

塔里木盆地塔河北部“过溶蚀残留型”断溶体发育特征及其成因

张长建^{1,2},杨德彬^{1,2},蒋林^{1,2},姜应兵^{1,2},昌琪^{1,2},马雪健^{1,2}

(1. 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;2. 中国石化缝洞型油藏提高采收率重点实验室,新疆乌鲁木齐830011)

摘要:为了研究塔里木盆地塔河北部强剥蚀区海西早期古岩溶洞穴发育特征,用古地貌恢复、岩溶水系统分析、测井-岩心洞穴识别和地震属性刻画等方法进行了YQ5井区的洞穴类型样式识别、缝洞结构刻画和洞穴成因演化研究。研究表明:YQ5井区在塔河油田Ⅱ号和Ⅲ号古岩溶台地北部的地势平缓区,总体为多期次岩溶叠加改造后的残留地貌,主要发育幅差较小的溶峰洼地、溶丘洼地和溶丘平原,南部发育NE向展布的峰丛垄脊沟谷。与塔河油田主体区及斜坡区不同,YQ5井区地下和地表水系的流向与地貌趋势不一致,岩溶水系统遭受构造作用破坏,导致补给、径流和排泄的岩溶水循环过程不完整。YQ5井区主要发育暗河型洞穴和“过溶蚀残留型”断溶体。暗河型洞穴充填较为严重,洞穴的有效储集空间受到破坏,影响油气开发效果。岩溶台地的构造抬升造成区域侵蚀基准面的下降,顺走滑断裂的垂向侵蚀作用有利于“过溶蚀残留型”断溶体的持续发育和保存,油气开发效果好。“过溶蚀残留型”断溶体的发育主控因素为走滑断裂、地层剥蚀强度和负向地貌。与塔河古岩溶台地演化过程一致,YQ5井区的岩溶演化经历深切曲流期、岩溶改造期和下渗断溶期3个阶段。暗河型洞穴被持续改造破坏,断溶体则持续建造。

关键词:“过溶蚀残留型”断溶体;暗河;走滑断裂;岩溶水系统;古地貌;YQ5井区;塔河北部;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Characteristics and origin of over-dissolution residual fault-karst reservoirs in the northern Tahe oilfield, Tarim Basin

ZHANG Changjian^{1,2}, YANG Debin^{1,2}, JIANG Lin^{1,2}, JIANG Yingbing^{1,2}, CHANG Qi^{1,2}, MA Xuejian^{1,2}(1. Exploration and Development Research Institute, Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China;
2. Key Laboratory for EOR of Fractured-Vuggy Reservoirs, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: This study aims to investigate the characteristics of the Early Hercynian paleokarst caves in the extensively eroded area of the northern Tahe oilfield in the Tarim Basin. Using methods such as paleogeomorphic reconstruction, karst water system analysis, logging-core observation-based cave identification, and seismic attribute characterization, we identify the cave types and styles in well block YQ5, characterize fracture-cave structures in this area, and explore the origin of the caves. The results show that the well block YQ5, located in the region with flat and gentle terrain to the north of Nos. II and III paleokarst platforms of the Tahe oilfield, generally exhibits residual landforms after modification by multi-phase superimposed karstification. Karst peak-depression, karst hill-depression, and karst hill-plain zones of low relief are primarily observed in the well block, with peak cluster-ridge/valley zones extending in the NE direction in the south. Different from the main body and slope area of the Tahe oilfield, the well block YQ5 displays a flow direction of the underground and surface water systems inconsistent with the geomorphic trend. Furthermore, the disrupted karst water system therein by tectonism, leads to an incomplete karst water cycle of recharge, runoff, and discharge. Caves of underground river type and over-dissolution residual fault-karst reservoirs are primarily found in the well block. The caves of underground river type are characterized by significant filling, which compromises the effectiveness of reservoir spaces, thus adversely affecting oil and gas exploitation. In contrast, for the over-dissolution residual fault-karst reservoirs, the vertical erosion along strike-slip faults, resulting from a

收稿日期:2023-09-21;修回日期:2024-03-06。

第一作者简介:张长建(1983—),男,副研究员,油气开发地质。E-mail:frank_geoscience@qq.com。

基金项目:中石化重大科技项目(P23034)。

decline in regional erosion base level due to the tectonic uplift of the karst platforms, is beneficial to the continuous development and preservation of these reservoirs, thus contributing to effective oil and gas exploitation. Overall, the dominant factors for the over-dissolution residual fault-karst reservoirs encompass the development of strike-slip faults, the denudation intensity of strata, and negative landforms. Consistent with the paleokarst platforms observed in the Tahe oilfield, karst in the well block YQ5 also experienced three evolutionary stages: the deeply incised meandering river stage, the karstification-induced modification stage, and the infiltrated fault-karst stage. During these stages, caves of underground river type underwent continuous transformation and destruction, while the fault-karst reservoirs experienced ongoing construction.

Key words: over-dissolution residual fault-karst reservoir, underground river, strike-slip fault, karst water system, paleogeomorphology, well block YQ5, northern Tahe oilfield, Tarim Basin

引用格式:张长建,杨德彬,蒋林,等.塔里木盆地塔河北部“过溶蚀残留型”断溶体发育特征及其成因[J].石油与天然气地质,2024,45(2):367-383.

DOI:10.11743/ogg20240205.

ZHANG Changjian, YANG Debin, JIANG Lin, et al. Characteristics and origin of over-dissolution residual fault-karst reservoirs in the northern Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 367-383. DOI: 10.11743/ogg20240205.

塔河北部上奥陶统剥蚀区主要发育风化壳面控制的古岩溶缝洞^[1-2],前人的研究主要集中在古岩溶缝洞的结构特征^[3-6]和古岩溶水文地貌系统^[7-10]等方面,诸如海西早期岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶盆地等古地貌单元的划分^[8],表层、垂向渗滤和潜流等岩溶分带结构的识别^[3,11],古水文地貌结构对古岩溶缝洞体的分布样式和空间结构的控制作用^[2,9-10],以及塔河油田地下河洞穴发育特征等^[5,12]。然而,前人关于断溶体的相关研究主要集中在上奥陶统尖灭线以南区域^[13-18],对于塔河北部岩溶剥蚀区的断溶体成因研究较为有限。

YQ5井区为塔河油田外围区油气潜力较大的区域。作为塔河油田的向北外拓区域,YQ5井区奥陶系的古岩溶条件、油藏类型与塔河油田大体类似^[4],其差异主要体现在古岩溶强度和地层剥蚀量:奥陶系遭受加里东中期—海西早期的长时间强岩溶作用,一间房组和北部区域的鹰山组上段被剥蚀殆尽,造成鹰山组下段直接出露地表^[19]。YQ5井区主要发育加里东晚期—海西早期充注的奥陶系超重质油藏,局部可见喜马拉雅期充注的中—轻质油藏^[20]。

YQ5井区奥陶系碳酸盐岩缝洞油藏的动用难度较大,主要原因在于优质缝洞储集体的发育规律不清晰^[20-24]。前人从古水文地貌角度认识到YQ地区南部石炭系覆盖区以海西早期表生岩溶作用为主^[21],岩溶地貌以峰丛—洼地为主,地表和地下水系较为发育^[19];从岩心观测、岩心薄片和测井资料等微观层面认识到YQ地区奥陶系岩溶缝洞储集体主要为洞穴型、裂缝—孔洞复合型和裂缝型,其中风化壳表层洞穴储集性能较差,泥、砂质充填非常严重^[22-23];利用正演模拟和地

震属性的相关性拟合方法来预测洞穴充填规律,认为利用均方根振幅和衰减梯度预测洞穴大小和充填程度的效果相对较好^[25]。目前,针对塔河外围强溶蚀背景下的YQ5井区岩溶水系统、岩溶洞穴类型和岩溶洞穴成因的研究较少,优质岩溶缝洞体的发育规律尚未明确,制约了该区超重质稠油油藏的开发动用。

本文以塔河北部外围YQ5井区中—下奥陶统古岩溶洞穴为研究对象,利用钻井资料及地震资料,以水文地貌和岩溶水系统理论为指导,利用古地貌恢复、岩溶水系统构建、测井—岩心洞穴识别和地震属性刻画等方法开展YQ5井区的古水文地貌、古岩溶水系统及古岩溶洞穴类型等研究,明确不同古岩溶洞穴的地质发育规律和成因演化模式,为勘探开发的井位部署提供地质依据。

1 地质概况

塔河油田位于塔里木盆地北部沙雅隆起阿克库勒凸起^[26],研究区YQ5井区位于塔河油田西部斜坡区东北部(图1a),受加里东期—海西期多期次构造运动影响,YQ5井区缺失中—下奥陶统一间房组、上奥陶统、志留系和泥盆系等,中—下奥陶统鹰山组经受了长时间、高强度的暴露岩溶,北部的鹰山组上段被剥蚀殆尽,其剥蚀尖灭线总体呈NE-SW向展布(图1b)。YQ5井区缺失一间房组,中—下奥陶统的鹰山组和蓬莱坝组为主要的古岩溶缝洞发育层段(图1c),其中鹰山组为主产油层,岩性为纯灰岩和白云质灰岩,蓬莱坝组以白云岩为主^[27]。目前钻井井位主要部署在鹰山组上段剥

