

文章编号: 0253-2697(2016)03-0289-10 DOI:10.7623/syxb201603001

塔河油田奥陶系岩溶分带及缝洞结构特征

李 阳¹ 金 强² 钟建华² 邹胜章³

(1. 中国石油化工股份有限公司 北京 100728; 2. 中国石油大学地球科学与技术学院 山东青岛 266580;
3. 中国地质科学院岩溶地质研究所 广西桂林 541004)

摘要:塔河油田是中国发现的储量最大的碳酸盐岩油田,其岩溶储层埋藏深度大、储集空间复杂。通过古今岩溶地质考察,查明了塔北隆起奥陶系岩溶层序中古地貌与岩溶分带及缝洞系统;通过不同岩溶带缝洞成因分析,提出表层岩溶带由地表河、落水洞等缝洞组成,渗流岩溶带缝洞由驻水洞和渗流井组成,径流岩溶带缝洞由厅堂洞、干流洞、支流洞和末梢洞组成;通过岩溶期地表河与地下河沉积、埋藏期垮塌、钙华及热液化学充填作用分析,查明了岩溶缝洞充填特征与缝洞单元的形成。研究结果表明,缝洞系统是由流水溶蚀碳酸盐岩所形成,其始于岩溶高地或岩溶斜坡的落水洞,终于岩溶洼地地下河出水口;一旦缝洞系统部分地被地下河沉积、垮塌和化学充填后,可以形成一个或多个缝洞单元。通过缝洞结构和充填特征分析,认为岩溶期古地貌、潜水面升降和埋藏期的断层活动控制了缝洞单元的形成。研究综合利用地震、测井和地质资料建立缝洞类型和充填物类型识别方法,统一了不同成因类型缝洞的描述术语,为油田开发地质模型的建立提供了详尽的依据。

关键词:岩溶储层;缝洞系统;缝洞单元;缝洞结构;缝洞充填;塔河油田

中图分类号:TE122 文献标识码:A

Karst zonings and fracture-cave structure characteristics of Ordovician reservoirs in Tahe oilfield, Tarim Basin

Li Yang¹ Jin Qiang² Zhong Jianhua² Zou Shengzhang³

(1. China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100728, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China; 3. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guangxi Guilin 541004, China)

Abstract: Tahe oilfield is a carbonate oilfield with the largest reserves in China, characterized by large buried depth of karst reservoir and complicated reserving space. Through geological investigations on present and ancient karsts, this study identifies the paleogeomorphic, karst zonings and fracture-cave system in Ordovician karst sequence of the North Tarim uplift. Through an analysis on the geneses of fracture-caves in different karst zonings, it is proposed that the surface karst zoning consists of surface rivers, dolines and other fracture-caves; the fracture-caves in porous flow karst zones are composed of water storage cave and porous flow well, and those in karst runoff zones include hall-like cave, mainstream cave, tributary cave and peripheral cave. The filling characteristics of karst fracture-caves and the formation of fracture-cave units are clarified though analyzing the surface river and subsurface river sedimentation in the karst stage as well as the collapse, travertine and the roles of hydrothermal chemical fillings in the burial stage. The research results indicate that the fracture-cave system is consisted of carbonate rocks dissolved by the running water from the dolines at karst highland or on a karst slope to the outfall of subsurface river at karst depression; if the fracture-cave system partially undergoes subterranean river sedimentation, collapse and chemical fillings, one or more fracture-cave units can be formed. Based on analyzing the fracture-cave structure and filling characteristics, it is believed that the formation of fracture-cave units is controlled by the paleo-geomorphology and phreatic fluctuation in the karst stage as well as the fault activity in the burial stage. In this study, seismic, logging and geological data are comprehensively applied in creating the methods for identification of fracture-cave and filling types, so as to unify the terms describing the fracture-caves with different geneses, thus providing a detailed basis for the establishment of geological model for oilfield development.

Key words: karst reservoir; fracture-cave system; fracture-cave unit; fracture-cave structure; fracture-cave filling; Tahe oilfield

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB201001)资助。

第一作者及通信作者:李 阳,男,1958年10月生,1982年毕业于华东石油学院,2000年获中国科学院博士学位,现为中国工程院院士、中国石油化工股份有限公司教授级高级工程师,中国石油大学(华东)兼职教授,主要从事油气开发地质研究与管理工。Email:liyang@sinopec.com

引用:李阳,金强,钟建华,邹胜章.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.

Cite:Li Yang, Jin Qiang, Zhong Jianhua, Zou Shengzhang. Karst zonings and fracture-cave structure characteristics of Ordovician reservoirs in Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 289-298.

塔河油田是中国已发现的储量超过 $10 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$ 、碳酸盐岩储层原油产量最高的油田^[2]。其埋藏深度大(超过 5 400 m)、岩溶储层复杂(缝洞储集空间多变)^[3-5]、原油性质差(原油密度 $> 0.9 \text{ g/cm}^3$)、油-水关系复杂^[6,7],成为世界上开发难度很大的油田^[8]。因此,中华人民共和国科技部、中国石油化工集团公司及相关科研院所投入了大量科研力量,进行了地质、地球物理和油藏工程等综合研究,本文就是其部分研究成果。

塔河油田位于塔里木盆地塔北隆起的高部位^[9],其奥陶系碳酸盐岩在加里东晚期—海西期经历了风化壳岩溶作用,形成复杂的岩溶地貌和溶蚀缝洞系统^[10,11]。通过现代岩溶和古岩溶的地质分析,以及塔河油田地质、测井和地震等资料的综合解释,提出了不同岩溶带成因特征和划分标准、不同岩溶带缝洞组合特征及其成因结构、以及缝洞系统和缝洞单元的研究方法,并给出了塔河油田奥陶系岩溶分带和岩溶缝洞的结构模式。

1 塔河油田奥陶系岩溶分带特征与分带标志

塔北隆起奥陶系历经了完善的岩溶地质过程,发育了表层岩溶带、渗流岩溶带(垂向渗流淋滤带)、径流岩溶带(径流溶蚀岩溶带)和潜流岩溶带^[12]。岩溶分带的形成受控于地貌形态、构造活动、可溶岩性分布、气候变化等^[13,14],其综合反映在岩溶区的水流运动方式上:表层岩溶带地表水(地表河等)以顺坡流动为主、有向下侵蚀作用^[15,16];渗流岩溶带的水流主要在断层、裂缝、溶蚀孔洞以垂向渗流运动为主^[17];径流岩溶带的水流以低角度径流方式向潜水面方向流动^[18];潜水面之下潜流岩溶带的水从高势区向低势区以渗流方式流动^[19]。因为流水是岩溶作用的主要地质营力,所以不同岩溶带缝洞产状及组合方式与水流方式具有一定的对应性,从而形成了岩溶分带特征和识别标志。

表层岩溶带水流基本顺地表坡度流动,形成了下切河道和顺坡溶蚀缝槽和落水洞,如果地表水流遇到可溶性较强的岩性,则会形成顺层的(低角度)溶蚀缝槽和溶蚀孔洞,同时在断层、构造裂缝和一些风化裂缝形成处会发育高角度的溶蚀裂缝。总体上看,表层岩溶带溶蚀孔缝以低角度为主、高角度为辅,从缝洞组合来看,表层岩溶带以地表河-落水洞为主,配合以低角度溶蚀缝槽和孔洞。

