

塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞结构研究

金强, 田飞

(中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580)

摘要:塔北隆起奥陶系碳酸盐岩经过上亿年的岩溶作用形成了纵横交错的溶洞和裂缝,成为复杂的储集体,位于该隆起中心部位的塔河油田就是在这样的储集体内发现了上十亿吨的石油储量。针对缝洞成因及其空间展布问题,通过对现代岩溶和古岩溶的地质考察,精细分析研究区地质、测井和地震等资料,提出表层岩溶带、渗流岩溶带和径流岩溶带划分方案,并且定义出每个岩溶带缝洞成因类型及其发育特征,建立缝洞结构模式;同时分析不同岩溶带缝洞充填物性质,为岩溶型碳酸盐岩储集空间描述和预测提供了理论依据。

关键词:碳酸盐岩;岩溶作用分带;缝洞结构;成因模式;塔河油田

中图分类号:TE 122.2 **文献标志码:**A

Investigation of fracture-cave constructions of karsted carbonate reservoirs of Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin

JIN Qiang, TIAN Fei

(School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The fracture-cave reservoir in Ordovician carbonates was formed by karstification in middle Paleozoic in Tahe Oilfield. It is one of the most complicated reservoirs in the world. Investigation of modern and ancient karst and comprehensive interpretation on geological, well-logging and seismic data reveal that there are three zones (i. e. epikarst zone, vadose karst zone, and runoff karst zone) in the fracture-cave systems. Fracture-cave structure models were established for each zone to characterize the features and mechanism of fracture and cave in Ordovician carbonates in Tahe Oilfield. The filling materials in the different zones of fracture-cave system were discussed. In conclusion, the study may help to describe and predict fracture-cave reservoir in karsted carbonates.

Key words: carbonate; karst zone; fracture-cave construction; genetic model; Tahe Oilfield

塔河油田自1984年发现以来,一直是中国缝洞型碳酸盐岩储层研究的前沿^[1-2]。人们把现代岩溶作为了解古岩溶的钥匙,开展了大规模研究^[3-6],对不同地表单元的河流、落水洞、地下河,以及地下河沉积和顶板的垮塌等进行了多种描述和成因解释^[7-11]。美国肯塔基州 Mammoth 岩溶地质考察表明^[12],地表水沿碳酸盐岩裂缝或断层向下渗流和溶蚀,且形成落水洞,到达潜水面附近水流沿岩层或裂缝流动,顺层洞穴或裂缝不断加宽,形成不同规模的地下河道;由于潜水面升降和不渗透泥质隔层的影响,形成了复杂的溶洞系统^[13]。储层的出露区常成

为地质考察的热点区,有助于正确认识地下储层。例如美国同行对中陆盆地下奥陶统碳酸盐岩露头考察,揭示了溶洞、裂隙的成因和空间组合关系,建立了缝洞连通关系及其充填的地质模型,有效地指导了地下储层储集空间的评价和预测^[14-16]。塔里木盆地西北缘出露的奥陶系古岩溶与塔河油田储层经历了相似的岩溶作用,古岩溶考察发现了垂直洞穴、水平洞穴和漏斗状洞穴^[17],认为塔河油田地下存在单层式和多层式洞穴^[18],提出塔河油田存在地下河系统和溶蚀孔缝等储集空间^[2]。塔里木盆地奥陶纪接受了广泛的浅海相碳酸盐岩沉积,到了早石炭

世末期由于抬升及剥蚀作用^[19],位于塔北隆起中部的塔河油田中下奥陶统碳酸盐岩经历了完整的岩溶发育阶段,形成了含油面积达 637 km² 的岩溶储层^[20-21]。近 20 年来,随着物探和钻井技术的不断提高,针对地震剖面上的“串珠状”反射区域进行钻井,常在洞高或洞径大于 10 m 的溶洞处获得高产石油,但是对溶洞的空间展布、连通性和充填特征始终认识不清,严重制约了勘探开发工作。因此,笔者对塔河油田主力区块(4、6 和 7 区)的岩溶储层进行全面解剖,查明岩溶发育的分带性,提出表层岩溶带、渗流岩溶带和径流岩溶带内缝洞分布及其结构模式,并且对其充填特征进行分析,为认识缝洞储层的储集空间及地质建模打下良好基础。

