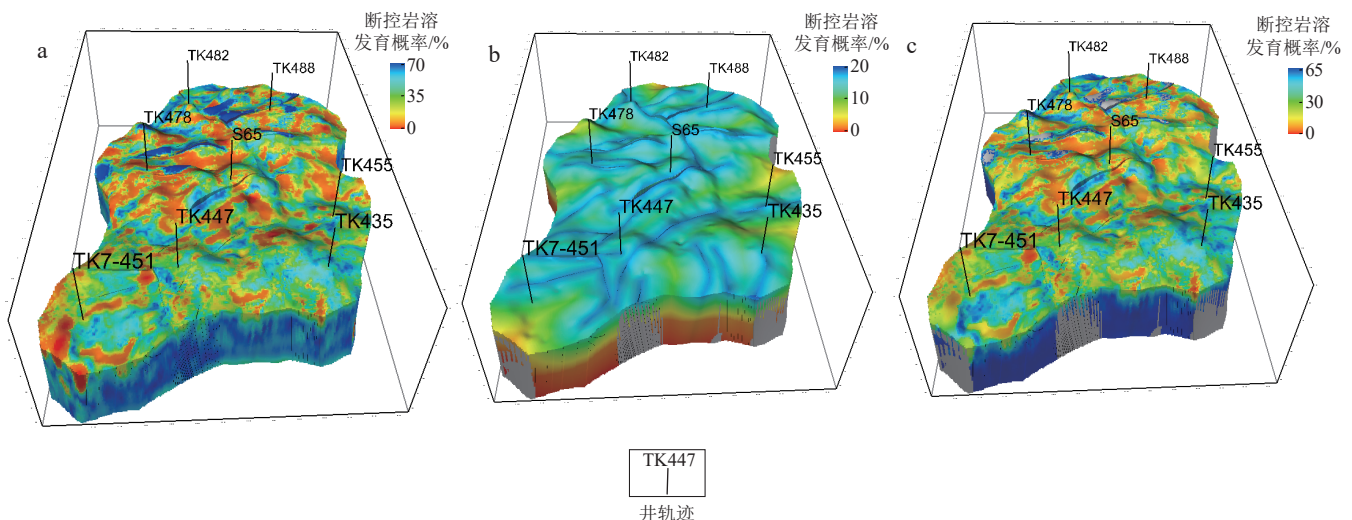


图9 塔河油田典型单元奥陶系断控岩溶发育概率体

Fig. 9 Probability volumes of the Ordovician fault-controlled karst reservoirs in typical units of the Tahe oilfield

a. 基于地震属性的断控岩溶发育概率体;b. 基于断裂距离的断控岩溶发育概率体;c. 多元约束的断控岩溶发育综合概率体

模型假设条件既考虑了各类信息间的冗余,也保持了不同来源数据的独立性。同样地,通过计算各因素相对其他因素的相关系数,得到各因素的独立贡献度,对基于地质模式和地震信息的储集体发育概率进行融合,将变量求取相关系数带入公式(1)即可得到储集体多元约束的断控岩溶发育综合概率体(图9c)。

3.3 分区带训练图像构建

断控岩溶储集体具有较强离散性特征,基于露头原型模型、人工绘制断控岩溶模式及对抗神经网络智能生成等方法,均能获取部分训练图像,但较难融合先验断控地质规律特征。通过野外露头观测及断控岩溶结构模式研究发现,断控储集体发育规律受断裂控制作用影响显著:距断裂越近,储集体分布规模越大,发育越密集,而远离断裂处,储集体分布规模渐小,发育稀疏。确定断层控制的地质体形状、规模和发育密度等,并将其作为定量约束参数,进一步表征其发育模式。统计单井钻遇储集体到断层的距离,根据其发育特征在平面上划分多个区带,构建分区带基于目标随机模拟的方法,将抽象的断控岩溶储集体按照露头上分区带统计的规模和频率进行模拟,形成断控岩溶储集体训练图像,能够体现溶洞主控因素与分布规律,储集体规模与密度也与实际露头相符。