当地表水通过落水洞、断层或裂缝进入奥陶系灰岩内部,则沿着断层或高角度裂缝垂向运动,形成渗流岩溶带。当地表河水补给充足时,在断层附近形成垂向淋滤瀑布(竖井溶洞),在可溶性较强岩石中或断层交叉处形成驻水洞;同时,在断层附近、竖井式溶洞和驻水洞附近形成大量高角度溶蚀裂缝和溶蚀孔洞^[20]。总之,在垂向渗流岩溶带高角度裂缝和溶蚀裂缝特别发育,围绕驻水洞环形和放射状溶蚀裂缝发育。

渗流岩溶带的流水不断汇聚形成地下河,并且向潜水面以下流去,地下河可以形成岩溶型碳酸盐岩最大的储集空间体系:末梢洞—支流洞—干流洞—厅堂洞,围绕地下河溶洞还产生一系列环形溶蚀裂缝、放射状溶蚀裂缝和溶蚀孔洞。由于地下河溶洞体系以低角度为主,因此与其相关的溶蚀裂缝也是以低角度为主。

潜水面之下称为潜流岩溶带,这时水流以真正的渗流形式从高势区向低势区缓慢流动,此时水流对碳酸盐岩的溶蚀作用大大减弱,已形成的溶洞常被砂泥沉积物所充填^[21]。从塔河油田实际资料看,潜水面一旦上升,径流岩溶带就成为潜流岩溶带,所以,潜流岩溶带的溶蚀储集空间与径流岩溶带类似。

图 1 展示了塔河油田常见的奥陶系岩溶地层的表层岩溶带、渗流岩溶带、径流岩溶带的特征。由图 1 可以看出,岩溶缝洞主要由这 3 个岩溶带形成,潜流岩溶带由于水流中二氧化碳分压相对增高,奥陶系碳酸盐岩溶蚀作用相对降低。塔河油田勘探开发实践证明,目前发现的溶蚀缝洞基本上是由这 3 个带形成的。

根据塔河油田主体区 150 余口钻井资料统计与对比,不同岩溶带缝洞发育特征在测井响应上具有一定的对应性,因此,提出了岩溶带划分的测井响应特征值(表 1)。

此外,作者还注意到不整合面上、下测井响应的差异性,这样用来划分奥陶系表层岩溶带顶面与石炭系巴楚组底界,而且发现表层岩溶带物质组成不同(奥陶系灰岩、地表河沉积物、风化剥蚀坡积物),两者的测井响应差别也不同(表 2)。

研究表明,岩溶地貌对不同岩溶带的发育起着明显的控制作用。例如,塔河 4 区位于岩溶高地,其表层岩溶带厚度薄、大面积奥陶系灰岩在岩溶期呈裸露状态、发育长度比较小的地表支流河和规模较小的落水洞,渗流岩溶带厚度也比较薄,径流岩溶带比较发育、而且受构造抬升作用发育了 2 层径流岩溶带;塔河 6

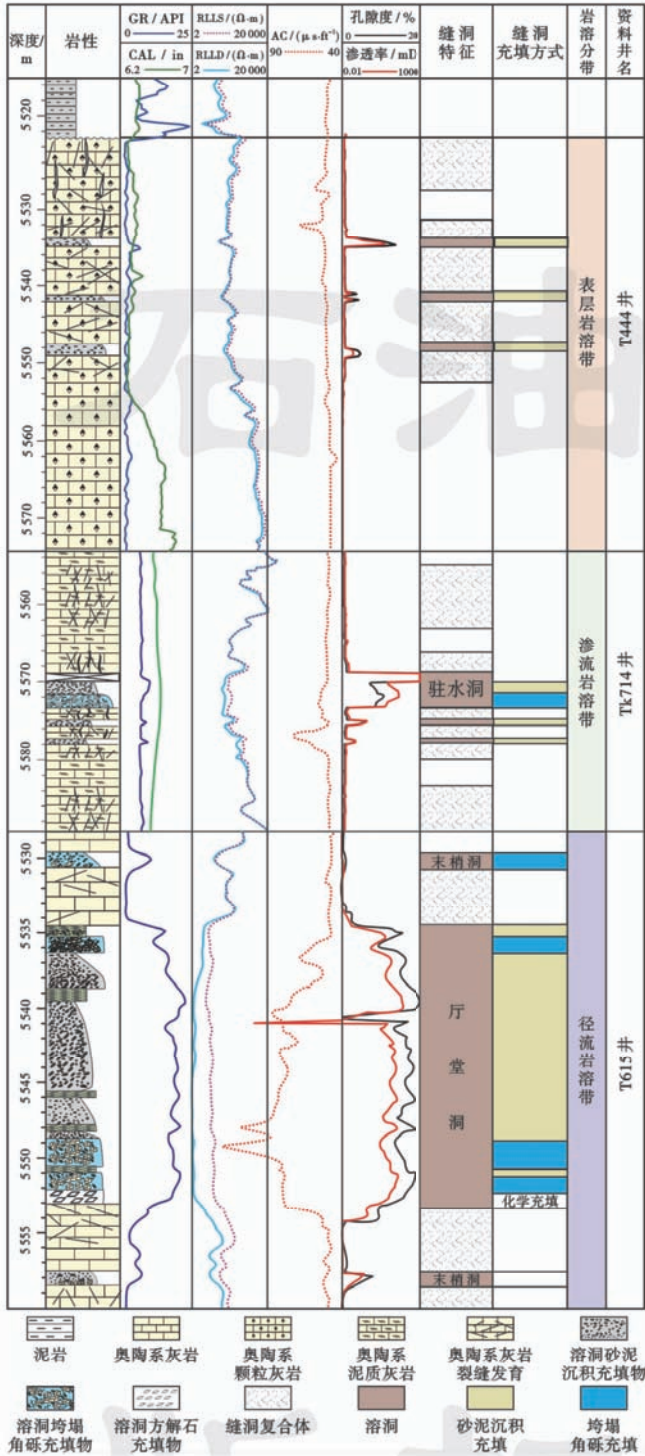


图 1 塔河油田岩溶分带柱状剖面图

Fig. 1 Column section of karst zonings in Tahe oilfield

区和 7 区基本上位于岩溶斜坡上,表层岩溶带、渗流岩溶带和径流岩溶带特征明显、厚度均比较大;塔河油田南部的 2 区等在岩溶期可能处于岩溶洼地,其岩溶分带特征也比较明显,但是缝洞规模相对较小。不同地貌单元对应的岩溶带厚度与特征见表 3 所示。

表 1 不同岩溶带测井响应及划分参考

Table 1 Well logging responses and divided references for different karst zones

岩溶带	GR/API	RD/(Ω·m)	AC/(μs·ft ⁻¹)
表层岩溶带	8~60	500~2 000	52~65
渗流岩溶带	3~10	800~5 000	45~49
径流岩溶带	15~80	10~400	50~65

