

塔北地区奥陶系地下河溶洞充填规律与储集性能

张三¹,金强²,史今雄¹,胡明毅¹,段梦悦³,李永强⁴,张旭栋²,程付启²

[1. 长江大学 地球科学学院,湖北 武汉 430100;2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院,山东 青岛 266580;

3. 西北大学 地质系,陕西 西安 710069;4. 中国石化 石油勘探开发研究院,北京 102206]

摘要:基于野外露头、油田钻井、测井及地震资料,从溶洞充填物类型及旋回组合分析入手,开展古岩溶地下河溶洞充填序列及规律研究,同时探讨其油气地质意义。研究表明,塔河油田奥陶系岩溶地下河溶洞充填率达89.9%,且以沉积砂泥岩和垮塌角砾岩充填为主,发育下粗上细多个组合旋回,构成多旋回沉积充填组合和多旋回垮塌-沉积充填组合2种类型。前者分布于岩溶斜坡下游地貌平坦区,放空漏失井比例小、低产井比例高;后者分布于地貌落差较大的岩溶斜坡上游区,放空漏失井比例大,出现大量高产井。分析认为,地下河迂回曲折的空间结构及其径流强搬运能力,使大量岩溶碎屑物质充填其中,导致其超高充填率;潜水面季节性升降使其充填物具旋回性及可对比性,加之水流冲蚀和构造活动,导致溶洞多期垮塌,构成了上游区多旋回垮塌-沉积充填组合,未充填空间发育;地下相对封闭的碳酸钙过饱和环境,使其充填物钙质胶结严重,孔隙度降低;未充填空间将是油气挖潜的重点靶区。

关键词:地下河;溶洞充填;沉积旋回;奥陶系;塔河油田;塔里木盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Filling patterns and reservoir property of the Ordovician buried-river karst caves in the Tabei area, Tarim Basin

ZHANG San¹, JIN Qiang², SHI Jinxiong¹, HU Mingyi¹, DUAN Mengyue³, LI Yongqiang⁴, ZHANG Xudong², CHENG Fuqi²

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 4. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: An integration of outcrop observations, as well as data from drilling, logging, and seismic surveys in an oilfield is applied to analyze the filling types and filling cycle assemblages of karst caves associated with paleokarst buried rivers; accordingly, the filling sequences and patterns of the paleokarst buried rivers, as well as the discussion on their petroleum geological implications. The results show that the Ordovician buried-river karst caves with a filling rate of 89.9% in the Tahe oilfield, are predominantly filled with sandy mudstones and collapse breccias. These karst caves host multiple combination cycles featuring coarse-grained lower parts and fine-grained upper parts, which can be classified into polycyclic sedimentary assemblages and polycyclic collapse-sedimentary assemblages for filling. The former is distributed in the karst slope's lower reaches of flat landform, where wells with lost circulation and stringers account for small and high proportions, respectively. In contrast, the latter is situated in the karst slope's upper reaches featuring landform of great drops, where wells with lost circulation are of high proportion together with multiple high-yielding wells. The following conclusions can be reached through analysis: (1) The tortuous spatial structure of buried rivers, combined with their strong runoff transport capacity, facilitate the filling of large amounts of karst detrital materials, resulting in an extremely high filling rate; (2) The seasonal fluctuations in the phreatic surface lead to the formation of cyclic and comparable fillings. This, coupled with water erosion and tectonic activities, gives rise to multi-phase collapses of karst caves. Consequently, polycyclic collapse-sedimentary filling assemblages are formed in the upper reaches, with unfilled spaces developed; (3) The relatively closed underground environment supersaturated with

收稿日期:2023-07-07;修回日期:2023-10-17。

第一作者简介:张三(1990—),男,博士、讲师,碳酸盐岩沉积、储层研究。E-mail: zspetro@sina.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U1663204,42072171);湖北省自然科学基金项目(2022CFB684)。

calcium carbonate, results in severe calcareous cementation of fillings, decreasing the intergranular porosity; (4) The unfilled spaces serve as the major targets with potential for oil and gas exploitation.

Key words: buried river, karst cave filling, sedimentary cycle, Ordovician, Tahe oilfield, Tarim Basin

引用格式:张三,金强,史今雄,等. 塔北地区奥陶系地下河溶洞充填规律与储集性能[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1582–1594. DOI: 10. 11743/ogg20230619.

ZHANG San, JIN Qiang, SHI Jinxiong, et al. Filling patterns and reservoir property of the Ordovician buried-river karst caves in the Tabei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1582–1594. DOI: 10. 11743/ogg20230619.

地下河又称暗河,是地下径流集中的地下通道,具有河流主要特性^[1]。碳酸盐岩岩溶区,水流沿岩石裂隙或落水洞进入地下,于潜水面附近转为径向流,经溶蚀、坍塌以及水流侵蚀、搬运沉积作用形成错综复杂的岩溶地下河溶洞系统^[2]。由于岩溶作用的随机性与复杂性,地下河溶洞空间分布及充填结构极其复杂,时而开阔、时而狭窄、时而完全充填、时而未充填^[3-4]。早期的国内外关于地下河溶洞研究主要集中在野外露头的观测与描述^[3-5],随着石油工业的蓬勃发展以及大批与古岩溶相关碳酸盐岩油气田的发现^[6],地表岩溶露头观测与地下岩溶结构描述相结合的地下河溶洞储层研究逐渐兴起^[7-9]。其中,广泛发育地下河溶洞系统的塔河油田奥陶系古风化壳岩溶一直是地下河溶洞储层研究的典范^[10-12]。李阳等^[10,13]通过塔北露头考察与塔河油田储集体对比分析,指出塔河油田奥陶系发育连续带状分布的地下河型、孤立分布的岩溶洞穴型(洞径>0.2 m)及网络状分布的溶蚀孔缝型3类缝洞系统,且地下河系统和岩溶洞穴系统为其主要储集体类型。鲁新便、李源等^[14-15]通过地震属性提取及三维雕刻技术,实现了地下河的识别与三维雕刻,明确了其空间分布。徐微、金强等^[16-17]基于岩心、薄片、测井等资料,建立了地下河溶洞充填物识别方法,识别出沉积、垮塌、化学3类充填物,并对比分析了其储集性能。杨晓兰等^[18]尝试基于正演模型与叠前分频技术进行溶洞内部充填结构识别,识别出部分充填和完全充填溶洞。田亮、张慧涛等^[19-20]综合前人研究成果,通过岩心、测井(成像测井)开展单井充填相分析,指出地下河溶洞未充填相为其主要储集空间。

然而,随着塔河油田勘探开发程度不断提高,生产实践显示,地下河溶洞发育区的油井普遍低产,仅局部未充填溶洞(放空段)可获高产^[21-22],早期认识的T615井地下河溶洞油浸石英砂岩优质储层^[23](孔隙度达23.4%)并未获得高产,累产原油仅 2.04×10^4 t。因此,地下河溶洞有何充填规律,井间如何充填,未充填空间在哪,成为目前地下河溶洞储层评价预测亟待解

决的难题。本文通过对塔河油田大量地下河溶洞段岩心观察描述与测井精细解释,分析不同类型充填物韵律结构与旋回组合特征,井-震结合,开展井间充填旋回对比分析,探讨其井间充填规律,预测未充填空间分布与规模,同时结合大量的岩心、薄片及测试资料,分析充填物储集性能,为地下河溶洞储层评价预测提供借鉴。

1 岩溶地质背景

塔河油田位于塔里木盆地北部塔北隆起之上,自下而上依次发育中、下奥陶统台地相蓬莱坝组、鹰山组、一间房组和上奥陶统混积陆棚相恰尔巴克组、良里塔格组、桑塔木组,其中鹰山组和一间房组为其主力储产层,岩溶缝洞为其主要储集空间^[24-25](图1)。海西早期,强烈的构造活动使塔河地区强烈抬升,形成北东向展布大型鼻隆构造,中、上奥陶统尖灭线自北向南依次呈裙带式分布^[26]。塔河油田北部一间房组和鹰山组可溶性灰岩大面积暴露地表遭受强烈岩溶作用,形成复杂的风化壳岩溶缝洞系统,高产井(累产油量 $>3 \times 10^4$ t的井)围绕峰丘呈准连续片状分布^[13,22];南部因上奥陶统非可溶性岩层覆盖,仅在深大断裂带部位的中、下奥陶统可溶岩层中发育断控岩溶缝洞体,高产井紧密围绕断裂带呈窄条带状分布^[22](图1)。泥盆纪末—石炭纪初,海水自西南向东北大规模侵入,结束了塔河油田海西早期岩溶^[27];而后的构造活动仅仅诱发塔河油田奥陶系早期断裂多期活动,而对其整体构造格局影响较小^[28]。

塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶地下河溶洞系统主要发育于鹰山组与一间房组,平面上主要分布于恰尔巴克组尖灭线以北,展布方向与断裂展布方向具一定的相关性,呈北东向和北西向展布^[14,22]。值得强调的是,各地下河向南均终止于恰尔巴克组尖灭线附近(出露地表而汇入泄水区^[29]),且AD20井区(加里东期岩溶区)亦不发育地下河^[22],表明塔河地区地下河主要分布于海西早期风化壳岩溶区(图1)。