基于目标的方法主要有两点优势:①可以较好地再现地质体几何形态;②能够将先验的地质规律和认识作为条件信息融合到模型中去,这样能够最大限度地综合、定量描述储集体的形态规模特征。根据露头上典型断控岩溶储集体特点,结合研究区实际单井识别及地震预测成果,选择溶洞空间形态和发育密度2个参数约束断控储集体的空间分布特征。分析单井识别的断控溶洞发育段与到断层距离的关系得出,溶洞高度与发育密度均随着到断层距离的增加而降低(图10)。根据这种溶洞发育规律,在平面上划分不同的断控岩溶区带,即断控区域一、断控区域二和断控区域三(图11)。

分析露头上断控溶洞的几何形态,将其简化为近直立状和近水平状2类。根据溶洞发育高度与分布密度随到断层距离的变化规律,采用分区带基于目标模拟的方法建立断控溶洞离散分布模型,作为断控溶洞多点统计结构建模的训练图像(图12)。结果表明:不同的断控区域,储集体发育特征差异显著,其中断控区域一内溶洞发育规模最大,且最为密集,溶洞形态、规模和发育密度随到断层距离变大逐

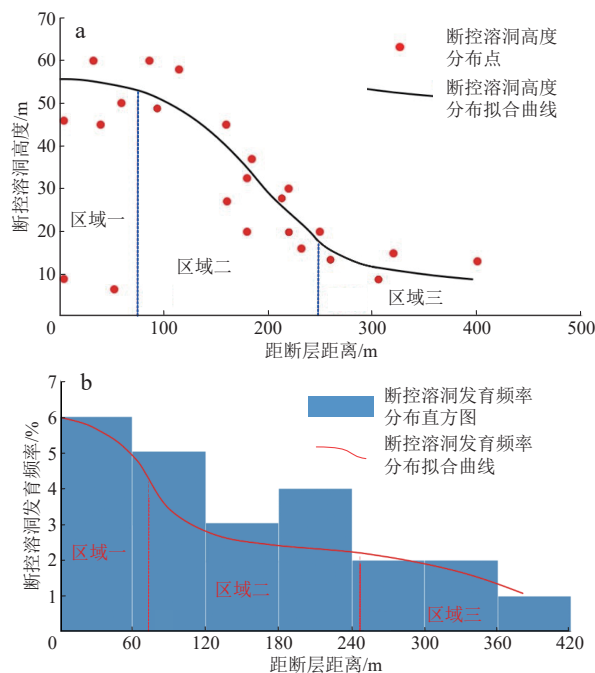


图10 塔河油田典型单元奥陶系断控溶洞发育特征随距断层距离变化规律

Fig. 10 Developmental characteristics of the Ordovician fault-controlled karst caves varying with their distances from faults in typical units of the Tahe oilfield

a. 断控溶洞高度与距断层距离的关系;b. 断控溶洞发育频率与距断层距离的关系

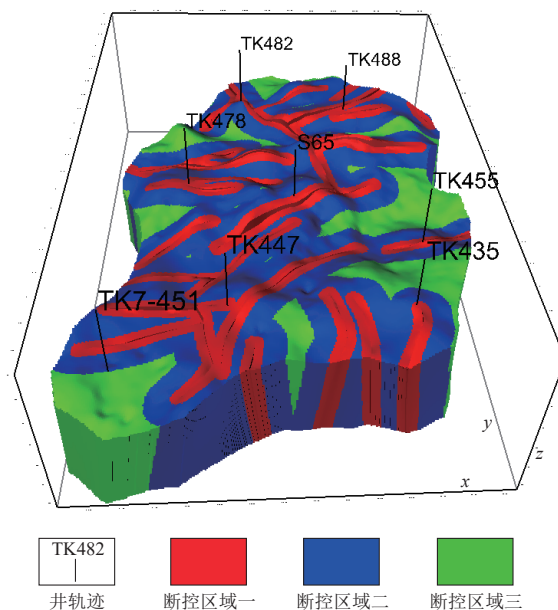


图11 塔河油田典型单元奥陶系断控岩溶分区带模型示意图

Fig. 11 Schematic diagram showing the modeling of the Ordovician fault-controlled karst zones in typical units of the Tahe oilfield
(x, y, z 表示坐标轴。)