1 塔河油田岩溶储层缝洞结构模式

塔河油田中下奥陶统形成于开阔局限海台地环境,主要为泥晶和微晶灰岩,由于受到多期构造运动、岩溶作用和成岩作用,碳酸盐岩中形成了非均质性极强的裂缝和溶洞系统。缝洞及其充填物的研究表明,岩溶作用主要发育在海西期,其中海西早期的岩溶作用更为广泛而强烈,大部分钻井均钻遇此阶段形成的溶洞^[21]。岩溶缝洞多发育在风化面以下 200 m 范围内,常常分布在岩溶高地边缘或部分岩溶斜坡区,多期构造线的交汇处及褶皱的轴部等。

经过对塔河油田缝洞储集体的成因研究,结合露头区古岩溶地质考察和前人成果^[22],发现塔河油田 4、6 和 7 区岩溶作用发育非常完整,可以分辨出表层岩溶带、渗流岩溶带和径流岩溶带(图 1)。

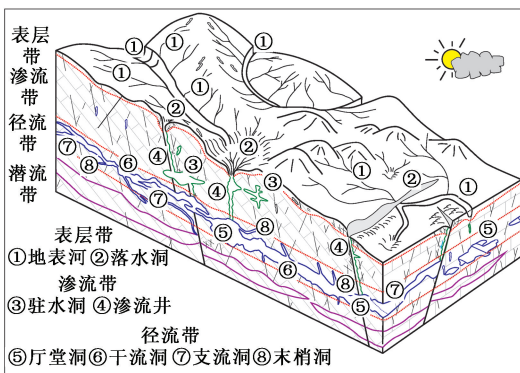


图 1 塔河油田岩溶分带及其缝洞发育结构模式

Fig. 1 Karst zone and fracture-cavity construction model in Tahe Oilfield

1.1 表层岩溶带的结构特征

表层岩溶带主要由地表河、落水洞、断层及裂缝、风化残积物和奥陶系裸露岩石所组成。表层岩溶带之下为渗流岩溶带,大气降水是这两个带形成

的主要原因。表层带的水流为顺坡流动,渗流带水流基本上是垂向流动,水流运动的转折处就是两个带的分界。表层岩溶带的深度不大,但有一定的起伏,地表河下切最深处、落水洞喇叭口最小处、裸露原岩受风化淋滤作用最大深度等可以定义为表层岩溶带的底界。该带的顶界往往是地表河、落水洞充填物的顶,风化残积物的顶,还有裸露原岩的表面,它们与石炭系巴楚组沉积物呈不整合接触。定义表层带的顶底界面为在塔河油田识别表层岩溶带打下基础。

表层岩溶带沿不整合面分布,储集空间发育,是岩溶型储层重要的含油带。根据对现代岩溶和古岩溶的考察,以及塔河油田的井下资料解释表明,地表河和落水洞被河流沉积物和垮塌角砾岩充填,其颗粒间孔隙以及断层、裂缝是主要的储集空间,裸露原岩内到处发育的缝洞复合体也是重要的储集空间。

地表河有的规模很大,宽度为 0.5 ~ 1.5 km、长度可达数十公里,河道下切深度为 10 ~ 20 m(类似于图 1 中的①处)。塔河油田 4 区的 TK422 井 5.5395 ~ 5.5539 km 为一典型的地表河及其充填物柱状剖面,推测该井钻遇了一条地表主干河,河道下切深度约为 15 m;通过测井解释,发现此河道被 5 个期次的河流沉积物所充填,充填物以中-粗砂岩为主^[23],其中还夹搬运角砾岩,砂砾岩孔隙度在 15% ~ 22%,为较好的储层(图 2(a))。

TK475 井 5.4965 ~ 5.5168 km 深度段为落水洞典型柱状剖面(图 2(b))。该井位于一条地表河终点(约为图 1 中的②处),由 4 期旋回的充填物将落水洞充填,充填物厚度约 20 m,估算该落水洞平面直径大于 40 m。落水洞充填物的物性很好,孔隙度在 10% ~ 18%,渗透率为 $(200 \sim 1000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