2 不同岩溶带缝洞结构与充填特征

实际上,岩溶作用期间地表水渗漏进入岩溶地层、再从地层中流出进入汇水盆地,在可溶性岩石中形成了复杂的缝洞系统^[22],也就是说,在具有统一的补-径-排特征的水文地质系统中产生了由孔、缝、洞等组合而成的缝洞系统。这个缝洞系统从岩溶高地或岩溶斜坡的表层岩溶带开始,穿越渗流岩溶带、径流岩溶带和/或潜流岩溶带,在岩溶洼地或岩溶斜坡低部位又穿越回表层岩溶带而结束;其边界为地下水零通量边界,规模大小由排泄基准面控制,当降雨量增大、排泄基准面上升,整个岩溶带向浅层变动;当排泄基准面向深部迁移、或者构造活动使岩溶地层抬升,岩溶分带的界限也向深处迁移,这种迁移会导致早期形成的缝洞废弃和充填,可以形成多层地下河体系。

岩溶作用期间以及岩溶地层埋藏—深埋藏期,在沉积作用、缝洞围岩垮塌和钙华及热液化学充填作用下,已形成的岩溶缝洞系统部分被充填、可以分隔成若干局部连通的缝洞单元。也就是岩溶型碳酸盐岩油气藏中常说的,具有统一的压力系统和水力条件的、以连通的缝洞为主要储集空间和渗流通道的、并被致密岩体封挡的储集体^[23]。

实践中笔者认识到,只有查明不同岩溶带的缝洞结构,才能有效地表征缝洞单元。所谓缝洞结构是指溶蚀缝洞空间上的组合关系。岩溶缝洞形成以后会被

表 2 石炭系巴楚组底界与奥陶系顶界测井响应特征

Table 2 Well logging responses of the base of Carboniferous Bachu Formation and the top of Ordovician

地层	响应特征		地层	响应特征		地层	响应特征	
	GR/API	RD/(Ω·m)		GR/API	RD/(Ω·m)		GR/API	RD/(Ω·m)
巴楚组	>80	<15	巴楚组	>60	<30	巴楚组	>80	<30
表层带地表河	<60	>50	表层带坡积物	<20	>200	奥陶系灰岩	<20	>500

表3 塔河油田岩溶地貌与岩溶分带及其缝洞组合特征

Table 3 Characteristics of karst geography, karst zoning and fracture-cave in Tahe oilfield

地貌单元	表层岩溶带			渗流岩溶带			径流岩溶带		
	裂缝特征	溶洞特征	厚度/m	裂缝特征	溶洞特征	厚度/m	裂缝特征	溶洞特征	厚度/m
岩溶高地	高+低角度缝	小型落水洞	5~10	高角度溶蚀缝	小型驻水洞	10~50	高+低角度溶缝	地下河溶洞	30~80
岩溶斜坡	中+低角度缝	大型落水洞	30~80	高角度溶缝+井	大型驻水洞	50~150	低角度	地下河溶洞	30~60
岩溶洼地	低角度裂缝	小型落水洞	10~30	高角度溶蚀缝	小型驻水洞	60~100	低角度	地下河溶洞	20~50

岩溶期的沉积作用、垮塌作用形成的碎屑物质所充填,岩溶缝洞在埋藏期还会被垮塌、胶结和热液作用等充填,据统计,塔河油田奥陶系岩溶缝洞75%以上被沉积充填物、垮塌充填物和化学充填物所充填^[24]。但是,不同岩溶带缝洞结构及充填特征具有明显差别,所以要进行分带研究。

2.1 表层岩溶带缝洞结构及充填特征

利用高精度三维地震和钻、测井资料,把奥陶系之上覆盖的石炭系剥离开,可以得到岩溶期奥陶系顶面的地貌特征(图2)。结合露头区古岩溶地质考察等成果,发现塔河油田主体区是一个相对完整的岩溶地貌:包括岩溶高地(塔河4区)、岩溶斜坡(塔河6区和7区)和岩溶洼地。由图2可以看出,岩溶期地表山丘和河流大体上是NE—SW向:①塔河4区NE向有一条大河在向SW流动时,遇到主体山丘而转向SE,该河向下侵蚀深

度可达90m,该河以西为岩溶高地地貌单元,岩溶高地内发育几条连接小型落水洞的地表干流河和支流河,每条河长度不超过5km;②塔河6区发育长度超过20km的地表河,河谷下切深度小于60m,同时发育一些支流河和大型落水洞,塔河7区有一条由塔河6区延伸过来的地表河,流向转为近NS向,该区西部发育几条规模较小的支流河;③在塔河7区南部边缘或塔河2区发现了若干地下河出水口,表明出现了岩溶洼地,而且这里发育一些汇水河道,可能是岩溶期相对干旱季节汇水洼地消失时形成的。这些河流及其形成的下切谷地在岩溶末期均被河流砂泥和溶丘坡积物充填。

地表河流配合构造活动组成了岩溶地貌形成的主要营力,经观察统计,地表河包括地表主干河和支流河2种类型,其充填的砂岩和坡积物发育粒间孔隙,也是潜在的储集体,其基本特征见表4。