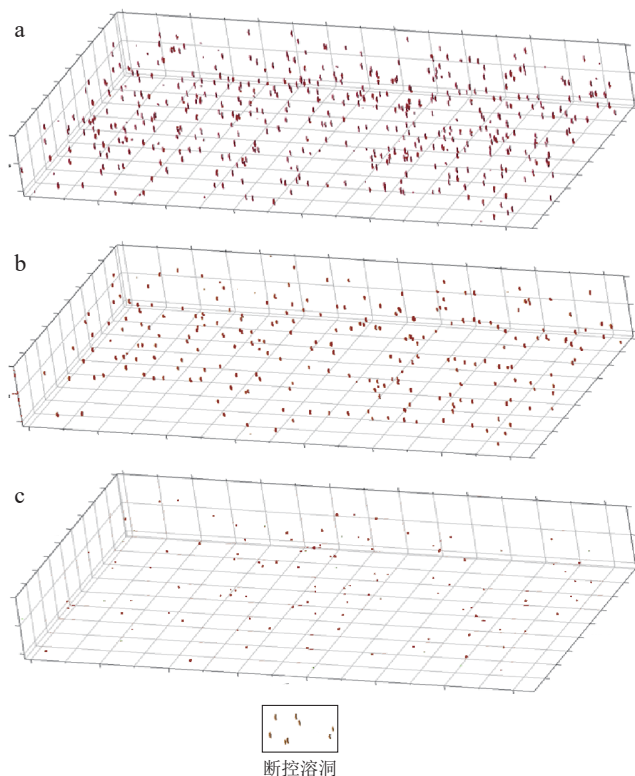


图12 塔河油田典型单元奥陶系断控岩溶分区带训练图像

Fig. 12 Training images of the Ordovician fault-controlled karst zones in typical units of the Tahe oilfield

a. 断控区域一; b. 断控区域二; c. 断控区域三

渐变小,与露头及实钻的统计规律基本吻合,其几何形态和分布特征与实际露头反映的模式信息也基本一致。

3.4 断控岩溶储集体精细建模

断控岩溶储集体分布主要依附于断层或裂缝,其建模最大难点是受分区带约束明显,不同区带储集体分布密度不同,溶洞形态差异较大。以单井揭示的断控岩溶发育段作为硬数据,以构建的断控岩溶综合发育概率体作为协同约束条件,优选断控岩溶分区带训练图像,采用多元约束多点地质统计建模方法,生成断控岩溶储集体分布模型。

建模过程中,通过依次扫描到断层距离构建的3个训练图像,得到的相关模板作为输入数据,并以分区带模型作为约束范围,保证在相关区带范围内进行模拟,建模过程中调整相比、置信度及软数据影响系数等,进一步确定建模参数。断控岩溶储集体建模结果显示,断控岩溶储集体发育频率、体积与到断层的距离成正比,储集体形态与露头特征及地震模式较为一致(图13)。