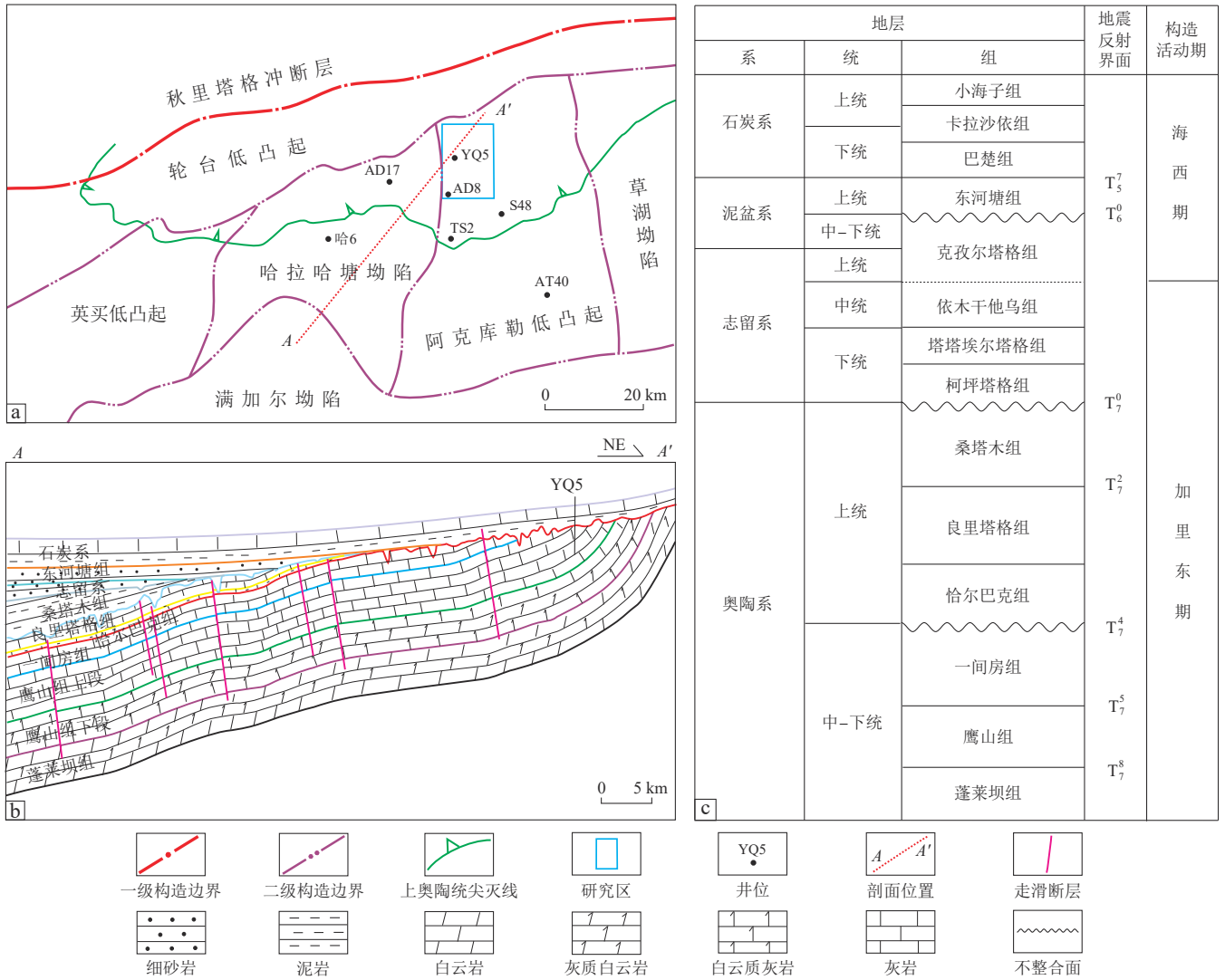


图1 塔河油田北部外围区构造位置、地质剖面 and 区域地层简表

Fig. 1 The tectonic position map, geological section, and regional stratigraphic profile of the Tahe oilfield's northern peripheral area
a. YQ5井区构造位置图; b. 塔河油田北东向地质剖面; c. 塔河油田区域地层简表

蚀线以南,鹰山组上段的纯灰岩和鹰山组下段的灰质云岩发育古岩溶缝洞型储层^[22]。

2 古地貌-古水系特征

2.1 古地貌特征

YQ5井区中-下奥陶统经历了加里东中期—海西早期的多期岩溶叠加剥蚀,其中海西早期为关键岩溶期,该期次古地貌代表了多期岩溶叠加的最终地貌趋势。考虑中-下奥陶统上覆地层为石炭系,地层接触关系及岩溶地质背景与塔河油田主体区相近,综合考虑印模法^[28]和构造趋势面^[29]等恢复方法的利弊,构建了“印模法与构造趋势面组合法”进行海西早期古地貌

恢复。该方法同时消除了上覆石炭系泥岩的压实和埋藏期的构造变形,具体恢复过程不再赘述。

海西早期古地貌图显示YQ5井区总体处于Ⅱ号和Ⅲ号岩溶台地(图2),与南部坍塌性峡谷—伏流岩溶水系统处于相对统一的高程。YQ5井区的古地貌分异特征较显著,呈现东南高、西北低的岩溶地貌。Ⅲ号岩溶台地地势相对平缓,高程为-450~-350 m,三级地貌主要为溶丘洼地;Ⅱ号岩溶台地的地貌趋势有所变化,高程为-350~-300 m,三级地貌主要发育溶峰洼地、溶丘洼地和溶丘平原,YQ3井附近发育NE-SW走向的峰丛垄脊沟谷地貌,再往南发育峰丛(曲流)峡谷地貌。

YQ5井区的古地貌展现出强烈剥蚀改造后的残留地貌特征,其改造程度呈现出“东强西弱、北强南弱”的特征。“东强西弱”表现为Ⅱ号岩溶台地相较于Ⅲ号岩

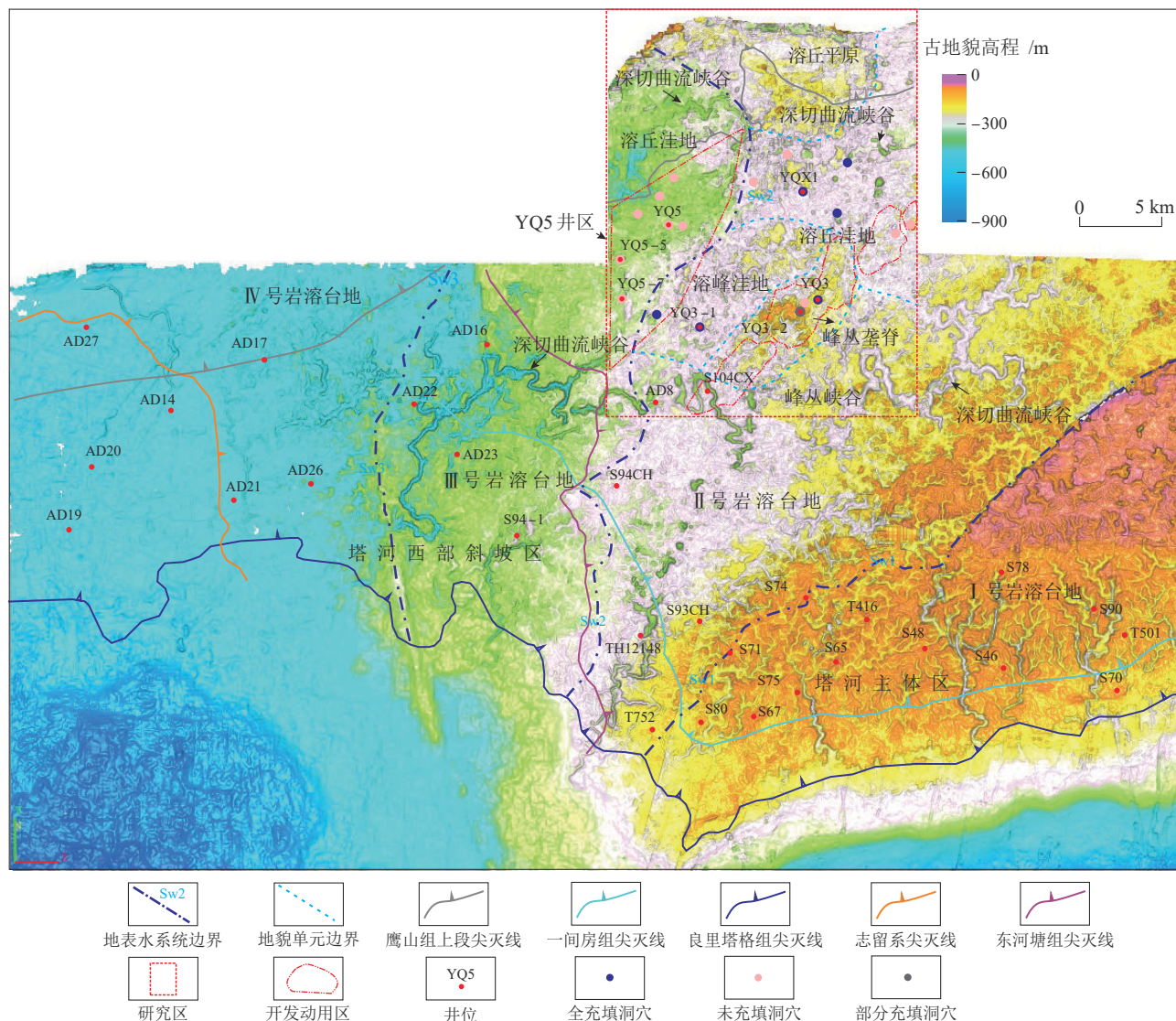


图2 塔河油田外围YQ5井区海西早期古地貌

Fig. 2 The Early Hercynian paleogeomorphology in the well block YQ5 at the periphery of the Tahe oilfield

溶台地经历了更为强烈的岩溶改造。最显著的特征是南部的深切曲流峡谷被改造成了3段结构。该深切曲流峡谷横剖面为深而窄的“V”字形,峡谷与溶丘高差达到150~200 m^[29]。按照古地貌趋势,这些峡谷本应该由东向西连续分布,但Ⅱ号和Ⅲ号岩溶台地的边界(AD8井处)及YQ3井峰丛垄脊靠南的隆起将深切曲流峡谷分为3段,凸显了岩溶台地抬升对早期地貌的强烈破坏作用。此外,在YQ5井区西北部Ⅲ号岩溶台地仍然保留了小段深切曲流峡谷,沿流向向东进入Ⅱ号岩溶台地的峡谷痕迹基本消失,仅在井区东部保留了一小截。

“北强南弱”表现为在YQ5井区Ⅱ号岩溶台地以YQX1井为界,以南的古岩溶微地貌和古水系保存相对较完整,而以北的古地貌形态明显受到改造。在南部,YQ3井处发育较为完整的NE走向峰丛垄脊沟谷地

貌,峰丛和洼地之间的高差达到180 m,溶峰洼地之间地表水系的分布相对较为连续;中部地区,溶丘洼地较少发育连续的沟谷,而是形成数量较多、孤立杂乱分布的椭圆形洼地和落水洞;最北部地区为古岩溶地貌分异特征最不明显的溶丘平原,其地貌平坦,起伏较小,整体呈现出“夷平化”特征。

2.2 古岩溶水系统

根据高精度地震资料及钻井资料,塔河地区地表和地下古水系恢复主要应用趋势面分析、精细相干技术、强振幅异常、波阻抗属性和混频属性等技术方法^[5,9]。基于地表和地下水系的刻画结果,考虑古地势梯度对地表及地下水系流向的控制作用,依据断头河、盲谷、伏流和地下河等典型地貌形态^[30-31],识别地下河

入水口和出水口,建立地表-地下水补给、径流、转换和排泄的空间配置关系,进而构建出具有统一地表和地下水系的岩溶水系统^[32]。

YQ5井区岩溶水系统整体处于深切曲流水系北坡位置,靠近峡谷区的地表和地下水系发育程度高,远离排泄中心的水系数量迅速减少,且岩溶水的补给、径流和排泄的循环结构较不完整(图3)。其岩溶水系统具体特征如下。

