

文章编号:1009-9603(2018)04-0033-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2018.04.006

塔河油田西部古暗河缝洞结构特征及控制因素

张娟, 鲍典, 杨敏, 何成江, 邓光校, 张慧涛

(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)

摘要:由于古暗河非均质性强、空间结构复杂,难以明确塔河油田西部古暗河缝洞结构特征及控制因素。为此,利用井震标定技术和频谱分解技术对塔河油田西部古暗河进行系统刻画与识别,研究表明:塔河油田西部奥陶系碳酸盐岩发育1—4号共4条古暗河,平面上呈较为复杂的网状或树枝状结构特征,平面上的缝洞结构可分为连续发育的条带状和不连续发育的团块状2大类;纵向上自上而下可分为未充填、砂泥质充填和角砾充填3种缝洞充填类型,其中有利缝洞主要发育在中—上奥陶统顶面反射轴之下的第1个波谷和波峰上,以“串珠状”反射特征为主。古构造形态、断裂系统和开放性入口对古暗河形态及缝洞结构特征起控制作用。其中断裂系统对油气充注具有建设性作用,古暗河与断裂匹配性好的区域为油气富集的有利目标区。

关键词:古暗河 缝洞结构 控制因素 奥陶系 碳酸盐岩 塔河油田西部

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Analysis on fracture-cave structure characteristics and its controlling factor of palaeo-subterranean rivers in the western Tahe Oilfield

ZHANG Juan, BAO Dian, YANG Min, HE Chengjiang, DENG Guangxiao, ZHANG Huitao

(Exploration & Production Research Institute, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

Abstract: The palaeo-subterranean river has strong heterogeneity and complex spatial structure, which bring difficulties in understanding on fracture-cave structure characteristics of palaeo-subterranean river in the western Tahe Oilfield and its controlling factors. To solve these problems, the well-seismic calibration technique and the spectral decomposition technique were utilized to identify and characterize the palaeo-subterranean rivers systemically in the western Tahe Oilfield. Results show that there are four major palaeo-subterranean rivers in the Ordovician carbonate rocks in the western Tahe Oilfield, presenting as complex reticular or dendrimer structure in the plane. From the dynamic and static data of drilling wells and well-seismic calibration, there are two types of horizontal distribution pattern for the karst caves of the palaeo-subterranean rivers, which are the ribbon-like cave with continuous distribution and the block-like cave with scattered distribution. In the vertical, it can be divided into three types from top to bottom: unfilled cave, sand and mud filled cave and breccia filled cave. The seismic reflection of favorable fracture-cave reservoirs in the seismic section is characterized by the first trough and peak under the reflection of middle-upper Ordovician top surface in “string”. The Palaeostructural form, fracture system and open entrances control the morphology of palaeo-subterranean rivers and the structural features of fracture-cave reservoirs. As the fault system plays a constructive role in the hydrocarbon charge, the development areas of the palaeo-subterranean river matching well with faults are favorable targets for hydrocarbon enrichment.

Key words: palaeo-subterranean river; fracture-cave structure; controlling factor; Ordovician; carbonate rocks; western Tahe Oilfield

收稿日期:2018-03-23。

作者简介:张娟(1985—),女,新疆乌鲁木齐人,工程师,从事碳酸盐岩油藏开发地质研究。联系电话:18999831875, E-mail: zjuan.xbsj@sinope.com。

基金项目:国家科技重大专项“塔里木盆地碳酸盐岩油气田提高采收率关键技术示范工程”(2016ZX05053),中国石化重大专项“塔河碳酸盐岩油藏降低自然递减技术”(ZDP17001)。

古暗河在塔河油田西部斜坡普遍发育,是碳酸盐岩缝洞型油藏重要的储集空间类型。鲁新便等将塔河油田碳酸盐岩古河道分为2类:一类为风化面表层受岩溶水溶蚀下切形成的明河河道;另一类为风化面内幕潜流和径流溶蚀形成的管道状暗河河道^[1]。胡文革等根据古河道缝洞系统纵向发育强弱及地下水运动方式和岩溶作用方式,将古河道岩溶剖面纵向上分为明河表层岩溶带和暗河内幕岩溶带^[2]。代冬冬等认为古暗河由内部潜流和径流溶蚀作用形成,通常发育在古潜水面附近,对其附近碳酸盐岩溶蚀改造作用显著^[3]。