将断控溶洞垮塌角砾充填地震预测属性转换为概

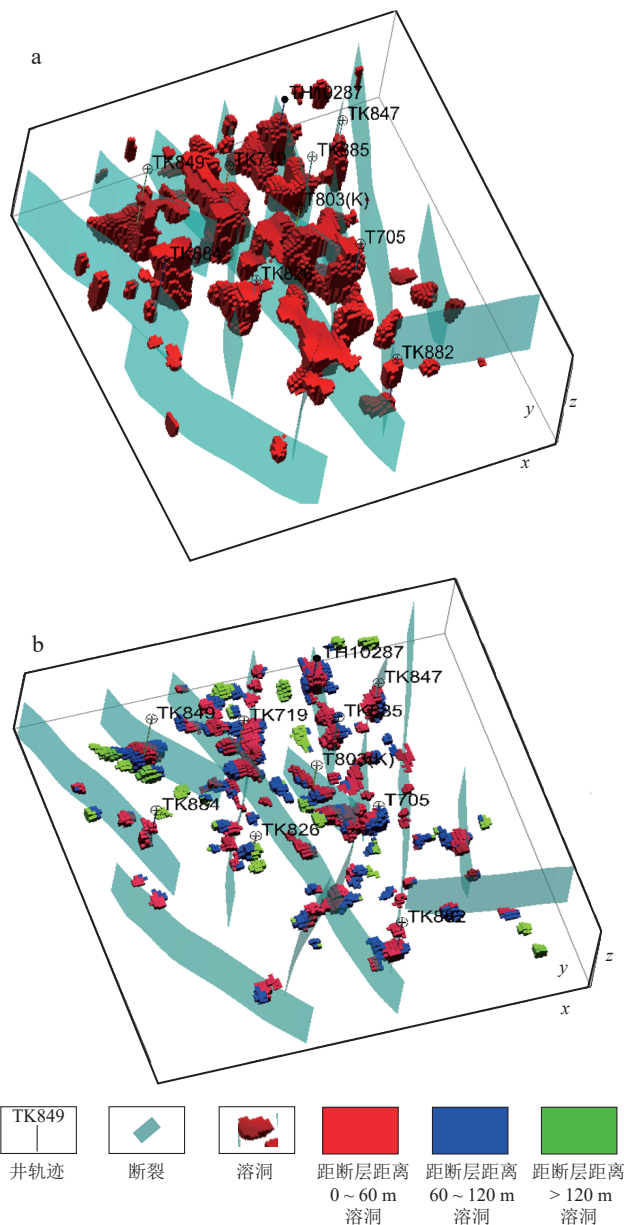


图13 塔河油田典型单元奥陶系断控岩溶储集体建模结果对比

Fig. 13 3D distribution model of the Ordovician fault-controlled karst reservoirs in typical units of the Tahe oilfield

a. 断控岩溶系统雕刻模型; b. 多点统计断控岩溶模型
(x, y, z 表示坐标轴。)

率体。以此概率体为约束,采用断控溶洞分布模型相控方法对溶洞充填特征进行模拟^[35,50]。同样,利用储集体分类约束方法,以井点测井解释得到的孔隙度等物性参数为硬数据,在不同类型断控储集体分布模型约束下,采用序贯高斯建模方法构建断控岩溶孔隙度和渗透率模型^[32-33]。

与常规的储集体雕刻建模方法进行对比,分析建立的T705单元典型断控岩溶结构模型的正确性和精细程度。在实钻井钻遇储集体符合率方面,利用抽稀

井钻遇的储集体厚度进行验证,符合率由雕刻建模的71.6%提高到新模型的85.8%;实际钻井钻遇断裂带宽度与模型符合率高达88.6%。在断控岩溶发育结构特征方面,新模型揭示了溶洞主要沿断裂发育,距离断裂越近、溶洞越发育的分区带结构特征(图14)。在断控岩溶储集体发育频率方面,与雕刻法构建的地质模型相比,新模型中的溶洞发育频率和到断裂距离统计规律,与露头 and 实钻井揭示的分区带规律具有更好的一致性。

4 结论

1) 断控岩溶演化主要包括断裂破碎带及派生裂缝的形成、溶蚀孔洞的形成、溶洞的形成以及溶洞进一步溶蚀扩大等过程,明确了塔河油田主体区典型单元断控岩溶储集体发育规模、范围和深度主要受断层级次、走向、部位和构造样式的控制。

2) 根据断裂性质及样式的差异,断控岩溶纵向上主要为直立状、正花状和负花状3种类型;直立状走滑断裂的活动盘、花状构造的分支端部以及主断裂与分支断裂的交叉部位均易发育溶洞;平面上分为直线型、雁列型、X型、斜列型、马尾型以及平行型6种结构模式,断裂交叉、拐点、叠接部位和端部的溶洞更发育,岩溶发育规模与断裂级别呈正相关。

3) 基于断控岩溶结构模式及分布规律构建成因控制储集体发育概率体,利用单井地震属性与储集体

频率响应关系,将地震属性数据转化为溶洞发育概率体,采用PR信息融合方法建立储集体发育综合概率体。基于储集体分区带发育特征,根据储集体规模和频率,采用基于目标的方法生成训练图像。以储集体综合发育概率体和训练图像为基础,构建分区带多元约束多点地质统计断控岩溶储集体精细建模方法。