1) 地表和地下水系的汇流方向与古地貌趋势不一致。在南部,深切曲流峡谷的最大下切深度被视为区域最低的排泄基准,大部分地表和地下水系呈现树枝状的层级结构,从北向南以深切曲流水系为主汇流排泄。然而,根据古地貌显示,Ⅱ号岩溶台地的南部YQ3井处的地貌高于北部,按照地貌控制水系流向的一般规律,YQ3井处的峰丛垄脊应该控制分水岭以北的地表水系向北汇流。这两者的方向显然相互矛盾,其原因在于深切曲流水系统形成时间略早于YQ3井处的构造隆升,构造隆升形成的峰丛垄脊地貌对早期

水系的汇流方向存在明显的改造作用。

2) 地表主干水系受到强烈的改造作用。与古地貌趋势相似,岩溶水系统分布表明深切曲流并没有形成完整的由东向西的汇流过程。流经YQ5井区和AD22井区的深切曲流峡谷都经历了改造,被分为3个部分,导致地表水系的中断。中断区域主要通过地下河建立岩溶水循环。YQ5井区北部鹰山组上段尖灭线附近的深切曲流峡谷同样呈现了截断现象。

3) 古岩溶水系统的岩溶水循环完整性较差,地表和地下水系之间的岩溶水转换关系不明确。地下水系的延伸长度较短,连续性较差,大多数长度在500~3 000 m(靠近排泄区的个别地下水系保存完整长度达到9.3 km)。在YQ3井处峰丛垄脊附近,地下水系经历剥蚀,南、北坡的地下水系无法完全对接,局部的构造抬升对早期地下水系产生了强烈的改造作用。

3 古岩溶洞穴发育特征及其控制因素

3.1 古岩溶洞穴类型及分布规律

岩溶洞穴是指形成于可溶岩中、人可直接进入或进行探测的地下空间^[33]。现代岩溶洞穴的分类原则很多,包括按成因、形态、功能和水动力带等分类。例如,依据成因划分为表生和深成岩溶洞穴^[34];依据形态划分为树枝状、网格状和海绵状岩溶洞穴^[35];依据功能划分为主干、支流、转向、废弃、诱导和活栓等岩溶洞穴^[36];依据渗流带、浅饱水带和深饱水带(深潜水带)等水动力带^[37],可将岩溶洞穴分为渗流带洞穴、地下水位洞穴和潜流带洞穴^[38];依据峡谷区的特殊水动力条件可划分暗河型、伏流型、穿洞型、顺河潜流型和渗流入流型等岩溶洞穴^[39],等等。

3.1.1 古岩溶洞穴类型

通过对现代岩溶及塔里木盆地西北缘(巴楚五道班)出露的奥陶系古岩溶洞穴考察^[40-41],前人针对塔河主体区古岩溶缝洞提出表层岩溶带、渗流岩溶带和径流岩溶带的划分方案,分带依次识别落水洞、驻水洞、渗流井、厅堂洞、干流洞、支流洞和末梢洞^[3,11];基于岩溶“层控”与“断控”认识,油田现场从塔河碳酸盐岩缝洞型油藏开发实践出发,提出了“岩溶残丘型”“岩溶古河道型”和“断溶体”的储集层-油藏一体的缝洞分类方案^[2];另外,基于塔河西部斜坡区深切曲流峡谷的发现,及对以峡谷为排泄中心的岩溶水系统的认识,依据

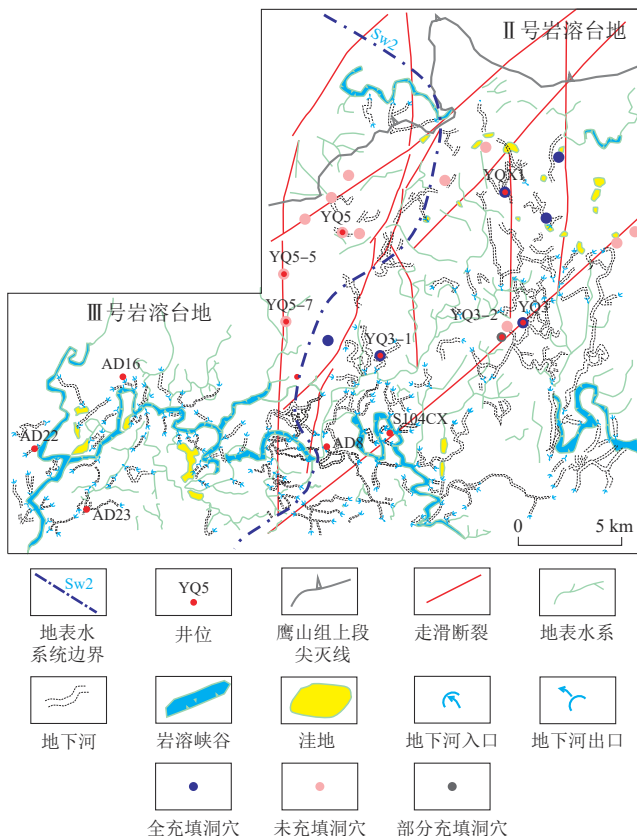


图3 塔河油田外围YQ5井区中-下奥陶统海西早期古岩溶水系统

Fig. 3 The Early Hercynian paleokarst water system of the Middle-Lower Ordovician in the well block YQ5 at the periphery of the Tahe oilfield

峡谷区水动力条件制定的岩溶洞穴划分方案贴合实际并得到开发验证^[30]。

断溶体最初是指盆内上奥陶统覆盖条件下以大气淡水沿断裂带溶蚀为主形成的缝洞体^[2]。YQ5井区同样发育相似的沿断裂溶蚀扩大形成的岩溶洞穴,这类表生岩溶条件下的断溶体可垂向“溶穿”3大岩溶带,而非归属某一特定岩溶带。另外,YQ5井区总体处于深切曲流峡谷岩溶水系统的北部,以峡谷为排泄中心的岩溶洞穴划分方案同样适合本研究区。因而,综合考虑专业严谨性及油藏开发实践,本次研究结合了岩溶峡谷区洞穴分类方案和断溶体分类方案,识别了暗河型洞穴及“过溶蚀残留型”断溶体。

3.1.2 古岩溶洞穴分布规律

前人利用野外露头、测井、岩心和地震等资料建立了较为成熟的古岩溶洞穴识别技术。塔里木盆地西北缘出露的奥陶系古岩溶洞穴类型丰富。前人参考现代实例,在塔北露头识别了暗河型溶洞和断控型溶洞,定量统计古岩溶洞穴的形态、尺寸和充填等特征参数,形

成了缝洞特征参数知识模板,为古岩溶洞穴结构表征提供依据^[40]。在测井曲线响应特征上,古岩溶洞穴发育段主要表现为自然伽马值增大、双侧向电阻率降低、中子孔隙度和声波孔隙度增大以及密度孔隙度减小^[42-43]。在地震响应特征上,基于实钻井洞穴标定和正演模型,暗河型洞穴的地震响应表现为沿地下河道走向的地震剖面中的连续强反射特征,垂直地下河走向的地震剖面为“串珠状”强反射特征,其平面地震属性表现为连续长条状和强振幅异常等^[5,44];断溶体主要呈现沿主干或次级断裂的连续多个相位的串珠强反射。综合钻时参数、放空漏失、岩心资料以及测井响应,岩溶洞穴可进一步划分为未充填、部分充填和全充填3种类型^[30,45](图4a)。

YQ5井区实钻井洞穴主要分布在中-下奥陶统鹰山组中,这些洞穴在规模上存在明显差异。根据实际钻遇洞穴的统计结果,22口实钻井中,有13口井钻遇到了洞穴,洞穴总数达到17个,其中暗河型洞穴10个,断溶体7个。洞高小于10 m的洞穴共12个,占到了总数的70.6%,而洞高在10 m以上的洞穴有5个,占比

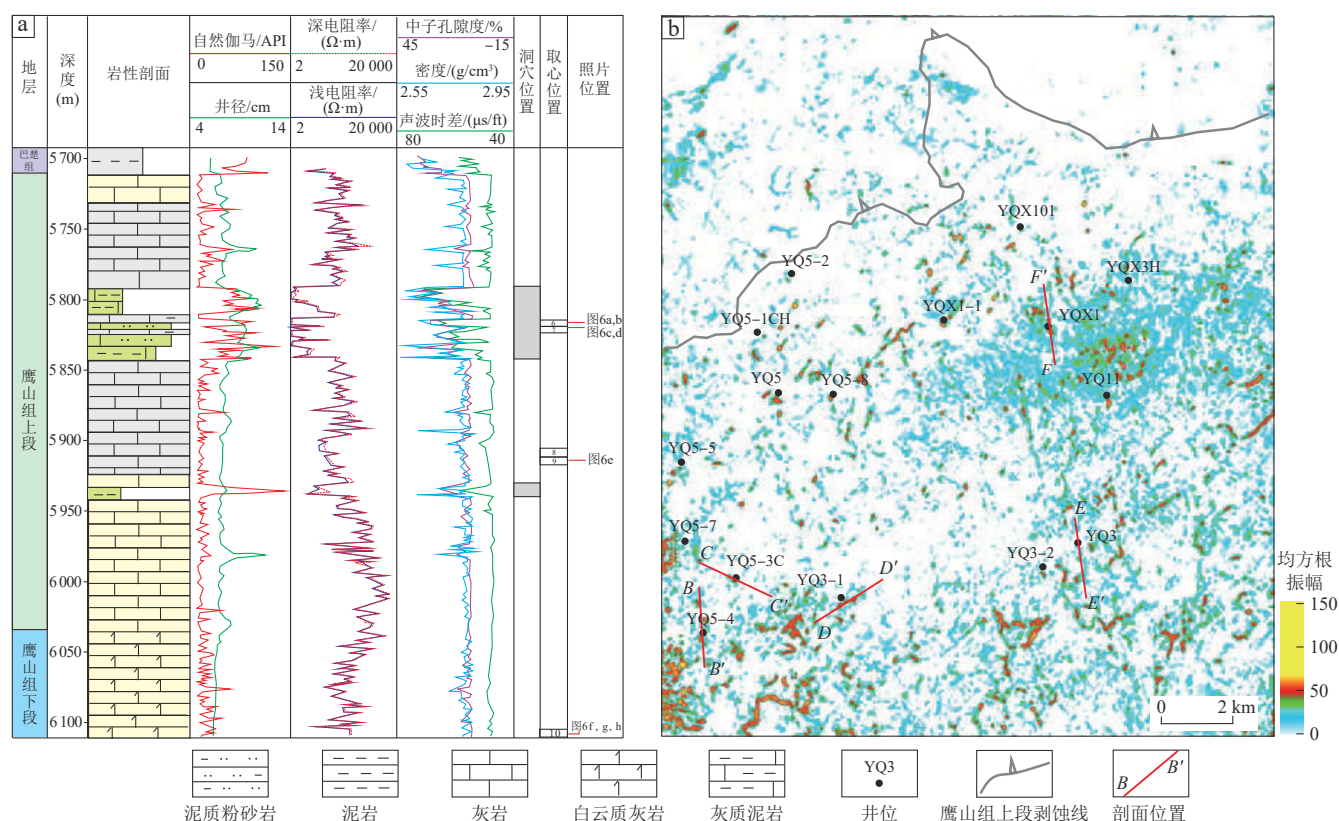


图4 塔河油田外围YQ5井区中-下奥陶统古岩溶洞穴测井响应和平面分布

Fig. 4 Maps showing the log responses and planar distribution of the Middle-Lower Ordovician paleokarst caves in the well block YQ5 at the periphery of the Tahe oilfield

a. YQ3井洞穴测井响应特征;b. 鹰山组上段顶面以下0~60 ms均方根振幅属性(红、黄色部分)

