

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

胡文革

(中国石化西北油田分公司,新疆乌鲁木齐830011)

摘要:塔里木盆地塔河油田是典型的岩溶缝洞型油藏,以溶洞和溶蚀缝孔为主要的储集空间,古岩溶缝洞如何划分与分类描述是制约该类油藏精细开发的核心问题。以塔河四区为例,以具有统一的岩溶水流动样式和循环路径为基本原则,研究了岩溶缝洞的成因关联性、缝洞分布控制因素以及缝洞产能特征的差异性,提出了表层型、暗河型和断控型3种类型缝洞划分方案,表征不同的古岩溶缝洞分布特征与发育规律。同时,进一步阐明了构造变化、溶洞垮塌和充填3种古岩溶缝洞的改造作用及规律,表征了改造后的缝洞内部结构及空间分布模式,成功指导了塔河四区储量动用评价和注采井网调整,研究方法对此类油藏高效开发具有重要的指导意义。

关键词:古岩溶;潜山区;缝洞结构;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

Paleokarst fracture-vug types and their reconstruction in buried hill area, Tahe oilfield, Tarim Basin

Hu Wenge

(Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumchi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The Tahe oilfield in the Tarim Basin contains typical karst fractured-vuggy reservoirs with caverns and solution fractures and vugs as the major storage space. The classification and description of the paleokarst fracture-vug poses a challenge for the fine development of the oil reservoirs. This study takes the Block 4 in the Tahe area as an example to investigate the genetic correlation, controlling factors of distribution and productivity differences of these karst fracture-vug. Three types of karst fracture-vug, i. e., epikarst type, underground river type and fault-controlled type, are then proposed based on whether they share unified karst water flow pattern and circulation path. Meanwhile, three processes that have modified the fracture-vug are recognized, i. e., the architectural transformation, cave collapse and in-filling. The intrinsic architecture and spatial distribution of the fracture-vug are also characterized. Guided by the understandings, a producing reserve assessment and production-injection well pattern readjustment have been successfully carried out in the Block 4, verifying the guiding significance of the study.

Key words: paleokarst, buried hill area, fracture-vug architecture, Ordovician, Tahe oilfield, Tarim Basin

引用格式: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. DOI: 10.11743/ogg20220104.

Hu Wenge. Paleokarst fractured-cavity types and their reconstruction in buried hill area, Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 43-53. DOI: 10.11743/ogg20220104.

20世纪80年代以来,古岩溶缝洞型储集体成为全球油气勘探与开发的重要目标^[1]。中国塔里木盆地深层、超深层已经发现的油气藏主要属于该类型^[2-5]。其中,塔河油田是最为典型的岩溶缝洞型油藏,具有十分丰富的油气资源^[6-7]。多年以来,围绕古岩溶缝洞,提出了多种基于缝洞系统的划分方法^[8-15]。根据岩溶缝洞空间分布形态,划分为层控型岩溶缝洞和断控型岩

溶缝洞^[14];根据岩溶垂向分带结构,自上而下划分为表层岩溶带、垂直渗流带和水平径流带^[15]。塔河地区古岩溶缝洞体研究取得了进展^[9,14,16-30],但仍然存在缝洞关联关系不清、埋藏期改造作用导致连通关系不明确的问题。

本文以塔河四区奥陶系油藏为例,基于岩溶缝洞体的成因,建立了基于岩溶水运动样式和循环路径的

岩溶缝洞结构类型划分思路,提出了表层型、暗河型和断控型3种类型缝洞体划分方案,建立了不同的古岩溶缝洞发育模式。通过研究古岩溶缝洞的形成机制、分布控因和组合特征,结合古岩溶缝洞埋藏后的改造作用,以动态时空演化来认识地下现存的缝洞体结构特征,阐明了构造变化、溶洞垮塌和充填3种古岩溶缝洞体的改造作用及规律,表征了改造后的缝洞内部结构及空间分布模式。该成果深化了塔河四区缝洞空间结构再认识、成功指导了注采井网构建与完善调整,对缝洞型油藏精细开发具有重要意义。

1 古岩溶缝洞成因类型划分与表征

以岩溶水流动样式及循环路径为出发点,结合岩溶缝洞的发育和组合特征、空间分布及其控制因素的差异性,将塔河油田潜山区古岩溶缝洞划分为表层型、暗河型、断控型3种类型;同时,建立了不同类型古岩溶缝洞的地球物理表征方法。

1.1 表层型古岩溶缝洞

表层型古岩溶缝洞是指地表大气淡水对碳酸盐岩地层表层淋滤、岩溶改造而形成的缝洞体,岩溶水流动样式以裂缝输导的扩散流为主。循环路径有两种;①地表流向为降雨—地面溶沟—地表明河;②浅层流向为降雨—沿裂隙下渗—出露地表—明河。

储集空间类型以小尺度(几厘米到几十厘米)岩溶缝洞为主,包括裂缝及溶扩裂缝、溶蚀孔洞和小型溶洞等^[31-32],其风化程度高、储集能力较好。缝洞关联性表现为以垂向沟通为主,横向沿层理可短距离沟通,孔洞间关联性好。

缝洞分布及控制因素表现为:垂向上主要发育在风化壳顶面以下0~70 m;平面上受到岩溶微地貌的控制,多发育于构造高部位和小角度缓坡带。

地震识别标志表现为连续的杂乱弱特征、断续的杂乱弱特征,通过古地貌恢复技术以及去强轴+最大似然技术予以表征。

新疆西北部柯坪地区南一沟剖面中下奥陶统一间房组出露地表,风化壳附近发育明显的表层型古岩溶缝洞,包括表层网状断裂及沿着裂缝局部溶蚀扩大形成的小型溶蚀空间(图1),溶蚀空间的垂向尺度为0.01~0.40 m、水平尺度为0.05~0.60 m(图1)。

受控于岩溶时期地形地貌展布,地表水沿裂隙线形成多向分流,可以在一个地区形成多个局部表层岩溶缝洞系统。塔河油田四区普遍发育表层型古岩溶缝

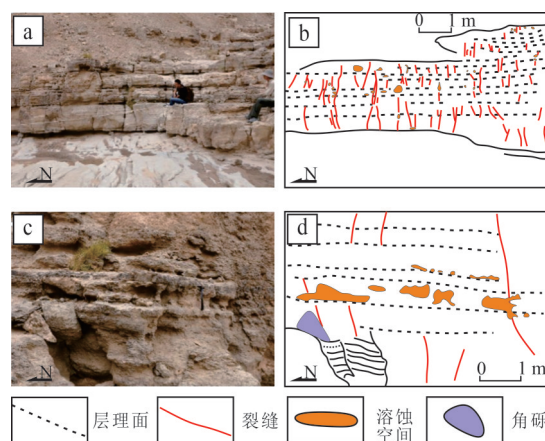


图1 塔里木盆地柯坪地区南一沟剖面一间房组表层型岩溶缝洞发育特征

Fig. 1 Characteristics of epikarst fractures and vugs in the Yijianfang Formation, Nanyigou section, Keping area

a. 表层裂缝网络及沿河裂缝扩溶空间;b. 表层裂缝网络及沿着裂缝扩溶空间素描图;c. 沿着地层发育的溶蚀孔洞;d. 沿着地层发育的溶蚀孔洞素描图

洞,以裂缝和沿着裂缝发育的溶蚀孔洞为主(图2),局部发育小型岩溶洞穴。该区表层型岩溶缝洞垂向发育深度主要位于风化壳顶面以下0~70 m,且具有似层状连片分布的特征,属浅层岩溶水循环的产物。由于该类缝洞多形成于暴露剥蚀初期或长期风化剥蚀后期,外来物充填程度高,单位体积有效空间占比低。实钻半-全充填占比达60%以上,油井产能低、供液能力差。