4) 模型有效表征了断控岩溶储集体分布规律、缝洞结构及强非均质性特征,实钻井符合率由雕刻建模的71.6%提高到新模型的85.8%。模型刻画了溶洞主要沿断裂发育,距离断裂越近、溶洞越发育的分区带结构特征,得出的溶洞发育频率与到断裂距离统计规律与露头 and 实钻井揭示的分区带规律具有更好的一致性。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 马永生,蔡勋育,李慧莉,等. 深层-超深层碳酸盐岩储层发育机理新认识与特深层油气勘探方向[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 1-13.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, LI Huili, et al. New insights into the formation mechanism of deep-ultra-deep carbonate reservoirs and the direction of oil and gas exploration in extra-deep strata[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 1-13.
- [3] 张希明,杨坚,杨秋来,等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏描述及储量评估技术[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 13-18.
ZHANG Ximing, YANG Jian, YANG Qiulai, et al. Reservoir description and reserves estimation technique for fracture-cave type carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 13-18.
- [4] 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]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 1-10.
- [5] 鲁新便,杨敏,汪彦,等. 塔里木盆地北部“层控”与“断控”型油藏特征——以塔河油田奥陶系油藏为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(4): 461-469.
LU Xinbian, YANG Min, WANG Yan, et al. Geological characteristics of “strata-bound” and “fault-controlled” reservoirs in the northern Tarim Basin: Taking the Ordovician reservoirs in the Tahe Oil Field as an example[J]. Petroleum Geology and

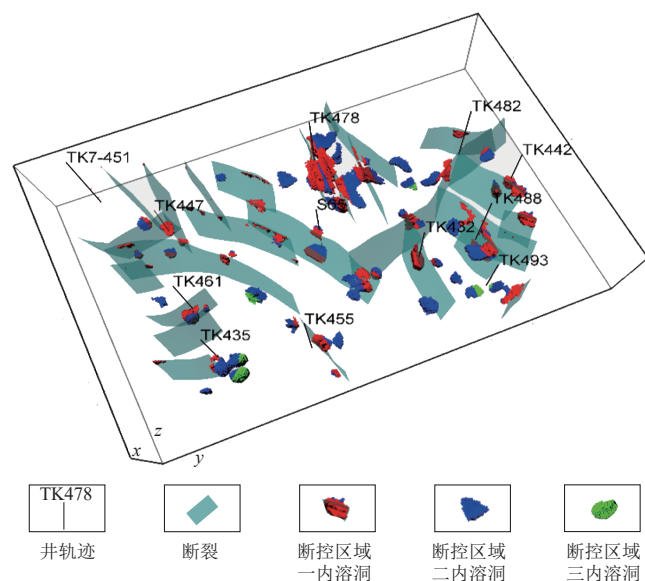


图14 塔河油田典型单元奥陶系断控溶洞储集体三维分布模型

Fig. 14 Comparison of models for the Ordovician fault-controlled karst reservoirs in a typical unit of the Tahe oilfield constructed using different methods
(x, y, z 表示坐标轴。)