为29.4%。

暗河型洞穴主要发育在鹰山组上段,分布于不整合面以下的0~90 m深度范围内;大部分暗河型洞穴高在10 m以下,有4个洞穴的高度在10 m以上;6个泥、砂质全充填的洞穴,3个未充填,1个半充填。断溶体分布于风化壳之下超过90 m的深度,发育规模总体偏小,除YQ5-1CH钻遇的40 m高度洞穴外,其他6个洞穴的高度均小于10 m;断溶体泥、砂质全充填概率较低,泥、砂质全充填的洞穴只有1个,未充填的有6个。总之,与暗河型洞穴相比,断溶体的砂、泥充填概率明显较低。

结合古地貌、古岩溶水系统,岩溶洞穴充填性的平面分布也呈现一定的规律:泥、砂质全充填洞穴主要分布在Ⅱ号岩溶台地上,该台地的溶丘洼地、溶峰洼地和峰丛垄脊等地区均有分布,而古地貌相对较低的Ⅲ号岩溶台上的充填概率却很低;洞穴的泥、砂质全充填概率与地下河的发育程度呈正相关,YQ5井区东南部的地下河发育比西北部更为显著,与之相对应,东南部的泥、砂质全充填概率也更高。

3.2 暗河型洞穴特征及成因

YQ5井区归属于深切曲流峡谷岩溶水系统,但大部分区域远离峡谷排泄中心,无法发育与峡谷相邻伴生的伏流型、穿洞型、顺河潜流型和渗流入流型洞穴^[30,39],因此研究区主要发育暗河型洞穴。通过提取YQ5井区鹰山组上段暗河型洞穴的平面分布(图4b),结合钻井暗河型洞穴标定的地震剖面特征(图5a),本区暗河型洞穴具有如下发育特征及成因条件:

1) 暗河型洞穴主要分布在鹰山组上段尖灭线以南,而在北部鹰山组下段的云质灰岩露头区暗河基本不发育。纯灰岩地层中更容易形成暗河型洞穴,同时结合古岩溶水系统(图3)和古岩溶洞穴分布(图4b),可知靠近南部深切曲流峡谷区的暗河型洞穴发育程度更高。这反映了排泄基面和岩石溶蚀能力对表层暗河型洞穴空间分布的共同约束作用^[17,27]。

2) 地震剖面显示暗河型洞穴发育于残丘下方并与风化壳紧密相连,呈现短、强和红黑双轴反射,并保留有明显的错段和扭曲,表明暗河形成之初受控于较浅的地下水位,形成之后遭受了构造改造。例如,YQ3井的洞穴标定地震剖面显示暗河型洞穴在遭受构造抬升作用后形成了翘倾的形态(图5a)。另外,暗河型洞穴平面主要以树枝状结构分布,少量为单支状,延伸距离较短,大多数无法直接与深切曲流峡谷直接建立岩溶水径流-排泄关系。以上都表明暗河型洞穴在形成

之后经历了一定程度的改造。

3) 通过钻井-地震标定,YQ5井区暗河型洞穴的泥、砂质全充填概率高达60%。YQ3,YQ3-1,YQ5-4,YQ5-3X和YQX1等井所钻遇的表层洞穴均为泥、砂质全充填(图5a)。例如,YQ3井在风化壳表层钻遇了洞穴高度为51 m的全充填暗河型洞穴,充填物质包括浅灰色泥质细砂岩、粉砂岩和灰质泥岩(图6a—d)。这些洞穴发育了水平层理、斜层理、小型交错层理和滑动变形构造,其中包含了灰质泥岩夹垮塌成因的灰白色团块泥质灰岩(图6c)。

结合强剥蚀改造后的残留地貌背景和循环结构不完整的古岩溶水系统,可知YQ5井区早期暗河型洞穴在形成之后遭受了构造抬升和剥蚀作用。构造抬升作用导致暗河型洞穴抬离地下水位,洞穴顶板剥蚀减薄易坍塌,泥、砂通过地表水系进入洞穴很容易形成泥、砂质全充填。这一过程导致表层暗河型洞穴的有效储集空间进一步受到破坏。

4 “过溶蚀残留型”断溶体特征及成因

4.1 “过溶蚀残留型”断溶体涵义

根据塔北地区断裂和岩溶2种地质条件的消长组合,先前的研究认为断溶体可以进一步分为3种类型:①上奥陶统尖灭线以北区域的“过溶蚀残留型”断溶体;②上奥陶统尖灭线以南直至塔北隆起结束的“破碎+强溶蚀型”断溶体;③塔北隆起南侧的顺北油气田的“强破碎+弱溶蚀型”断溶体^[46-48]。“过溶蚀残留型”断溶体主要指风化岩溶区溶蚀断裂带附近以洞穴和溶蚀孔洞为主的缝洞储集体,同时遭受风化淋滤作用和断裂纵向溶蚀作用,受控于区域性侵蚀基准面的下降,纵向溶蚀深度可达340 m^[46]。

“过溶蚀残留型”断溶体的形成与塔河油田的“阶梯状”岩溶台地演化密切相关。湖北恩施地区的岩溶台面呈现相似的阶梯状分布,每个岩溶台面的形成代表了一期稳定的构造抬升运动,这些运动导致区域岩溶侵蚀基准面下降,此时垂向岩溶侵蚀作用占主导地位^[49]。

塔河油田的岩溶台地具有相对稳定的“阶梯状”高程分布:Ⅰ号岩溶台地高程为-300~-100 m,Ⅱ号岩溶台地高程为-350~-300 m,Ⅲ号岩溶台地高程为-500~-350 m,Ⅳ号岩溶台地高程为-600~-500 m(图2)。根据现代实例,塔河油田岩溶台地的演化呈现典型的阶段性,即由东向西Ⅰ—Ⅳ号,岩溶台地逐期

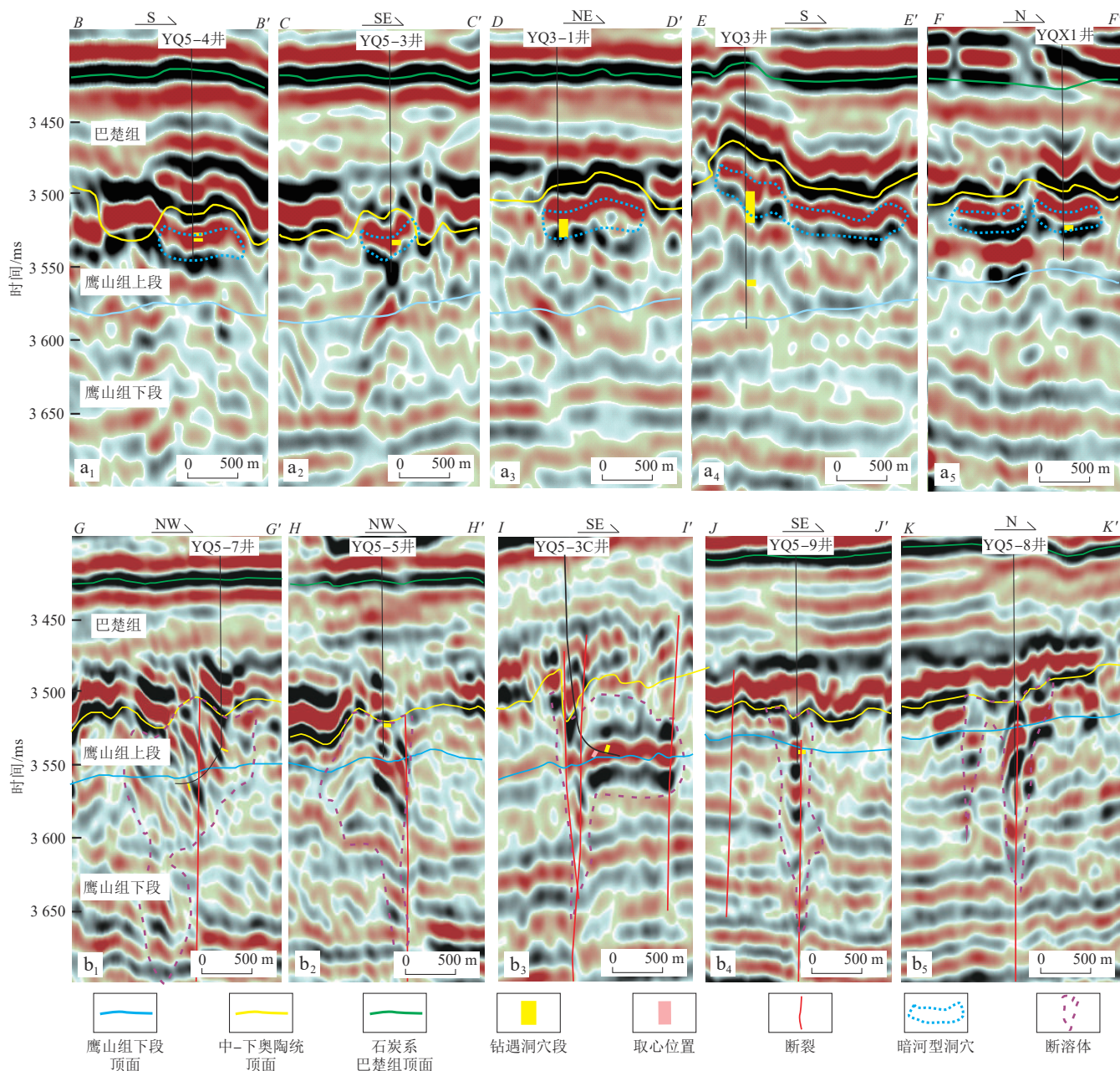


图5 塔河油田外围YQ5井区暗河型洞穴和断溶体地震响应特征

Fig. 5 Seismic response characteristics of caves of underground river type and fault-karst reservoirs in the well block YQ5 at the periphery of the Tahe oilfield

a₁—a₅, 暗河型洞穴地震响应特征(剖面位置见图4b); b₁—b₅, “过溶蚀残留型”断溶体地震响应特征(剖面位置见图9c)