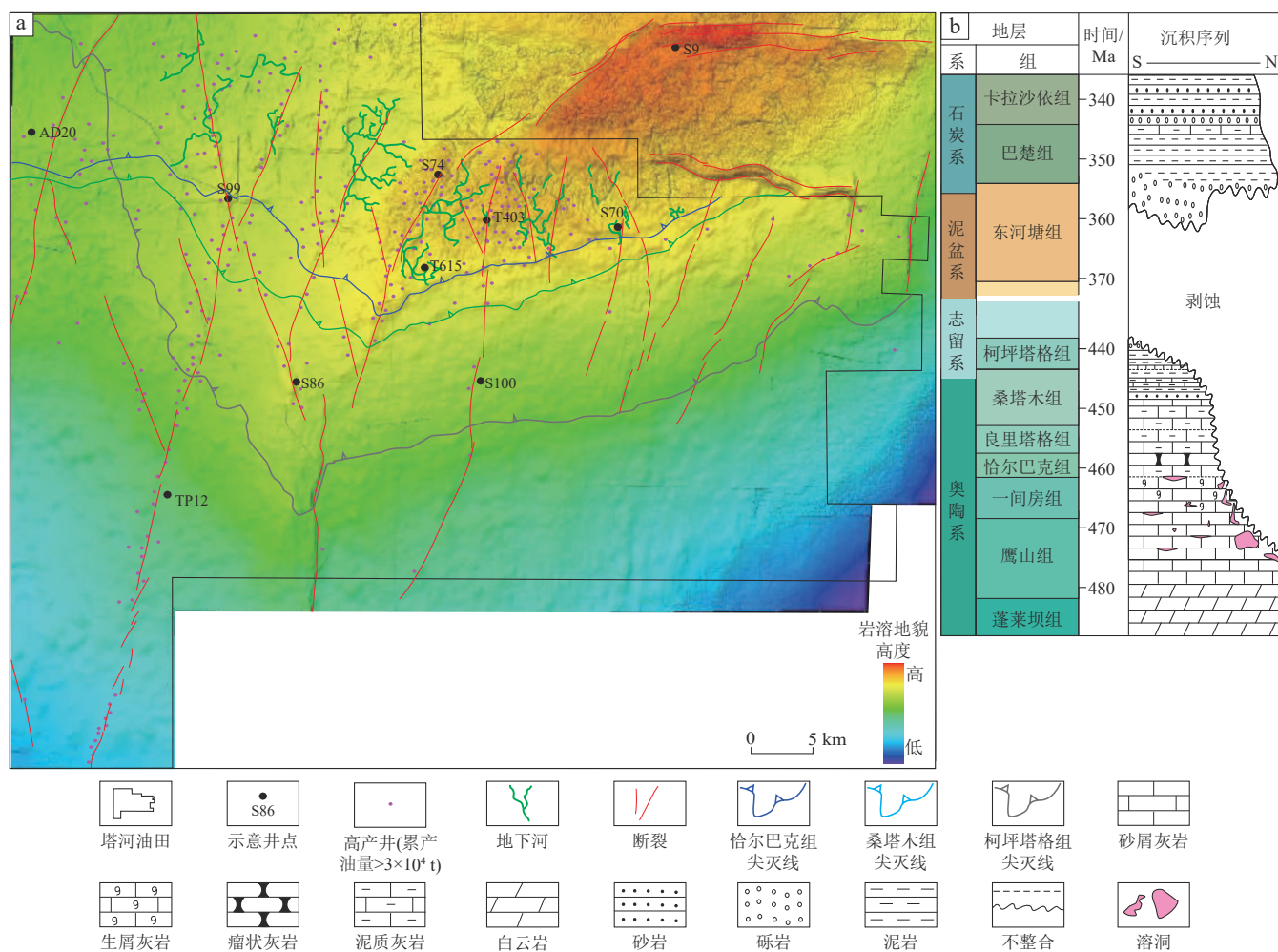


图1 塔河油田奥陶系岩溶地质概况

Fig. 1 Geological overview map of the Ordovician karsts in the Tahe oilfield

a. 塔河油田奥陶系古构造及地下河、高产井分布; b. 塔河地区地层柱状图

2 地下河溶洞充填物类型及占比

2.1 充填物类型及特征

地下河溶洞的形成过程除了水流的侵蚀与溶蚀,还伴随着垮塌与充填作用,即一边扩大,一边充填;且因其水流属于地下径流,具较强搬运与沉积能力,其充填物发育河流相沉积层理^[1-2]。因此,具沉积层理或搬运砾石(具一定磨圆)的溶洞充填物是地下河溶洞判别的关键标志^[29-32]。本文通过对塔北奥陶系岩溶露头考察与塔河油田40余口井奥陶系溶洞段岩心观察描述,识别出塔北西克尔和硫磺沟2个典型的地下河古溶洞露头剖面,发现塔河油田14口井(S65, S70, S75, S81, S93, S94, AD8, YQ4, T403, T414, T502, T615, TK404和TH12112井)发育地下河古溶洞系统(图2)。

西克尔剖面一间房组地下河溶洞出露规模:长23.6 m、高5.3 m,溶洞被钙质砂岩与粉砂质泥岩完全充填,具下粗上细多个充填旋回(图2a)。硫磺沟剖面地下河溶洞仅出露了一个截面:洞高7.5 m的不规则溶洞(后期构造挤压形变),发育垮塌-沉积充填组合;下部发育3.8 m厚砂泥岩充填,具下粗上细正旋回特征,其中底部充填砂砾岩夹垮塌角砾,砾石具一定磨圆,成分为奥陶系泥晶灰岩;上部发育3.5 m厚垮塌角砾充填,角砾间被沉积粉砂及泥质充填(图2b);顶部出现0.2 m高的未充填空间(少量碎石松散堆积)。这种具一定旋回组合的溶洞充填现象在塔河油田深度5 400 m的奥陶系岩溶洞穴中亦有发现。如:T502并于深度5 439.74 m的鹰山组钻遇具下粗上细的砂泥质充填物(图2c),S70并于深度5 498.21 m的一间房组钻遇具多个正韵律粉砂岩与泥岩组合(图2d),AD8并于深度6 042.56 m的鹰山组钻遇具一定磨圆砾石与

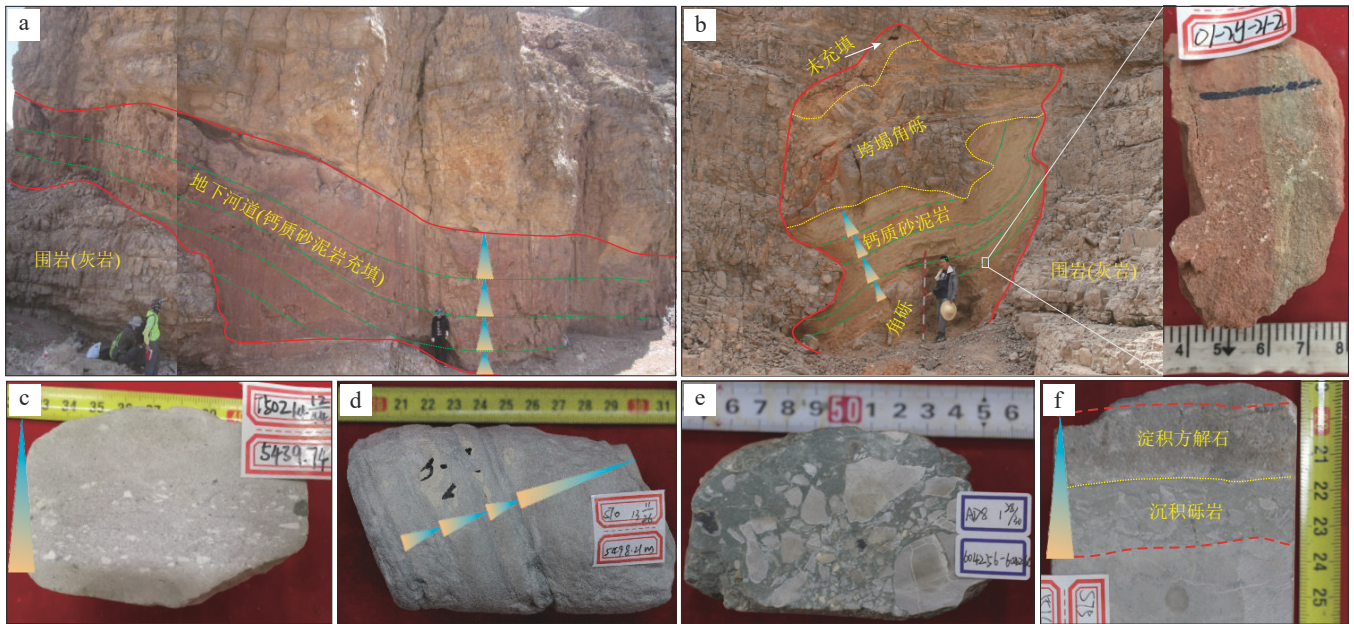


图2 塔北地区奥陶系地下河溶洞充填特征及充填物类型

Fig. 2 Filling characteristics and filling types of the Ordovician buried-river karst caves in the Tabei area

a. 塔北西克尔岩溶露头, 一间房组, 溶洞被沉积钙质砂泥岩充填, 野外照片; b. 塔北硫磺沟岩溶露头, 鹰山组, 溶洞下部被具沉积层理的钙质砂泥岩充填, 上部为垮塌角砾充填, 顶部出现未充填空间, 野外照片; c. T502井, 埋深5 439.74 m, 鹰山组, 溶洞内砂泥岩充填物, 具正韵律特征, 岩心照片; d. S70井, 埋深5 498.21 m, 一间房组, 溶洞内砂泥岩充填物, 具沉积层理结构, 岩心照片; e. AD8井, 埋深6 042.56 m, 鹰山组, 溶洞内角砾岩充填物, 砾石大小混杂、呈次棱角状, 个别具一定磨圆度, 成分为奥陶系灰岩, 岩心照片; f. S75井, 埋深5 516.89 m, 鹰山组, 溶洞内沉积砾岩及化学淀积方解石充填物, 岩心照片