- Experiment, 2018, 40(4): 461–469.
- [6] 胡文革. 塔里木盆地塔河油田潜山区古岩溶缝洞类型及其改造作用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 43–53.
- HU Wenge. Paleokarst fracture-vug types and their reconstruction in buried hill area, Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 43–53.
- [7] 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.
- [8] 张朝军, 贾承造, 李本亮, 等. 塔北隆起中西部地区古岩溶与油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(3): 263–269.
- ZHANG Chaojun, JIA Chengzao, LI Benliang, et al. Ancient karsts and hydrocarbon accumulation in the middle and western parts of the North Tarim uplift, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(3): 263–269.
- [9] 何治亮, 马永生, 朱东亚, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 533–546.
- HE Zhiliang, MA Yongsheng, ZHU Dongya, et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 533–546.
- [10] 黄诚, 云露, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统“断控”缝洞系统划分与形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 54–68.
- HUANG Cheng, YUN Lu, CAO Zicheng, et al. Division and formation mechanism of fault-controlled fracture-vug system of the Middle-to-Lower Ordovician, Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 54–68.
- [11] 李阳, 金强, 钟建华, 等. 塔河油田奥陶系岩溶分带及缝洞结构特征[J]. 石油学报, 2016, 37(3): 289–298.
- LI Yang, JIN Qiang, ZHONG Jianhua, et al. Karst zonings and fracture-cave structure characteristics of Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 289–298.
- [12] 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.
- [13] 马晓强, 侯加根, 胡向阳, 等. 塔里木盆地塔河油田奥陶系断控型大气水岩溶储层结构研究[J]. 地质论评, 2013, 59(3): 521–532.
- MA Xiaoliang, HOU Jiagen, HU Xiangyang, et al. Framework of fault-controlled meteoric palaeokarst Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Geological Review, 2013, 59(3): 521–532.
- [14] 史今雄. 塔河油田断裂对奥陶系碳酸盐岩缝洞储集体控制作用研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020: 112–118.
- SHI Jinxiang. Study on controlling effects of faults and fractures on Ordovician carbonate fracture-cavity bodies in Tahe Oilfield [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020: 112–118.
- [15] 商晓飞, 段太忠, 张文彪, 等. 断控岩溶主控的缝洞型碳酸盐岩内部溶蚀相带表征——以塔河油田10区奥陶系油藏为例[J]. 石油学报, 2020, 41(3): 329–341.
- SHANG Xiaofei, DUAN Taizhong, ZHANG Wenbiao, et al. Characterization of dissolution facies belt in fracture-cavity carbonate rocks mainly controlled by fault-controlling karst: A case study of Ordovician reservoirs in the Block 10 of Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(3): 329–341.
- [16] 韩长城, 林承焰, 鲁新便, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶斜坡断控岩溶储层特征及形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 644–652.
- HAN Changcheng, LIN Chengyan, LU Xinbian, et al. Characterization and genesis of fault-controlled karst reservoirs in Ordovician carbonate karst slope of Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 644–652.
- [17] 张文彪, 段太忠, 李蒙, 等. 塔河油田托甫台区奥陶系断溶体层级类型及表征方法[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 314–325.
- ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, LI Meng, et al. Architecture characterization of Ordovician fault-controlled paleokarst carbonate reservoirs in Tuoputai, Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 314–325.
- [18] 程洪, 张杰, 张文彪. 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[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 996–1003.
- CHENG Hong, ZHANG Jie, ZHANG Wenbiao. 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 [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 996–1003.
- [19] 李军, 唐博超, 韩东, 等. 断控缝洞型油藏储集体发育特征及其连通关系——以塔河油田托甫台区T单元为例[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(5): 572–579.
- LI Jun, TANG Bochao, HAN Dong, et al. Characteristics and connectivity of fault-controlled fractured-vuggy reservoirs: A case study of unit T in Tuofutai area, Tahe Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(5): 572–579.
- [20] 廖涛, 侯加根, 陈利新, 等. 断裂对塔北地区哈拉哈塘油田奥陶系非暴露岩溶缝洞型储集层的控制作用[J]. 古地理学报, 2016, 18(2): 221–235.
- LIAO Tao, HOU Jiagen, CHEN Lixin, et al. Fault controlling on non-exposed karst fracture-vug reservoirs of the Ordovician in Halahatang Oilfield, northern Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2016, 18(2): 221–235.
- [21] 陈利新, 王胜雷, 姜振学, 等. 哈拉哈塘油田塔河北区块奥陶