抬升,每个岩溶台地形成了独特的水文地貌和相对独立的岩溶水系统^[50]。岩溶台地的演化还表现出继承性,早期抬升的岩溶台地被晚期构造抬升后,早期岩溶形态被继承、破坏和改造(图7)。YQ5井区的大部分区域位于Ⅱ号岩溶台地,表明该区至少经历了3期构造抬升运动和3次岩溶侵蚀基准面下降,提供了充足的岩溶水垂向侵蚀空间。

结合塔河岩溶台地的演化过程,“过溶蚀残留型”

断溶体概念具有两层涵义。①“过溶蚀残留型”强调了多期次岩溶的继承效果,即早期形成的岩溶台上的各类表生岩溶形态,在晚期构造抬升后遭受改造和破坏,但会保留早期古地貌和岩溶水系统的残余痕迹。正如前文所述,YQ5井区展现了这类残留特征。②“断溶体”被赋予了岩溶台地多期岩溶叠加的岩溶建设意义,即早期抬升过的岩溶台面,在晚期构造抬升和区域侵蚀基准面下降的影响下,岩溶水的垂向溶蚀和侵蚀

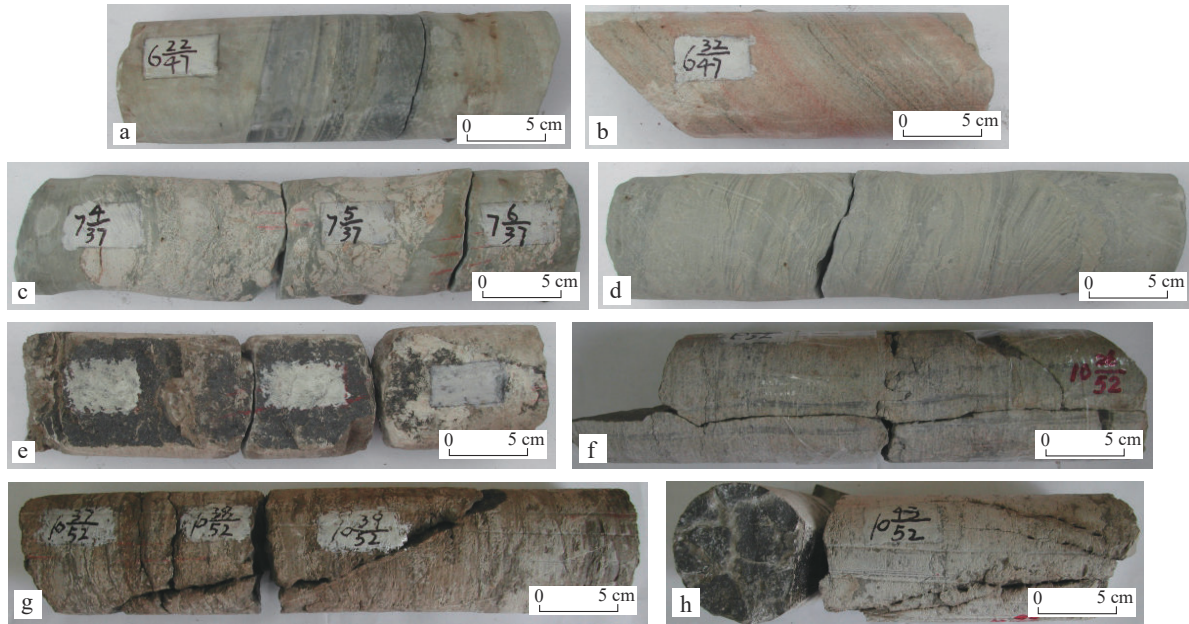


图6 塔河油田外围YQ3井中-下奥陶统古岩溶洞穴沉积及裂缝岩心照片

Fig. 6 Core photos showing sediment fill and fractures in the Middle-Lower Ordovician paleokarst caves in well YQ3 at the periphery of the Tahe oilfield

- a. 溶洞沉积,浅灰色灰质细砂岩,发育水平层理,埋深5 848.90~5 849.10 m;b. 溶洞沉积,浅灰色灰质细砂岩,发育斜层理,埋深5 820.65~5 820.80 m;c. 溶洞沉积,浅绿灰色灰质泥岩,夹灰白色团块泥质灰岩,埋深5 824.20~5 824.50 m;d. 溶洞沉积,浅灰绿色泥质细砂岩,发育小型斜层理,个别层系见滑动现象,埋深5 824.50~5 824.80 m;e. 浅黄灰色斑状沥青质云质灰岩,发育方解石半充填的立缝,含沥青,埋深5 910.70~5 910.95 m;f. 浅灰色微晶云质灰岩,发育一长0.5 m的直立缝,无充填,埋深6 107.00~6 107.30 m;g. 褐灰色条带状微晶云质灰岩,发育方解石半充填的立缝,扩溶现象显著,含沥青,埋深6 108.20~6 108.60 m;h. 浅灰色微晶云质灰岩,发育含沥青方解石半充填溶蚀裂缝,埋深6 108.70~6 109.00 m

能力增强,从而有利于断溶体的发育。

4.2 “过溶蚀残留型”断溶体特征

地震剖面上,“过溶蚀残留型”断溶体呈现沿主干或次级断裂的连续多个相位的串珠强反射,其纵向贯穿深度较大,个别情况下可贯穿至鹰山组下段,并在鹰山组下段深部形成强串珠反射(图5b)。“过溶蚀残留型”断溶体的岩溶水补给主要来自风化面的负向蓄水构造,断溶体正上方往往对应了风化壳面呈下凹形态的洼地、落水洞和干谷等地貌形态(图5b)。“过溶蚀残留型”断溶体垂向溶蚀较深,沿裂缝的溶蚀现象显著,泥、砂质充填现象很少。YQ3井岩心显示,在风化壳面之下400 m深处的鹰山组下段云质灰岩中,发育高陡裂缝,裂缝张开程度显著,沿裂缝方向可见明显的溶蚀扩大现象。裂缝的储集空间保存较好,多数未被充填,少数方解石半充填,含有沥青(图6e—h)。YQ5-3C井为向深部断溶体部署的水平井(图5b),该断溶体在深部表现为沿断裂走向的红黑双轴强振幅。YQ5-3C井在水平轨迹段钻遇了两个溶蚀洞穴,洞宽分别为0.5 m和1.5 m,在深部断溶体部位取心见构造角砾岩、溶洞和裂

缝。其中构造角砾岩多以灰岩砾和砂泥岩砾为主(图8a,d—f),含少量白云岩砾(图8a),围绕角砾发育典型的塑性变形构造,溶洞多为灰白色次级方解石充填,方解石呈晶簇块状且节理发育(图8b—c,k),裂缝发育且张开度明显(图8c,g—j),个别裂缝呈撕裂状并个体大小达到3 cm×7 cm(图8g),多被方解石和有机质充填。

走滑断裂的纵向贯穿能力和破碎程度直接影响了纵、横向的溶蚀程度和范围,进而对“过溶蚀残留型”断溶体的开发井油气产量产生影响(图5b)。以YQ5-5和YQ5-7等井为例,这些井的断裂垂向切穿深度和断溶体的溶蚀轮廓范围较广,具有较高的油气产量。YQ5-7井于2023年3月投产,油压19.0 MPa,日产油60.0 t,不含水。截至2023年10月YQ5-7井累产原油达到 1.1×10^4 t,YQ5-5井累产原油已达到 8.3×10^4 t。

4.3 “过溶蚀残留型”断溶体发育控制因素

结合古岩溶背景、钻井洞穴标定及地震剖面特征,综合分析认为YQ5井区北部“过溶蚀残留型”断溶体的发育主控因素为断裂系统、地层剥蚀强度和负向蓄水构造。

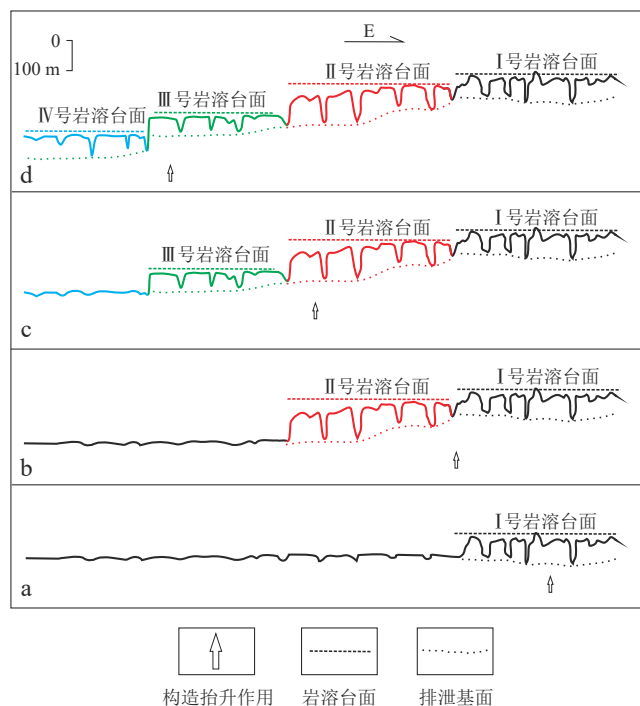


图7 塔河油田海西早期岩溶台地演化模式

Fig. 7 Evolutionary model of the Early Hercynian karst platforms in the Tahe oilfield

a. 与 I 号岩溶台面对应的构造抬升期; b. 与 II 号岩溶台面对应的构造抬升期; c. 与 III 号岩溶台面对应的构造抬升期; d. 与 IV 号岩溶台面对应的构造抬升期

1) 走滑断裂控制“过溶蚀残留型”断溶体的岩溶分布

YQ5 井区“过溶蚀残留型”断溶体平面线性规律性较强,与断裂分布有较好的一致性。前人研究表明,塔河地区受加里东中期—海西早期多期构造活动影响,中—下奥陶统中普遍发育 NNE 向和 NNW 向为主的共轭走滑断裂系统^[51-52]。YQ5 井区主要发育 NE 向、NNE 向和近 SN 向的走滑断裂,YQ5-1 和 YQ3 主干走滑断裂沿 NNE 向分布,YQ5-5 和 YQ11 次级走滑断裂为近 SN 走向分布(图 9a)。“过溶蚀残留型”断溶体主要分布于 YQ5-1 主干断裂和 YQ3 主干断裂的平行夹持区域,沿 NE 向和 NNE 向分布的线性排列规律显著。

2) 鹰山组上段剥蚀程度影响“过溶蚀残留型”断溶体的岩溶发育及保存程度

“过溶蚀残留型”断溶体展布呈现“条带状”规律,主要受控于地表出露岩性和鹰山组上段残余厚度以及区域侵蚀基准面。①“过溶蚀残留型”断溶体总体分布在鹰山组上段尖灭线以南(图 9b),鹰山组下段直接出露地表,以云质灰岩和白云岩为主,相对鹰山组上段的纯灰岩,其岩溶强度较弱^[53],不易发育岩溶洞穴,鹰山