泥岩混杂沉积组合(图2e), S75井于深度5 516.89 m的鹰山组钻遇下部为沉积砾岩、上部淀积方解石的正韵律充填组合(图2f)。

2.2 不同类型充填物占比

采用岩心刻度测井、测井标定地震、地震三维雕刻等技术方法, 雕刻出工区内地下河的空间展布。区内地下河平面上呈迂回曲折条带状(图3a), 空间上呈错综复杂网络状(图3b), 受潜水面升降控制, 空间上发育多层地下河(图3c)。结合塔河地区奥陶系古岩溶地下河平面展布, 复查了98口钻遇了地下河溶洞的井, 其中有13口井发生放空。结合岩心观察结果及前人不同类型溶洞充填物测井识别图版^[17,30], 对工区内98口井地下河溶洞充填物开展解释。结果显示, 累计解释地下河溶洞高度1 191.2 m, 其中沉积充填物累计厚度681.5 m, 占比57.2%, 垮塌充填物累计厚度312.4 m, 占比26.2%, 化学充填物累计厚度76.8 m, 占比6.4%; 未充填空间累计高度120.5 m(包含钻井放空段)、占比10.1%, 即地下河溶洞充填率89.9%(表1)。值得强调的是塔河地区地下河溶洞化学充填物通常为薄层的淀积方解石, 并不发育孤立溶洞中充填的块状巨晶方解石和块状硅质岩。

3 地下河溶洞充填组合类型及展布规律

基于岩心、测井解释成果总结发现, 塔河地区奥陶系古岩溶地下河溶洞主要发育多旋回沉积充填组合、垮塌-沉积组合2种类型。化学充填通常呈薄夹层或粒间胶结物产出, 在上述2种组合中都有发育。

3.1 多旋回沉积充填组合

多旋回沉积充填组合类型主要指地下河溶洞被多个沉积砂泥岩正韵律旋回组合充填, 各旋回底部通常发育磨圆砾石与泥质混杂沉积, 且局部可能发育薄层垮塌角砾岩。因其充填物以细粒物质为主, 充填溶洞段自然伽马(GR)及无铀伽马(GR_k)曲线整体表现为箱形高值(垮塌角砾岩段为低值), 声波时差(AC)及补偿中子孔隙度(CNL)曲线也为箱形高值, 而双侧向电阻率(R_{LLD}, R_{LIS})曲线呈箱形特低值, 且具明显正差异。该类型充填组合通常位于岩溶地貌落差较小(水流动力弱)的岩溶下斜坡区^[29]。

T615井于深度5 534.5~5 553.3 m发育18.8 m高度的多旋回沉积充填地下河溶洞。该溶洞主要被块状

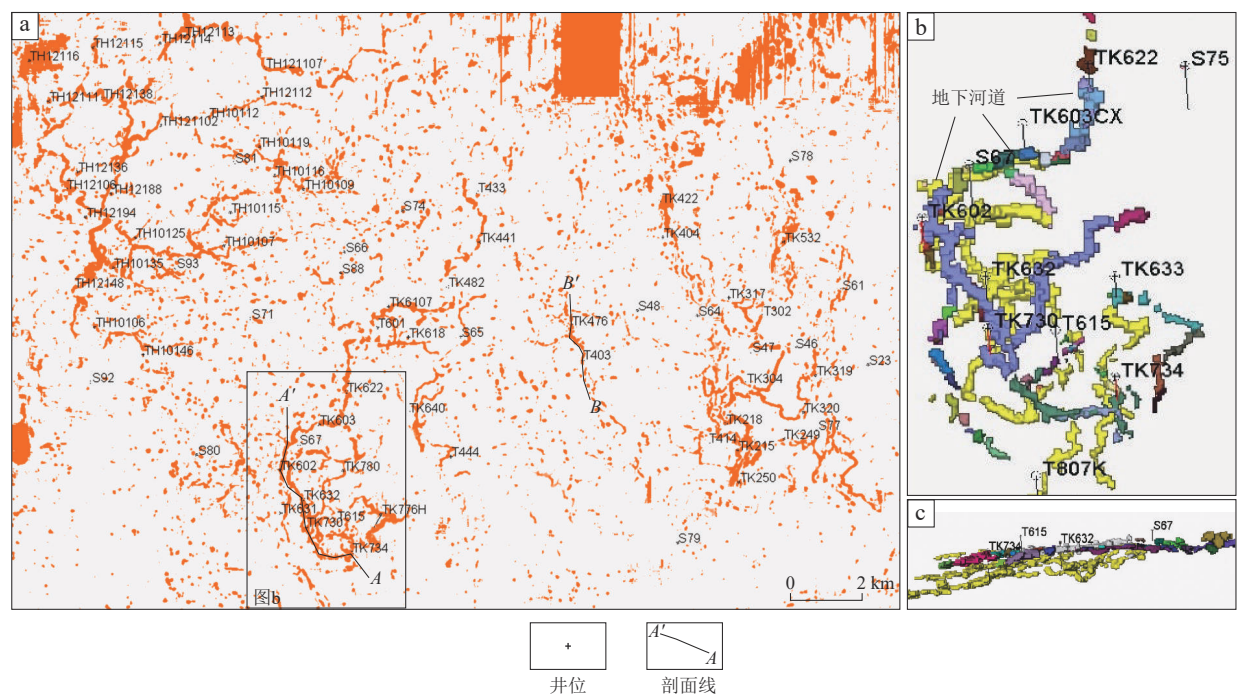


图3 塔河地区奥陶系地下河溶洞空间结构特征

Fig. 3 Spatial structures of the Ordovician buried-river karst caves in the Tahe area

a. 奥陶系顶面以下30 ms波阻抗属性切片表征孤立缝洞异常体与连续缝洞异常体;b. 地下河三维空间结构(俯视图);c. 图b侧视图

表1 塔河地区奥陶系地下河溶洞充填程度统计

Table 1 Statistics of the filling rates of the Ordovician buried-river karst caves in the Tahe area

充填类型	充填物类型	测井识别标志	解释厚度/m	充填程度/%
沉积充填	泥岩、粉砂岩、砂砾岩	$V_{sh}>15\%$, $NEN<2.68\text{ g/cm}^3$, $R_{LLD}<50\ \Omega\cdot\text{m}$	681.5	57.2
垮塌充填	角砾岩	$V_{sh}<15\%$, $NEN>2.71\text{ g/cm}^3$, $R_{LLD}>100\ \Omega\cdot\text{m}$	312.4	26.2
化学充填	巨晶方解石、燧石	$V_{sh}<10\%$, $R_{LLD}>1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$	76.8	6.4
未充填	钻井放空或松散堆积	$V_{sh}<15\%$, $NEN<2.61\text{ g/cm}^3$, $R_{LLD}<50\ \Omega\cdot\text{m}$	120.5	10.1

注: V_{sh} 为泥质含量; NEN 为补偿密度; R_{LLD} 为深侧向电阻率。

砂岩和粉砂质泥岩完全充填,共发育9个充填正旋回组合(图4),下部主要为块状砂岩与薄层粉砂质泥岩互层结构,其中砂岩物性及含油性好,孔隙度可达20.3%以上,而泥岩物性差,几乎不含油;上部发育粉砂岩与泥岩组合,粉砂岩物性及含油性变差,平均孔隙度为12.2%(图4b)。该溶洞底部2.0 m高度范围内发育2层薄层溶洞,岩心、成像测井显示其呈近水平产状,且被粉砂岩充填。另外,深度5 556.0~5 558.1 m发育的2.2 m高度的地下河溶洞,被沉积砂砾与垮塌角砾完全充填(图4c),同样发育2个正旋回组合。

3.2 多旋回垮塌-沉积充填组合

多旋回垮塌-沉积充填组合类型主要指地下河溶洞被多个垮塌角砾岩-沉积砂砾岩组合旋回充填;因其垮塌角砾及近源搬运砾石充填占比增加(充填物粒度较粗),充填溶洞段GR和GR_k曲线整体呈峰丛