古暗河在较强的水动力条件下,形成条带状古暗河岩溶管道,以缝洞型储层为主^[4]。在缝洞保存较好或未充填部位,缝洞有效空间大。钻遇塔河油田西部古暗河部位的油井显示,缝洞钻遇率达67%,其中累积产油量大于 5×10^4 t的油井占35%,表明古暗河是油气富集的有力部位,且塔河油田西部古暗河缝洞结构特征及控制因素尚不清楚。为此,开展古暗河识别与描述,厘清缝洞结构特征及控制因素,对古暗河开发具有重要意义。

1 古暗河识别及分布特征

1.1 古暗河识别

前人利用地震振幅属性提取、三维可视化雕刻等技术^[1,5-7],对古暗河识别和预测进行过研究,但由于古暗河非均质性强、空间结构复杂,近年来,频谱分解技术在古暗河研究中逐步得到重视,该技术既摆脱了对振幅能量类单一属性的依赖,又可最大限度的剔除噪音等干扰信息。

1.1.1 井震标定技术

利用井震标定技术可以明确古暗河段在地震上的响应特征。井震标定技术是建立井点信息与地震信息的关键技术,在标定过程中充分利用现有资料,通过单井及多井共同标定,明确井点实钻信息与地震反射特征间的对应关系。

以中—上奥陶统顶面(T_7^4)为标志层,对位于古暗河部位48口实钻井的钻井、录井、测井资料进行统计和井震标定,结果显示,古暗河主要发育在 T_7^4 之下第1个波谷底部及第1个波峰内, T_7^4 以下60~120 m具有强波谷、强波峰和条带状展布的特征,具有一定起伏,受整体构造控制。古暗河沿走向具有顺断裂发育、横向被断裂切割的特征。实钻缝洞地震反射特征以“串珠状”为主,局部古暗河交汇处可见杂乱反射特征,个别井钻遇古暗河的振幅能量较

弱,“串珠状”反射特征不明显(图1)。

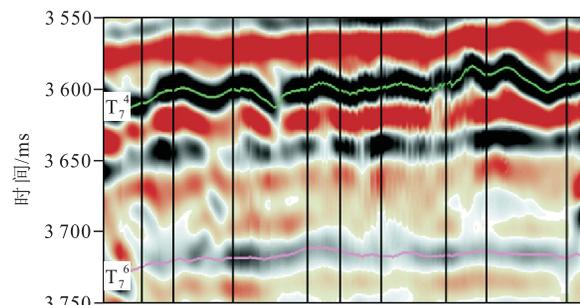


图1 塔河油田西部沿古暗河地震反射特征

Fig.1 Seismic reflection characteristics along the palaeo-subterranean river in the western Tahe Oilfield

1.1.2 频谱分解技术

频谱分解技术主要是对原始地震数据进行多种变换^[8-9],目前常用的频谱分解技术主要有离散傅立叶变换、连续小波变换、时间-频率连续小波变换和S-变换4种。利用频谱分解技术,可以将原始地震数据分成不同的频率数据体,在同一时窗内可分不同频率段浏览强能量反射特征,提取所有样点瞬时频率的平均值,以确定主要古暗河的平面分布特征。具体包括3个步骤:①分时窗进行频率分解。按照古暗河与 T_7^4 的发育深度,分为表层(T_7^4 之下0~60 m)、内幕1段(T_7^4 之下60~120 m)和内幕2段(T_7^4 之下120 m以下)3个深度段,分别进行频率提取。井点频率统计结果显示,表层及内幕1段井点频率主要为20~30 Hz,内幕2段井点频率主要为15~30 Hz,频带范围较表层、内幕1段稍宽(图2)。②分频率提取。古暗河主要发育在内幕1段。根据研究区内幕1段井点频率分布范围,分别提取20,25和30 Hz的瞬时频率,得到不同频谱能量分布(图3)。在同一频率下古暗河特征依然存在较大变化,这也反映同一条古暗河具有较强的非均质性。③瞬时频率提取。平均瞬时频率是时窗内所有样点瞬时频率的平均值。对内幕1段古暗河井点20,25和30 Hz的瞬时频率进行统计,剔除古暗河以外的无效瞬时频率数据,以刻画古暗河的发育形态。结果显示,瞬时频率可清晰表征古暗河外部轮廓,并精细刻画古暗河局部弯曲变化的形态。古暗河内部瞬时频率呈高低值交错、横向变化较快的特征。以位于研究区西部钻遇古暗河TH12333井为例,该古暗河中部瞬时频率为22.3~24.6 Hz,向南瞬时频率增加至29.5 Hz,表明古暗河内部存在非均质性。