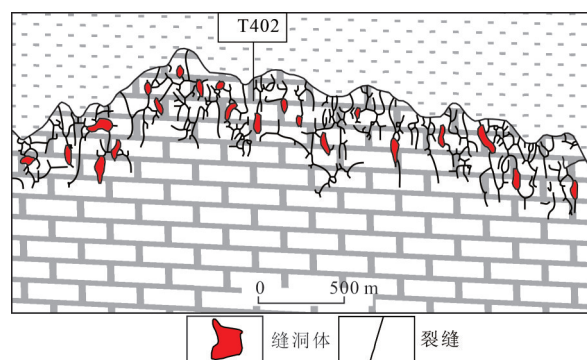


图2 塔里木盆地塔河油田表层型古岩溶缝洞发育特征与空间分布

Fig. 2 Development characteristics and spatial distribution of paleokarst fracture-vug of epikarst type, Tahe oilfield, Tarim Basin

1.2 暗河型古岩溶缝洞

暗河型古岩溶缝洞是指径流溶蚀形成的大型地下河道,暗河内一般会存在外来泥沙充填和垮塌填充等地质特征。循环路径有两种:①地表明河—落水洞等

—地下岩溶管道或暗河—明河;②地表—沿裂隙下渗—汇入地下岩溶管道或暗河—明河或岩溶泉等。

储集空间类型以大规模或大尺度岩溶(几米到几十米,甚至百米)缝洞为主,包括地下河入口、落水洞、竖井、厅堂型溶洞、水平潜流洞道、末梢洞、天窗以及地下河出口等。缝洞关联性表现为沿岩溶水方向沟通性好,垂向上主要发育在风化壳顶面以下40m或70m以深。

地震识别标志上:落水洞表现为串珠状反射,厅堂型溶洞、地下廊道表现为连续的强反射、串珠状反射、杂乱强反射^[33-34]。地球物理表征方法有能量体属性以及叠前叠后波阻抗反演。

与表层型古岩溶缝洞不同的是,暗河型古岩溶缝洞主要发育在不整合面之下更深的部位,垂向上主要受到多期次排泄基准面的控制^[14, 35],平面上受到断裂走向的控制,其发育部位和规模与断裂等密切相关^[11]。塔河四区暗河型古岩溶缝洞由落水洞、厅堂型溶洞和暗河管道组成,在平面上呈弯曲分布、具有明显的方向性,充填物以砂泥和角砾为主(图3)。由相互关联的暗河入口、落水洞、暗河管道与出口等多种岩溶形态类型构成了暗河岩溶缝洞系统。

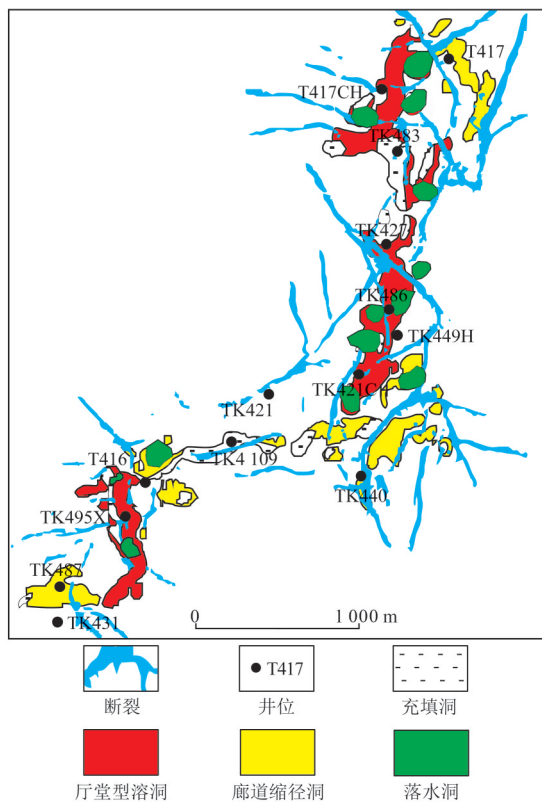


图3 塔里木盆地塔河四区暗河型古岩溶缝洞发育特征

Fig. 3 Spatial distribution of paleokarst fracture-vug of underground river type, Block 4, Tahe oilfield, Tarim Basin

厅堂型溶洞作为地下岩溶管道的一个重要组成要素,是因溶蚀、崩塌再溶蚀形成的较大规模的洞穴,主要发育在断裂交汇处、暗河交汇处或落水洞下方(图4c)。厅堂型溶洞在地震剖面上呈不连续强反射或串珠反射,在阻抗属性上表现为近圆形强异常体(图4a, b);在测井曲线的响应上十分敏感,如T403井5565.5~5585.5m井段。该段自然伽马值急剧升高、自然伽马曲线整体上呈现箱形形态,厅堂型溶洞顶部5565.5~5576.5m井段井径扩径明显;密度、中子和声波孔隙度曲线呈锯齿震荡特征;同时,该段呈现出明显的高孔渗特征,孔隙度高达10%以上,渗透率可达 $1\,000\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$ (图4c)。厅堂型溶洞洞穴高度一般为10~100m,该部位上的油井产能高、累产量高,是目前塔河油田重要的开发对象。

1.3 断控型古岩溶缝洞

断控型古岩溶缝洞是大气淡水沿断裂面或断裂两侧构造裂缝下渗、溶蚀形成的缝洞集合体^[14, 24, 28, 36],垂向缝洞储集体可达600m。该类缝洞体不受控于区域性岩溶排泄基准面与岩溶微地貌部位,其发育程度、空间分布与岩溶作用时期断裂的结构密切相关,包括断裂的级次、规模、分段性、分层性以及开启程度。循环路径有2种:①沿断裂垂向流,即岩溶水—断裂—断层泉(或明河);②沿裂隙垂向流,即岩溶水沿裂隙下渗—汇入断裂面—断层泉等。断裂在岩溶作用过程中主要发挥着导水的作用,随着溶蚀作用的强化,由初期的溶蚀缝进而演变为较大的溶洞。缝洞关联性表现为垂向沟通为主,沿断裂发育,深度变化较大,达数百米;沿断裂走向呈分段沟通特征。储集空间由溶蚀缝与断面控制的溶蚀孔洞和溶洞组成。

地震识别标志为沿断裂方向的连续强相位错断的串珠反射,平面上沿断裂发育强能量体;中—小尺度溶扩缝表现为沿断裂带的杂乱反射特征。地球物理表征方法有相干体以及最大似然/蚂蚁体+能量体组合。

由相互关联的溶蚀缝、孔洞和溶洞共同构成了断控型缝洞系统,同一条断裂带可以发育多个岩溶缝洞系统。大型断裂发育部位往往形成显著的集中水流,形成平面延伸长、纵向深度大的缝洞系统(图5);次级断裂岩溶水汇聚相对较弱、溶蚀强度相对较低,形成多个沿断裂分隔的缝洞系统,以小规模孔洞体和局部溶洞为主。