1.2 渗流岩溶带的结构特征

渗流岩溶带的缝洞主要由渗流井和驻水洞以及缝洞复合体组成。其中渗流井是连通表层岩溶带与径流岩溶带的水流通道,一般沿断层或裂缝发育,也是驻水洞的水流通道;驻水洞如果靠近表层带则为高位驻水洞,如果靠近径流带则为低位驻水洞,驻水洞的形态、大小不一(图 1)。渗流井废弃后常常被表层碎屑物或垮塌角砾充填,而驻水洞如果不受垮塌影响,充填程度一般比较低,是非常好的油气成藏和产出空间,但是由于规模大小不一,石油储量和产能有很大变化。

TK714 井的 5.5665 ~ 5.5780 km 是一典型的驻水洞(对应于图 1 的③处),洞穴顶部有 0.9 m 的末

充填段,有34%的空间被垮塌角砾充填(图3(a)),角砾间孔隙发育,可能是埋藏期间没有受到压实等成岩作用的影响。渗流井多数为竖直产状钻井,不

易钻遇,但是TK454井的5.5688~5.5733 km深度段应当是渗流井(图3(b)),可见充填程度比较高,含油性比较差。

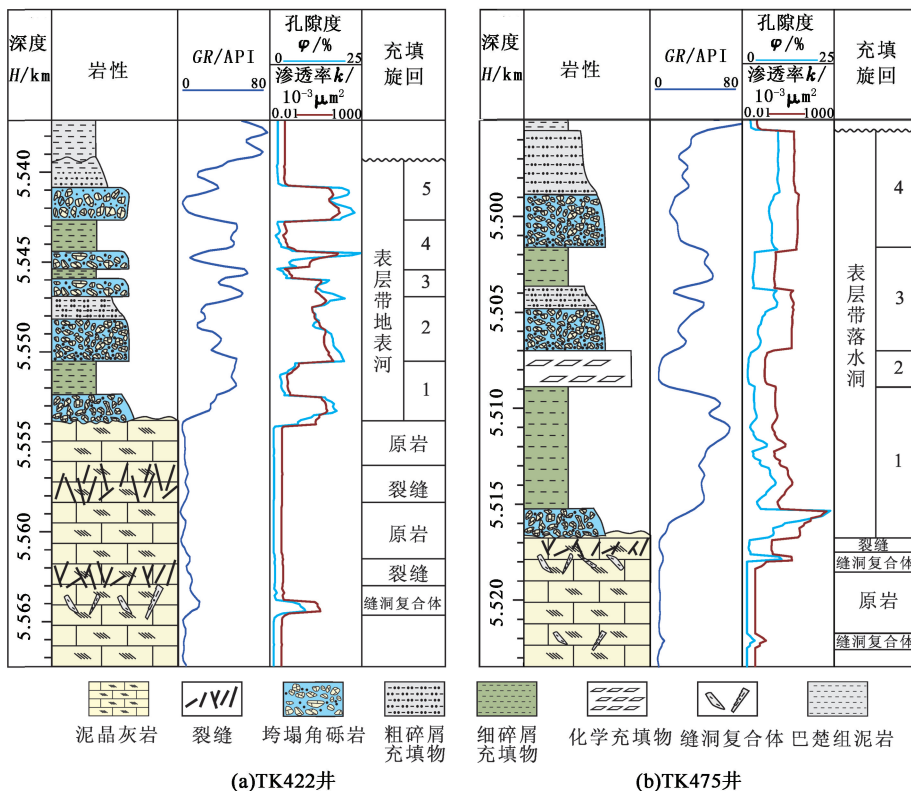


图2 表层岩溶带地表河(a)和落水洞(b)柱状剖面

Fig.2 Columnar sections of surface river (a) and sinkhole (b) in epikarst zone

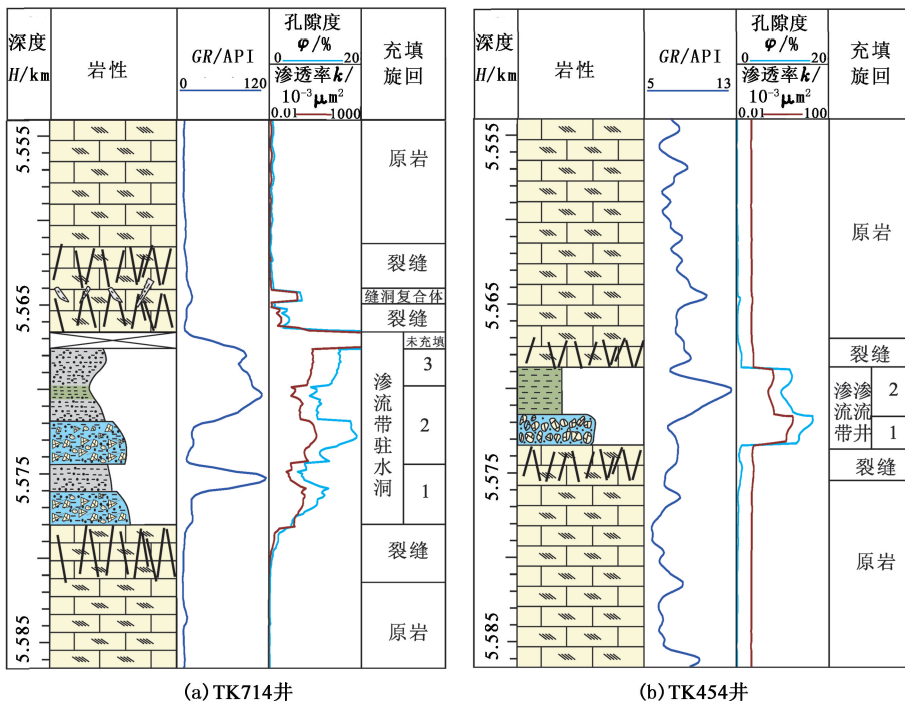


图3 渗流岩溶带驻水洞柱状剖面(柱状剖面图例见图2)

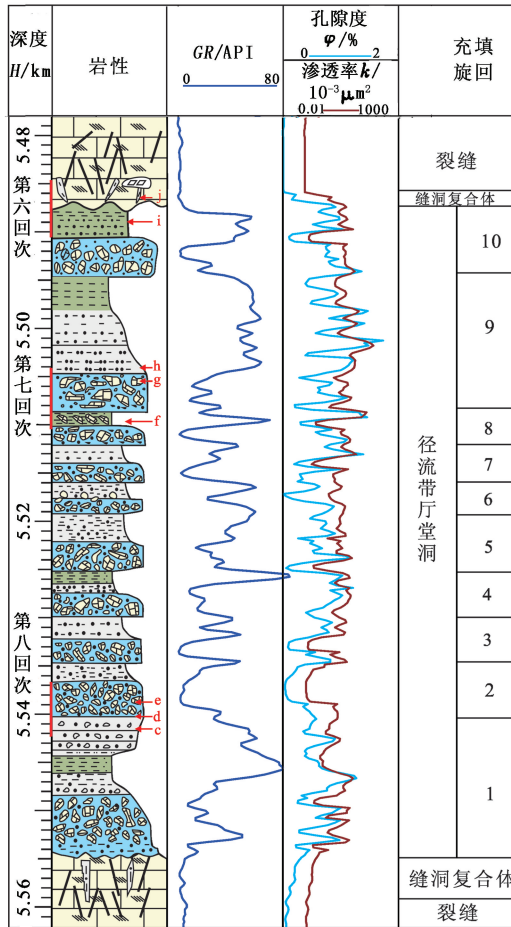
Fig.3 Columnar sections of caves in vadose karst zone (legend see Fig.2)