1.2 古暗河分布特征

塔河油田西部奥陶系古暗河主要发育在剥蚀区。现代岩溶研究表明,可溶性岩石和可循环的水动力条件是形成古暗河的决定性因素^[10-13]。塔河油

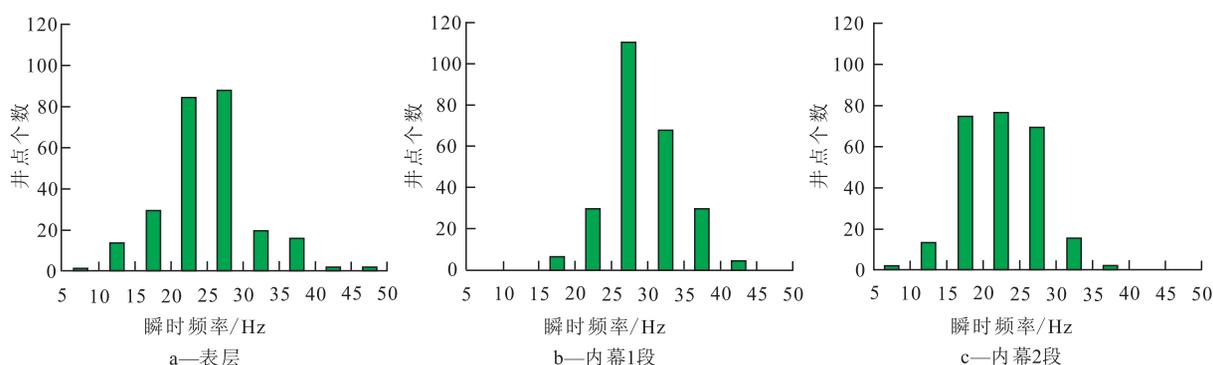


图2 塔河油田西部不同层段井点瞬时频率统计

Fig.2 Instantaneous frequency statistics of well points in different sections in the western Tahe Oilfield

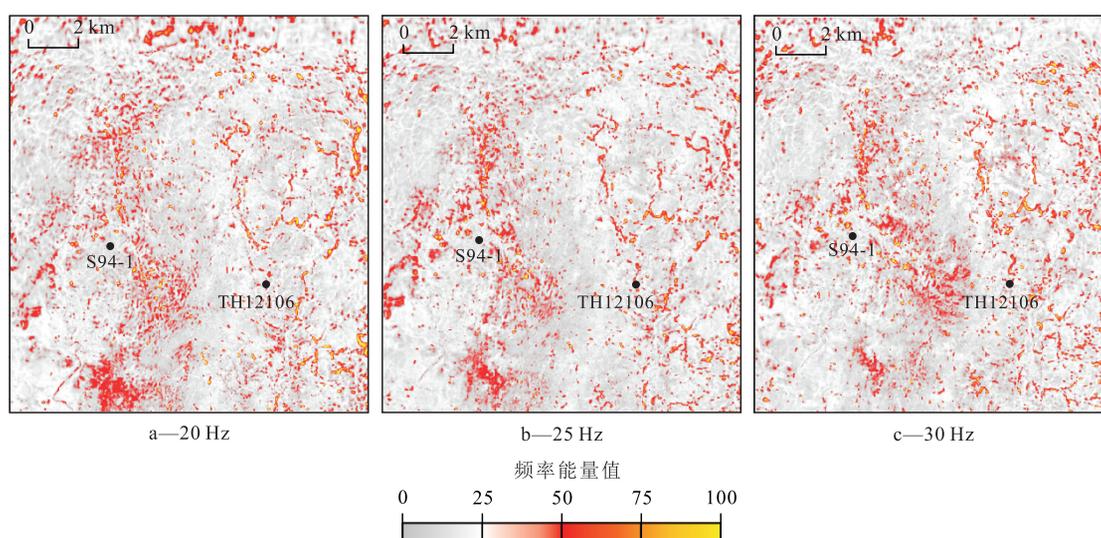


图3 塔河油田西部内幕1段不同频率能量平面分布

Fig.3 Energy decomposition in plane for different frequencies of Section1 in the western Tahe Oilfield

田西部上奥陶统剥蚀区在加里东期至海西期整体处于构造高部位,暴露时间长,岩溶作用强烈,是岩溶富水区^[14]。位于碳酸盐岩地表的大气降水及地表水系沿断裂、竖井等进入地下,在重力作用下沿断裂或破碎岩层流动,随着岩溶时间的推移,最终在碳酸盐岩内幕潜流、径流带形成管道状暗河河道。古暗河在构造低部位以岩溶泉、暗河出口等形式排泄至地表,这样就形成了沿碳酸盐岩可溶性岩层循环的水动力系统^[15-17]。