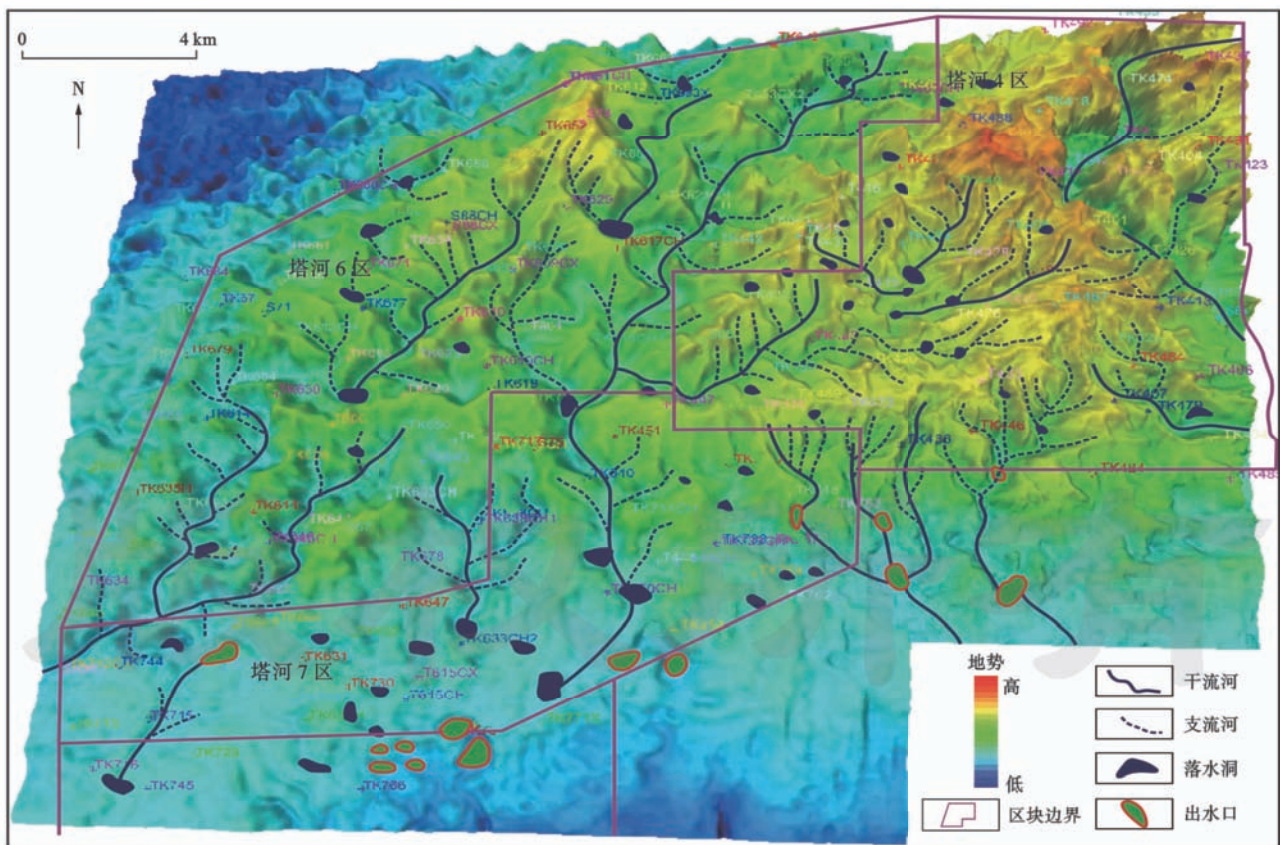


图2 塔河油田主体区岩溶期古地貌恢复

Fig. 2 Recovered paleogeography for the karst period in Tahe oilfield

表 4 塔河油田奥陶系岩溶期溶丘地貌地表河及其充填物特征

Table 4 Ground river and its fillings developed in a dissolved Ordovician dune for the karst period in Tahe oilfield

地貌特征	地表干流河			充填物组成	地表支流河			充填物组成
	长度/km	宽度/km	深度/m		长度/km	宽度/km	深度/m	
岩溶高地	<4	<1	<30	河流相+坡积物	<3	<0.5	<20	河流相+坡积物
岩溶斜坡	>20	1.0~2.0	30~50	河流相+坡积物	<5	0.5~1.0	<30	河流相+坡积物
岩溶洼地	>10	>1.0	20~50	砂、泥岩	3~5	0.2~0.5	<20	河流相

岩溶高地和岩溶斜坡具有大量裸露的奥陶系灰岩,在风化与淋滤作用下,可以形成大量沿着断层、裂缝或节理发育的溶蚀孔洞(缝洞复合体),在河谷和山丘坡脚处可以堆积滚石等坡积物,河谷内充填河流相沉积;岩溶洼地地貌单元,在雨季可以形成岩溶湖泊,在旱季可以形成岩溶斜坡类似的地表河和风化淋滤作用,奥陶系灰岩也经受溶蚀和淋滤作用,但是地表河侵蚀深度和溶蚀孔洞规模要小一些。

裸露的奥陶系灰岩是表层岩溶带重要组成部分,经受长期风吹日晒,可以产生大量节理和裂缝,在地表水的溶蚀作用下会形成大量沿裂缝分布的溶蚀孔洞(缝洞复合体)。在山丘坡脚和地表河附近会产生滚石等坡积物。从剖面上看(图 3),裸露灰岩产生缝洞复合体的厚度取决于节理或裂缝发育的深度、以及地表水淋滤的深度,该深度一般不超过 5m;地表河下切深度以及落水洞的底部深度是表层岩溶带的底界,深度为 70~80m。

2.2 渗流岩溶带缝洞结构及充填特征

渗流岩溶带厚度变化很大,在岩溶高地大约厚 10 m,而在岩溶斜坡部位可以厚达 150 m。岩溶高地渗流带厚度较小,其原因是抬升受剥蚀作用比较强烈、表层岩溶带厚度较薄等。

渗流岩溶带的溶蚀缝洞主要由渗流井和驻水洞组成,渗流井一般沿断层发育,是表层岩溶带与径流岩溶带的地下水高速通道;地下水遇到可溶性较强岩性可

以形成驻水洞,这种孤立溶洞通过溶蚀裂缝造成表层岩溶带和径流岩溶带相连,岩溶高地驻水洞的规模比较小(洞径<0.5 km、洞高<5 m),而岩溶斜坡发育较大规模的驻水洞(洞径>0.5 km、洞高>5 m,图 4)。

驻水洞常常被沉积砂、泥和垮塌灰岩角砾所充填,有的也被化学充填物充填。

2.3 径流岩溶带缝洞结构及充填特征

地下河是径流带的重要特征,潜水面是径流带的底界。塔河主体区径流岩溶带非常发育,大型溶洞是其主要缝洞储集空间,根据岩溶地质特征并且考虑到地震和测井资料能够识别的规模,可以分为厅堂洞、干流洞、支流洞和末梢洞(表 5 和图 5)^[25]。由于构造抬升和潜水面下降,塔河 4 区和塔河 7 区部分位置形成了上、下 2 层地下河系统。

厅堂洞常发育在断层交叉处、地表落水洞下方(图 6)。径流带溶洞是塔河油田主体区主要储集空间,虽然其约 70%以上被地下河沉积物、垮塌角砾岩和方解石等化学物质充填,仍然具有未充填的溶洞空间,成为地下油库。厅堂洞常与干流洞、支流洞和末梢洞相连,形成形态复杂、规模变化的溶洞群。围绕着地下河溶洞群,发育环状、放射状溶蚀裂缝和溶蚀孔洞,这些溶蚀裂缝和溶蚀孔洞走向上沿着地下河发育,因此,井中钻遇溶蚀裂缝以低角度为主,地下河溶洞与溶蚀裂缝及孔洞共同组成了径流岩溶带缝洞储集体系。