式高值、AC和CNL曲线呈峰丛式低值、R_{LLD}与R_{LIS}曲线呈锯齿状中-低值(明显不同于多旋回沉积充填组合)。其中沉积充填段GR与AC曲线呈锯齿状中-高值,R_{LLD}与R_{LIS}曲线呈箱形低值(正差异);垮塌充填段GR与AC曲线呈微齿状箱形低值(与奥陶系灰岩基值相当),Rd与Rs曲线呈箱形中-高值(无差异)。该类型充填组合通常位于岩溶地貌落差大(水流动力强)、断裂活动频繁的岩溶上斜坡区^[29]。

塔河油田T403井位于断裂带上,其于深度5 487.6~5 554.3 m钻遇66.7 m高度的多旋回垮塌-沉积充填地下河溶洞。该溶洞主要被垮塌角砾岩与沉积砂砾岩充填,二者充填比例为0.91(厚度相当),且自下而上共发育10个沉积-垮塌充填组合旋回。其中垮塌角砾多为不同尺度的次棱角状灰岩岩块,角砾间被淀积(钙化)方解石及钙质粉砂岩充填,胶结致密,物性差(孔隙度<2%),几乎不含油(图5d,e);沉积充填

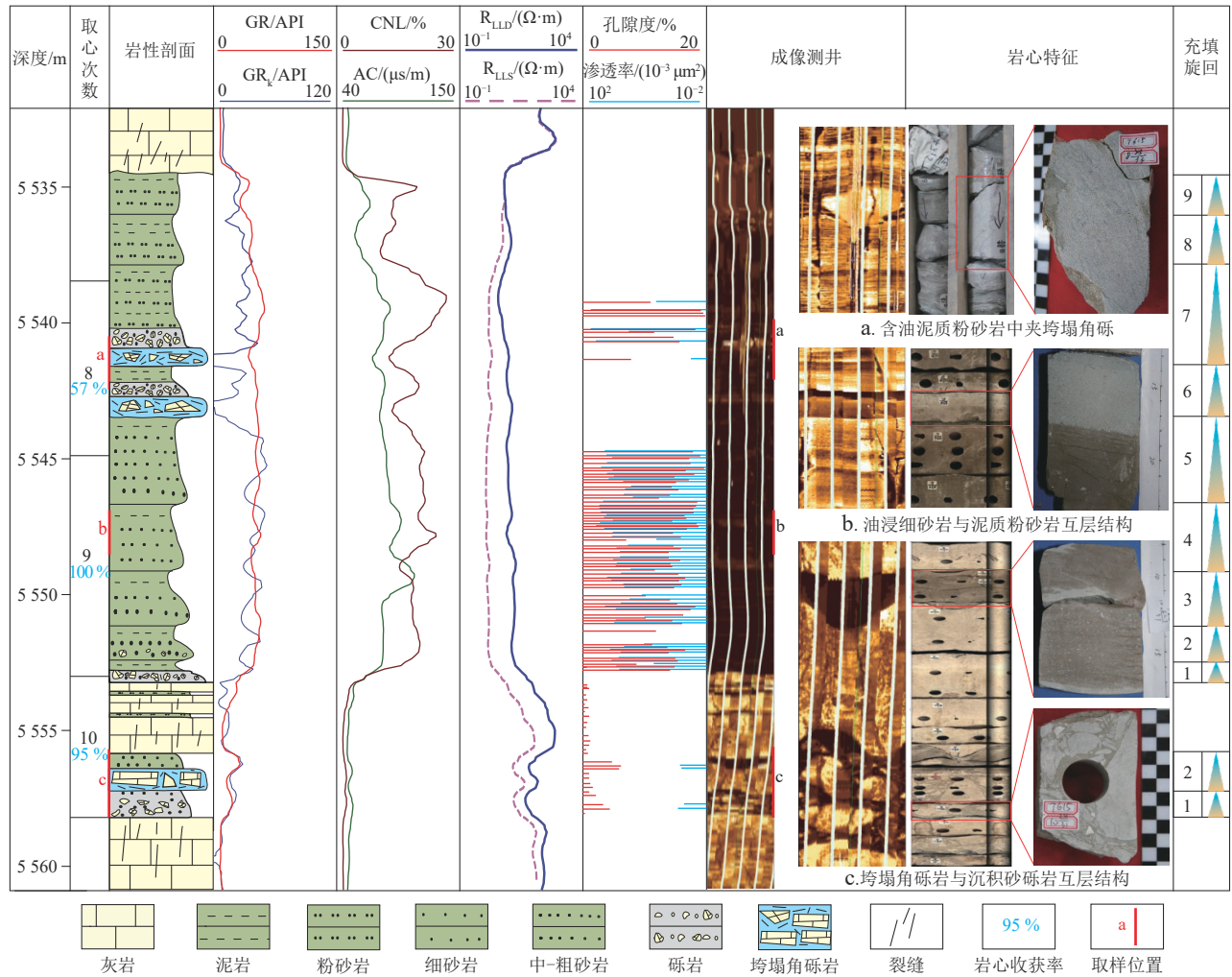


图4 塔河油田奥陶系地下河溶洞多旋回沉积充填组合特征

Fig. 4 Characteristics of polycyclic sedimentary filling assemblages in the Ordovician buried-river karst caves in the Tahe oilfield

物为较粗砂砾岩,砾石成分为奥陶系灰岩、磨圆较好,孔隙度可达8.6%,不含油(图5f);局部发育小尺度角砾(砾径<10 cm)与砂泥岩混杂堆积,角砾呈次棱角状(具一定磨圆),属洪泛期快速近源沉积(图5c),物性差(与垮塌角砾相当)。值得注意的是,第6次取心显示,洞顶发育张性开启裂缝(图5a),且存在1.76 m未充填空间(放空),预示着该类型溶洞充填组合易出现未充填空间。

3.3 充填旋回组合空间对比

地下河溶洞的形成过程始终受潜水面的控制^[2,4,15]。当潜水面上升并维持在较高水平时,地下河溶洞被水体充满,以泥质或粉砂质细粒沉积为主,即洪泛沉积^[17],井间可追踪对比;当潜水面下降,地下河溶洞内水位降低,水体流速加快,出现砂砾岩等较粗碎屑沉积。因此,潜水面的多期升降变化,将导致地下河溶洞充填物的多期旋回性,且洪泛期的细粒沉积物可作

为井间旋回对比的重要标志。基于此,本文针对地下河溶洞的多旋回充填组合特征,依据沉积旋回理论,开展井间旋回对比分析。结果显示,同一地下河道内不同段溶洞充填旋回井间可追踪对比。如TK734井与TK730井相距1.51 km,钻遇同一条地下河,分别揭示21.9 m和22.1 m高度的溶洞,溶洞均发育沉积旋回充填组合,被多个沉积砂砾岩与泥岩旋回充填。各旋回中的泥岩段和砂砾岩段均可追踪对比,空间上构成3个正旋回沉积充填组合。

依据图6旋回对比原则,井-震结合,开展地下河溶洞充填物横向对比。图7a为塔河油田T615井区TK734井—TK602井方向地下河溶洞充填剖面,波阻抗反演属性剖面显示该地下河为相对稳定的地下干流河(稳定连续管道状);其中TK734井与TK730井间发育的3个正旋回组合可连续追踪至TK602井(长达5.4 km),尽管②号和③号旋回下部的厚层砂砾岩段在TK632与TK602井明显较薄,然而其整体旋回