利用井震标定及频谱分解等技术,对研究区内古暗河进行系统刻画与识别。塔河油田西部奥陶系碳酸盐岩发育1—4号共4条古暗河,平面上呈复杂的网状或树枝状结构,除1号古暗河外,其余古暗河间存在多条支流沟通,整体形成一个巨大的古暗河网络。1号古暗河规模较小且相对孤立,呈近SN向展布,长度为6.3 km,发育1条NNE向展布、长度为2.8 km的支流,干流在S94-1井附近出露地表,向南汇入地表河,表明1号古河道形成时整体地貌形

态呈北部高、南部低的特征。2号古暗河主体呈近SN向展布,长度为12.6 km,在TH12106井附近出露地表,向南汇入地表河,局部发育EW向的支流,平面上构成了较为复杂的网状结构特征。3号古暗河主体呈NNE—SSW向,长度为11.4 km,同时交错发育多条近EW向支流,与断裂伴生发育,自东向西汇入3号古暗河干流。4号古暗河整体呈NE—SW向展布,发育多条NW,NE及SN向支流,在平面上形成树枝状结构(表1,图4)。

表1 塔河油田西部古暗河发育特征统计

Table1 Statistical analysis of development characteristics of palaeo-subterranean rivers in the western Tahe Oilfield

古暗河序号	走向	干流长度/km	视宽度/m	支流数量/条	古暗河顶部距T ₁ 界面深度/m
1	近SN	6.3	132~200	1	62.5~111.5
2	近SN	12.6	100~235	>1	51~69
3	NNE-SSW	11.4	130~340	>1	30~88
4	NE-SW	>5.9	94~180	>1	23.5~103

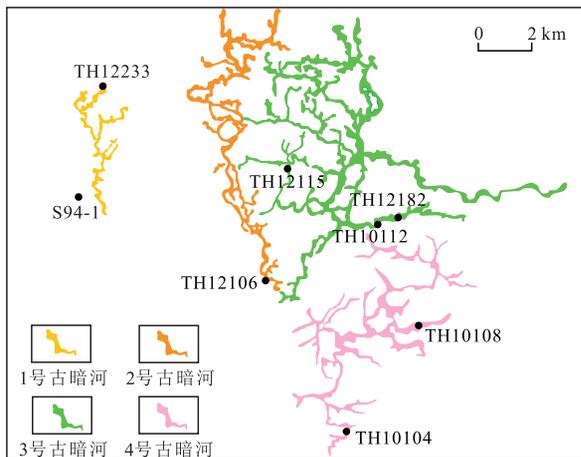


图4 塔河油田西部古暗河综合识别结果

Fig.4 Comprehensive identification results of palaeo-subterranean rivers in the western Tahe Oilfield

2 古暗河缝洞结构特征

2.1 纵向充填序列

通过对古暗河井点测井特征分析,将古暗河井段纵向上自上而下可分为未充填、砂泥质充填和角砾充填3种缝洞充填类型。位于3号古暗河上的TH12115井深度为5 907.5~6 014 m钻遇古暗河,洞穴高度达43.5 m,结合常规测井和成像测井可清晰看到纵向缝洞空间结构的变化:古暗河顶部深度为5 970.5~5 973 m为未充填缝洞,表现为低密度、低电阻率和高中子孔隙度的特征,成像测井显示为暗色的团块分布。深度为5 973~5 992 m为砂泥质充填缝洞,表现为高自然伽马、低电阻率和低密度的特征,在成像测井上可见明显的水平层理。5 992~6 014 m为角砾充填缝洞,自然伽马介于泥岩与灰岩之间,其值为30~60 API;电阻率为3~70 Ω·m,成像测井可见小块角砾岩、砂泥质混积段与大块砾岩交互堆积(图5)。结合实钻井特征,建立古暗河缝洞充填类型常规测井的识别标准(表2),其中未充填缝洞多在钻井过程中发生放空漏失,后期难以进行常规测井或成像测井;砂泥质充填和角砾充填缝洞可利用常规测井或成像测井进行有效识别。

