

# 塔里木盆地轮古潜山暗河发育特征 及其与油气富集的关系

罗泉<sup>1</sup>, 刘俊锋<sup>1</sup>, 韩杰<sup>1</sup>, 张磊<sup>2</sup>, 彭涛<sup>1</sup>, 程林<sup>3</sup>

1 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院; 2 中国石油东方地球物理公司研究院库车分院

3 中国石油塔里木油田分公司天然气事业部

**摘要** 综合地震及钻井、录井、测井、生产动态等资料,对塔里木盆地轮古奥陶系潜山的暗河进行了精细刻画,共识别出暗河 174 条,暗河面积达 70.37 km<sup>2</sup>,并阐明了轮古潜山暗河明显受断裂控制的发育规律。同时,将暗河系统分为暗河主河道、暗河分支河道和暗河洞顶缝,并根据河道规模大小及充填程度,进一步将暗河主河道分为洞大沟深区、廊道区和淤塞区;根据分支河道汇入主河道的垂向角度大小,将暗河分支河道分为垂降型、斜坡型和平缓型。统计分析及钻探实践表明:暗河主河道的洞大沟深区、分支河道的垂降型和斜坡型,以及暗河洞顶缝是最有利的岩溶储层发育区,也是油气富集有利场所。

**关键词** 暗河; 岩溶储层; 碳酸盐岩; 油气富集; 奥陶纪; 轮古潜山; 塔里木盆地

**中图分类号**: TE122.2 **文献标识码**: A

## 0 引言

关于塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩岩溶储层的研究一直是石油地质领域的热点和难点,专家学者针对岩溶储层的发育规律<sup>[1-5]</sup>、刻画识别<sup>[6-9]</sup>,及其与油气富集的关系<sup>[10-11]</sup>和开发对策<sup>[12-14]</sup>进行了系统广泛的研究。其中,鲁新便等<sup>[11]</sup>于2015年提出了“断溶体”油藏等相关概念,并深化了碳酸盐岩岩溶储层的认识,认为岩溶储层的发育与断裂密切相关,断裂破碎带附近是岩溶储层发育的有利区域,并有效指导了相关油气藏的勘探开发,这个认识也得到了业内广泛认可。由于不同地区的地质背景各不相同,这决定了不同地区碳酸盐岩的岩溶作用和岩溶储层的发育规律有各自的特点,因此,除了研究它们的共性,搞清楚它们的差异性显得尤为重要。

在轮古奥陶系潜山区,对岩溶储层发育特征的认识不足,是制约该地区油气勘探开发的关键因素。韩杰等<sup>[10]</sup>于2016年提出轮古潜山以洞穴型储层为主,并将洞穴型储层细分为山高洞大型和暗河连通型,并提出这类储层的发育与高效井分布密切相关的观点,但

是未对暗河连通型储层做进一步细分和刻画描述。本次研究在充分吸收前人认识的基础上,对轮古潜山碳酸盐岩岩溶储层的发育特点,特别是对暗河的分布作了精细的刻画,并且对暗河与油气富集的关系进行了深入研究,以期指导研究区今后的油气开发工作。

在轮古地区,由于受到早海西期多次构造抬升作用,造成奥陶系碳酸盐岩上覆的泥盆系、志留系及中上奥陶统被剥蚀,同时受大气淡水淋滤作用的影响,形成了古潜山岩溶地貌,岩溶储层表现为暗河连通型和孤立洞穴型,而尤其以暗河连通型为主。暗河,即地下河,是指由岩溶管道、岩溶洞穴、岩溶裂隙、岩溶裂缝和岩溶孔隙等多种岩溶孔隙介质体组成的复合体系<sup>[15-16]</sup>。本次研究将暗河系统细分为暗河主河道、暗河分支河道和暗河洞顶缝。其中,暗河主河道在平面上延伸距离较长,规模较大,但所处的构造位置相对较低,从而容易被砂泥质充填;暗河分支河道在平面上延伸距离较短,但所处的构造位置相对较高,常以一定方式汇入到主河道中,是有利的岩溶储层发育区。暗河河道在地震剖面上表现为连续的强反射特征,因此相对容易识别;另外,由于暗