1.3 径流岩溶带结构特征

径流带内水流以横向流动为主,与渗流带截然不同,潜水面是径流带的底界。地下河溶洞是径流带缝洞的主要类型,在塔河油田根据地下河溶洞相互连通关系和规模,可以划分出干流洞、支流洞和末梢洞(见图1的径流岩溶带),干流洞高度一般为5~10 m,支流洞高度小于5 m,末梢洞高度小于1 m。在断层附近和地表落水洞下方可以形成规模巨大的厅堂洞(见图1的⑤处),除此之外,断层和裂隙也十分发育。径流带溶洞形成了塔河油田重要石油储集空间,它们发育在不整合面之下几十米到200 m

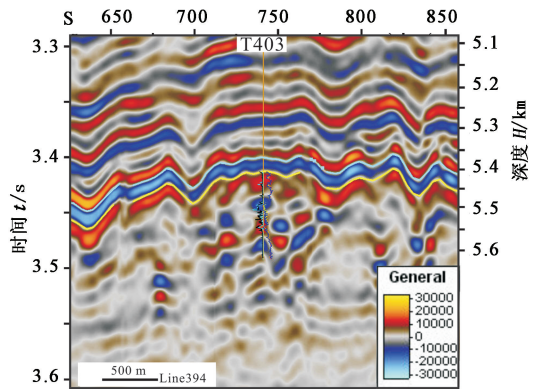
范围内,大都具有比较强烈充填作用:地下河沉积碎屑充填,垮塌角砾充填和碳酸钙化学充填。充填率较低的厅堂洞、干流洞、支流洞等富含石油,也是产量高的油藏。如S48井区的TK411井充填率为89%,原油产量高达210 t/d;而T615井区充填程度很高(>97%),原油产量较低(2 t/d,T615井)。因此,溶洞充填类型和充填程度需要加强研究。

塔河油田4区的T403井5.4875~5.5545 km深度段是一高度达到67 m的厅堂洞,该厅堂洞充填程度比较高,几乎被10个旋回河流碎屑沉积物和角砾岩全部充填满(图4)。



(a) T403井径流带厅堂洞柱状剖面

注:岩心照片解释为(c)次磨圆状搬运角砾岩;(d)粗碎屑充填物夹角砾岩;(e)次磨圆状搬运角砾岩夹灰绿色细碎屑充填物;(f)棱角状垮塌角砾岩夹细碎屑充填物;(g)次棱角状角砾岩;(h)粗碎屑充填物;(i)浅绿色细碎屑充填物;(j)缝洞复合体充填灰绿色碎屑充填物。



(b) 过T403井地震剖面

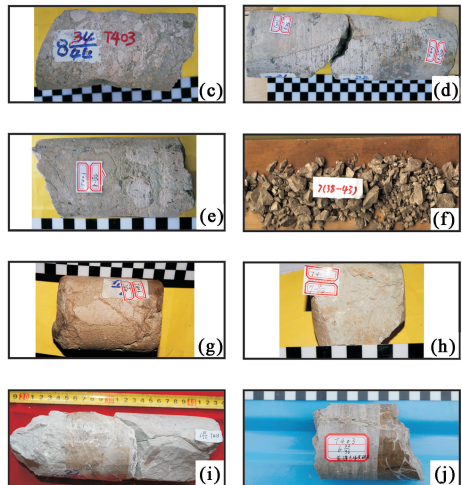


图4 T403井厅堂洞特征

Fig.4 Characterization of chamber cave in well T403

厅堂洞和干流洞在地震剖面上有良好显示,容易识别,末梢洞(特别是高度小于0.5 m的末梢洞)识别比较困难。TK411井5.4662~5.4745 km为一干流洞,其中发育3期沉积碎屑充填、2次垮塌角砾充填,顶部有0.9 m未充填部分(图5(a))。垮塌角

砾具有良好物性,所以该干流洞原油产量高。TK421井在5.562~5.570 km发育3个末梢洞,其中有方解石化学充填物和垮塌角砾充填物,末梢洞外裂缝密集发育(图5(b))。