1.4 古岩溶缝洞发育模式

在不同地貌和构造背景下,不同类型的古岩溶缝

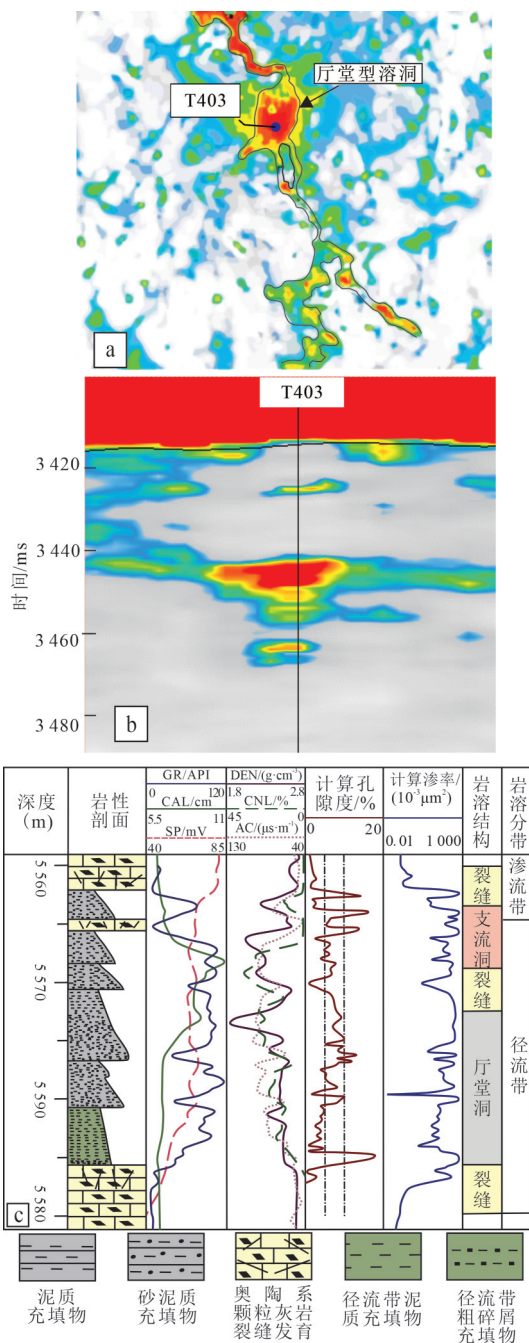


图4 塔里木盆地塔河四区厅堂型溶洞地球物理响应特征

Fig. 4 Geophysical responses of giant caves of corridor hall type in the Block 4, Tahe oilfield, Tarim Basin

a. 塔河四区振幅能量平面图; b. 塔河四区过T403井的波阻抗反演剖面; c. 塔河四区T403井古岩溶缝洞测井解释图

洞呈现出不同的上下叠置和空间配置关系(图6)。

古潜山区残丘常发育“表层型+暗河型”上下叠置组合;平台区多发育“断控型+暗河型”叠置组合;缓斜坡区发育“表层型+断控型+暗河型”组合;环形凹地发育“暗河型+断控型”平面配置组合等。不同模式组合决定着缝洞空间关联关系,影响开发井网构建原则及开发政策的制定。

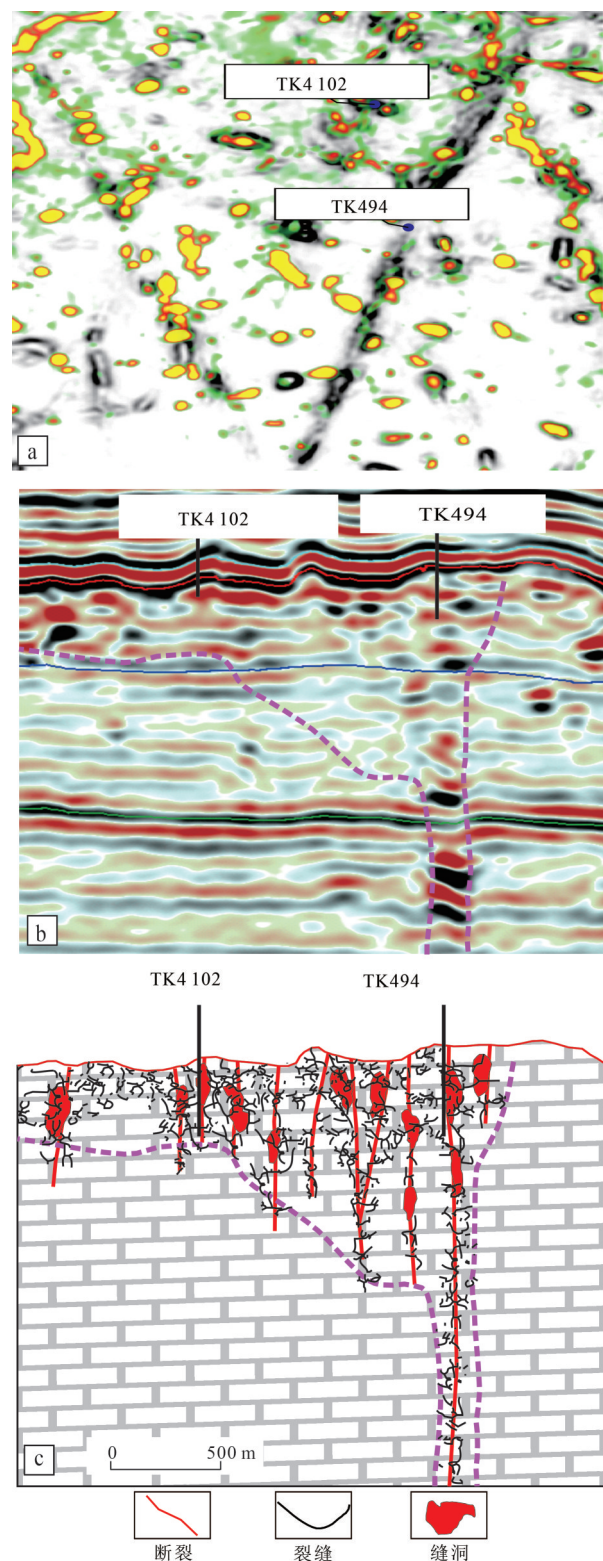


图5 塔里木盆地塔河四区断控型古岩溶缝洞发育特征与空间分布

Fig. 5 Development characteristics and spatial distribution of paleokarst fracture-vug of fault-controlled type in the Block 4 of the Tahe oilfield, Tarim Basin

a. 塔河四区相干与能量体叠合图; b. 塔河四区TK4102—TK494一线地震剖面; c. 塔河四区TK4102—TK494一线缝洞解释图

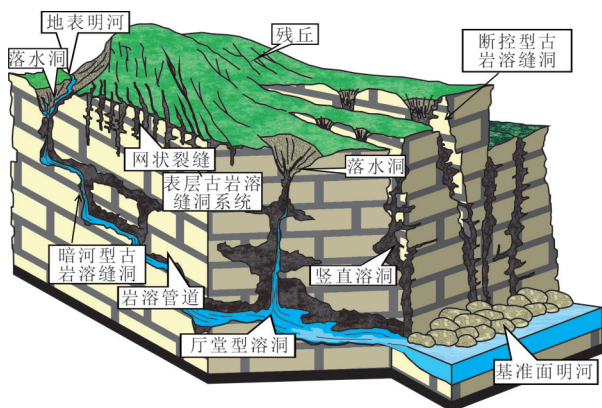


图6 塔里木盆地塔河潜山区3类古岩溶缝洞发育模式

Fig. 6 Schematic diagram showing the development models of three types of paleokarst fracture-vug in the buried hill area, Tahe oilfield, Tarim Basin