收稿日期: 2017-08-17; 改回日期: 2018-04-14

本文受中国石油科技重大专项“塔里木油田勘探开发关键技术研究与应用”(编号:2014E-21-05)资助

罗泉: 1991年生,工程师,2015年毕业于中国石油大学(北京),获矿产普查与勘探专业硕士学位,现从事碳酸盐岩石油地质研究。通信地址: 841000 新疆维吾尔自治区库尔勒市石化大道26号; E-mail: aoeix1541@126.com

河洞顶缝的形成与河道的形成密切相关,为统一整体,所以将其同样归为暗河系统,但是暗河洞顶缝在地震剖面上较难判识,它分布在强反射河道的上方。

断溶体,即沿深大断裂带发育一定规模的破碎带,经多期岩溶水沿断裂下渗或局部热液上涌,致使破碎带内断裂、裂缝被溶蚀改造而形成的柱状溶蚀孔洞储集体<sup>[11]</sup>。而在轮古潜山区,暗河的发育分布多与断裂相伴生,暗河即为“断溶体”在轮古潜山区的表现形态。因此,开展对轮古潜山暗河的精细刻画和

发育特征的研究,将有助于寻找有利的岩溶储层发育区和油气富集区,从而提高研究区碳酸盐岩油气藏的开发效果。

## 1 区域构造背景

轮古潜山位于塔里木盆地塔北隆起轮南低凸起的中部,整体表现为一大型断背斜,可划分为轮南断垒带、桑塔木断垒带及北部斜坡带、西部斜坡带、南部斜坡带、中部斜坡带和东部斜坡带(图1)。

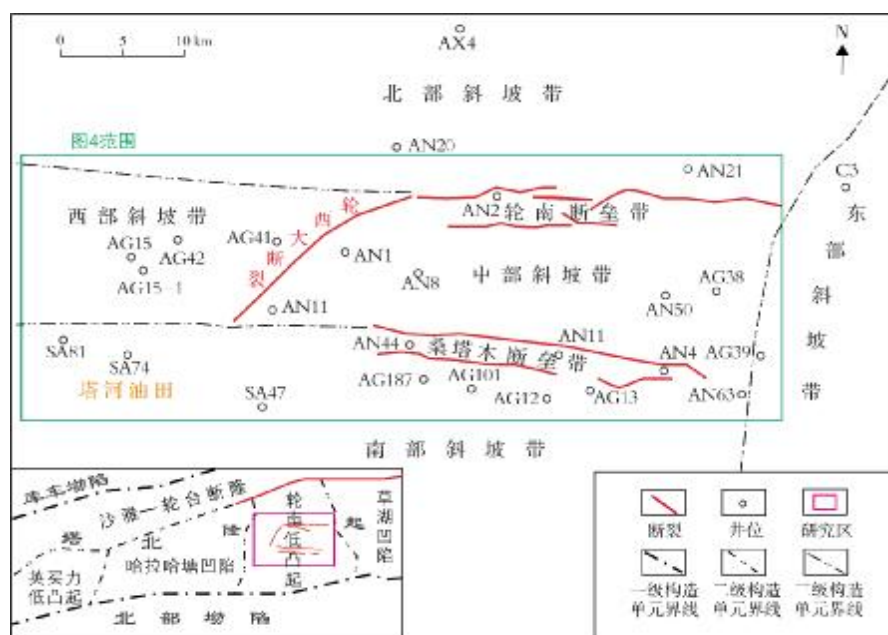


图1 塔里木盆地轮古潜山构造位置及区带划分

轮古潜山是一个古生界残余古隆起,经历了多期构造运动<sup>[17-18]</sup>。加里东晚期,由于区域构造抬升不均衡,使得轮南地区形成了一大型的南倾斜坡。海西早期,由于北西—南东方向区域性挤压运动,在大斜坡的背景上形成了一个北东—南西走向的大型背斜,背斜高部位发育了北东—南西走向的轮西大断裂。海西中晚期—印支期以区域上的强烈挤压应力和东西向大型断裂活动为特点。海西晚期,石炭系逐层向潜山超覆,形成一个盖层厚度超过500m的大型披覆背斜。海西末期,在南北向区域挤压应力的作用下,形成了轮南断垒带和桑塔木断垒带,轮南断垒带高部位上的石炭系被完全剥蚀。印支期,在北东—南西向剪切应力的作用下,轮南断裂和桑塔木断裂继续活动,并形成了一系列共轭剪切走滑断裂。燕山期—喜马拉雅早期是一个构造应力转化时期,受库车坳陷沉降作用