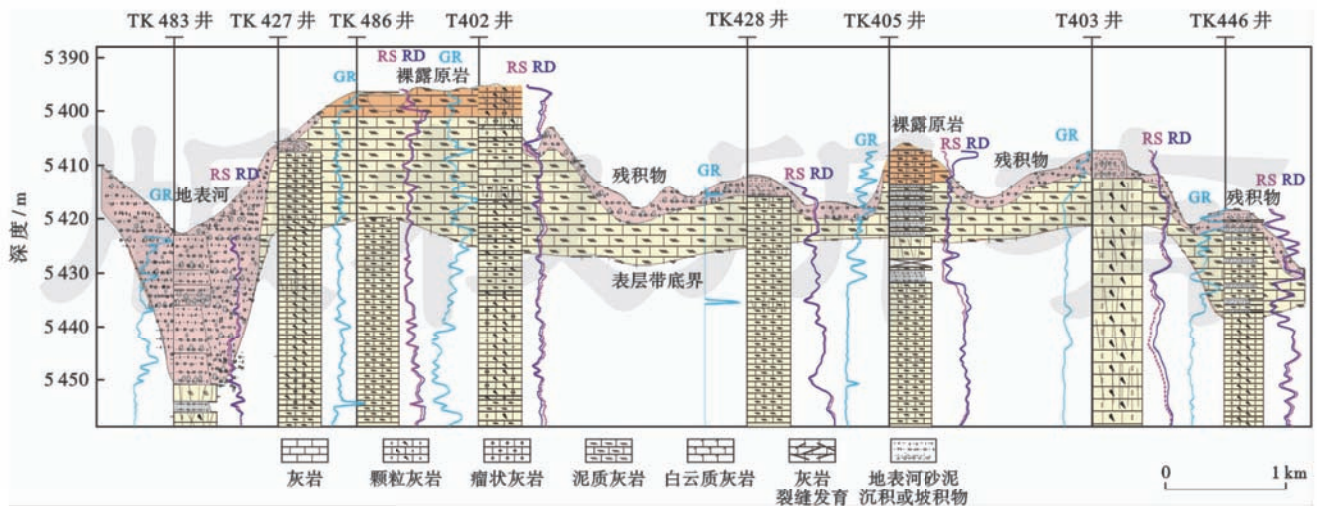


图 3 塔河油田表层岩溶带缝洞结构与充填特征

Fig. 3 Fracture-cave structure and fillings of epikarst zone in Tahe oilfield

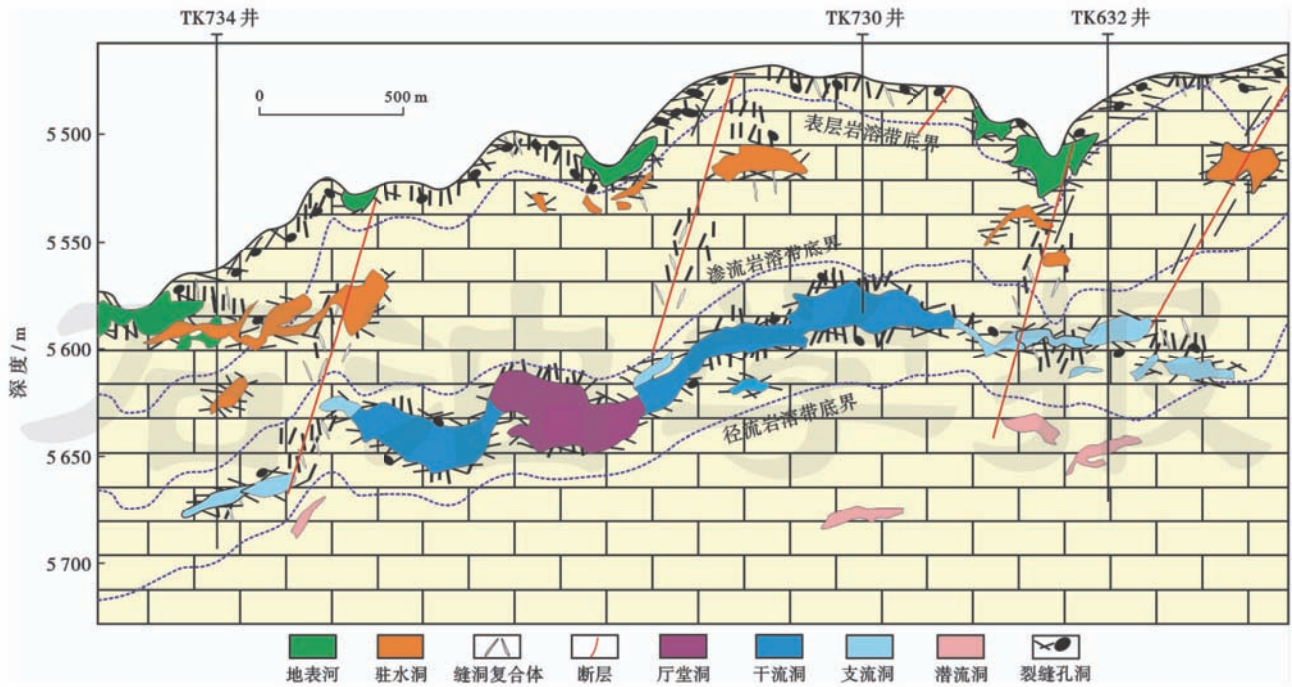


图4 塔河油田7区渗流岩溶带驻水洞剖面分布

Fig. 4 Profile of single-cave distribution in porous flow karst zone in Zone-7 of Tahe oilfield

表5 径流岩溶带和渗流岩溶带不同成因溶洞及结构规模

Table 5 Genetic caves and their structure sizes in run-off karst zone and porous flow karst zone

径流带	厅堂洞		干流洞		支流洞		木梢洞		溶蚀孔洞+缝洞复合体	
	洞径/m	洞高/m	洞径/m	洞高/m	洞径/m	洞高/m	洞径/m	洞高/m	长度/m	厚度/m
缝洞规模	>200	>15	50~200	5~15	5~50	0.5~5	<5	<0.5	>10	>2
渗流带	—	—	大型驻水洞		小型驻水洞		—	—	—	—
规模	—	—	50~500	5~15	10~50	0.5~5	—	—	—	—

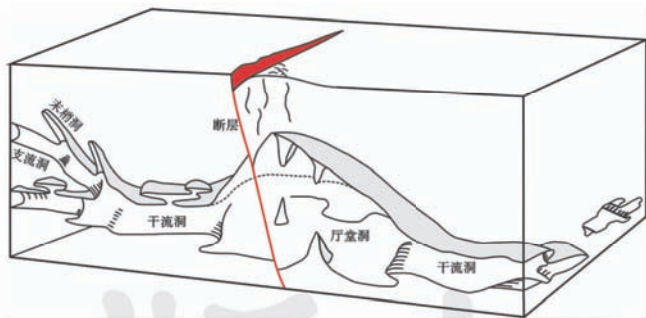


图5 径流岩溶带缝洞结构

Fig. 5 Fracture-cave structure in run-off karst zone

地下河缝洞体系充填物主体是沉积砂、泥,其次是垮塌角砾充填物,再次是钙华和热液方解石等充填物。在具有2层地下河之处,第1期地下河溶洞充填程度高,第2期地下河溶洞充填程度相对较低。

把塔河油田奥陶系观察到的岩溶分带和缝洞发育特征集中在一起,可以构成岩溶分带和缝洞结构模式(图7)。

3 塔河油田岩溶作用控制因素

3.1 岩溶期古地貌控制作用

塔里木盆地奥陶统为开阔海台地环境沉积的厚层泥晶-微晶颗粒灰岩,泥质隔夹层不多,发育少量硅质夹层,总体是一套可溶性比较强的地层。晚加里东期—早海西期整个塔北隆起处于构造隆起状态,并且受到挤压和断裂作用,上覆的泥盆系—志留系和部分奥陶系被剥蚀,当下奥陶统出露时,在大气降水作用下,发育了强烈的岩溶作用,距离奥陶系风化壳300m的深度范围内发育了表层岩溶带、渗流岩溶带、径流岩溶带和潜流岩溶带。但是这些岩溶带在岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶洼地的厚度以及内部缝洞组合差别很大,说明古地貌控制了岩溶发育。例如,岩溶高地地表河以支流河和小型落水洞为主,而岩溶斜坡地表河和落水洞规模均较大,落水洞往往对应于地下河的起点,地下河出水口往往在岩溶洼地(图2)。