组上段的纯灰岩更易受到溶蚀,有利于岩溶水沿断裂纵向发生溶蚀。②“过溶蚀残留型”断溶体的分布密度与鹰山组上段的残余厚度呈一定的关联性。从图 9b 可知,鹰山组上段残余厚度在 0~120 m 范围内的断溶体最为发育,残余厚度 120~240 m 范围内的断溶体仍有相当数量,而残余厚度大于 240 m 范围内的断溶体数量显著减少。③区域侵蚀基准面的控制影响了岩溶水顺断裂向下侵蚀的最大深度。当超过侵蚀基准面深度时,形成的是受止溶层控制的承压型岩溶^[17],而非具有垂向缝洞结构的“过溶蚀残留型”断溶体。受下渗溶蚀底界的限制,楔形可溶地层在平面上沿着鹰山组上段尖灭线呈现出“条带状”分布。

断溶体的“条带状”展布规律对于向东的 YQ 东地区 and 向西的艾丁北地区奥陶系油藏的勘探开发具有重要的油气地质启示。艾丁北地区 YQ201CH 井为向断裂深部断溶体的侧钻井,于 2023 年 10 月投产,目前稳定日产原油 40.0 t,表现出较好的油气效果,佐证了近 EW 向的“条带状”分布规律。

3) 负向地貌为“过溶蚀残留型”断溶体提供岩溶水补给条件

现代岩溶露头实例表明,远离排泄区且高于区域排泄基准面之上的高位潜水洼地,能够为白云岩岩溶提供良好的溶蚀条件^[54],岩溶水沿走滑断裂拉分断阶区的下渗扩溶可在白云岩中形成溶蚀洼地、落水洞和洞穴^[55]。正如前文所述,“过溶蚀残留型”断溶体与风化壳面向负向地貌紧密相关。特别是在远离深切曲流峡谷排泄基准的区域,洼地、落水洞和干谷等负向地貌形成了良好的蓄水构造,为岩溶水的下渗扩溶形成断溶体提供了充足的补给条件(图 6,图 9c)。实际钻井显示,即使是在溶蚀性能相对较弱的鹰山组下段灰质云岩和白云岩中,在走滑断裂的拉分断阶区也能形成溶蚀程度较高的断溶体(图 5b)。

需要注意的是,尽管 YQ5 井区与塔河主体区都发育“过溶蚀残留型”断溶体,它们之间仍存在一些明显差异:在塔河主体区,断溶体与表层风化壳型缝洞体无法剥离开,形成了似层状连续分布的结构^[42];相比之下,YQ5 井区的表层风化壳型缝洞体经历了强烈的剥蚀改造,断溶体呈现出线性或孤立分布的特征,平面延伸距离较短,不具备似层状分布的特征(图 10)。这表明 YQ5 井区断溶体的横向缝洞连通性相对较弱。目前的生产井之间尚未建立起动态响应关系,存在“一洞一藏”的可能性,因此,为了提高油藏的动用程度,需制定这类断溶体特征相符合的开发井网方案。

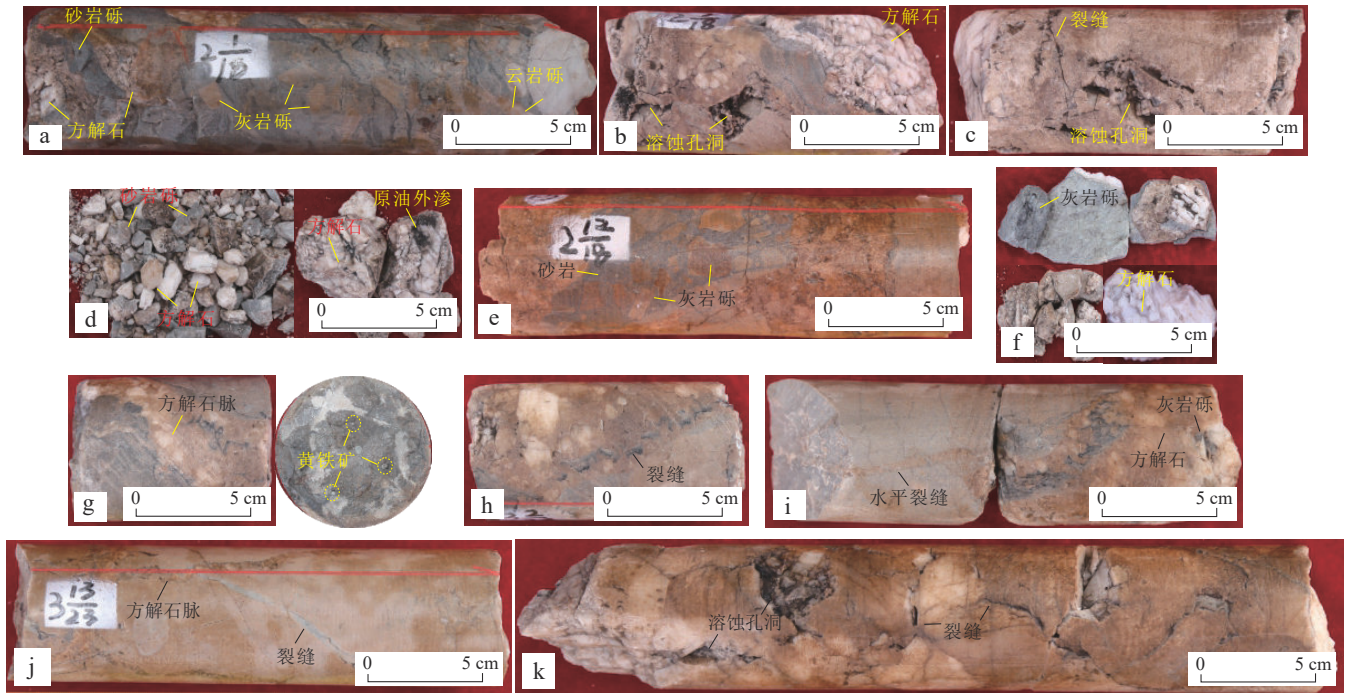


图8 塔河油田外围YQ5-3C井中-下奥陶统断溶体岩心照片

Fig. 8 Core photos showing the Middle-Lower Ordovician fault-karst reservoirs in well YQ5-3C at the periphery of the Tahe oilfield

a. 构造角砾岩,以灰岩砾、砂岩砾和白云岩砾为主,发育塑性变形,埋深6 453.00~6 453.25 m;b. 构造角砾岩,裂缝中灰白色次生方解石,发育塑性变形和溶蚀孔洞,方解石节理发育并呈晶簇块状,埋深6 453.25~6 453.40 m;c. 溶洞,灰白色次生方解石充填,发育平缝、斜缝和溶蚀孔洞,埋深6 453.74~6 453.92 m;d. 构造角砾岩,岩心破碎,以灰岩砾、砂岩砾为主,次生方解石节理发育并见原油外渗,埋深6 453.92~6 454.10 m;e. 浅黄灰色角砾岩,塑性灰黑色砂泥岩中发育黄灰色灰岩角砾,埋深6 454.47~6 454.68 m;f. 岩心破碎,见灰岩角砾和次生方解石,埋深6 455.20~6 455.30 m;g. 灰岩中发育3.0 cm×7.0 cm大小斜缝,斜缝被灰白色次生方解石全充填,埋深6 457.30~6 457.39 m;h. 7.0 cm×12.0 cm大小溶洞,灰白色次生方解石全充填,斜缝张开度0.5~1.0 cm,被黑色有机质充填,埋深6 457.39~6 457.51 m;i. 灰岩中发育水平缝,灰白色次生方解石全充填,方解石中见灰岩砾石,埋深6 457.51~6 457.72 m;j. 灰岩中发育方解石脉和斜缝,斜缝被黑色有机质充填,埋深6 459.07~6 459.28 m;k. 溶洞,灰白色次生方解石全充填,发育节理、裂缝和溶蚀孔洞,埋深6 459.79~6 460.15 m

5 古岩溶演化模式及油气开发效果

5.1 古岩溶演化模式

综合YQ5井区古地貌、古岩溶水系统、岩溶洞穴分布和洞穴发育控制因素等方面的分析,对应Ⅱ号、Ⅲ号和Ⅳ号岩溶台地演化模式(图7),塔河北部YQ5井区海西早期开放式表生岩溶的演化过程可分为3个主要阶段:深切曲流期、岩溶改造期和下渗断溶期(图11)。

5.1.1 深切曲流期

在这个阶段,塔河西部斜坡Ⅱ号岩溶台地地区经历了深切曲流峡谷的形成过程^[30],即Ⅱ号岩溶台地的抬升期。在这个时期,Ⅱ号岩溶台地迅速抬升,导致侵蚀基准面快速下降,为适应地下水位的快速下降形成了

弯曲度高、下切深度大、由东向西连续无间断的深切曲流峡谷(图11a)。这一过程主要受到先存断裂和古地貌趋势的共同控制,影响了地下和地表水系的流向,以及主干和分支的汇流模式。溶蚀作用主要表现为以峡谷为最低排泄基准、沿着NNE向断裂的地表和地下河的侧向溶蚀为主。区域侵蚀基准面与地表面相距较近,垂向溶蚀能力相对较弱。

5.1.2 岩溶改造期

岩溶改造期对应Ⅲ号岩溶台地抬升期。随着区域侵蚀基准面的大幅下降,靠近深切曲流峡谷排泄基准的区域,暗河开始适应基准面的变化向深部形成多层管道系统。在远离排泄基准的区域,由于侧向径流系统开始遭到充填、改造及破坏,岩溶水只能通过洼地、落水洞和干谷等负向地貌沿着断裂下渗扩溶。这一过程初步形成了鹰山组的“过溶蚀残留型”断溶体。