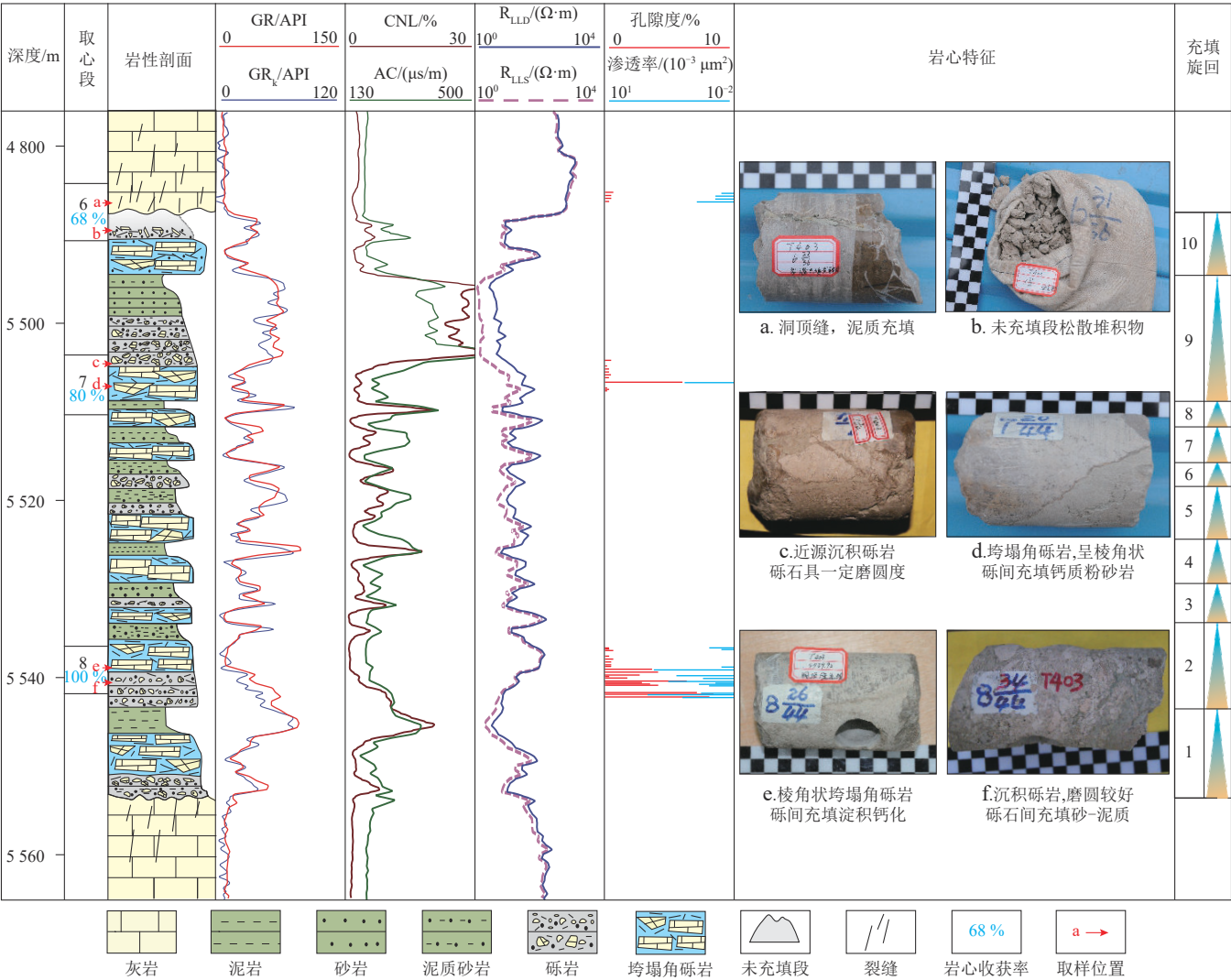


图5 塔河油田奥陶系地下河溶洞多旋回垮塌-沉积充填组合特征

Fig. 5 Characteristics of polycyclic collapse-sedimentary filling assemblages in the Ordovician buried-river karst caves in the Tahe oilfield

组合依然可对比。图 7b 为塔河油田 T403 井区的 TK476 井—T403 井方向地下河溶洞充填结构,波阻抗反演属性剖面显示该地下河结构复杂,河道连续性差。钻井资料揭示,T403 井与 TK476 井分别钻遇该河道的 2 个厅堂洞,且 2 口井均在深度 5 510 m 和 5 516 m 钻遇厚度相当的垮塌角砾岩。该角砾岩与其上下的沉积砂泥岩组成了 2 套垮塌-沉积充填旋回组合。该组合在河道复杂的空间结构中仍然可以连续追踪(长达 1.6 km)。另外在 T403 井溶洞上部垮塌角砾岩之上发育一定的未充填空间。

3.4 不同类型充填组合平面展布

基于上述两种充填组合特征,分类统计了区内 98 口钻井的地下河溶洞充填组合,结果发现,54 口井发育垮塌-沉积充填组合,44 口井发育沉积旋回充填组

合。本文依据区内岩溶古地貌高差和古水系产状,将塔河地区奥陶系岩溶斜坡划分为上游和下游;上游地形平均坡度 2.9°,相对高差 30~80 m,地下河呈枝状展布,连续性较差,发育多旋回垮塌-沉积充填组合;下游地形平均坡度 1.5°,相对高差不足 20 m,地下河呈网状展布,连续性较好,发育多旋回沉积充填组合(图 8)。

综合分析表明,断裂和地貌对地下河溶洞的发育与充填组合具有明显的控制作用,地貌与潜水面之间落差产生的势能控制着地下水的区域流势,断裂走向影响了地下水的路径,使其在沿斜坡下流过程中优先沿断裂带方向流动,继而发生溶蚀、侵蚀形成沿断裂走向展布的地下河溶洞系统。在岩溶斜坡上游地区,地下水位与潜水面间的落差大,水流迅猛,搬运能力强,常常携带一些粗碎屑(砂砾岩)沉积于迂回曲折的

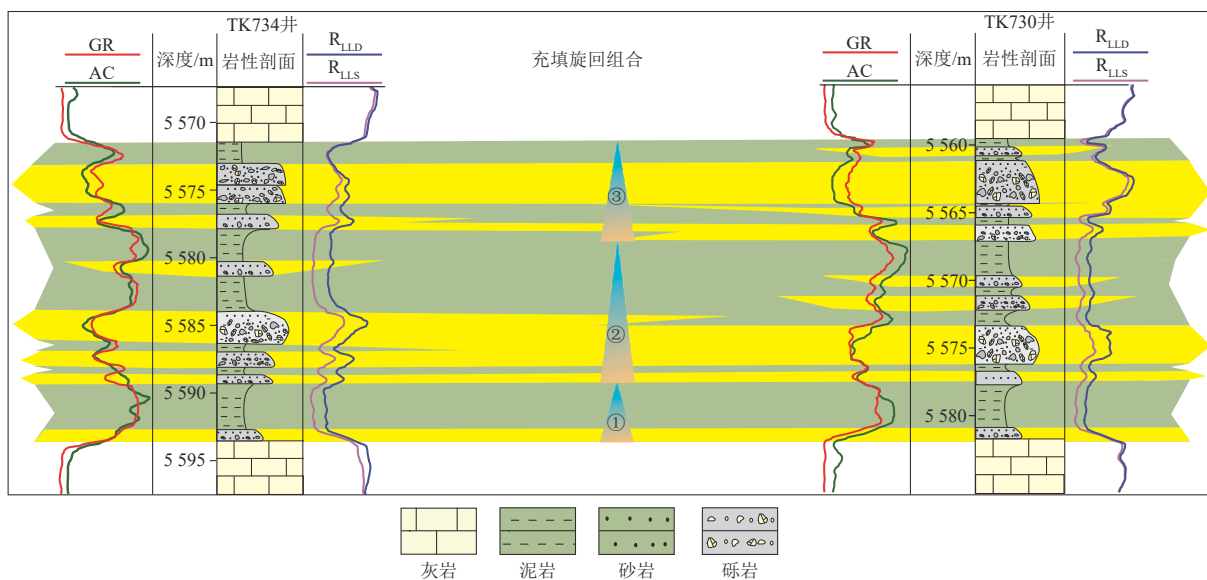


图6 塔河油田奥陶系TK734—TK730井剖面地下河溶洞充填旋回对比

Fig. 6 Comparison of filling cycles in the Ordovician buried-river karst caves between wells TK 734 and TK 730 in the Tahe oilfield