- 系断裂发育特征及断控区储层类型与分布预测[J]. 石油科学通报, 2024, 9(3): 408–421.
- CHEN Lixin, WANG Shenglei, JIANG Zhenxue, et al. Fault characteristics, reservoir types and distribution prediction in a fault-controlled area in the Ordovician strata of the Tahebei Block, Halahatang Oilfield [J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(3): 408–421.
- [22] 马德波, 邬光辉, 朱永峰, 等. 塔里木盆地深层走滑断层分段特征及对油气富集的控制: 以塔北地区哈拉哈塘油田奥陶系走滑断层为例[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 225–237.
- MA Debo, WU Guanghui, ZHU Yongfeng, et al. Segmentation characteristics of deep strike slip faults in the Tarim Basin and its control on hydrocarbon enrichment: Taking the Ordovician strike slip fault in the Halahatang Oilfield in the Tabei area as an example [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 225–237.
- [23] 吴昌达, 赵学钦, 邬光辉, 等. 塔北跃满区块一间房组碳酸盐岩断控型储层特征及其分布规律[J]. 中国地质, 2024, 51(3): 762–779.
- WU Changda, ZHAO Xueqin, WU Guanghui, et al. Characteristics and distribution of fault-controlled carbonate reservoirs in Yijianfang Formation of Yueman area, northern Tarim Basin [J]. Geology in China, 2024, 51(3): 762–779.
- [24] 张艳秋, 陈红汉, 王燮培, 等. 塔里木盆地富满油田走滑断裂带通源性评价[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 787–800.
- ZHANG Yanqiu, CHEN Honghan, WANG Xiepei, et al. Assessment of connectivity between source rocks and strike-slip fault zone in the Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 787–800.
- [25] 江同文, 邓兴梁, 曹鹏, 等. 塔里木盆地富满断控破碎体油藏储集类型特征与注水替油效果[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 542–552.
- JIANG Tongwen, DENG Xingliang, CAO Peng, et al. Storage space types and water-flooding efficiency for fault-controlled fractured oil reservoirs in Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 542–552.
- [26] 宋兴国, 陈石, 谢舟, 等. 塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 335–349.
- SONG Xingguo, CHEN Shi, XIE Zhou, et al. Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 335–349.
- [27] 云露, 朱秀香. 一种新型圈闭: 断控缝洞型圈闭[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 34–42.
- YUN Lu, ZHU Xiuxiang. A new trap type: Fault-controlled fracture-vuggy trap [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 34–42.
- [28] 张煜, 毛庆言, 李海英, 等. 顺北中部超深层断控缝洞型油气藏储集体特征与实践应用[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 1–13.
- ZHANG Yu, MAO Qingyan, LI Haiying, et al. Characteristics and practical application of ultra-deep fault-controlled fractured-cavity type reservoir in central Shunbei area [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 1–13.
- [29] 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): 1466–1480.
- 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): 1466–1480.
- [30] 伍齐乔, 李景瑞, 曹飞, 等. 顺北1井区奥陶系断溶体油藏岩溶发育特征[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 444–449.
- WU Qiqiao, LI Jingrui, CAO Fei, et al. Characteristics of fault-karst carbonate reservoirs in the Shunbei No. 1 well block, Tarim basin [J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 444–449.
- [31] 谢鹏飞, 侯加根, 汪彦, 等. 碳酸盐岩缝洞型储层多元信息融合建模方法在塔河油田十二区奥陶系油藏的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(3): 1–14.
- XIE Pengfei, HOU Jiagen, WANG Yan, et al. Application of multi-information fusion modeling of fracture-vuggy reservoir in Ordovician reservoir of 12th block in Tahe Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(3): 1–14.
- [32] 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 Xinrui, LI Hongkai, WEI Hehua, 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.
- [33] 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.
- [34] 陈叔阳, 何云峰, 王立鑫, 等. 塔里木盆地顺北1号断裂带奥陶系碳酸盐岩储层结构表征及三维地质建模[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(2): 124–135.
- CHEN Shuyang, HE Yunfeng, WANG Lixin, et al. Architecture characterization and 3D geological modeling of Ordovician carbonate reservoirs in Shunbei No. 1 fault zone, Tarim Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(2): 124–135.
- [35] 吕心瑞, 孙建芳, 李红凯, 等. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏精细地质建模技术[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1195–1210.
- LYU Xinrui, SUN Jianfang, LI Hongkai, et al. Fine geological modelling technology for deep fractured-vuggy carbonate oil reservoirs in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45