随着Ⅲ号岩溶台地的构造抬升,与Ⅱ号岩溶台地

总之,断裂与岩溶的双重控制作用贯穿整个开

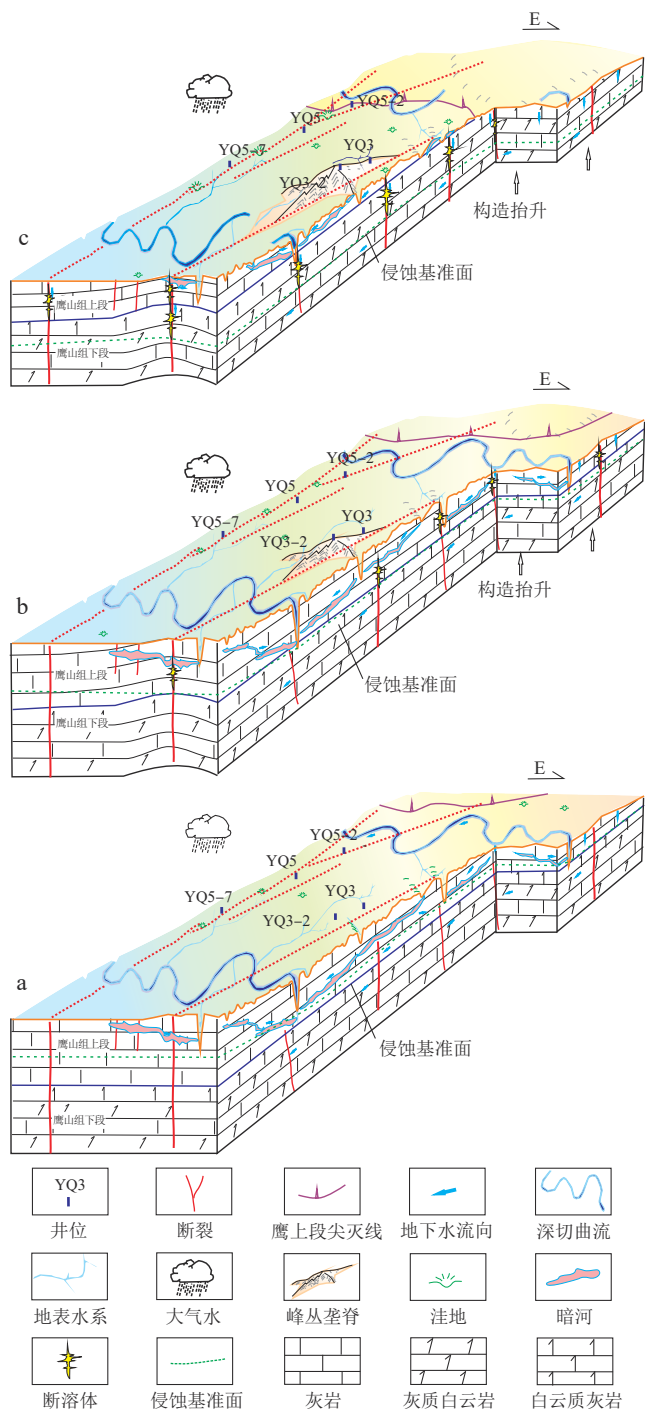


图11 塔河油田外围YQ5井区海西早期岩溶演化阶段

Fig. 11 Evolutionary stages of the Early Hercynian karst in the well block YQ5 at the periphery of the Tahe oilfield

a. 深切曲流期; b. 岩溶改造期; c. 下渗断溶期

放式表生岩溶的演化阶段。在深切曲流期、岩溶改造期和下渗断溶期这3个阶段,断裂与岩溶的相互作用关系呈现出明显的消长规律:①深切曲流期以侧向溶蚀作用为主,断裂控制着径流体系的汇流;②岩溶改造期侧向溶蚀作用逐渐减弱,垂向侵蚀作用破坏了径流体系,断溶体初具规模;③下渗断溶期以垂

向顺断裂侵蚀为主,是“过溶蚀残留型”断溶体的主要发育阶段。在YQ5井区,海西早期表生岩溶的演化过程既是暗河型洞穴持续被改造破坏的过程,也是断溶体持续建造的过程。

根据塔河北部强剥蚀区古岩溶缝洞的演化模式,结合“过溶蚀残留型”断溶体的发育控制因素分析,“过溶蚀残留型”断溶体最有利发育区域为远离主干水系汇流区域,并沿鹰山组上段尖灭线分布的主干断裂、次级断裂以及断裂夹持区分布。另外,由于强剥蚀区的落水洞、低洼和干谷等负向蓄水构造地貌可以给断溶体提供充足岩溶水补给,有利于深部优质缝洞体的发育,因而针对“过溶蚀残留型”断溶体的具体甜点选择并不需刻意考虑古岩溶风化面的相对高程。这与塔河主体区的选点原则有较大差异。

5.2 油气开发效果

2004—2021年间,YQ5井区针对表层风化壳暗河型洞穴部署钻井14口,钻遇全充填洞穴7个,半充填洞穴1个,建产油井10口,建产率71.4%,平均单井累产原油较低,为 1.6×10^4 t,单井累产原油大于 5.0×10^4 t的只有1口(后期分析认为该井动用了深部断溶体),单井累产原油 2.0×10^4 t以下13口。YQ5井区古岩溶暗河型洞穴的储集性能较差,导致油井地层能量不足,使得井区一直处于低产低效的难动用状态。

自2022年以来,YQ5井区复产后,基于塔河北部强剥蚀背景下古岩溶洞穴成因和古岩溶演化规律等地质认识,在YQ5井区聚焦于中—深部鹰山组的“过溶蚀残留型”断溶体进行部署和开发,快速评估了NE向主干断裂、SN向主干断裂以及次级断裂夹持区,共计部署20口井。截至2023年10月,已有8口井投产,建产率达100%,设计单井原油产能为19.7 t/d,实际产能达到37.0 t/d,动用原油储量达 700.0×10^4 t(图12)。值得注意的是,新部署钻井所钻遇的洞穴均未出现充填现象。总体而言,对于“过溶蚀残留型”断溶体的开发部署所取得的油气效果远远超过了暗河型洞穴。

6 结论

1) YQ5井区海西早期的古地貌呈现出东南高、西北低的特征,整体上呈现为多期次岩溶叠加改造后的残留地貌特征。三级地貌主要为溶峰洼地、溶丘洼地和溶丘平原,在YQ3井附近发育NE-SW走向的峰丛垄脊沟谷。

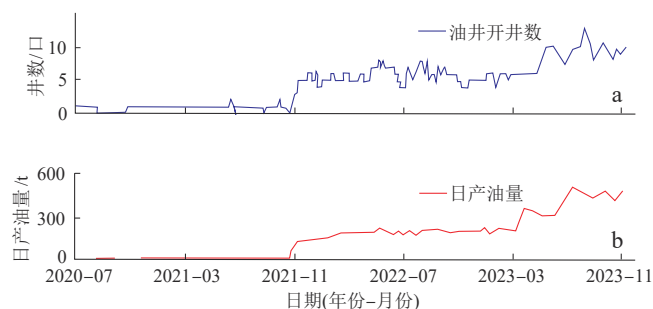


图12 塔河油田外围YQ5井区油井开井数和生产曲线

Fig. 12 Producing wells production curves of oil wells in the well block YQ5 at the periphery of the Tahe oilfield

a. 油井开井数曲线; b. 日产量生产曲线

2) YQ5井区的岩溶水系统在补给、径流和排泄方面呈现出较为不完整的循环特征。水系流向与古地貌趋势并不完全一致,导致地表水系和地下水系显得支离破碎,连续性差,南部深切曲流峡谷呈现出三分截断的现象,整体表现为遭受构造抬升和强剥蚀后的残留水系统特征。

3) YQ5井区主要发育暗河型洞穴和“过溶蚀残留型”断溶体。随着塔河岩溶台地的多期次构造抬升,早期深切曲流期形成的暗河型洞穴经历了改造和充填作用;相反,在岩溶改造期和下渗断溶期,由于区域侵蚀基准面的大幅度下降,垂向顺断裂侵蚀作用促进了“过溶蚀残留型”断溶体的形成。

4) “过溶蚀残留型”断溶体主要受断裂系统、地层剥蚀强度和负向蓄水构造等因素影响,其有利发育区域为远离主干水系汇流区域,并沿鹰山组上段尖灭线分布的主干断裂、次级断裂以及断裂夹持区分布,这类断溶体不易被破坏,被砂、泥质充填概率较低,开发井产量较高,开发潜力较大。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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 Experiment, 2018, 40(4): 461-469.
- [3] 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.
- [4] 鲁新便, 蔡忠贤. 缝洞型碳酸盐岩溶藏古溶洞系统与油气开发——以塔河碳酸盐岩溶洞型油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 22-27.
LU Xinbian, CAI Zhongxian. A study of the paleo-cavern system in fractured-vuggy carbonate reservoirs and oil/gas development——Taking the reservoirs in Tahe Oilfield as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 22-27.
- [5] 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 and Experiment, 2014, 36(3): 268-274.
- [6] 张娟, 杨敏, 谢润成, 等. 塔里木盆地塔河油田4区和6区奥陶系小尺度缝洞储集体概率识别方法[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 219-228.
ZHANG Juan, YANG Min, XIE Runcheng, et al. Probability-constrained identification of Ordovician small-scale fractured-vuggy reservoirs in Blocks 4-6, Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 219-228.
- [7] 吕艳萍, 吕晶, 徐想东, 等. 塔里木盆地塔河油田中下奥陶统鹰山组内幕储层成因机理[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 1031-1037.
LYU Yanping, LYU Jing, XU Xiangdong, et al. Genetic mechanism of inner reservoirs of Yingshan Formation of Middle-Lower Ordovician in Tahe Oil Field, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(6): 1031-1037.
- [8] 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. Hydrogeomorphologic characteristics and its controlling caves in Hercynian, Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(8): 1011-1020.
- [9] 李源, 鲁新便, 蔡忠贤, 等. 塔里木盆地塔河油田岩溶峡谷区海西早期洞穴系统发育模式[J]. 古地理学报, 2017, 19(2): 364-372.
LI Yuan, LU Xinbian, CAI Zhongxian, et al. Development model of Hercynian cave system in karst canyon area of Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(2): 364-372.
- [10] 蔡忠贤, 张恒, 漆立新, 等. 塔里木盆地中一下奥陶统岩溶水文地貌结构类型及特征[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 43-58.
CAI Zhongxian, ZHANG Heng, QI Lixin, et al. Types and