2 古岩溶缝洞改造作用与模式

塔河古岩溶缝洞改造分为岩溶期和埋藏期两个阶段,前者指海西早期,发生大气淡水岩溶作用^[11,37-38],后者指石炭系地层沉积之后为的时期。缝洞改造受构造升降、多期次断裂活动及上覆地层重力作用等因素的影响。此外断裂错断、机械压实垮塌、角砾岩化及化学充填等作用对缝洞结构与连通性均有直接影响。

2.1 断裂改造作用

断裂对古岩溶缝洞的控制作用可以分为岩溶期和埋藏期两个阶段。岩溶演化的初期,地表裂隙带和断裂带是地表水由分散转向汇聚的有利部位,容易形成不同的级次地表溶沟及与之相应的皮下径流场,因而控制了表层型古岩溶缝洞的发育。当岩溶演化达到一定程度,地表水可向地下转换形成集中式流动,从而发育暗河型古岩溶缝洞集合体。断裂的走向往往控制暗河的延伸方向,断裂交汇处易溶蚀扩大形成厅堂型溶洞(图7a)。无论是岩溶发育的初期还是晚期,在断控型岩溶缝洞中,断裂控制了缝洞的展布方向、纵向深度和平面分布范围;断裂发育规模、断开深度与缝洞规模和纵向发育深度呈正相关。

埋藏期,断裂对古岩溶缝洞的改造以破坏性为主,断裂活化切断了岩溶期形成的岩溶管道,使得原本连续的洞道上下完全错位或部分错位,从而改变了岩溶缝洞的连通关系;原始岩溶缝洞的错断、变形程度越高,其分隔的可能性越大(图7b)。同时,埋藏期断裂的活化也可能构建出新的连通通道,导致岩溶期相互

不连通的岩溶缝洞相互连通。TK424CH井和TK440井在岩溶期分别发育表层型岩溶缝洞和暗河型岩溶缝洞,在空间上两者并不关联,但是动态关系显示两口井注采连通。在埋藏期,TK424CH井和TK440井之间形成了一条NE向延伸的次级断裂,提供了地层流体的连通路径,从而影响了水驱气驱效果。

岩溶期的断裂两侧往往伴生溶蚀空间,在地震剖面上表现为杂乱强反射或串珠状反射,在波阻抗反演属性上呈现出阻抗异常(图7b,c)。由于埋藏期岩溶作用已经终止,期间的断裂在地震剖面上仅表现为相位错断特征(图7b,c)。

2.2 垮塌作用

岩溶垮塌作用在塔河地区十分普遍^[21,39],它极大地改变了古岩溶缝洞轮廓形态和内部结构。按照垮塌作用发生的时间,可分为早期垮塌和晚期垮塌,分别对应于岩溶期和埋藏期。

在岩溶期,溶洞洞顶和洞壁在重力作用下,会形成一个应力穹隆或最大剪切带,从而导致洞顶垮塌,洞底形成堆积角砾岩。另外,在断裂转换段或者交汇处,容易发生大型洞穴周缘的垮塌。在地震上,岩溶期垮塌呈强反射或杂乱反射。上覆地层逐渐填平补齐,沉积连续性好,与中-下奥陶统顶面构造具有一致性,无明显的构造变形(图8a)。在测井曲线上,自然伽马值呈现中幅度齿化特征,井径曲线显示明显的扩径,孔隙度曲线小幅度增大特征。在岩心上,可见发育在洞底胶结松散的垮塌角砾。岩溶期的缝洞垮塌体内破碎角砾岩伴随着搬运和再溶蚀作用,洞穴多为不完全充填,缝洞的连通性较好,不造成缝洞间分隔。

进入埋藏期后,由上覆地层压力增加引起的机械压实作用通常会导致溶洞整体垮塌,缝洞储集空间变小。同时,在溶洞上方会形成塌陷构造及次生断裂或裂缝网^[9]。在地震剖面上,岩溶期垮塌体呈杂乱或串珠状反射,同相轴具有错断下掉或顶部下凹特征。垮塌部位的上覆沉积地层厚度均一、连续,具有明显的构造变化,且伴有上覆地层的错位或错断,常表现为同相轴下凹(图8b)。在测井曲线上,自然伽马值呈现低幅齿化,井径曲线无明显变化,孔隙度曲线无明显变大特征(图4c)。在岩心上,可见砂泥质胶结的灰岩角砾、泥质或方解石充填,胶结充填程度高^[39]。埋藏期的垮塌导致先期形成溶洞的连通性变差,形成分隔;同时,洞顶或洞壁新产生的裂缝和崩落角砾岩也可造成不同类型缝洞间连通,连通方式由溶洞连通转变为角砾岩间裂缝或洞顶缝网连通。