2.2 平面缝洞结构特征

结合古暗河部位实钻井静、动态资料和地球物理技术,对古暗河缝洞结构发育情况进行综合判别。首先,依据实钻井揭示的充填情况及实际生产状况,综合判别实钻井的缝洞空间发育程度,以3号古暗河近EW向TH12182支流为例,古暗河上的TH10112井在5 820~5 834.6 m钻遇充填和部分充填缝洞,投产后稳定产油量为35 t/d,累积产油量为4×

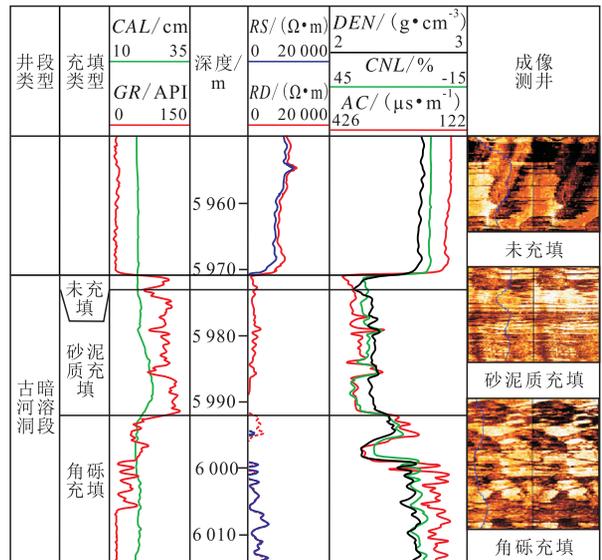


图5 TH12115井古暗河测井特征

Fig.5 Well logging features of palaeo-subterranean river drilled by Well TH12115

表2 古暗河缝洞充填类型常规测井识别标准
Table2 Conventional identification standards for filling types of fracture-caves in palaeo-subterranean rivers

充填类型	识别标准
未充填	低密度(接近钻井液)、低电阻率(接近钻井液)、高中子孔隙度,中子孔隙度达到30%以上
砂泥质充填	高自然伽马,一般为45~100 API; 低电阻率,一般小于2 Ω·m;低密度
角砾充填	自然伽马介于泥岩与灰岩之间,一般为30~60 API;电阻率一般为3~70 Ω·m

10⁴ t,地层供液能力充足,表明TH10112井区有效储集空间发育,综合判断为未充填缝洞型储层(图6)。其次,通过对钻遇古暗河井点的储集空间发育情况的大量统计,确定利用波阻抗反演、古暗河条带内的能量及频率的差异,能够较好地表征古暗河的充填性。古暗河条带内低阻抗、强能量及中高频率部位储集空间更为发育、缝洞保存较好;反之,高阻抗、弱能量及低频率部位储集空间发育程度差,缝洞充填或垮塌可能性大。

基于上述方法,可将塔河油田西部古暗河平面上的缝洞结构分为2类:一类基本为连续发育的条带状古暗河,局部被弱溶蚀段或充填段分割,如3号古暗河近EW向TH12182支流,综合评价结果显示古暗河有效储集空间较为连续,主要在古暗河拐弯及末端分支位置充填(图6);另一类古暗河的储集空间发育程度较低,保存程度较差,缝洞结构空间被严重分割成不连续发育的团块状,如1号古暗河,综合评价结果显示古暗河充填较为严重,被分隔为段塞状,仅在局部发育未充填的有效缝洞(图7)。

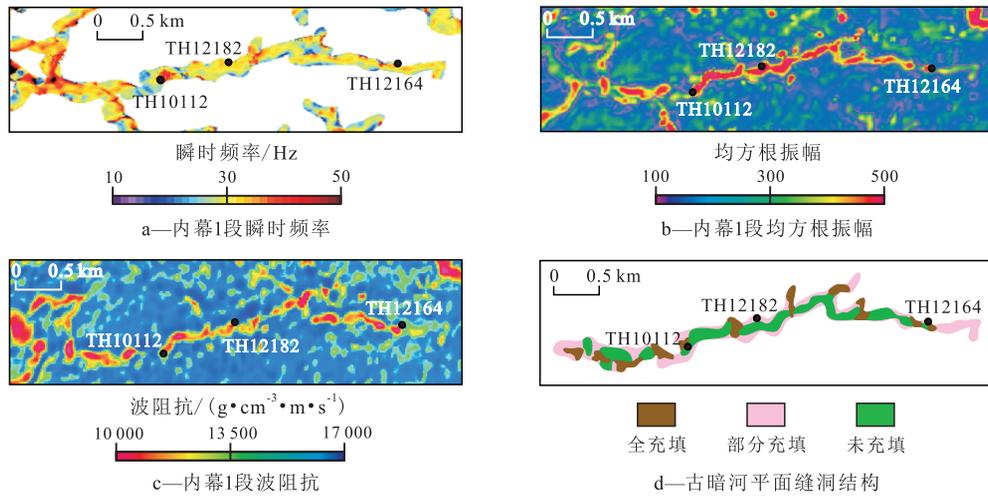


图6 3号古暗河 TH12182 段平面缝洞结构预测及结果

Fig.6 Prediction result of fracture-cave structure in plane for No.3 palaeo-subterranean river in Section TH12182