的影响,轮南地区发育一系列北东向的区域性拉张断裂。喜马拉雅中晚期,轮南地区相对稳定,断裂停止活动。总而言之,轮古潜山经历了多期次的构造活动,导致断裂十分发育,而断裂是岩溶水在岩层中流动的良好通道,进而影响着研究区的岩溶储层,特别是暗河型岩溶储层的广泛发育和分布。

## 2 暗河判识方法

### 2.1 利用地震资料判识暗河

轮古潜山区的地震资料已经全覆盖,本次研究主要依据地震资料对暗河河道进行了判识,具体方法可分为4个步骤:首先,利用地震振幅属性提取振幅异常信息(图2a),从平面属性结果中发现符合暗河地质特征的线性强振幅响应;其次,沿线性振幅

异常区切过井的地震剖面(图2b),结合构造地质背景和钻井标定,明确暗河在地震剖面上呈强反射特征,据此对暗河河道进行判识;然后,利用缝洞空间地震雕刻技术,确定暗河在空间上的展布情况

(图2c);最后,结合平面地震属性、缝洞空间雕刻结果,手工绘制暗河边界,根据暗河的平面展布特征及空间构造位置关系来确定暗河主河道、分支河道(图2d)。

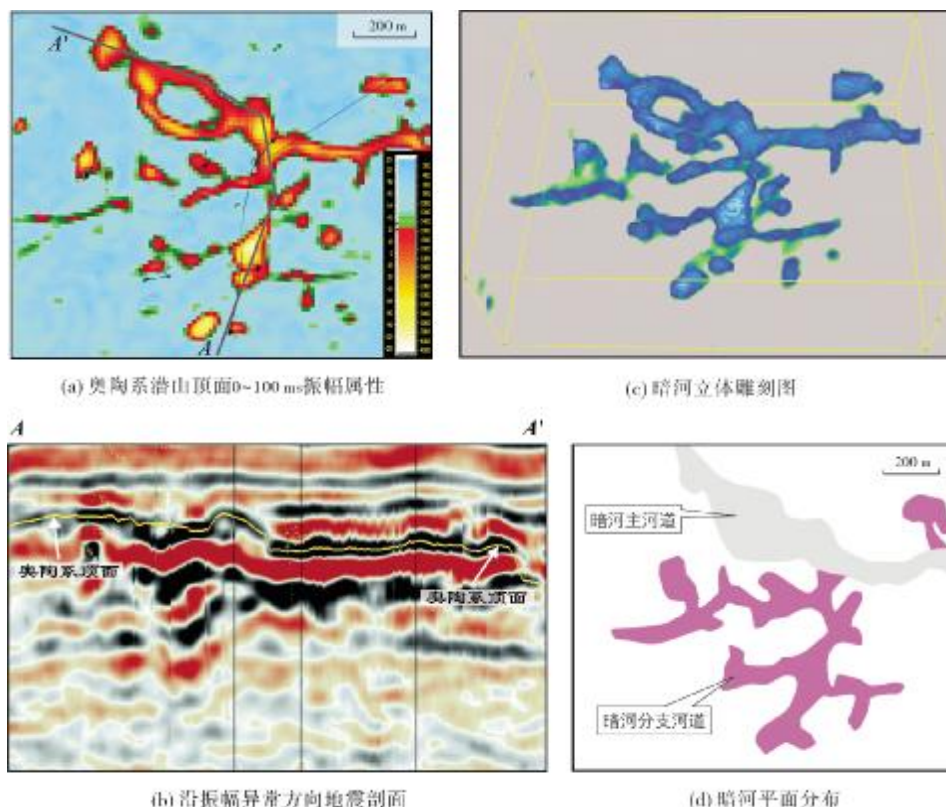


图2 塔里木盆地轮古潜山地震资料判识暗河步骤

## 2.2 利用钻井资料验证暗河

在利用地震资料判识暗河的同时,还利用钻井的动态、静态资料对判识结果进行验证。一般情况下,对于钻遇与暗河相关岩溶储层的井,在钻井过程中常会发生放空或漏失;在测井曲线上可观察到岩溶孔洞、裂缝的异常响应(或者溶洞被砂泥质充填的异常响应)。例如,当溶洞未被砂泥质充填时,测井上主要表现为电阻值、密度值明显减小,而声波时差、中子值增大(图3);如果溶洞被泥质充填,则自然伽马值变大;如果溶洞富含油气,则在总烃、甲烷含量曲线上表现为高值。另外,在目的层段的岩心上也可观察到明显的岩溶孔洞或裂缝,在生产动态上则表现为早期高一中产,后期产量迅速下降的特点。