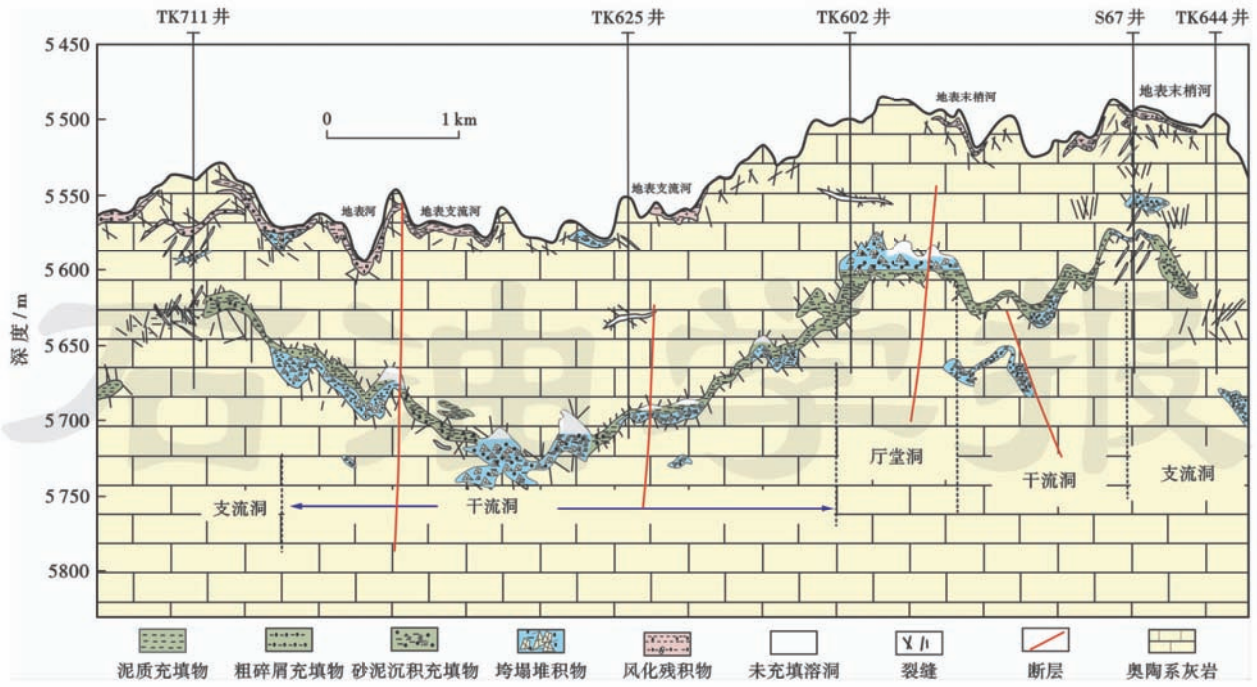


图 6 径流岩溶带地下河溶洞体系及其充填物分布特征(图中岩性特征同图 1、缝洞特征同图 4)

Fig. 6 Profile of fracture-cave system developed by sub-ground river and its fillings in run-off karst zone (lithologic feature same to Fig. 1, fracture-cave feature same to Fig. 4)

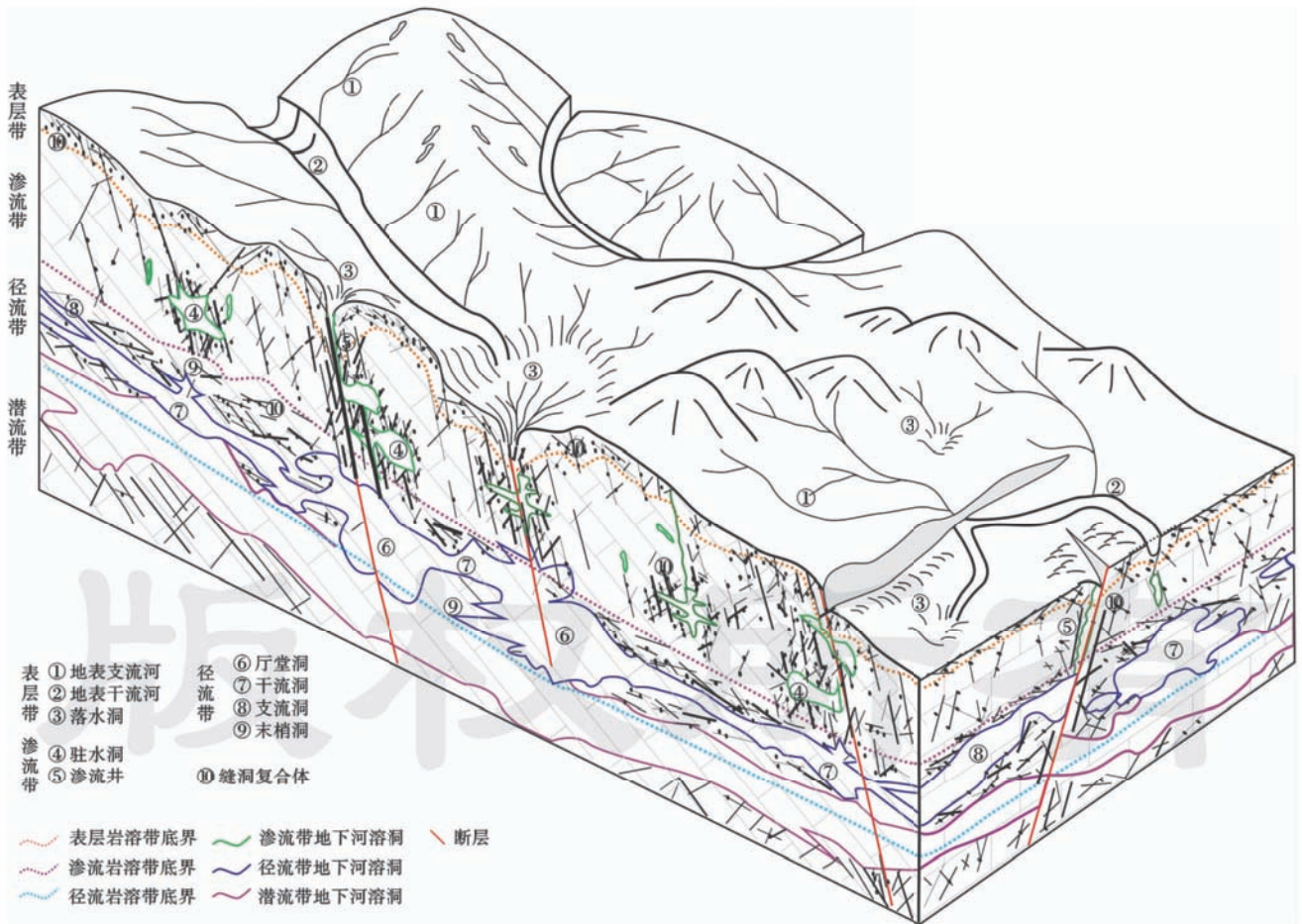


图 7 塔河油田奥陶系岩溶分带和缝洞结构模式

Fig. 7 Model of karst zonings and fracture-cave structure in Tahe oilfield

3.2 潜水面变化对径流带洞穴充填的控制作用

潜水面以下一般为潜流岩溶带,其中水流速度缓慢,水动力弱,只有细粒且暗色碎屑充填物沉积,同时已沉积的碎屑物质受到胶结作用。潜水面一般向盆地方向倾斜,当爆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,此时径流带的地下河出现潜水面以下的细粒沉积物,并且形成地下河沉积物的旋回性(图8)。例如TK734井5595.1~5571.6m为径流岩溶的一个厅堂洞,其被3个旋回式充填物所充填:①5595.1~5589.8m为第1旋回充填,其由钙华方解石和潜流带

灰质泥岩充填;②5589.8~5578.0m为第2旋回充填,其中5584.2~5578.0m为潜水面之下的沉积充填物;③5578.0~5571.6m为第3旋回充填,5572.9~5571.6m为潜流带充填物。

3.3 岩溶期断层构造活动对岩溶作用的控制作用

岩溶期活动的断层控制了地表河的走向,2条断层的交叉部位往往发育落水洞;在渗流岩溶带断层附近常发育驻水洞,沿断面可以发育渗流井;径流岩溶带的地下河走向多数也是沿断层发育,断层交叉处常发育厅堂洞。断层还控制缝洞的垮塌作用及垮塌充填物的分布(图9)。