除上述介绍的3个岩溶带缝洞成因类型和结构

以外,研究区不同深度的碳酸盐岩均发育大量缝洞复合体(图 6),即沿构造裂缝溶蚀形成长条形溶洞,

它们分布疏密不均,可能是塔河油田岩溶型碳酸盐岩储层重要的渗流通道,值得深入研究。

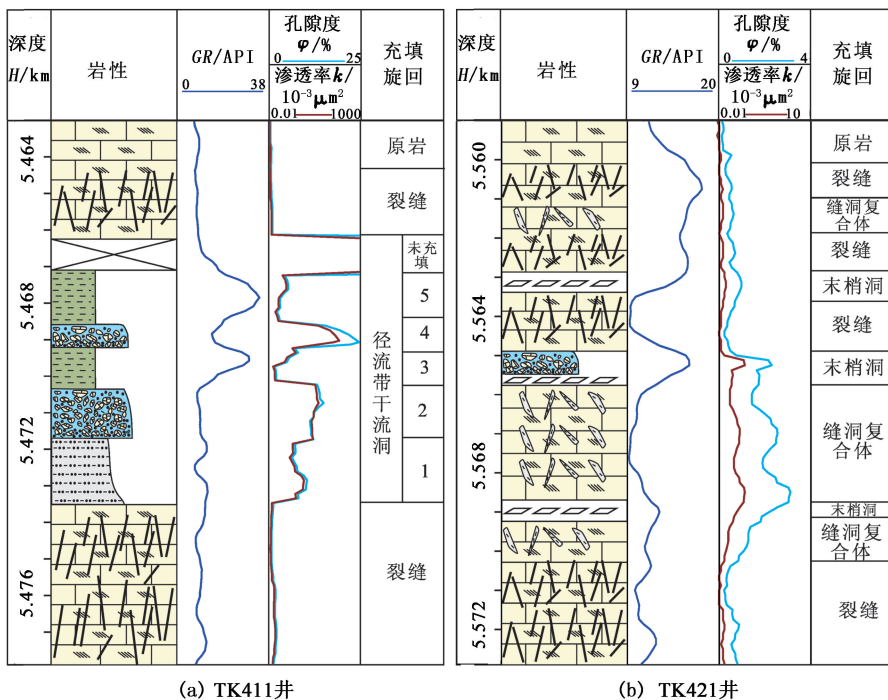


图 5 径流岩溶带干流洞和未梢洞柱状剖面图(柱状剖面图例见图 2)

Fig. 5 Columnar sections of main channel and tip channel in runoff karst zone (legend see Fig. 2)

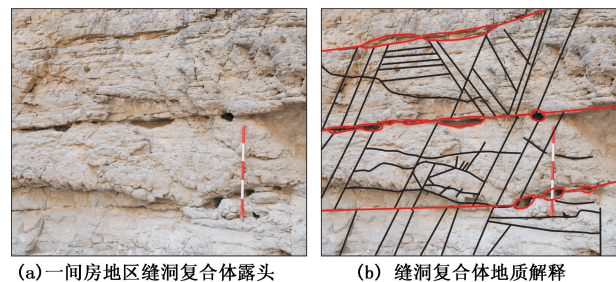


图 6 塔里木盆地西北缘奥陶系露头缝洞复合体
Fig. 6 Fracture-cave complex in Ordovician outcrop, northwestern margin of Tarim Basin

2 潜水面的变化对径流带洞穴充填的控制作用

径流带是重要的石油储集空间,其发育演化及充填作用受多方面因素控制,限于篇幅,本文只介绍潜水面升降对其充填作用的控制。

潜水面以下一般为潜流岩溶带,其中水流速度缓慢,水动力很弱,只有细粒的且常是暗色碎屑充填物沉积,已沉积的碎屑物质受到胶结作用。潜水面在塔北隆起岩溶作用期往往是向盆地方向倾斜的,当暴发洪水时潜水面会上升,导致径流带部分或全

部成为潜流带,这样在径流带形成的地下河沉积物中出现潜水面以下的沉积充填物,同时导致在厅堂洞-干流洞中出现粗碎屑-细碎屑的沉积旋回,这种旋回式的沉积充填反映了潜水面变化控制地下溶洞沉积充填作用,也是认识和预测地下河系统充填物分布规律的基本思路。图 7 反映的是 T615 井区径流带识别出的潜水面及其对沉积充填物的控制作用;该剖面的 3 口井(TK632、TK730、TK734)鉴别出潜水面位于 5.578 km,北部的 TK602 鉴别出潜水面位于 5.604 km,这两个潜水面控制径流带碎屑充填以两个大的由粗到细沉积旋回组成,局部夹有垮塌角砾岩。