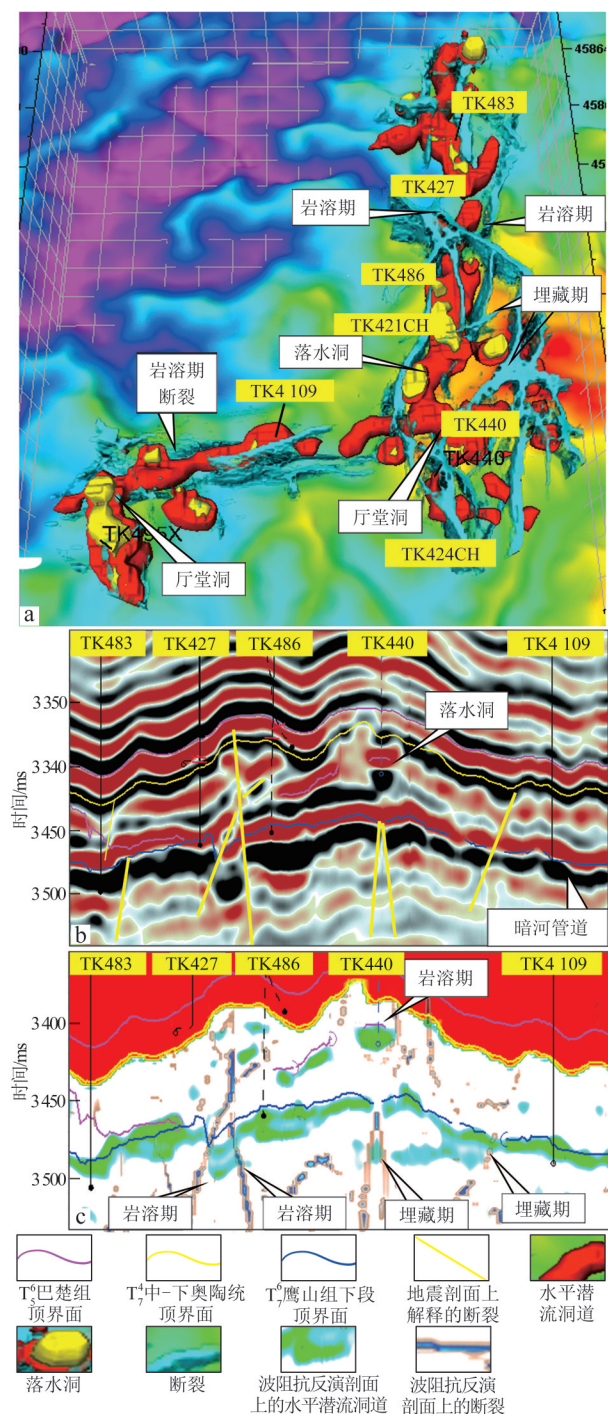


图7 塔里木盆地塔河四区断裂与缝洞体叠合图

Fig. 7 Superimposition of fault upon fracture-vug bodies in the Block 4, Tahe oilfield, Tarim Basin

a. 塔河TK440井区缝洞立体刻画图; b. 塔河TK440井区TK483—TK4109—线地震剖面; c. 塔河TK440井区TK483—TK4109—线波阻抗反演剖面

2.3 充填作用

古岩溶缝洞的充填在塔河油田也是普遍存在的^[22,40-41],且增强了岩溶缝洞结构的非均质性。古岩

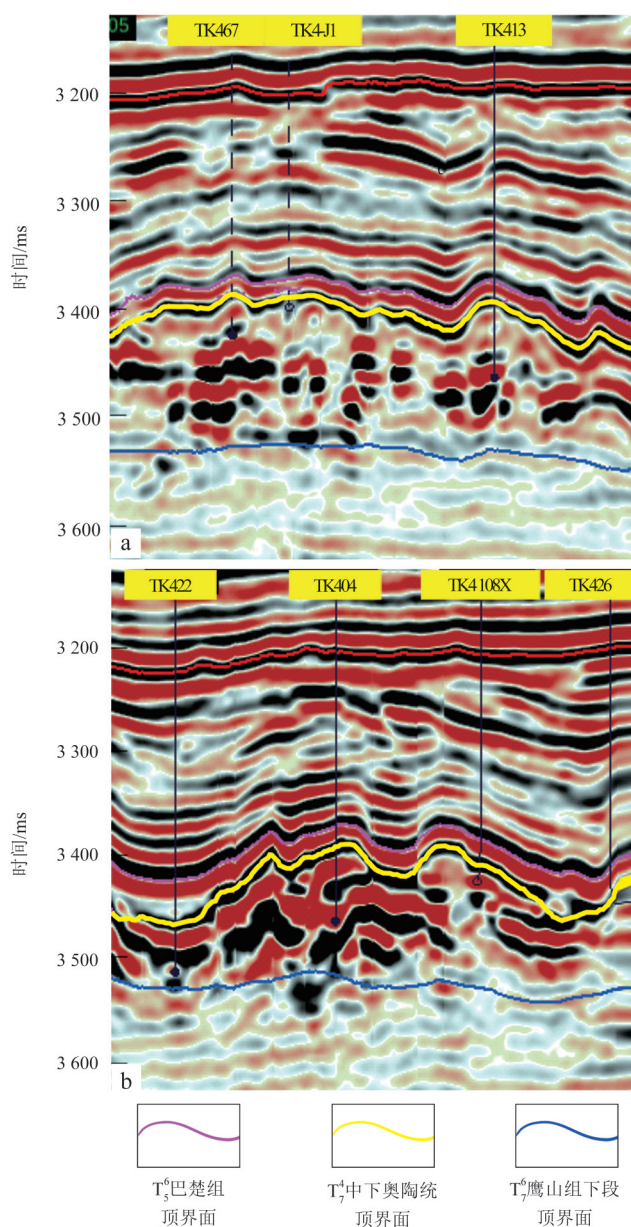


图8 塔里木盆地塔河四区典型垮塌特征地震深度偏移剖面
Fig. 8 Seismic depth migration section showing typical collapse in the Block 4, Tahe oilfield, Tarim Basin

a. 岩溶期垮塌典型地震剖面; b. 埋藏期垮塌典型地震剖面

溶缝洞的充填作用主要包括岩溶期的搬运充填作用和埋藏期的化学充填作用,分别对应于流水机械沉积和化学沉积两种洞穴沉积物^[42]。

岩溶期发育的缝洞(尤其是在暗河型缝洞)中,搬运沉积物是普遍存在的,充填物多为由硅质岩碎屑或碳酸盐岩组成的机械沉积物。这一类充填易在暗河入口(包括落水洞、竖井等)、缝洞低部位(包括断裂错断导致的缝洞下掉部位)、转弯和缩径的位置发生,从而影响暗河缝洞的连通性。泥质含量反演以及叠前波阻抗反演技术可预测缝洞充填性(图9a)。

埋藏期,当地层水中的溶质达到饱和时,容易形成方解石以及石英等化学沉积物,胶结先存的角砾或裂缝等(图9b)。化学充填可降低古岩溶缝洞的储集和连通能力。

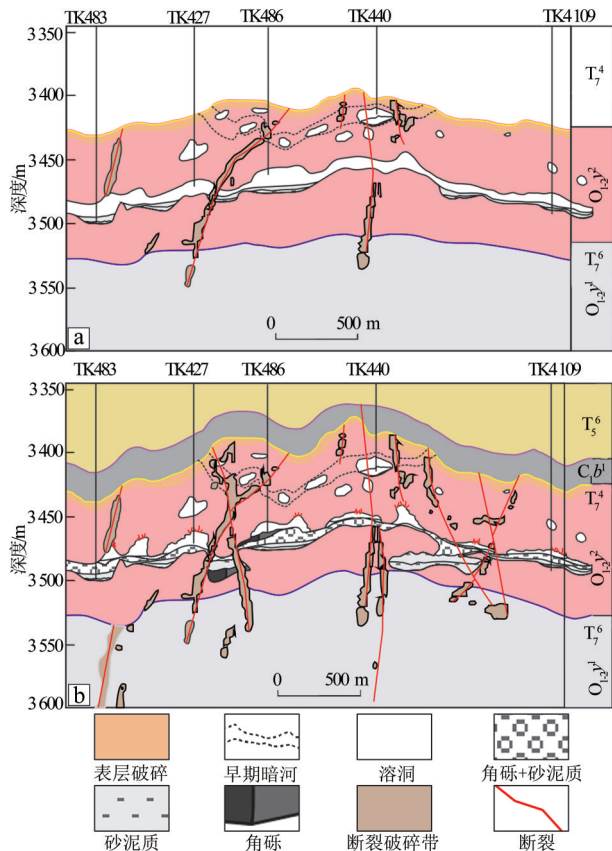


图9 塔里木盆地塔河地区古岩溶缝洞改造作用综合模式

Fig. 9 Integrated model of paleokarst fracture-vug reconstruction, Tahe oilfield, Tarim Basin

a. 岩溶期岩溶缝洞结构改造模式; b. 埋藏期岩溶缝洞结构改造模式

2.4 改造后缝洞系统模式

基于表层型、暗河型和断控型3种岩溶缝洞类型,经理藏期断裂作用、垮塌作用和充填作用对缝洞系统的改造后,重构了现今3种结构类型模式,不同结构类型对应不同的开发方式与井网设计,为缝洞型油藏的效益开发奠定基础。