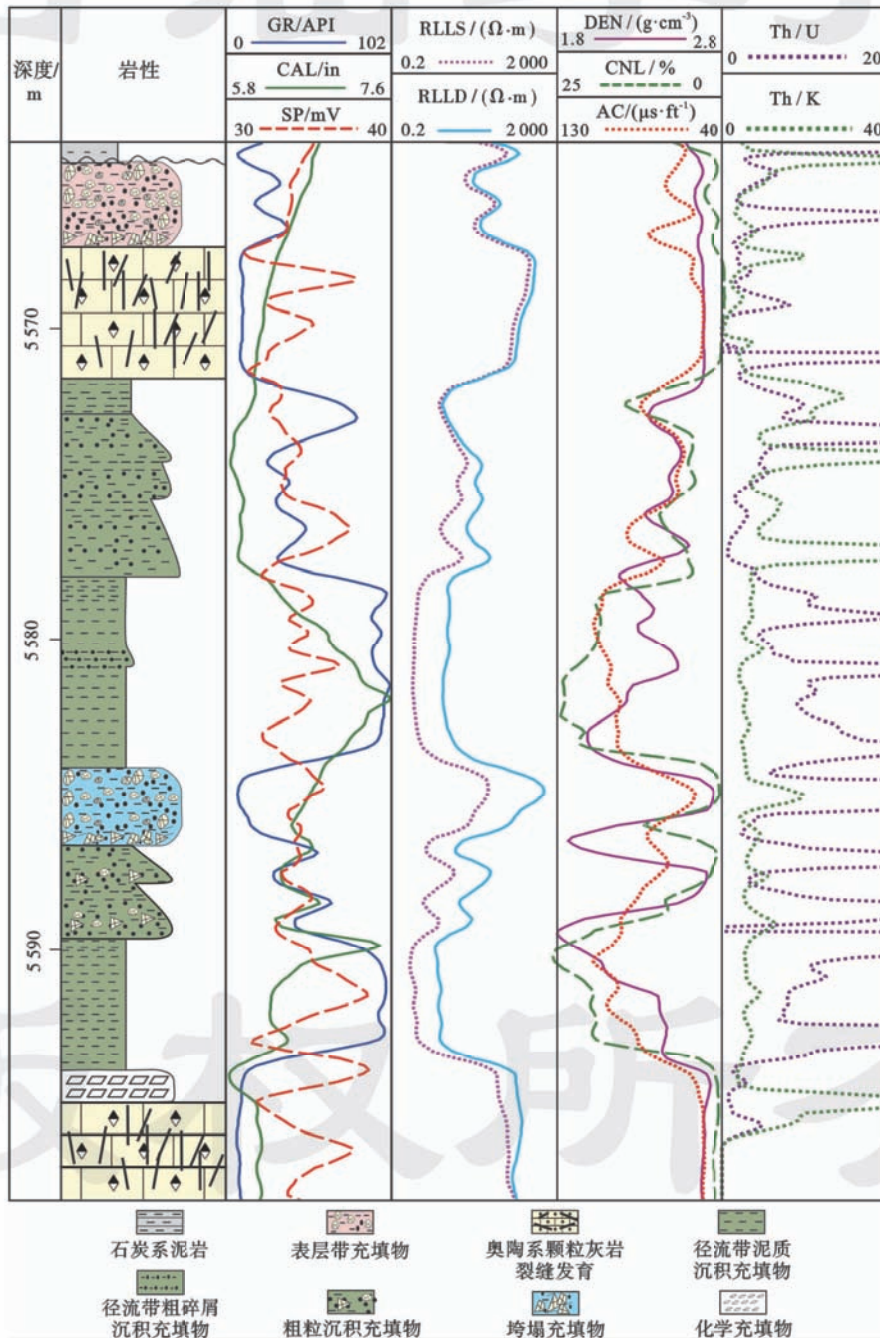


图8 TK734井潜水面3次上升导致径流带厅堂洞沉积充填3个旋回性变化

Fig. 8 Three sedimentary circles in a hall-cave of run-off zone found in Well TK734, which were developed by three times of rises of the water tables

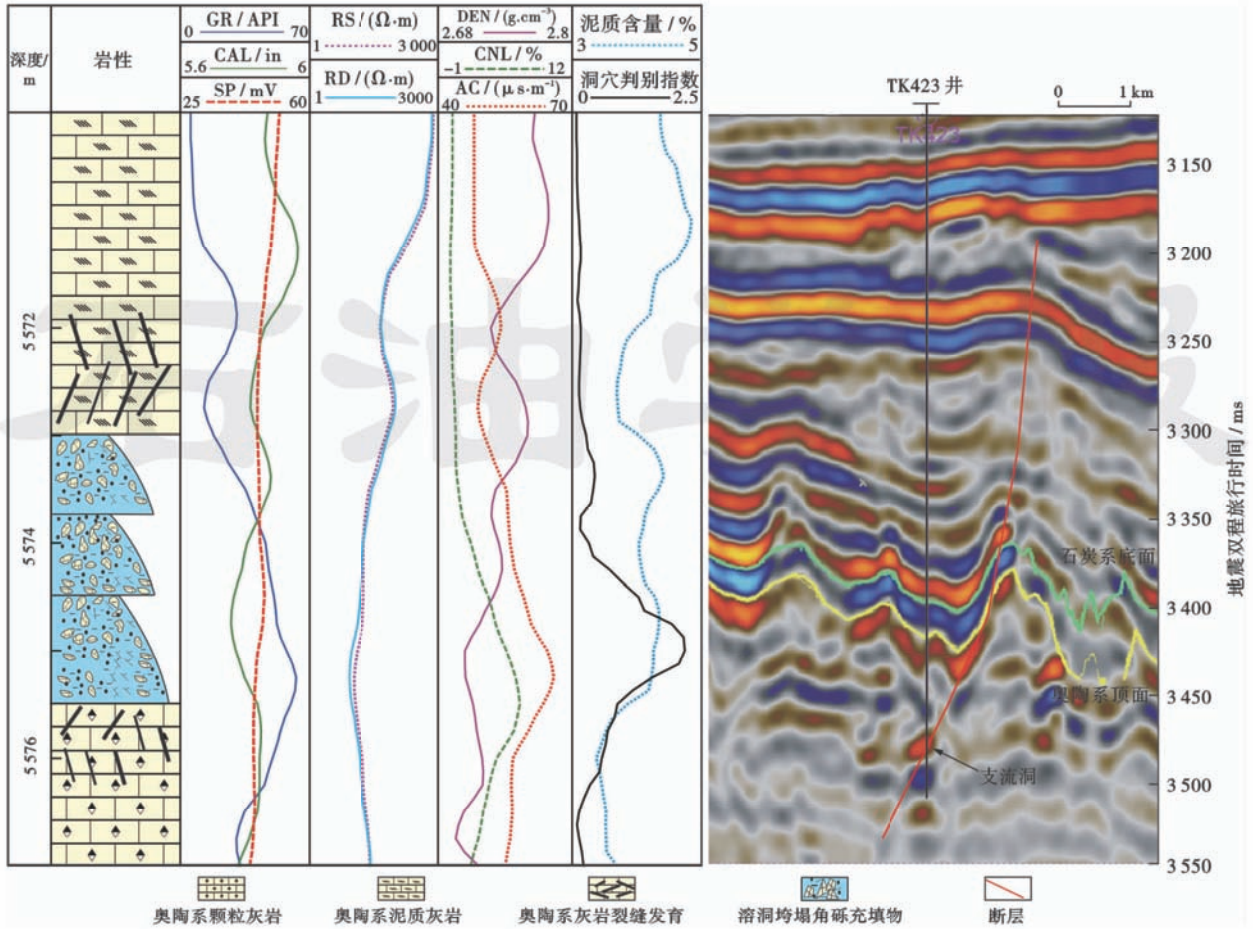


图 9 T423 井在 5573.0~5576.4m 钻遇的支流洞完全被垮塌角砾充填(左),该支流洞靠近断层(右)
 Fig. 9 A full filled branch cave found in interval of 5573.0~5576.4m in Well T423(left), and seismic section showing the cave near a fault(right)