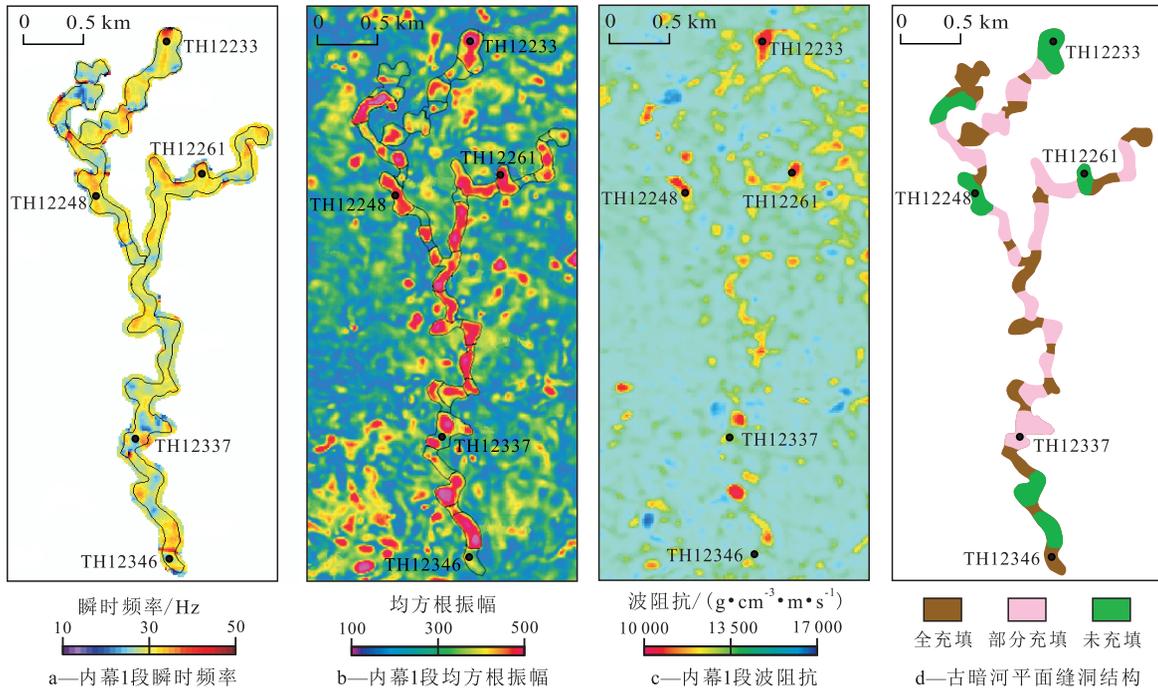


图7 1号古暗河平面缝洞结构预测及结果

Fig.7 Prediction result of fracture-cave structure in plane for No.1 palaeo-subterranean river

3 古暗河控制因素

3.1 古构造形态

古构造形态决定了古河道的走向。塔河油田西部古暗河主要发育在中奥陶统一间房组和中一下奥陶统鹰山组,是以海西期为主的复合岩溶产物。在海西早期中一下奥陶统顶面构造表现为北部和东部(阿克库勒凸起核部)高的构造格局,在该构造格局控制下东部及南部发育SN向及EW向2大流势;西部以SN向流势为主^[18]。目前研究区古河道

系统的平面展布特征与海西期的构造面貌较为吻合。

3.2 断裂系统

前人研究认为,节理和裂缝对古暗河管道早期定型起主导作用,其总体延伸方向往往是纵张节理和横张节理的方向^[19-22]。从研究区古暗河缝洞结构解剖来看,断裂系统在古暗河的发育及古暗河管道状缝洞结构的保存过程中起到的主要是破坏作用,表现在4个方面:①随着古暗河的发育,断裂将早期古暗河切断或切割,阻碍古暗河的继续发育,导致部分古暗河停止发育或独立成2个古暗河管道。②