1) 连通式缝洞系统结构

这一类缝洞系统基本保持或继承了岩溶期较为完整的内部结构,连通关系好,基于岩溶水运动样式和循环路径,系统地进行有效缝洞体积计算、储量分类和经济效益评价。以少井高产、低注高采的思路,沿缝洞展布整体布局注采井网,提高驱替效益。

2) 部分连通式缝洞系统结构

这一缝洞类型因断裂错断、垮塌以及充填等改造

作用,导致缝洞间部分或完全分隔,其连通关系和程度可通过改造作用强度进行判识。对于部分连通式类型,可以从井组或单个缝洞的角度,进行有效体积计算、油气富集程度评价以及地质储量计算,以井组或单洞的形式进行注采井网构建、分段或逐洞开发。

3) 缝洞系统间贯通式结构

埋藏期断裂(构造裂缝)可使不同缝洞系统之间实现连通,垮塌缝洞体周围产生的应力裂缝以及垮塌角砾岩间的裂缝也存在沟通邻近缝洞系统的可能性。这种新的连通关系,使得井网由原来沿同一缝洞系统布局,转变为系统间基于连通节点和路径的“纵向叠置、平面配置”的空间结构构建,从而形成空间上高效的驱替关系。但断裂或裂缝作为连通通道,易形成水窜、气窜,造成水驱气驱效率降低,这一点在现场开发过程中应引起特别的注意。

3 塔河四区古岩溶缝洞划分及应用

塔河四区位于阿克库勒鼻状构造轴部,是塔河油田主体区最典型的古潜山岩溶发育区,该区古岩溶缝洞类型丰富,包括大尺度的岩溶洞穴与中小尺度的裂缝-孔洞等。塔河四区属于高成熟开发区,高产井—S48井位于本研究区,为研究提供了丰富的动静资料和认识借鉴(图10)。

通过对塔河四区古岩溶缝洞的表征和描述,绘制了不同类型古岩溶缝洞的平面分布图(图11),并在古

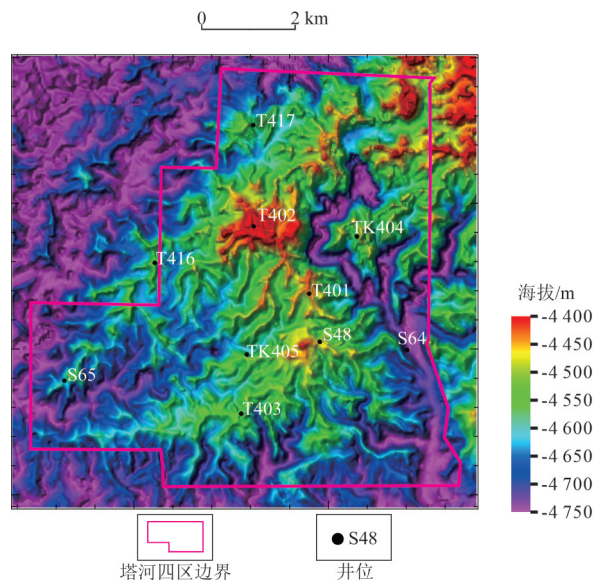


图10 塔里木盆地塔河四区位置、地层及海西早期岩溶古地貌
Fig. 10 Location, stratigraphic sequence and Early Hercynian paleokarst geomorphology of the Block 4 in the Tahe oilfield of Tarim Basin

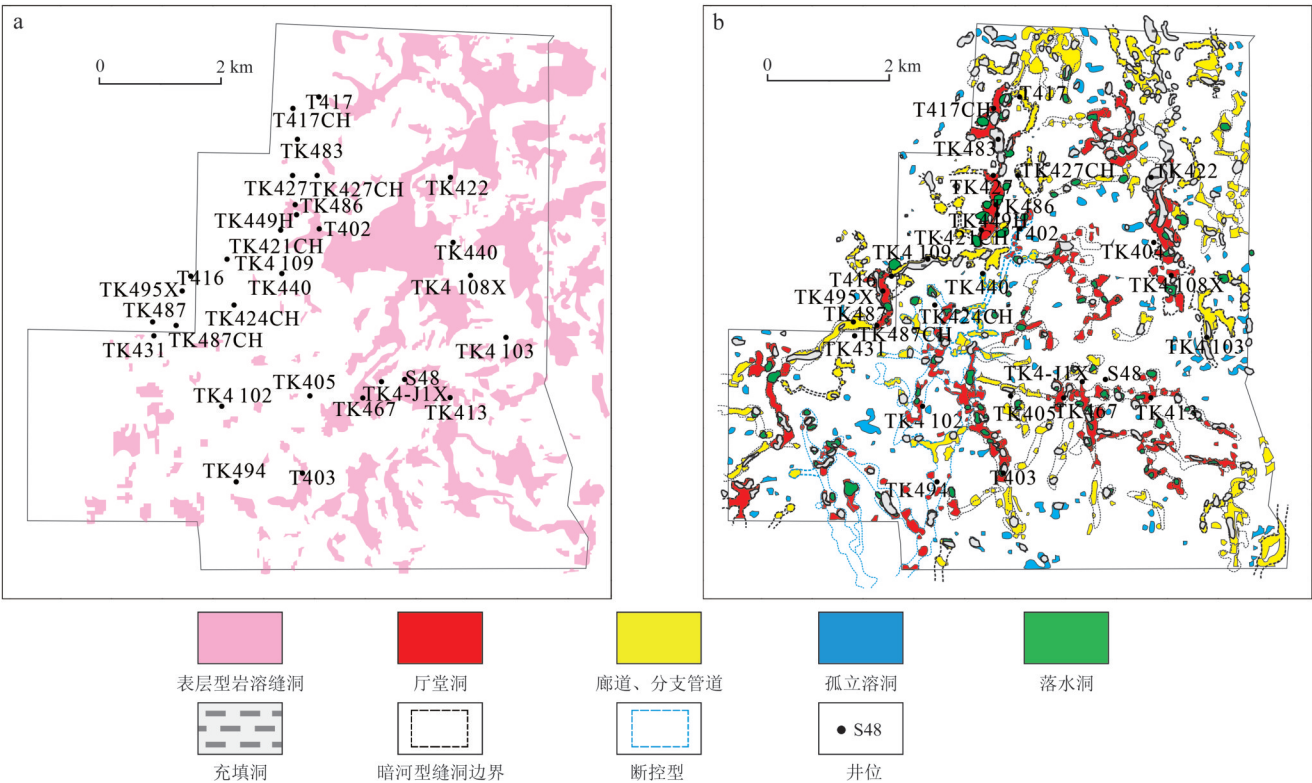


图 11 塔里木盆地塔河四区古岩溶缝洞结构平面分布
Fig. 11 The plane distribution of paleokarst fracture-vug architecture in the Block 4 of the Tahe oilfield, Tarim Basin
a. 最大释然属性刻画的表层型岩溶缝洞;b. 能量体刻画的暗河型和断控型岩溶缝洞