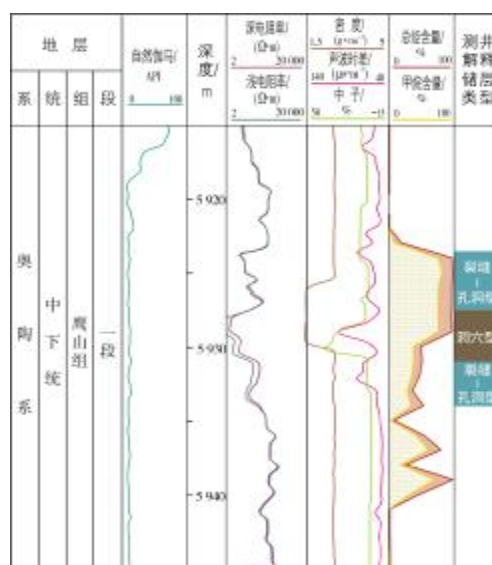


图3 塔里木盆地轮古潜山AG15-1井奥陶系综合柱状图

### 3 暗河发育特征及其与油气富集的关系

以地震资料识别为主、钻井资料验证为辅,完成了对轮古潜山区暗河的精识别和刻画,共刻画暗河174条,暗河面积达70.37 km<sup>2</sup>。根据区域构造演化背景及断裂规模大小,将轮古潜山区断裂划分为2期3级:

加里东中晚期主要为北东向Ⅱ级断裂及其伴生断裂,海西期形成了轮西大断裂等Ⅰ级断裂及大部分Ⅲ级断裂。根据断裂解释成果,发现暗河的发育受Ⅱ级、Ⅲ级断裂控制明显,很多暗河的走向与Ⅱ级、Ⅲ级断裂的走向具有高度的一致性(图4),这进一步证实了暗河即是断溶体在轮古潜山受断裂控制的一种表现形态。

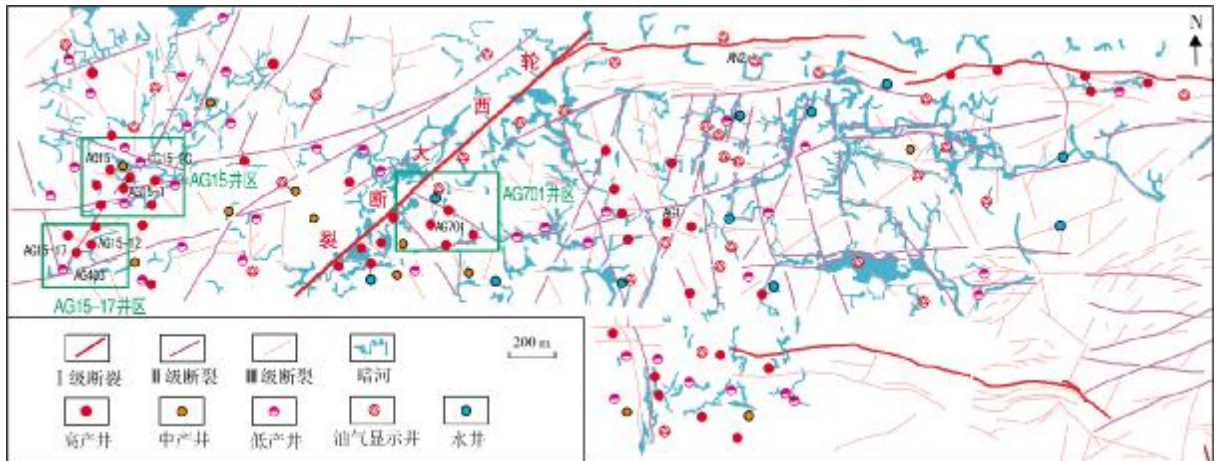


图4 塔里木盆地轮古潜山断裂与暗河叠合图

在对轮古潜山区暗河精细刻画的基础上,开展了大数据统计分析。分析结果表明,轮古潜山区共钻井214口,而钻遇与暗河相关岩溶储层的井达139口(其中钻遇主河道36口、钻遇分支河道65口、钻遇洞顶缝38口),占比64.9%,且钻遇暗河的井的总产量占全区总产量的70.9%。可见,暗河是十分重要的钻探地质目标,对研究区的产能建设具有十分重要的作用。