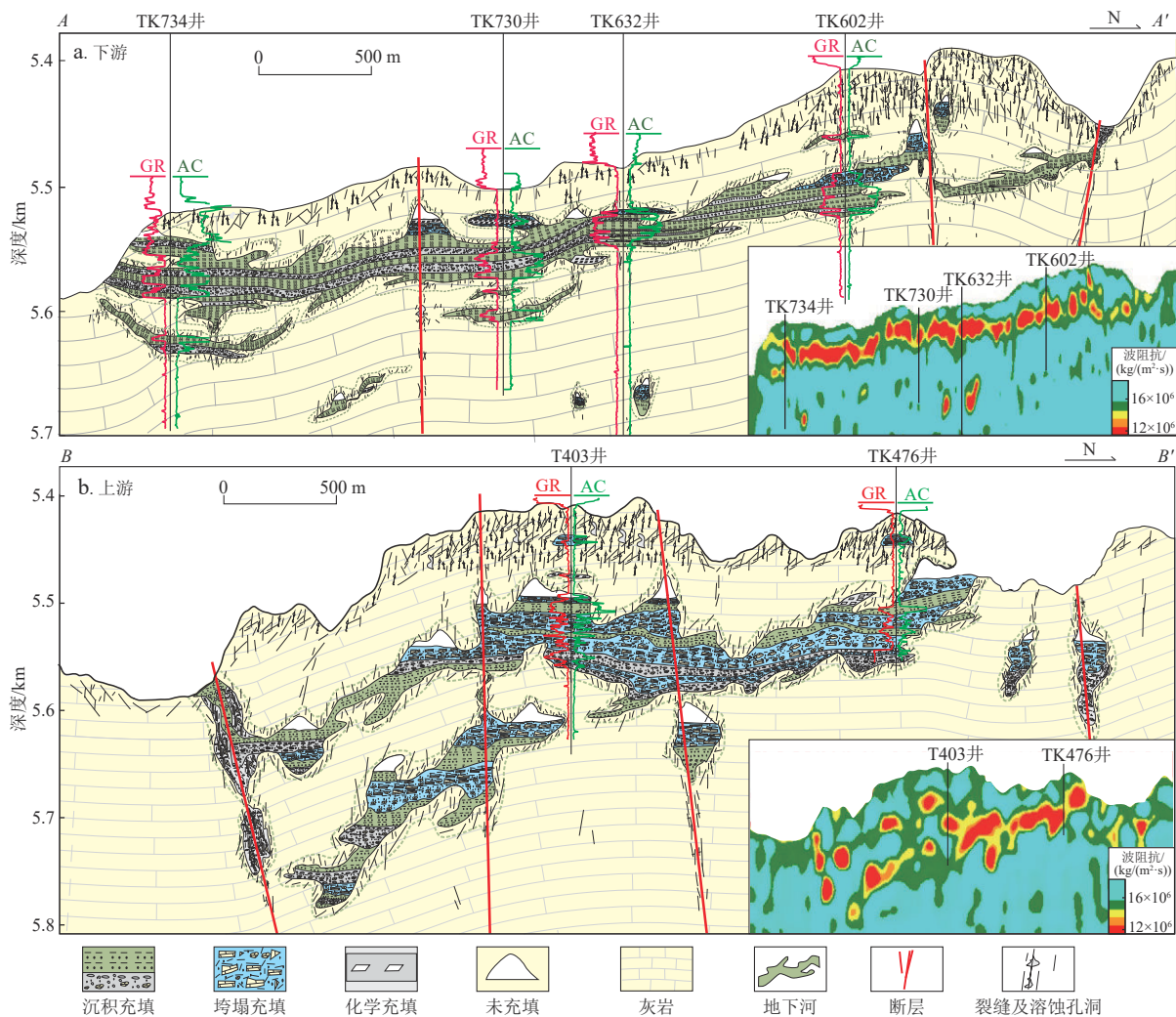


图7 塔河油田奥陶系岩溶斜坡上、下游地下河溶洞充填特征(剖面位置见图3a)

Fig. 7 Filling characteristics of buried-river karst caves in the upper and lower reaches of the Ordovician karst slope in the Tahe oilfield
(see Fig. 3a for the section location)

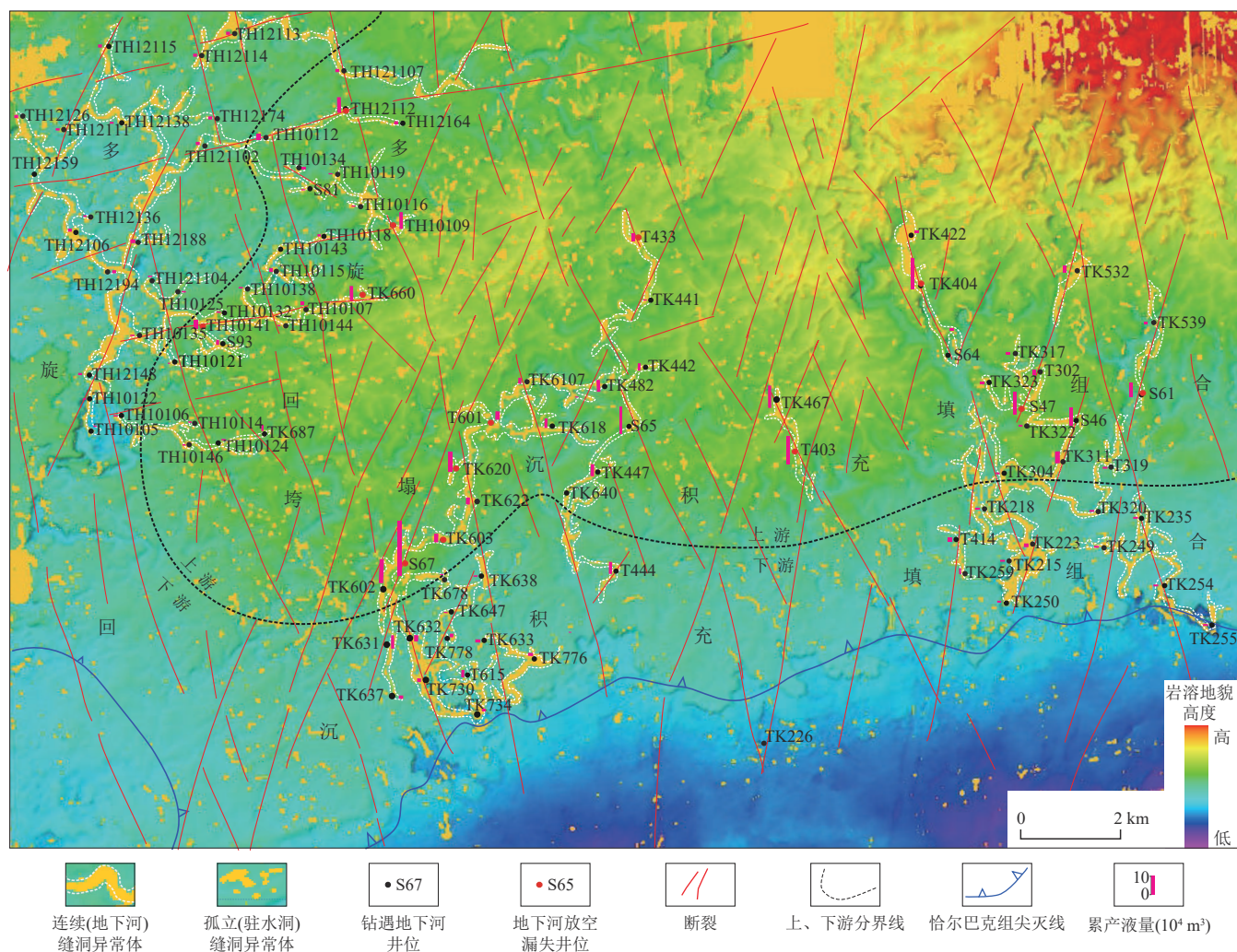


图8 塔河地区奥陶系地下河溶洞不同类型充填组合平面分布

Fig. 8 Planar distributions of various types of filling assemblages in the Ordovician buried-river karst caves in the Tahe area

地下河河道中;另外迅猛的流水对地下河溶洞的破坏能力也强,加之断裂的多期活动,极易导致溶洞的坍塌,从而形成垮塌角砾岩与沉积砂砾岩互层充填结构,如此垮塌—沉积—垮塌往复循环,即形成了地下河溶洞内的多期垮塌—沉积旋回充填组合。然而在岩溶斜坡下游平坦地区,地下水位与潜水面间落差小(局部地区重合),水流缓慢,搬运能力弱,通常携带一些细粒物质(粉砂—细砂岩)充填于地下河道之中;其对溶洞的破坏性小,即便由于断裂活动,在潜水面的托浮下,溶洞也不易发生垮塌。如此往复,地下河溶洞可持续稳定的发育多套沉积旋回充填组合。值得强调的是,溶洞的每一期垮塌,在其顶部均会出现未充填空间,未充填空间往往与垮塌角砾岩和构造活动伴生,尤其是在地貌落差大的岩溶斜坡上游发育的垮塌—沉积旋回充填组合的地下河溶洞顶部。如T403井地下河溶洞顶部钻遇1.76 m高度未充填段(图5),

该井累产液 $28.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,表明其地下空间的规模可能更大(图7b)。

4 地下河溶洞储集特征

4.1 地下河溶洞未充填空间分布

塔河油田地下河溶洞放空—漏失高产井的存在,已证实了未充填空间的巨大储集潜力(图8)。然而,限于地震分辨率的局限性,目前溶洞的未充填空间尚且无法预测。依据上述认识(地下河溶洞充填旋回井间可对比性)可开展未充填空间井间预测。本文基于地下河溶洞充填旋回组合规律,通过绘制地下河溶洞高度与沉积—垮塌充填厚度等值线图,预测地下河溶洞未充填空间分布及规模(高度、面积)。

塔河油田六区S67缝洞单元发育长达16.2 km地

下河溶洞系统(图9),共有13口井钻遇,3口井(S67, TK622, TK603)发生放空漏失;1条干流河(洞)中发育7个厅堂洞及6个支流洞;溶洞高度在4.2~45.1 m,充填程度在16.5%~100.0%,主要发育沉积、垮塌两类充填物。其中沉积充填物主要分布于干流洞和厅堂洞;垮塌充填物主要在厅堂洞中充填,且临近断层发育,距断层越近充填厚度最大。结合洞高、沉积、垮塌充填物厚度分布即可求取未充填空间分布及规模。如S67井钻遇地下河溶洞以垮塌-沉积旋回组合为主,钻遇未充填高度4.8 m,以未充填高度等值线圈定范围达0.468 km²。S67井累产液量达51.8×10⁴ m³,其中累产油40.9×10⁴ t,印证了地下未充填空间的存在。位于次级断裂上的TK622井钻遇18.6 m高度的垮塌-沉积旋回充填溶洞,发育1.6 m高度的未充填空间,圈定面积0.15 km²,其累产液量达18.6×10⁴ m³。然而位于厅堂洞部位的TK603井区,其地下河溶洞主要发育多旋回沉积充填组合,钻遇未充填高度0.6 m,圈定面积约0.03 km²,单井累产液量不到2×10⁴ m³。

由此可见,地下河溶洞未充填空间多发育于厅堂洞顶部,且与垮塌角砾相伴生,加之深大断裂的有效配置,可形成紧邻断裂带方向展布的规模油气储集空间。这也就是大部分钻遇地下河的高产井(累产液量>5×10⁴ t)均分布于断裂带附近的原因。