断裂系统造成古暗河的局部垮塌、形成落水洞,导致入口处以下的古暗河充填风险增加。③与古暗河走向一致的断裂大规模活动,对早期形成的古暗河造成大范围的破坏,古暗河段仅局部得以保存。④后期断裂活动对已有古暗河进行切割,造成古暗河被明显错断,破坏了早期的连通状态^[19-24]。研究区西部的1号古暗河受到不同期次断裂的破坏作用,分割形成多个相对独立的部分,横向连续性较差(图1,图7)。

断裂对古暗河的形成及其管道储集空间的保存来说虽然是破坏性的,但对古暗河后期充注成藏却是不可或缺的。古暗河一般发育深度较大,除地下暗河的出入口外,是一个相对封闭的储集空间,不利于油气成藏。而与古暗河有沟通的断裂系统作为非常重要的油气输导通道,更有利于其成藏。与断裂匹配性好的古暗河段均取得了较好的开发效果,如1号古暗河上的TH12233等井,平均单井累积产油量超过 5×10^4 t。而断裂沟通条件差的古暗河油气富集程度较差。因此,断裂对古暗河的发育及储集空间的保存整体起破坏作用,但对其油气成藏具有积极作用。

3.3 开放性入口

大量实钻井资料揭示,开放性入口及与地表沟通通畅的古暗河入口处,当上覆碎屑岩地层沉积时,泥砂会在入口及附近入口端优先充填,对有效缝洞空间的破坏较为严重^[25-26],在常规测井及成像测井上可见洞底垮塌角砾岩上堆积的外来砾石或砂泥质沉积。

4 结论

研究区内共识别出4条古暗河,平面上呈复杂的网状或树枝状结构,纵向上发育在中一下奥陶统顶面以下60~120 m。古暗河缝洞结构平面上可分为连续发育的条带状和不连续发育的团块状2大类,纵向上自上而下分为未充填、砂泥质充填和角砾充填3种缝洞充填类型。古构造形态、断裂系统和开放性入口对古暗河形态及缝洞结构特征起控制作用。古构造形态决定了古河道的走向,断裂系统对古暗河储集空间起破坏性作用,但对油气充注起建设性作用。开发实践证明,古暗河与断裂匹配性好的区域为油气富集的有利目标区。

参考文献:

[1] 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.

[2] 胡文革,鲁新便.塔河碳酸盐岩缝洞型储集体的分类表征技术[C].西安:油气田勘探与开发国际会议,2015.

HU Wenge, LU Xinbian. Characterization and classification of carbonate fractured-vuggy reservoirs in Tahe Oilfield[C]. Xi'an: International Field Exploration and Development Conference, 2015.

[3] 代冬冬,房启飞,万效国,等.哈拉哈塘地区奥陶系岩溶古河道识别及其成藏意义[J].岩性油气藏,2017,29(5):89-96.

DAI Dongdong, FANG Qifei, WAN Xiaoguo, et al. Identification of Ordovician karstic paleochannels and its accumulation significance in Halahatang area[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(5): 89-96.

[4] 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.

[5] 郭川,田亮,鲍典.塔河油田12区奥陶系油藏东部区域岩溶古河道识别及其意义[J].石油地质与工程,2016,30(1):26-31.

GUO Chuan, TIAN Liang, BAO Dian. Regional karst old channel identification and its significance of eastern Ordovician reservoir of block-12 in Tahe oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2016, 30(1):26-31.

[6] 高厚强,徐颖,邵文潮,等.逆时偏移技术在碳酸盐岩缝洞体成像中的应用[J].中国石油勘探,2017,22(1):99-105.

GAO Houqiang, XU Ying, SHAO Wenchao, et al. Application of reverse-time migration technology in imaging of fractures and cavities in carbonate reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1):99-105.

[7] 王延光.地震叠前深度偏移技术进展及应用问题与对策[J].油气地质与采收率,2017,24(4):1-7.

WANG Yanguang. Progress of seismic prestack depth migration and its application problems and solution[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(4):1-7.

[8] 冯智慧,要丹,陈树民,等.频谱分解技术在敖南地区致密砂体预测中的应用[J].大庆石油地质与开发,2016,35(6):132-137.

FENG Zhihui, YAO Dan, CHEN Shumin, et al. Application of spectral decomposition technique in Aonan dense sandbody prediction[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(6):132-137.

[9] 张璐.地震频多属性融合在小断层解释中的应用[J].特种油气藏,2017,24(6):44-47.