通过对钻遇与暗河相关岩溶储层的139口井的统计分析,结果表明:在暗河系统中,各区域的开发效果存在差异(图5),钻探暗河分支河道的井开发效果最好,在分支河道上原油累计产量大于 $1 \times 10^4$  t的井数超过50%,其中产量大于 $2 \times 10^4$  t的井数达到32.3%;而钻探暗河主河道的井的开发效果则相对较差,在主河道上原油累计产量大于 $2 \times 10^4$  t的井数仅13.9%,而失利井高达38.9%,钻探暗河洞顶缝的井开发效果居中。同时,对失利井的失利原因也进行了分析,可将钻探失利原因归为3类:储层不发育、流体不落实或地层出水、钻井工程技术问题。统计结果表明:在暗河主河道上钻探失利以储层原因为主,而在分支河道上钻探失利以流体原因为主(图6)。

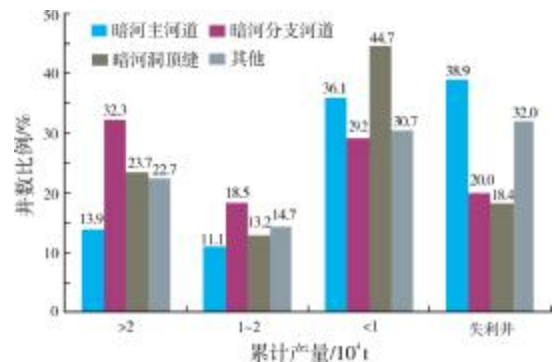


图5 塔里木盆地轮古潜山暗河系统产量分布统计

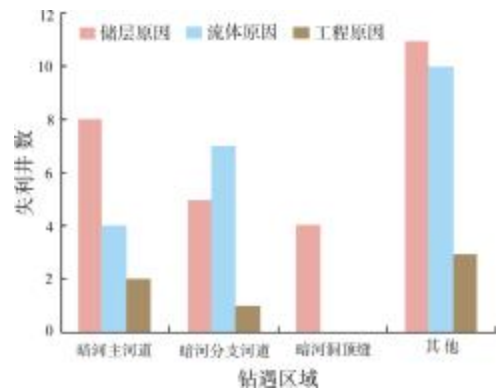


图6 塔里木盆地轮古潜山暗河系统失利井原因统计

### 3.1 暗河分支河道特征及其与油气富集的关系

暗河分支河道的开发效果整体上比暗河主河道的要好,这主要是因为暗河主河道所处的构造位置较低、地势平缓,故水动力较弱,易被砂泥质等充填,而暗河分支河道所处的构造位置相对较高,往往保存有良好的岩溶储集空间。

以AG15井区为例,AG15-2井靶点位于主河道上,原油累计产量仅有 $0.11 \times 10^4$  t,低产的主要原因是储层不发育;而邻井AG15-1井、AG15-3井的靶点位

于分支河道上,原油累计产量分别达到了 $23.10 \times 10^4$  t、 $6.34 \times 10^4$  t。虽然这几口井之间的井距相差不大,也位于同一岩溶缝洞系统,但原油累计产量却相差巨大。整体来看,分支河道的岩溶储层明显优于主河道,但并不是钻遇分支河道上的井开发效果就一定好,如AG15-2C井,虽然靶点也位于分支河道上(图7),但原油累计产量仅 $0.14 \times 10^4$  t。分析认为,造成这种分支河道上产量有差异的原因是与岩溶储层的发育及充填程度密切相关,这又与暗河分支河道的类型有关。