4.2 地下河溶洞充填物储集性能评价

塔河地区地下河溶洞充填程度高达89.9%,有必要对其充填物储集性能开展评价。然而限于资料的局限性,目前对于地下河溶洞充填物是否具备储集性能尚无定论。本文基于塔河油田钻井岩心、薄片及物性数据统计发现,塔河地区奥陶系岩溶地下河溶洞充填物物性差异极大、非均质性极强、单井产能差异巨大。岩心、薄片资料显示,地下河溶洞充填物钙质胶结严重,尽管其充填碎屑颗粒呈点接触(压实较弱),但其粒间方解石胶结使其粒间孔大大减小。如图10a所示, T615井同一块地下河砂岩充填物含油段与不含油段薄片观察显示,不含油段粒间方解石胶结程度强(红色为方解石、黑色为原油),测试孔隙度仅5.6%,而含油段粒间方解石胶结程度弱,测试孔隙度达21.8%。再如T615井深度5 557.52 m地下河砂砾岩充填物,砾石成分为奥陶系砂屑灰岩,砾间充填石英砂岩,粒间同样被方解石(染色薄片红色部分)胶结严重,测试孔隙度仅4.2%,且不含油(图10b)。另外,地下河溶洞垮塌角砾岩砾间也多被泥质与淀积方解石充填,导致角砾间空隙减小(孔隙度<1%),其中淀积方解石厚度可达2~43 cm,呈棕红色,晶粒粗大,孔隙不发育(图10c)。

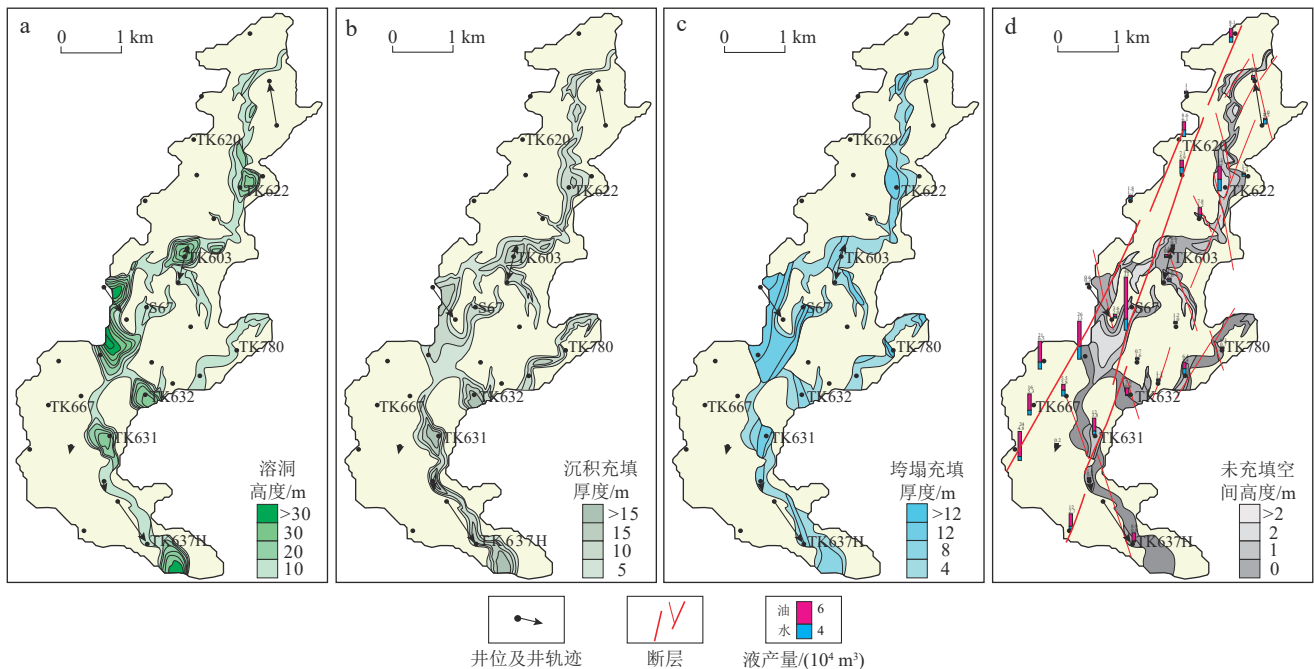


图9 塔河油田S67缝洞单元奥陶系地下河溶洞充填特征及开发现状

Fig. 9 Filling characteristics and oil/gas exploitation status-quo of the Ordovician buried-river karst caves in the fractured-vuggy unit S67, Tahe oilfield

a. 地下河溶洞等高线; b. 沉积充填等厚线; c. 垮塌充填等厚线; d. 未充填空间等高线

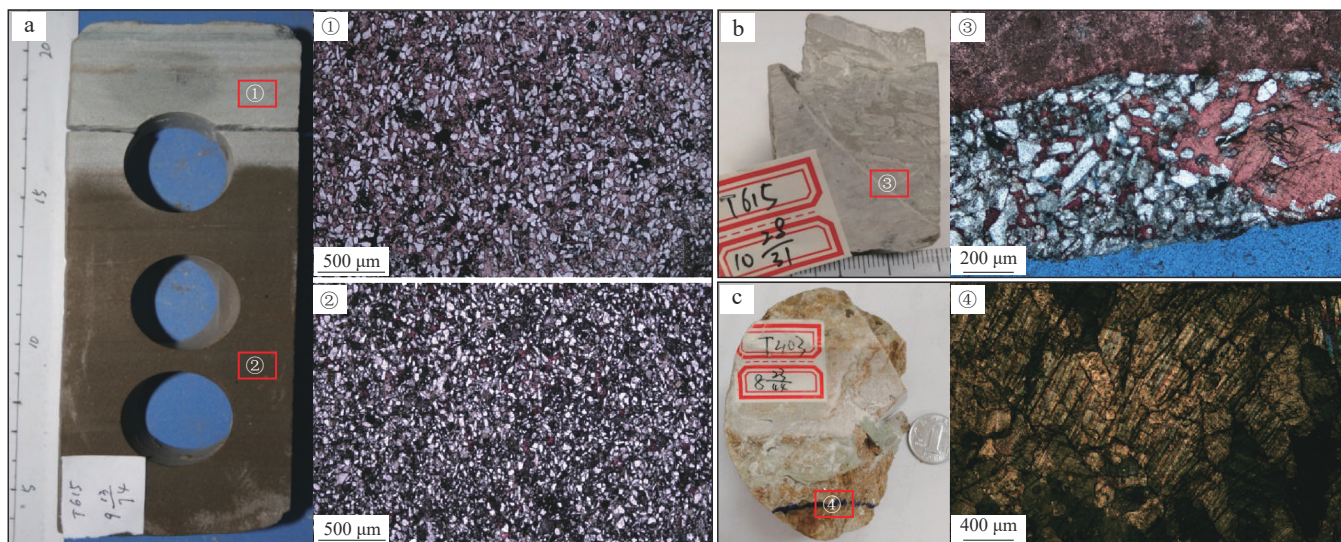


图10 塔河油田奥陶系地下河溶洞不同类型充填物孔隙发育特征

Fig. 10 Pore characteristics of various filling types in the Ordovician buried-river karst caves in the Tahe oilfield

a. T615井,埋深5 547.23 ~ 5547.48 m,岩心照片,地下河溶洞石英砂岩充填物,其中①为不含油段,石英颗粒呈点接触,钙质胶结强(茜素红染色薄片显微照片,正交光),测试孔隙度5.6%,②为含油段,石英颗粒呈点接触,钙质胶结弱(茜素红染色薄片显微照片,正交光),测试孔隙度23.4%; b. T615井,埋深5 557.52 m,岩心照片,地下河溶洞沉积砾岩,砾石为奥陶系灰岩,砾间充填石英砂岩,石英颗粒呈点-线接触,钙质胶结强(③为对应位置茜素红染色铸体薄片显微照片,正交光),测试孔隙度4.2%; c. T403井,埋深5 539.21 m,岩心照片,地下河溶洞垮塌角砾间岩,砾间充填泥质与淀积钙化(方解石),方解石晶粒粗大,测试孔隙度0.6%(④为对应位置普通薄片显微照片,正交光)

塔河地区11口井的地下河充填物全直径样品物性测试数据显示(图11),仅T615井的石英砂岩孔隙度可达10%以上,且孔隙度与渗透率具良好线性关系;而其他井砂砾岩孔隙度主要分布在4%以下(个别样品超过5%),渗透率均不超过 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,且孔隙度与渗透率相关性差;角砾岩充填物孔隙度均在3%以下;淀积钙化充填物孔隙度不到1%。因此,地下河溶洞充填物储层物性差异较大、非均质性极强,T615井高孔隙度油浸细砂岩的溶洞充填物不能代表地下河溶洞充填物储集性能,早期基于T615井物性数据认为地下河溶洞沉积充填物储集物性好(孔隙度可达