- (5): 1195–1210.
- [36] 段太忠, 张文彪, 何治亮, 等. 塔里木盆地顺北油田超深断溶体深度学习地质建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 203–212.
- DUAN Taizhong, ZHANG Wenbiao, HE Zhiliang, et al. Deep learning-based geological modeling of ultra-deep fault-karst reservoirs in Shunbei Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 203–212.
- [37] 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.
- [38] 何治亮, 孙建芳, 郭攀红, 等. 碳酸盐岩储集层知识库构建方法及其在缝洞型油藏地质建模中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 710–718.
- HE Zhiliang, SUN Jianfang, GUO Panhong, et al. Construction method of carbonate reservoir knowledge base and its application in fracture-cavity reservoir geological modeling [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(4): 710–718.
- [39] 胡迅, 侯加根, 刘钰铭. 多源断控岩溶型溶洞训练数据集构建和生成对抗网络三维建模应用[J]. 石油科学通报, 2024, 9(3): 422–433.
- HU Xun, HOU Jiagen, LIU Yuming. Construction of a multi-source fault-controlled karst cave training dataset and application in three-dimensional modelling using generative adversarial networks[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(3): 422–433.
- [40] 韩鹏远, 丁文龙, 杨德彬, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层裂缝表征与主控因素分析[J]. 地学前缘, 2024, 31(5): 209–226.
- HAN Pengyuan, DING Wenlong, YANG Debin, et al. Characteristics and main controlling factors of fracture development in the Ordovician carbonate reservoir, Tahe Oilfield [J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(5): 209–226.
- [41] 赫俊民, 王小垚, 孙建芳, 等. 塔里木盆地塔河地区中-下奥陶统碳酸盐岩储层天然裂缝发育特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 1022–1030.
- HE Junmin, WANG Xiaoyao, SUN Jianfang, et al. Characteristics and main controlling factors of natural fractures in the Lower-to-Middle Ordovician carbonate reservoirs in Tahe area, northern Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 1022–1030.
- [42] 马庆佑, 曾联波, 徐旭辉, 等. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面走滑断裂带内部结构及控储模式[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 69–78.
- MA Qingyou, ZENG Lianbo, XU Xuhui, et al. Internal architecture of strike-slip fault zone and its control over reservoirs in the Xiaerbulake section, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 69–78.
- [43] 韩长城, 林承焰, 任丽华, 等. 塔里木盆地塔河10区奥陶系断裂特征及对岩溶储层的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(5): 790–798.
- HAN Changcheng, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Characteristics of Ordovician fault in the block 10 of Tahe Oilfield, Tarim Basin and its controlling effect on karst reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(5): 790–798.
- [44] ZENG Lianbo, SHI Jinxiong, MA Qingyou, et al. Strike-slip fault control on karst in ultra-deep carbonates, Tarim Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2024, 108(2): 235–260.
- [45] 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): 412–420.
- 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): 412–420.
- [46] 刘军, 任丽丹, 李宗杰, 等. 塔里木盆地顺南地区深层碳酸盐岩断裂和裂缝地震识别与评价[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 703–710.
- LIU Jun, REN Lidan, LI Zongjie, et al. Seismic identification and evaluation of deep carbonate faults and fractures in Shunnan area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 703–710.
- [47] 何治亮, 朱成宏, 徐蔚亚, 等. 深层-超深层碳酸盐岩多类型储集体地震预测[J]. 地球物理学报, 2023, 66(1): 65–82.
- HE Zhiliang, ZHU Chenghong, XU Weiya, et al. Seismic characterization of multi-type deep/ultra-deep carbonate reservoir [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(1): 65–82.
- [48] 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.
- LYU 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.
- [49] ALLARD D, COMUNIAN A, RENARD P. Probability aggregation methods in geoscience [J]. Mathematical Geosciences, 2012, 44(5): 545–581.
- [50] 吕心瑞, 邬兴威, 孙建芳, 等. 深层碳酸盐岩储层溶洞垮塌物理模拟及分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1505–1514.
- LYU Xinrui, WU Xingwei, SUN Jianfang, et al. Physical simulation and distribution prediction of karst cave collapsing in deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1505–1514.

(编辑 张 晟)