4 结 论

(1) 塔河油田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)。其表层岩溶带包含地表河、落水洞、断层及裂缝等缝洞结构;渗流岩溶带发育渗流井和驻水洞缝洞结构;径流岩溶带地下河系统发育,形成了厅堂洞、干流洞、支流洞和末梢洞。

(2) 岩溶高地或岩溶斜坡地表河通过落水洞进入岩溶地层变成地下河,再从岩溶洼地流出来,在岩溶地层中形成了复杂的溶蚀缝洞系统。该系统经过岩溶期的沉积充填、埋藏期的垮塌充填和化学充填,形成互不连通的缝洞单元,缝洞单元是重要的油气聚集和油田开发的单元。

(3) 塔河油田开发实践证明,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,其中的驻

水洞、厅堂洞、干流洞、支流洞和末梢洞以及周围大量的缝洞复合体尽管被数量不等的沉积、垮塌和化学充填物所充填,但是所受压实等成岩作用较弱,具有良好的储集物性。

致谢 本文研究得到中国石油化工集团公司西北石油局勘探开发研究院、中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院的大力支持,并得到康玉柱院士和袁向春教授的帮助,在此一并表示衷心的感谢!

参 考 文 献

[1] 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.

[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] 康玉柱. 中国海相油气田勘探实例之四: 塔里木盆地塔河油田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 2005, 10(4): 31-39.

- Kang Yuzhu. Cases of discovery exploration of marine fields in China (part 4): Tahe Oilfield in Tarim Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2005, 10(4): 31-39.
- [4] 夏日元,唐建生,邹胜章,等.塔里木盆地北缘古岩溶充填物包裹体特征[J]. *中国岩溶*, 2006, 25(3): 246-249.
Xia Riyuan, Tang Jiansheng, Zou Shengzhang, et al. Features of the inclusion in paleo-karst fillings at the north edge of Tarim Basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(3): 246-249.
- [5] 韩庆之,曾克峰,梁杏.特殊的地表岩溶形态及成因探讨[J]. *中国岩溶*, 1998, 17(4): 392-396.
Han Qingzhi, Zeng Kefeng, Liang Xing. Discussion on the special surface karst features and their genesis[J]. *Carsologica Sinica*, 1998, 17(4): 392-396.
- [6] 荣元帅,赵金洲,鲁新便,等.碳酸盐岩缝洞型油藏剩余油分布模式及挖潜对策[J]. *石油学报*, 2014, 35(6): 1138-1146.
Rong Yuanshuai, Zhao Jinzhou, Lu Xinbian, et al. Remaining oil distribution patterns and potential-tapping countermeasures in carbonate fracture-cavity reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(6): 1138-1146.
- [7] 鲁新便,蔡忠贤.缝洞型碳酸盐岩油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.
- [8] 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.
- [9] 翟晓先,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.
- [10] 闫相宾,韩振华,李永宏.塔河油田奥陶系油藏的储层特征和成因机理探讨[J]. *地质论评*, 2002, 48(6): 619-626.
Yan Xiangbin, Han Zhenhua, Li Yonghong. Reservoir characteristics and formation mechanisms of the Ordovician Carbonate pools in the Tahe oilfield[J]. *Geological Review*, 2002, 48(6): 619-626.
- [11] 鲁新便,高博禹,陈姝媚.塔河油田下奥陶统碳酸盐岩古岩溶储层研究:以塔河油田6区为例[J]. *矿物岩石*, 2003, 23(1): 87-92.
Lu Xinbian, Gao Boyu, Chen Shumei. Study on characteristics of paleokarst reservoir in Lower Ordovician carbonate of Tahe oil field [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2003, 23(1): 87-92.
- [12] 陈学时,易万霞,卢文忠.中国油气田古岩溶与油气储层[J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 244-253.
Chen Xueshi, Yi Wanxia, Lu Wenzhong. The paleokarst reservoirs of oil/gas fields in China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 244-253.
- [13] Brenchley P J, Marshall J D, Harper D A T, et al. A late Ordovician (Hirnantian) karstic surface in a submarine channel, recording glacio-eustatic sea-level changes: Meifod, central Wales[J]. *Carsologica Sinica*, 2006, 41(1): 1-22.
- [14] 李彬.不同环境下岩溶发育特征的差异及其古环境研究意义:以中国南方与挪威极地岩溶为例[J]. *中国岩溶*, 1997, 16(4): 313-318.
Li Bin. Differences in karst features under various environments and their bearing on paleoenvironmental studies: case of the karst of South China and North Norway[J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16(4): 313-318.
- [15] 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.
- [16] Gutiérrez F, Guerrero J, Lucha P. A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain [J]. *Environmental Geology*, 2008, 53(5): 993-1006.
- [17] Baceta J I, Wright V P, Pujalte V. Palaeo-mixing zone karst features from Palaeocene carbonates of north Spain: criteria for recognizing a potentially widespread but rarely documented diagenetic system[J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 139(3/4): 205-216.
- [18] Ford D C. Paleokarst as a target for modern karstification[J]. *Carbonates and Evaporites*, 1995, 10(1): 138-147.
- [19] Loucks R G. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(11): 1795-1834.
- [20] Johnson K S. Evaporite-karst problems and studies in the USA [J]. *Environmental Geology*, 2008, 53(5): 937-943.
- [21] 蔡春芳,李开开,李斌,等.塔河地区奥陶系碳酸盐岩缝洞充填物的地球化学特征及其形成流体分析[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2399-2404.
Cai Chunfang, Li Kaikai, Li Bin, et al. Geochemical characteristics and origins of fracture- and vug-fillings of the Ordovician in Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2399-2404.
- [22] 夏日元,邹胜章,梁彬,等.塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究[M].北京:地质出版社,2011.
Xia Riyuan, Zou Shengzhang, Liang Bin, et al. Models of fracture-cave systems in Ordovician carbonates and their origins in Tarim Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [23] 张希明,朱建国,李宗宇,等.塔河油田碳酸盐岩缝洞型油气藏的特征及缝洞单元划分[J]. *海相油气地质*, 2007, 12(1): 21-24.
Zhang Ximing, Zhu Jianguo, Li Zongyu, et al. Ordovician carbonate fractured-vuggy reservoir in Tahe oilfield, Tarim Basin: characteristics and subdivision of fracture-vug units[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(1): 21-24.
- [24] 钟建华,毛磊,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 Lei, 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, 55(9): 1406-1426.
- [25] 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 Sciences*, 2013, 37(5): 15-21.