塔河油田岩溶型碳酸盐岩的表层岩溶带、渗流岩溶带和径流岩溶带是重要的石油聚集场所,本文提出的缝洞成因类型及其结构逐步被塔河油田开发部门所应用,取得了良好的增储上产效果。潜流岩溶带细粒沉积物充填作用强,碳酸盐胶结也比较强烈,所以储集性能比较差,目前笔者及其团队正在对其进行研究,进而完善 4 个岩溶带的缝洞结构模式。

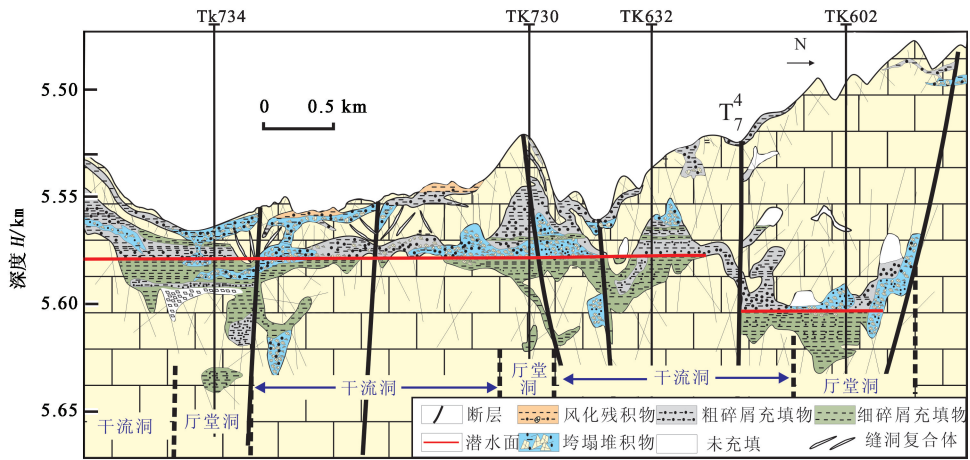


图7 T615井区缝洞结构和充填模式

Fig. 7 Construction model and fracture-cave filling characters in well T615 area

3 结论

(1)塔里木盆地塔北隆起奥陶系经历了长期的岩溶地质作用,形成了复杂的岩溶系统,按照岩溶体系中水流运动方式,可以将其划分为表层岩溶带(水流横向沿地表流动)、渗流岩溶带(水流基本上垂向流动)、径流岩溶带(水流横向往潜流带流动)和潜流岩溶带(水流沿潜水面倾斜方向流动)。

(2)塔河油田表层岩溶带包含地表河、落水洞、断层及裂隙等缝洞结构,虽然地表河和落水洞往往被水流沉积物充填,但是这些充填物、风化残积物和裸露原岩受风化淋滤产生大量缝洞复合体,发育大量粒间孔隙,是重要的石油储集和产出层段。

(3)渗流岩溶带发育渗流井和驻水洞缝洞结构,驻水洞往往充填程度低,是良好储集溶洞;径流带地下河溶洞很发育,包括厅堂洞、干流洞、支流洞和末梢洞,尽管有大量地下河沉积物和垮塌角砾岩充填,仍然是塔河油田重要的储集空间,石油产量很高;潜流岩溶带石油产量较低,其缝洞结构和充填作用需要进一步研究。

致谢 感谢李阳和袁向春两位项目负责人及课题跟踪专家的批评指导,感谢钟建华、邹胜章和徐守余教授等课题研究人员共同努力,感谢中国石化西北石油局在资料提供等方面的大力支持。

参考文献:

[1] 张抗. 塔河油田的发现及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 120-125.
ZHANG Kang. The discovery of Tahe Oilfield and its geological implication [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 101-106.

[2] 李阳. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 115-121.
LI Yang. The theory and method for development of carbonate fractured-cavity reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 115-121.