岩溶缝洞结构改造作用研究的基础上,构建了缝洞间关联和连通关系。塔河四区表层型岩溶缝洞与暗河型、断控型缝洞相互叠置分布,共划分出6个表层型缝洞发育区,呈连片状分布(图 11a);25个暗河型岩溶缝洞发育区,呈条带状段塞式分布(图 11b-c);2个断控型古岩溶缝洞发育区,呈条带状散点式分布(图 11c)。结合古岩溶缝洞改造作用研究,识别出具有分隔能力的全充填缝洞27个,错断缝洞9个(图 11d)。

根据古岩溶缝洞结构的划分结果,重新计算塔河四区缝洞体积和储量,认识缝洞间关系,精细评价储量动用状况,找出了占区块探明储量43%的未动用储量,开展综合治理,区块日产油气量提升50%以上,油田开发指标明显改善(表1;图 12)。表层岩溶缝洞平均单井累产油 1.1×10^4 t,暗河型缝洞的平均单井累产

油 10.3×10^4 t,断控型缝洞的平均单井累产油 3.8×10^4 t。

4 结论

1) 基于潜山区古岩溶缝洞成因建立了表层型、暗河型和断控型3种有利储集体划分方法。表层型岩溶缝洞以小规模缝洞体为主,以平面沟通为主,平面上受到岩溶地貌的控制,多发育于构造高部位和小角度缓坡带,以不整合面以下0~70 m发育为主。暗河型古岩溶缝洞主要由厅堂型溶洞、廊道-分支河道和落水洞等组成,单位体积有效空间占比大,横向沟通性好,主要分布在不整合面70 m以下。断控型岩溶缝洞沿断裂表现为条带状展布的小规模孔洞体,局

表 1 塔里木盆地塔河四区综合治理前、后开发指标对比
Table 1 Comparison of development indexes before and after comprehensive treatment in the Block 4 of the Tahe oilfield, Tarim Basin

治理前						治理后					
地质储量/(10 ⁴ t)		日产油/ t	综合含水/%	自然递减率/%	采油速度/%	地质储量/(10 ⁴ t)		日产油/ t	综合含水/%	自然递减率/%	采油速度/%
已动用	未动用					已动用	未动用				
6 345	0	423	72.4	17.4	0.28	3 617	2 728	650	71.2	15.5	0.43

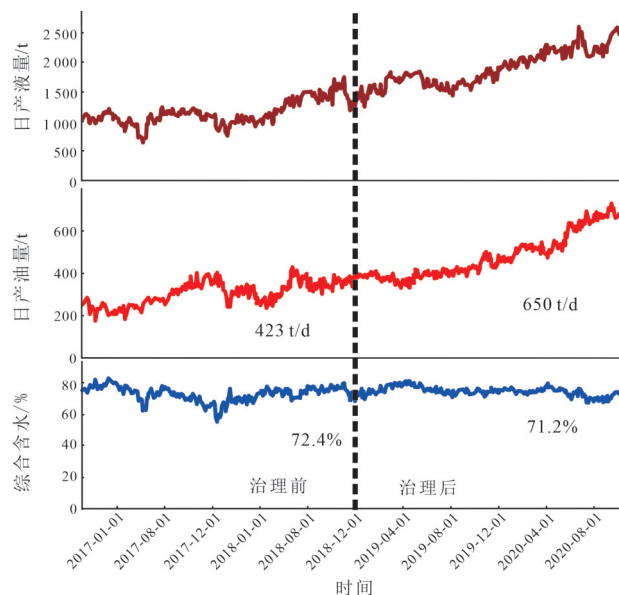


图12 塔里木盆地塔河油田四区开发曲线

Fig. 12 Development curve of the Block 4, Tahe oilfield, Tarim Basin

部发育溶洞,以垂向沟通为主,沿断裂走向有分段沟通特征。

2) 古岩溶缝洞埋藏过程中的断裂作用、垮塌作用和充填作用改变了原始岩溶缝洞系统的内部结构,重构了连通式、部分连通式和贯通式3种缝洞系统结构模式,制定了相应的开发政策。

3) 塔河四区古岩溶缝洞系统结构类型划分及模式的研究,有效指导了缝洞系统的再认识,支撑了储量动用评价和注采井网调整,提升了油藏开发水平,也进一步证实了缝洞系统结构类型划分方法的科学性。

参 考 文 献

- [1] White, V P. Paleokarst: type, recognition, controls, and associations. [C]// Wright V P, M Esteban, Smart P L, et al. Paleokarst and paleokarstic reservoirs: Postgraduate Research Institute for Sedimentology, University of Reading, PRIS, Contribution, 1991, 152:89-119.
- [2] 康玉柱. 塔里木盆地塔河大油田形成的地质条件及前景展望[J]. 中国地质, 2003, 30(3):315-319.
Kang Yuzhu. Geological characteristics of the formation of large Tahe oilfield in the Tarim Basin and its prospects[J]. Geology in China, 2003, 30(3):315-319.
- [3] Fei Ning, Jinbiao Yun, Zhongpei Zhang, et al. Deformation patterns and hydrocarbon potential related to intracratonic strike-slip fault systems in the east of Central Uplift Belt in the Tarim Basin [J]. Energy Geoscience, 2022, 3(1): 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.10.008>.
- [4] 朱光有, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J]. 岩石学报, 2010, 27

(3): 827-844.

Zhu Guangyou, Yang Haijun, Zhu Yongfeng, et al. Study on petroleum geological characteristics and accumulation of carbonate reservoirs in Hanilcatam area, Tarim basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 27(3): 827-844.

- [5] 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.
- [6] 翟晓光, 云露. 塔里木盆地塔河大型油田地质特征及勘探思路回顾[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5):565-573.
Zhai Xiaoxian, Yun Lu. Geology of giant Tahe oilfield and a review of exploration thinking in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5):565-573.
- [7] 康玉柱. 中国古生代海相油气资源潜力巨大[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6):699-706.
Kang Yuzhu. Great hydrocarbon potential in the Paleozoic marine sequences in China [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 699-706.
- [8] 徐微, 蔡忠贤, 林忠民, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏岩溶成因类型[J]. 海相油气地质, 2012, 17(001):66-72.
Xu Wei, Cai Zhongxian, Lin Zhongmin, et al. Karst genesis classification of Ordovician carbonate reservoir in Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012, 17(001): 66-72.
- [9] 牛玉静, 康志宏, 龙旭, 等. 塔河油田奥陶系岩溶油藏溶洞储集体成因及演化[J]. 现代地质, 2011, (4):650-659.
Niu Yujing, Kang Zhihong, Long Xu, et al. Origin and Evolution of Ordovician Karst Cave Reservoir in Tahe Oilfield [J]. Geoscience, 2011(4):650-659.
- [10] 刘存革, 徐明军, 云露, 等. 塔里木盆地阿克库勒凸起奥陶系海西晚期古岩溶特征[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 280-285.
Liu Cunge, Xu Mingjun, Yun Lu, et al. Characteristics of Late Hercynian paleokarst in Akekule Uplift, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3):280-285.
- [11] 李源, 鲁新便, 蔡忠贤, 等. 塔河油田海西早期古水文地貌特征及其对洞穴发育的控制[J]. 石油学报, 2016, 37(8):1011-1020.
Li Yuan, Lu Xinbian, Cai Zhongxian, et al. Hydrogeomorphic characteristics and its controlling caves in Hercynian, Tahe oilfield [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 37(8): 1011-1020.
- [12] 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 Xiaoqiang, 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.