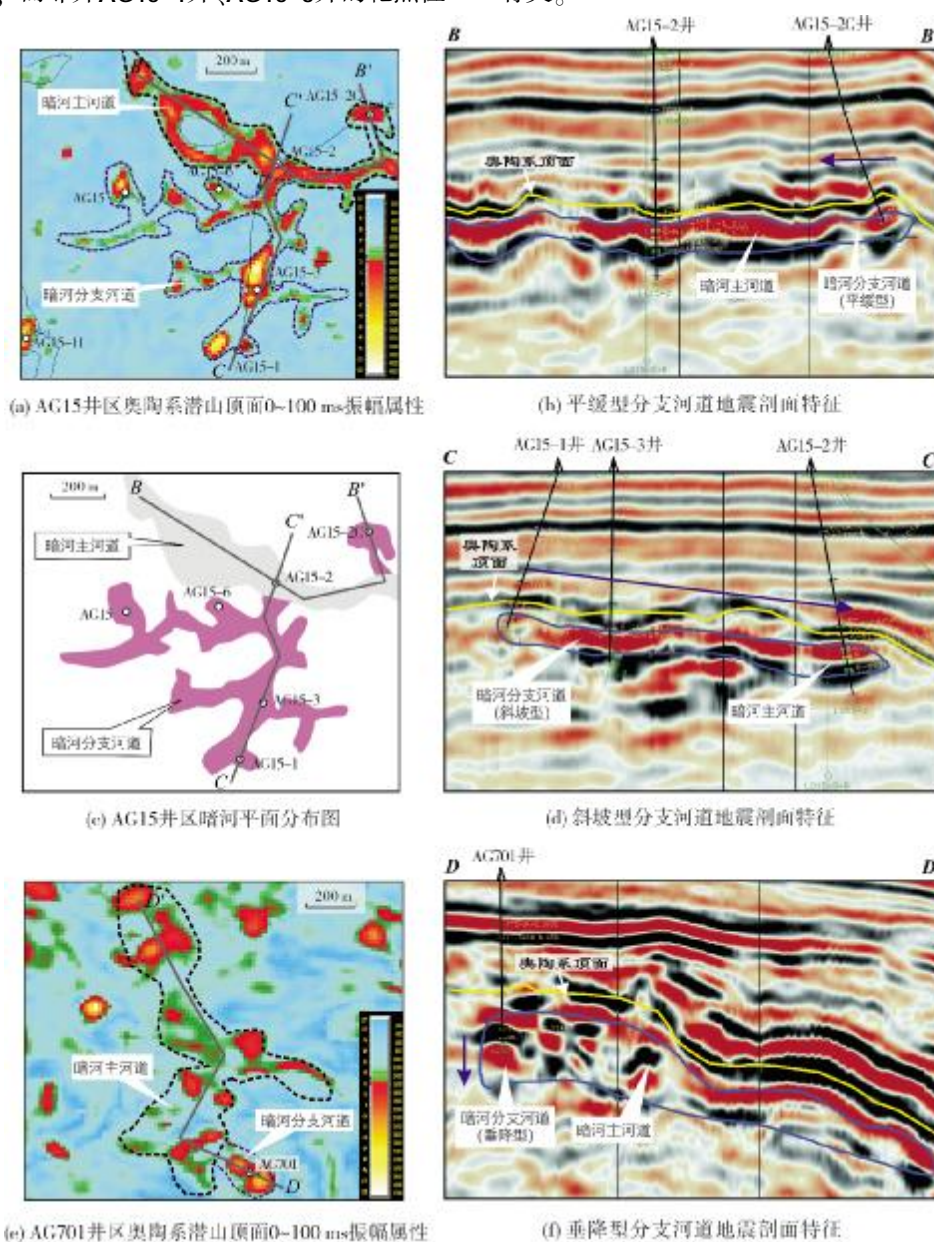


图7 塔里木盆地轮古潜山暗河分支河道3种类型的平面及剖面特征

本文根据暗河分支河道汇入主河道在垂向上的角度大小,将其分为平缓型(垂向角度小于 $30^\circ$ )(图7b)、斜坡型(垂向角度在 $30^\circ\sim 45^\circ$ 范围)(图7d)和垂降型(垂向角度大于 $45^\circ$ )(图7f)。不同类型分支河道的岩溶储层发育特征存在差异:对于平缓型分支河道,如AG15-2C井的靶点所处位置(图7a,7b),由于地势平缓,水动力较弱,与暗河主河道类似,易发生充填作用,导致储集空间有限,AG15-2C井的原油累计产量也很低;而斜坡型分支河道,如AG15-1井、AG15-3井靶点所处的分支河道以一定角度汇入主河道(图7c,7d),使得水动力较强,不易发生充填,因此岩溶储层更为发育,这两口井的原油累计产量也高;垂降型分支河道,即以落水洞的形式作为入水口直接汇入主河道,如AG701井靶点所处位置(图7e,7f),由于水动力强,极不易发生充填,导致储集条件优越,该井的原油累计产量达 $7.21\times 10^4\text{t}$ 。