- characteristics of karst hydrogeomorphologic architecture in the Middle-Lower Ordovician, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(1): 43–58.
- [11] 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 cabonate reservoirs of Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(5): 15–21.
- [12] 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.
- [13] 胡文革. 塔里木盆地顺北地区不同断裂带油气充注能力表征研究与实践[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 528–541.
- HU Wenge. Study and practice of characterizing hydrocarbon charging capacity of different fault zones, Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 528–541.
- [14] 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): 207–218.
- 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): 207–218.
- [15] ZHANG Heng, CAI Zhongxian, HAO Fang, et al. Hypogenic origin of paleocaves in the Ordovician carbonates of the southern Tahe Oilfield, Tarim Basin, northwest China [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 225: 211669.
- [16] 张长建, 吕艳萍, 文欢, 等. 塔河油田西部斜坡区加里东运动中后期Ⅱ幕水文地貌特征及其对洞穴发育的控制[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(2): 135–144.
- ZHANG Changjian, LYU Yanping, WEN Huan, et al. Paleohydrogeomorphic characteristics of episode II of Middle Caledonian movement and their controls on karst cave development in western slope area of Tahe Oilfield [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(2): 135–144.
- [17] 张长建, 张振哲, 金燕林. 塔河油田浅覆盖区中一下奥陶统承压岩溶缝洞结构特征——以T738井区为例[J]. 海相油气地质, 2023, 28(2): 133–143.
- ZHANG Changjian, ZHANG Zhenzhe, JIN Yanlin. Characteristics of confined karst fractures-caves structure of the Middle-Lower Ordovician in shallow coverage zone of Tahe Oilfield: Taking the T738 well block as an example [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2023, 28(2): 133–143.
- [18] 李源, 蔡忠贤, 张恒, 等. 塔河油田T738井区顺层岩溶储层特征及成因[J]. 地质科技情报, 2017, 36(2): 80–85.
- LI Yuan, CAI Zhongxian, ZHANG Heng, et al. Characteristics and genesis of bedded karstification in T738 region of Tahe Oilfield [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(2): 80–85.
- [19] 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 paleokarsts in Akekule uplift, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2015, 37(3): 280–285.
- [20] 罗明霞, 夏永涛, 邵小明, 等. 塔河油田西北部于奇西1井奥陶系中—轻质原油地化特征及成因探讨[J]. 石油实验地质, 2016, 38(2): 244–250.
- LUO Mingxia, XIA Yongtao, SHAO Xiaoming, et al. Geochemical characteristics and genetic analysis of Ordovician medium-light oils from well YQX1 in the northwest of Tahe Oil Field [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2016, 38(2): 244–250.
- [21] 汤鸿伟. 塔河外围于奇地区奥陶系碳酸盐岩储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- TANG Hongwei. The study on characteristics of the Ordovician carbonate reservoirs in Yuqi area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [22] 旷理雄, 郭建华, 黄太柱, 等. 塔里木盆地于奇地区碳酸盐岩储集层特征及其控制因素[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(1): 15–18.
- KUANG Lixiong, GUO Jianhua, HUANG Taizhu, et al. Carbonate reservoir characteristics and control factors in Yuqi area, Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(1): 15–18.
- [23] 李文, 何敏, 李悦, 等. 塔河油田于奇地区奥陶系碳酸盐岩岩溶作用研究[J]. 新疆地质, 2015, 33(2): 229–234.
- LI Wen, HE Min, LI Yue, et al. Study on karstification of Ordovician carbonate rock in Yuqi area of Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2015, 33(2): 229–234.
- [24] 刘存革, 李涛, 吕海涛, 等. 阿克库勒凸起中—上奥陶统地层划分及加里东中期Ⅰ幕古喀斯特特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 55–63.
- LIU Cunge, LI Tao, LYU Haitao, et al. Stratigraphic division of Middle-Upper Ordovician and characteristics of the first episode karstification of Middle Caledonian in Akekule uplift, Xinjiang, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2010, 37(1): 55–63.
- [25] 张瑜, 彭守涛, 汲生珍. 塔河油田于奇西地区奥陶系洞穴充填程度预测与应用[J]. 新疆地质, 2017, 35(1): 89–93.
- ZHANG Yu, PENG Shoutao, JI Shengzhen. Filling degree prediction of Ordovician paleocave and the application in Yuqixi area of Tahe Oilfield [J]. *Xinjiang Geology*, 2017, 35(1): 89–93.

- [26] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1-12.
- QI Lixin, YUN Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1-12.
- [27] 卫端, 高志前, 杨孝群, 等. 塔里木盆地塔河地区中下奥陶统鹰山组碳酸盐岩层系内幕不整合识别特征[J]. 古地理学报, 2017, 19(3): 457-468.
- WEI Duan, GAO Zhiqian, YANG Xiaoqun, et al. Identification methods and features of unconformity within carbonate successions of the Lower-Middle Ordovician Yingshan Formation in Tahe area, Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19 (3): 457-468.
- [28] 康志宏. 塔河碳酸盐岩油藏岩溶古地貌研究[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(5): 522-525.
- KANG Zhihong. The karst palaeogeomorphology of carbonate reservoir in Tahe oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(5): 522-525.
- [29] 邓兴梁, 张庆玉, 梁彬, 等. 塔中Ⅱ区奥陶系鹰山组岩溶古地貌恢复方法研究[J]. 中国岩溶, 2015, 34(2): 154-158.
- DENG Xingliang, ZHANG Qingyu, LIANG Bin, et al. Reconstruction of karst palaeogeomorphology for the Ordovician Yingshan Formation in the central Tarim Basin [J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(2): 154-158.
- [30] 张长建, 吕艳萍, 张振哲. 塔里木盆地塔河油田西部斜坡区中下奥陶统古岩溶洞穴发育特征[J]. 石油实验地质, 2022, 44(6): 1008-1017, 1047.
- ZHANG Changjian, LYU Yanping, ZHANG Zhenzhe. Features of Middle-Lower Ordovician paleo-karst caves in western slope area, Tahe Oil Field, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(6): 1008-1017, 1047.
- [31] 张长建, 吕艳萍, 马海陵, 等. 塔河油田岩溶峡谷区伏流坍塌型古暗河缝洞系统[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(1): 9-17.
- ZHANG Changjian, LYU Yanping, MA Hailong, et al. Fracture-cave system in collapsed underground paleo-river with subterranean flow in karst canyon area, Tahe oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(1): 9-17.
- [32] 韩行瑞, 鲁荣安, 李庆松, 等. 岩溶水系统——山西岩溶大泉研究[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- HAN Xingrui, LU Rongan, LI Qingsong, et al. Karst water system: A study on big karst springs in Shanxi [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [33] 朱学稳. 洞穴学研究的进展[J]. 科技导报, 1997(12): 26-29.
- ZHU Xuewen. Progress in the research of speleology[J]. Science & Technology Review, 1997(12): 26-29.
- [34] PALMER A N. Distinction between epigenic and hypogenic maze caves[J]. Geomorphology, 2011, 134(1/2): 9-22.
- [35] PALMER A N. Origin and morphology of limestone caves [J]. GSA Bulletin, 1991, 103(1): 1-21.
- [36] MYLROIE J E. Hydrologic classification of caves and karst [M]// LAFLEUR R G. Groundwater as a Geomorphic Agent. London: Routledge, 1984: 157-172.
- [37] 任美镔, 刘振中. 岩溶学概论[M]. 北京: 商务印书馆, 1983.
- REN Meie, LIU Zhenzhong. Karst introduction [M]. Beijing: Commercial Press, 1983.
- [38] 张任. 岩溶洞穴分类新思考[J]. 中国岩溶, 1994, 13(3): 229-236.
- ZHANG Ren. New consideration on classification of karst caves [J]. Carsologica Sinica, 1994, 13(3): 229-236.
- [39] 杨明德. 岩溶峡谷区溶洞发育特征及水动力条件[J]. 中国岩溶, 1998, 17(3): 5-13.
- YANG Mingde. Characteristics and hydrodynamic conditions of cave development in karst gorge districts [J]. Carsologica Sinica, 1998, 17(3): 5-13.
- [40] 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.
- [41] 肖玉茹, 何峰煜, 孙义梅. 古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究——以塔河油田奥陶系古洞穴为例[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 75-80, 86.
- XIAO Yuru, HE Fengyu, SUN Yimei. Reservoir characteristics of paleocave carbonates—a case study of Ordovician paleocave in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24 (1): 75-80, 86.
- [42] 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.
- [43] 于聪灵, 蔡忠贤, 杨海军, 等. 基于BP神经网络预测轮古油田奥陶系碳酸盐岩油藏洞穴充填程度[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(5): 614-621.
- YU Congling, CAI Zhongxian, YANG Haijun, et al. Prediction of cave filling degree in Ordovician carbonate reservoirs based on BP neural network in Lungu Oilfield, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(5): 614-621.
- [44] 邓光校, 胡文革, 王震. 碳酸盐岩缝洞储集体分尺度量化表征[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 232-237.
- DENG Guangxiao, HU Wenge, WANG Zhen. Quantitative characterization of fractured-vuggy carbonate reservoirs [J].

- Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 232-237.
- [45] 赵军, 李宗杰, 虞兵, 等. 碳酸盐岩洞穴充填物及其充填程度的测井判别方法[J]. 中国岩溶, 2013, 32(2): 225-230, 237.
ZHAO Jun, LI Zongjie, YU Bing, et al. The logging recognition for the infill and the filling degree in karst cave[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(2): 225-230, 237.
- [46] 焦方正, 胡文革, 鲁新便, 等. 塔里木盆地古生界碳酸盐岩断溶体油藏认识及开发实践[M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2021.
JIAO Fangzheng, HU Wenge, LU Xinbian, et al. Understanding and development practice of Paleozoic carbonate karst-fault reservoir, Tarim Basin [M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2021.
- [47] 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.
- [48] 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): 20-27.
LYU 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): 20-27.
- [49] 王增银, 沈继方, 徐瑞春, 等. 鄂西清江流域岩溶地貌特征及演化[J]. 地球科学, 1995, 20(4): 439-444.
WANG Zengyin, SHEN Jifang, XU Ruichun, et al. Karst landscapes and their evolution in reaches of the Qingjiang River, western Hubei[J]. Earth Science, 1995, 20(4): 439-444.
- [50] 张长建, 杨德彬, 吕艳萍, 等. 塔河油田海西运动早期岩溶水系统划分及特征[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(6): 646-656.
ZHANG Changjian, YANG Debin, LYU Yanping, et al. Division and characteristics of karst water system in Early Hercynian movement in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(6): 646-656.
- [51] 韩勇, 徐浩. 塔河油田于奇地区断裂体系特征研究[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(3): 7-12.
HAN Yong, XU Hao. Characteristics of fault system in Yuqi area of Tahe Oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(3): 7-12.
- [52] 吕海涛, 张哨楠, 马庆佑. 塔里木盆地中北部断裂体系划分及形成机制探讨[J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 444-452.
LYU Haitao, ZHANG Shaonan, MA Qingyou. Classification and formation mechanism of fault systems in the central and northern Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2017, 39(4): 444-452.
- [53] 淡永, 梁彬, 曹建文, 等. 塔北哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩岩溶层组特征与溶蚀强度分析[J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 582-590.
DAN Yong, LIANG Bin, CAO Jianwen, et al. Characteristics and solution intensity of karst formations in Ordovician carbonates in the Halahatang area of the northern Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2015, 37(5): 582-590.
- [54] 何树伦, 王子红, 邱运鑫, 等. 贵州遵义白云岩岩溶区特色高位潜水及成因[J]. 矿产与地质, 2022, 36(3): 646-653.
HE Shulun, WANG Zihong, QIU Yunxin, et al. Distinctive high-level phreatic water and genesis in the dolomite karst area of Zunyi, Guizhou [J]. Mineral Resources and Geology, 2022, 36(3): 646-653.
- [55] 吴继文, 吴亮君, 吕勇, 等. 云南泸水市压扭性构造对银厂坪白云岩岩溶系统发育控制作用[J]. 中国岩溶, 2021, 40(5): 793-804.
WU Jiwen, WU Liangjun, LYU Yong, et al. Transpressional structure and its control on development of Yinchangping dolomite karst system in Lushui City, Yunnan [J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(5): 793-804.

(编辑 许诺)