- [13] 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. Modelling method of carbonate fracture-cavity reservoirs using multiscale karst facies-controlling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(2): 340-346.
- [14] 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):5-13.
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 reservoir in the Tahe Oil Field as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4):5-13.
- [15] 余智超, 王志章, 魏荷花, 等. 塔河油田缝洞型油藏不同成因岩溶储集体表征[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(6): 53-61.
Yu Zhichao, Wang Zhizhang, Wei Hehua, et al. Characterization of fracture-cave karst reservoirs with different genesis in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(6):53-61.
- [16] 鲁新便, 何成江, 邓光校, 等. 塔河油田奥陶系油藏喀斯特古河道发育特征描述[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 268-274.
Lu Xinbian, He Chengjiang, Deng Guangxiao, et al. Development features of karst ancient river system in Ordovician reservoirs, Tahe Oil Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3):268-274.
- [17] 胡华锋, 鲍典, 马灵伟, 等. 基于高频衰减梯度的碳酸盐岩溶洞储集体规模识别方法——以塔河油田岩溶古河道溶洞储集体为例[J]. 石油物探, 2018, 57(6):102-111.
Hu Huafeng, Bao Dian, Ma Lingwei, et al. Scale characterization of carbonate karst cave reservoirs based on high-frequency attenuation gradient: A case study from karst paleochannels reservoirs in Tahe Oilfield, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(6):102-111.
- [18] 康志宏, 戎意民, 魏历灵, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶储集体类型及划分方法研究[J]. 现代地质, 2014, (5): 986-994.
Kang Zhihong, Rong Yimin, Wei Liling, et al. Approach to karst reservoir types and classification of Ordovician Carbonate in Tahe Oilfield[J]. Geoscience, 2014, (5):986-994.
- [19] 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 Xiaochang, Zhang Jun, Li Jun, 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.
- [20] 何成江, 张慧涛. 负向构造塌陷体的地震正演模拟——以塔河油田为例[J]. 天然气勘探与开发, 2016, 39(3):21-24.
He Chengjiang, Zhang Huitao. Seismic forward modeling for collapse body in negative structures[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2016, 39(3):21-24.
- [21] 杨瑞召, 金圣林, 杨敏, 等. 塔里木盆地塔河油田不同岩溶塌陷类型地震响应特征与识别[J]. 天然气地球科学, 2017, 208(3):391-396.
Yang Ruizhao, Jin Shenglin, Yang Min, et al. Seismic response characteristics and identification of different types of karst collapse in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 208(3):391-396.
- [22] 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 Juan, Bao Dian, Yang Min, 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.
- [23] 杨晓兰. 基于正演模型的地震相识别溶洞充填技术——以塔河油田12区东奥陶系储层为例[J]. 复杂油气藏, 2019, 12(2): 17-21.
Yang Xiaolan. Cavern filling identification technique of seismic facies based on forward modeling: A case study on the Ordovician reservoirs in eastern block 12 of Tahe Oilfield[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2019, 12(2): 17-21.
- [24] 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.
- [25] 漆立新. 塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 39-51.
Qi Lixin. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shuntuoguole uplift, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 39-51.
- [26] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831-839.
Jiao Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 831-839.
- [27] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207-216.
Jiao Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 207-216.
- [28] 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.
- [29] 康志江, 李江龙, 张冬丽, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏渗流特征[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 634–640.
Kang Zhijiang, Li Jianglong, Zhang Dongli, et al. Percolation characteristics of fractured-vuggy carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(5): 634–640.
- [30] 康志江, 李阳, 计秉玉, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率关键技术[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 434–441.
Kang Zhijiang, Li Yang, Ji Bingyu, et al. Key technologies for EOR in fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 434–441.
- [31] 邹胜章, 夏日元, 刘莉, 等. 塔河油田奥陶系岩溶储层垂向带发育特征及其识别标准[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2490–2501.
Zou Shengzhang, Xia Riyuan, Liu Li, et al. Vertical zone characteristics and identification standard of Ordovician karst reservoirs in the Tahe Oilfield[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(9): 2490–2501.
- [32] 李阳, 康志江, 薛兆杰, 等. 中国碳酸盐岩油气藏开发理论与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 669–678.
Li Yang, Kang Zhijiang, Xue Zhaojie, et al. Theories and practices of carbonate reservoirs development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 669–678.
- [33] 马学军, 李宗杰. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层精细成像技术[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 764–768.
Ma Xuejun, Li Zongjie. Fine seismic imaging technology for fractured-vuggy carbonate reservoirs in the Tahe Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 764–768.
- [34] 王震, 文欢, 胡文革. 塔河油田碳酸盐岩缝洞空间位置预测方法研究[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(4): 433–438.
Wang Zhen, Wen Huan, Hu Wenge. Study on spatial location prediction method of fractured-vuggy carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(4): 433–438.
- [35] 李源, 蔡忠贤. 塔里木盆地塔河油田主体区海西早期岩溶台面划分及洞穴层对比[J]. 古地理学报, 2016(4): 560–568.
Li Yuan, Cai Zhongxian. Division of karst platform architecture and cave levels correlation in the early Hercynian, Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2016(4): 560–568.
- [36] 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.
- [37] 吕海涛, 张达景, 杨迎春. 塔河油田奥陶系油藏古岩溶表生作用期次划分[J]. 地质科技情报, 2009, 28(6): 71–75.
Lv Haitao, Zhang Dajing, Yang Yingchun. Stages of paleokarstic hypergenesis in Ordovician reservoir, Tahe Oilfield[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(6): 71–75.
- [38] 李会军, 丁勇, 周新桂, 等. 塔河油田奥陶系海西早期、加里东中期岩溶对比研究[J]. 地质论评, 2010(3): 413–425.
Li Huijun, Ding Yong, Zhou Xingui, et al. Study on Hercynian and Middle Caledonian karstification of Ordovician in the Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Geological Review, 2010(3): 413–425.
- [39] 金强, 康迅, 荣元帅, 等. 塔河油田奥陶系古岩溶地表河和地下河沉积和地球化学特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015(39): 1–10.
Jin Qiang, Kang Xun, Rong Yuanshuai, et al. Sedimentary and geochemical characteristics of sandstones and mudstones deposited in surface rivers and subsurface rivers in Ordovician karsted carbonates, Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(6): 1–10.
- [40] 张慧涛, 王金柱, 杨敏, 等. 塔河奥陶系岩溶古暗河充填特征研究[J]. 新疆石油天然气, 2020, 16(1): 4–10.
Zhang Huitao, Wang Jinzhu, Yang Min, et al. Description of filling characteristics of karst ancient river in Tahe Oilfield[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2020, 16(1): 4–10.
- [41] 田亮, 李佳玲, 焦保雷. 塔河油田12区奥陶系油藏溶洞充填机理及挖潜方向[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(3): 52–60.
Tian Liang, Li Jialing, Jiao Baolei. Filling mechanism and potential tapping direction of Ordovician karst reservoirs in block-12 of Tahe Oilfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(3): 52–60.
- [42] 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.

(编辑 董立)