23.4%)的结论^[23]值得商榷。

综合分析认为,复杂的地下河溶洞结构和地下封闭的碳酸钙过饱和环境,导致其充填物粒间泥质和钙质胶结严重,原始粒间孔缩减,进而导致极强的储层非均质性。因此,对于地下河溶洞充填物储集性能的评价,应该结合地下河空间结构、水流动力及溶洞充填组合类型差异分类评价。本文所提出的岩溶斜坡上、下游地下河溶洞充填组合差异的认识,即可为其分类评价提供借鉴。

5 结论

1) 塔河油田奥陶系迂回曲折的地下河溶洞结构和地下河较强的搬运能力,导致地下河溶洞的超高充填性,充填率高达89.9%,以沉积砂泥岩、垮塌角砾岩充填为主,发育多旋回沉积充填和多旋回垮塌-沉积充填2种组合类型。

2) 受潜水面升降、构造活动及断裂多期活化的影响,地下河溶洞充填组合具有旋回性,且各旋回组合井间可连续追踪对比,据此可进行井间充填物与未充填空间分布预测。

3) 岩溶斜坡上、下游地貌落差的差异,导致地下河溶洞充填组合差异;上游地貌起伏大,水流动力强,发育多旋回垮塌-沉积充填组合,未充填空间发育;下

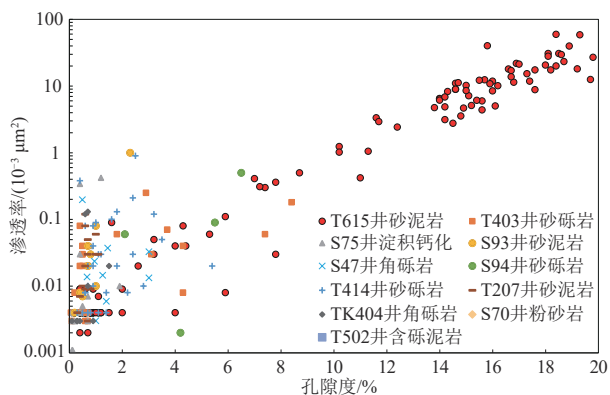


图11 塔河油田奥陶系地下河溶洞不同类型充填物孔-渗特征

Fig. 11 Porosity vs. permeability of various filling types in the Ordovician buried-river karst caves in the Tahe oilfield

游地貌平坦、水流动力弱,发育多旋回沉积充填组合,未充填空间不发育。

4) 封闭的地下碳酸钙过饱和环境,导致地下河溶洞充填物颗粒易被淀积方解石胶结,加之泥质充填,导致其储集物性差异悬殊,非均质性极强;未充填空间将是地下河溶洞储层油气挖潜的重点靶区。

参 考 文 献

- [1] 袁道先,朱德浩,翁金桃,等. 中国岩溶学[M]. 北京:地质出版社,1994: 23-52.
YUAN Daoxian, ZHU Dehao, WENG Jintao, et al. Karst in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 23-52.
- [2] FORD D C, WILLIAMS P W. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2007: 1-5.
- [3] LOUCKS R G. Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795-1834.
- [4] ESTEBAN M, KLAPPA C F. Subaerial exposure environment [M]//SCHOLLE P A, BEBOUT D G, MOORE C H. Carbonate Depositional Environments. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1983: 1-54.
- [5] 何宇彬. 试论均匀状厚层灰岩水动力剖面及实际意义[J]. 中国岩溶, 1991, 10(1): 4-15.
HE Yubin. Hydrodynamic section of thick homogeneous limestone and its practical significance [J]. Carsologica Sinica, 1991, 10(1): 4-15.
- [6] 白国平. 世界碳酸盐岩大油气田分布特征[J]. 古地理学报, 2006, 8(2): 241-250.
BAI Guoping. Distribution patterns of giant carbonate fields in the world[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(2): 241-250.
- [7] LØNØY B, PENNOS C, TVERANGER J, et al. Delimiting morphological and volumetric elements of cave surveys as analogues for paleokarst reservoir modelling-A case study from the Maaras cave system, northern Greece [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 129: 105091.
- [8] 钟建华,毛鑫,李勇,等. 塔北硫磺沟奥陶系含油古溶洞的发现及意义[J]. 中国科学:地球科学, 2012, 42(11): 1660-1680.
ZHONG Jianhua, MAO Cui, LI Yong, et al. Discovery of the ancient Ordovician oil-bearing karst cave in Liuhuanggou, North Tarim Basin, and its significance [J]. Science China Earth Sciences, 2012, 42(11): 1660-1680.
- [9] 淡永,梁彬,易连兴,等. 现代岩溶地下河成因研究对塔北奥陶系大型岩溶缝洞体储层勘探的启示——以桂林寨底岩溶地下河系统的剖析为例[J]. 海相油气地质, 2015, 20(2): 1-7.
DAN Yong, LIANG Bin, YI Lianxing, et al. Revelation of research of modern karst subterranean streams to exploration of paleokarst fractured-caved reservoirs: An example of Zhaidi underground river in Guilin applied in Ordovician fractured-caved reservoirs in northern Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2015, 20(2): 1-7.
- [10] 李阳,范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 101-106.
LI Yang, FAN Zhihui. Developmental pattern and distribution rule of the fracture-cavity system of Ordovician carbonate reservoirs in the Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 101-106.
- [11] 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.
- [12] 何治亮,赵向原,张文彪,等. 深层-超深层碳酸盐岩储层精细地质建模技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 16-33.
HE Zhiliang, ZHAO Xiangyuan, ZHANG Wenbiao, et al. Progress and direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 16-33.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 李源,鲁新便,王莹莹,等. 塔河油田海西早期岩溶水文地貌特征及其演化[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 674-683.
LI Yuan, LU Xinbian, WANG Yingying, et al. Hydrogeomorphologic characterization and evolution of the Early Hercynian karstification in Tahe Oilfield, the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 674-683.
- [16] 徐微,蔡忠贤,贾振远,等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏溶洞充填物特征[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 287-293.
XU Wei, CAI Zhongxian, JIA Zhenyuan, et al. The study on Ordovician carbonate reservoir karst cavern fillings characterization in Tahe Oilfield [J]. Geoscience, 2010, 24(2): 287-293.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 吕心瑞, 孙建芳, 郭兴威, 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.
- [22] 张三, 金强, 胡明毅, 等. 塔河地区奥陶系不同地貌岩溶带结构组合差异与油气富集[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(5): 962-973.
- ZHANG San, JIN Qiang, HU Mingyi, et al. Differential structure of Ordovician karst zone and hydrocarbon enrichment in paleogeomorphic units in Tahe area, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(5): 962-973.
- [23] 张文博, 邵珠福, 张英敏, 等. 塔河油田奥陶系古溶洞充填砂岩发育特征及成因——以塔河七区T615井为例[J]. 海相油气地质, 2014, 19(1): 51-59.
- ZHANG Wenbo, SHAO Zhufu, ZHANG Yingmin, et al. Development characteristics and genesis of filling sandstone in Ordovician paleocaves in Tahe Oil Field, Tarim Basin: A typical case of filling sandstone in Well T615 in Tahe Block 7 [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2014, 19(1): 51-59.
- [24] 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.
- [25] 唐磊, 王建峰, 曹敬华, 等. 塔里木盆地顺北地区超深断溶体油藏地质工程一体化模式探索[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 329-339.
- TANG Lei, WANG Jianfeng, CAO Jinghua, et al. Geology-engineering integration mode of ultra-deep fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 329-339.
- [26] 张三, 金强, 孙建芳, 等. 塔河地区奥陶系岩溶斜坡峰丘高地的形成及油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 303-313.
- ZHANG San, JIN Qiang, SUN Jianfang, et al. Formation of hoodoo-upland on Ordovician karst slope and its significance in petroleum geology in Tahe area, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 303-313.
- [27] 姜应兵, 李兴娟. 塔里木盆地塔河油田TH12402井区中下奥陶统古岩溶洞穴发育模式[J]. 古地理学报, 2021, 23(4): 824-836.
- JIANG Yingbing, LI Xingjuan. Development model of paleokarst caves in the Middle-Lower Ordovician of TH12402 Well area in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2021, 23(4): 824-836.
- [28] 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.
- [29] 张三, 金强, 程付启, 等. 古岩溶流域内地表河与地下河成因联系与储层特征——以塔河油田奥陶系岩溶为例[J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 900-910.
- ZHANG San, JIN Qiang, CHENG Fuqi, et al. Genesis relation of surface and underground rivers and reservoir characteristics in paleokarst drainage systems: A case study of Ordovician karst in the Tahe Oilfield [J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(6): 900-910.
- [30] 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(6): 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.
- [31] 刘晶晶, 毛毳, 魏荷花, 等. 塔河油田奥陶系缝洞充填序列及其测井响应[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(1): 46-52.
- LIU Jingjing, MAO Cui, WEI Hehua, et al. Ordovician fracture-cavity filling sequence and its logging responses in Tahe Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(1): 46-52.
- [32] 彭军, 夏梦, 曹飞, 等. 塔里木盆地顺北一区奥陶系鹰山组与一间房组沉积特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 17-30.
- PENG Jun, XIA Meng, CAO Fei, et al. Sedimentary characteristics of Ordovician Yingshan Formation and Yijianfang Formation in Shunbei-1 area, Tarim Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(2): 17-30.

(编辑 张亚雄)