ZHANG Lu. Application of seismic frequency-divided multi-tribute fusion method to small faults interpretation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(6):44-47.

[10] 朱学稳.地下河洞穴发育的系统演化[J].云南地理环境研究,1994,6(2):7-16.

- ZHU Xuewen. Systematic evolution of underground river cavern development [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 1994, 6(2): 7-16.
- [11] 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.
- [12] 孙勤华, 刘晓梅, 张虎权, 等. 古河道河床侵蚀深度自动识别技术[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(增刊1): 168-173.
- SUN Qinhu, LIU Xiaomei, ZHANG Huquan, et al. Automatic estimation of erosion depth of ancient river [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(Supplement1): 168-173.
- [13] 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, 15(1): 17-25.
- YANG Mingde. Characteristics and hydrodynamic conditions of cave development in karst gorge districts [J]. *Carsologica Sinica*, 1998, 15(1): 17-25.
- [14] 周江羽, 吕海涛, 林忠民, 等. 塔河油田奥陶系岩溶作用模式及控制因素[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(6): 547-550.
- ZHOU Jiangyu, LÜ Haitao, LIN Zhongmin, et al. Karstification models of the Ordovician carbonates and their influential factors in the Tahe Oilfield, the Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(6): 547-550.
- [15] 刘伟方, 郑多明, 王洪求, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩潜山古水系研究方法及其意义[J]. *海相油气地质*, 2013, 18(4): 75-81.
- LIU Weifang, ZHENG Duoming, WANG Hongqiu, et al. Research methods and the significance of palaeodrainage patterns in Ordovician buried-hill carbonate reservoirs, Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(4): 75-81.
- [16] 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 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.
- [17] 李宗杰, 韩革华, 张旭光, 等. 塔河地区碳酸盐岩储层预测技术方法研究[C]//塔里木盆地北部油气田勘探与开发论文集. 北京:地质出版社, 2005.
- LI Zongjie, HAN Gehua, ZHANG Xuguang, et al. Research on prediction technology and method for Tahe carbonate reservoir [C]// Oil and gas field exploration and development in northern Tarim Basin. Beijing: Geology Publishing House, 2005.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 吴国强, 张丽娟, 杨振周, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区奥陶系储层古岩溶作用及其与裂缝的关系[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(6): 790-796.
- WU Guoqiang, ZHANG Lijuan, YANG Zhenzhou, et al. Paleokarstification of the Ordovician carbonate reservoirs and the relationship with fractures in the Halahatang area of Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(6): 790-796.
- [21] 韩杰, 洪涛, 朱永峰, 等. 轮古油田奥陶系潜山洞穴型储层发育特征及油气分布控制因素[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(5): 1-8.
- HAN Jie, HONG Tao, ZHU Yongfeng, et al. Characteristics of Ordovician buried-hill cave reservoir and controlling factors of petroleum distribution of Lungu oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(5): 1-8.
- [22] 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.
- [23] 马晓强, 侯加根, 胡向阳, 等. 塔里木盆地塔河油田奥陶系断控型大气水岩溶储层结构研究[J]. *地质论评*, 2013, 59(3): 521-532.
- MA Xiaoliang, HOU Jiagen, HU Xiangyang, et al. Framework of fault-controlled meteoric palaeokarst Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. *Geological Review*, 2013, 59(3): 521-532.
- [24] 和虎, 冯海霞, 蔡忠贤. 塔中地区中下奥陶统鹰山组表生岩溶分布特征及主控因素[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(2): 17-23.
- HE Hu, FENG Haixia, CAI Zhongxian. Distribution characteristics of supergene karst and dominated factors analysis in Yingshan Formation of Lower-Middle Ordovician in Tazhong area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(2): 17-23.
- [25] 蔡忠贤, 刘永立, 刘群. 塔河油田中下奥陶统顶部岩溶古水系对接现象及其意义[J]. *现代地质*, 2010, 24(2): 273-278.
- CAI Zhongxian, LIU Yongli, LIU Qun. The appearance and significance of palaeo-drainage systems connection in the top of Lower-Middle Ordovician in Tahe Oilfield [J]. *Geoscience*, 2010, 24(2): 273-278.
- [26] 曹建文, 夏日元, 张庆玉, 等. 潮湿环境下典型碳酸盐岩缝洞系统充填模式探讨[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(1): 56-62.
- CAO Jianwen, XIA Riyuan, ZHANG Qingyu, et al. Typical filling models of a fractured-vegy system in carbonate rocks under a moist environment [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(1): 56-62.