[3] CRAIG D H. Caves and other features of Permian Karst in Sand Andres Dolomite, Yates Field reservoir, West Texas [M] // JAMES N P, CHOQUETTE. Paleokarst. Springer-Verlag, 1988, 342-363.

[4] DEREK FORD. Paleokarst as a target for modern karstification [J]. Carbonates and Evaporites, 1995, 10(2): 138-147.

[5] PURDY Edward G, DAVE Waltham. Reservoir implications of modern karst topography [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1774-1794.

[6] LOUCKS R G. Modern analogs for paleocave-sediment fills and their importance in identifying paleocave reservoirs [J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 2001(46): 195-206.

[7] ZENG H L, LOUCKS R G, JANSON X, et al. Three-dimensional seismic geomorphology and analysis of the Ordovician paleokarst drainage system in the central Tabei Uplift, northern Tarim Basin, western China [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2061-2083.

[8] FRANCISCO Gutiérrez, GUERRERO Jesús, PEDRO Lucha. A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain [J]. Environmental Earth Sciences, 2008, 53(5): 993-1006.

[9] LOUCKS R G. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795-1834.

[10] ANGELA McDonnell, LOUCKS R G, TIM Dooley. Quantifying the origin and geometry of circular sag structures in

- northern Fort Worth Basin, Texas: Paleocave collapse, pull-apart fault systems, or hydrothermal alteration? [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(9): 1295-1318.
- [11] 金强, 王端平. 潜山型碳酸盐岩储集空间成因模式 [J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(5): 12-15.
JIN Qiang, WANG Duan-ping. Genetic models of buried hill carbonate reservoir space [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(5): 12-15.
- [12] ALAN Glennon, CHRIS Groves. An examination of perennial stream drainage patterns within the Mammoth Cave watershed, Kentucky [J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2002, 64(1): 82-91.
- [13] DEREK Ford, WILLIAMS Paul. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. London: Wiley, 2007: 39-65.
- [14] LOUCKS R G. A review of coalesced, collapsed-paleocave systems and associated suprastratal deformation [J]. Acta Carsologica, 2007, 36(1): 121-132.
- [15] LOUCKS R G, MESCHER Paul K, MCMECHAN George A. Three-dimensional architecture of a coalesced, collapsed-paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, central Texas [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(5): 545-564.
- [16] GALE Julia F W, GOMEZ Leonel A. Late opening-mode fractures in karst-brecciated dolostones of the Lower Ordovician Ellenburger Group, west Texas: Recognition, characterization, and implications for fluid flow [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(7): 1005-1023.
- [17] 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.
XIAO Yu-ru, HE Feng-yi, SUN Yi-mei. 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.
- [18] 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 Zhi-hui. 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.
- [19] 张学丰, 李明, 陈志勇, 等. 塔北哈拉哈塘奥陶系碳酸盐岩岩溶储层发育特征及主要岩溶期次 [J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 815-826.
ZHANG Xue-feng, LI Ming, CHEN Zhi-yong, et al. Characteristics and karstification of the Ordovician carbonate reservoir, Halahatang area, northern Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 815-826.
- [20] ZHANG Tao, YAN Xiang-bin. A study of the genetics of karst-type subtle reservoir in Tahe Oilfield [J]. Petroleum Science, 2004, 2(2): 99-104.
- [21] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素和复合-联合成因机制 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743-752.
HE Zhi-liang, PENG Shou-tao, ZHANG Tao. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 743-752.
- [22] 张文博, 金强, 徐守余, 等. 塔北奥陶系露头古溶洞充填特征及其油气储层意义 [J]. 特种油气藏, 2012, 19(3): 50-54.
ZHANG Wen-bo, JIN Qiang, XU Shou-yu, et al. Paleocavern filling characteristics and hydrocarbon reservoir implication in the Ordovician outcrops in the northern Tarim Basin [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(3): 50-54.
- [23] 田飞, 金强, 李阳, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型储层小型缝洞及其充填物测井识别 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(9): 900-908.
TIAN Fei, JIN Qiang, LI Yang, et al. Identification of small fracture-vugs and their fillings through log interpretation in fractured-vuggy Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(9): 900-908.

(编辑 徐会永)