### 3.2 暗河主河道特征及其与油气富集的关系

钻遇暗河主河道的井开发效果整体较差,主要是因为主河道水动力较弱,从而容易发生充填,导致储层不发育。但同时也注意到,少量钻遇暗河主河道的井仍然能获得高产,认为这与钻遇暗河主河道的区域位置有关。根据主河道河道规模的大小及充填程度,

可将主河道分为洞大沟深区、廊道区和淤塞区。

洞大沟深区纵向高差大,一般大于 $10\text{m}$ ,在地震剖面上表现为强振幅异常区,且纵向变化范围大,具有“上凸下凹”的特点,它是长期的岩溶改造作用的结果,可以作为暗河主河道局部的“蓄水库”,同时洞大沟深区也较难发生完全充填,从而可以保存良好的油气储集空间。

廊道区是主河道的主体部分,是连接主河道上相邻洞大沟深区之间的狭窄长廊,在地震剖面上表现为较为连续的强振幅,且延伸较长,纵向分布较为集中。廊道区多发生半充填,从而导致储集空间有限。

淤塞区是主河道上相对更为狭窄的长廊,它容易被砂泥质等完全充填,这导致整个河道的连通性减弱,又因为仅从地震剖面上往往难以判别淤塞区,从而增加了在主河道上部署开发井位的风险。

统计结果表明:在主河道获得高产的井,靶点均位于洞大沟深区,如AG15-12井、AG15-17井(图8),原油累计产量分别达到 $4.05\times 10^4\text{t}$ 、 $2.01\times 10^4\text{t}$ ;AG403井的靶点位于主河道廊道区,储集规模相对较小,原油累计产量仅为 $0.89\times 10^4\text{t}$ ;而如果钻在主河道淤塞区,就会直接导致钻探失利。所以,在暗河主河道上部署开发井位,洞大沟深区是最有利的目标。

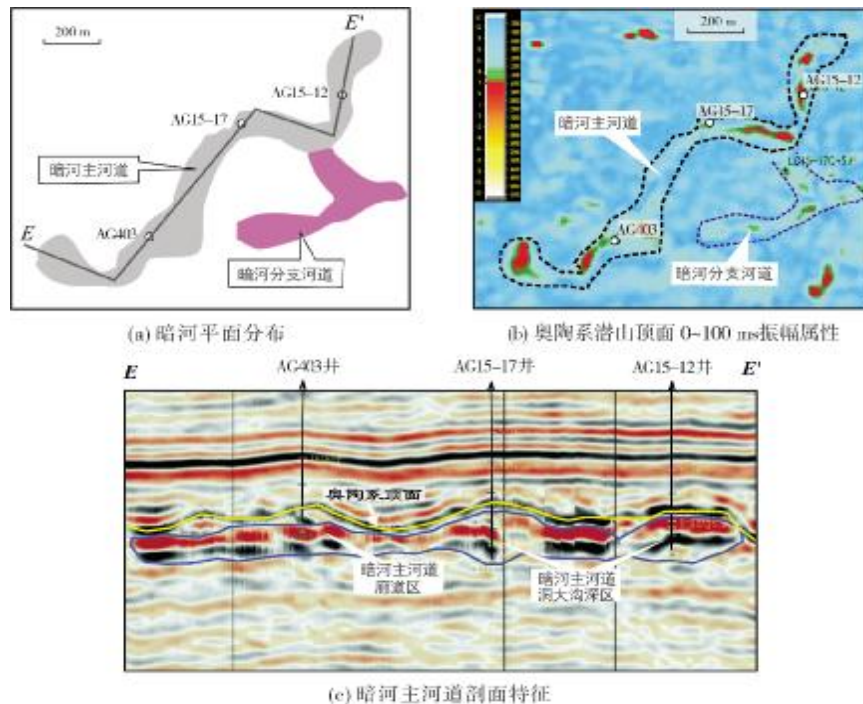


图8 塔里木盆地轮古潜山AG15-17井区暗河平面及剖面展布特征

### 3.3 暗河发育模式

暗河是由岩溶洞穴、孔洞、裂缝组成的复合体系,是长期岩溶作用的产物。通过对轮古潜山暗河的精细刻画,认识到暗河发育受断裂控制作用明显。这主要是因为:在平面上,断裂活动控制着古地貌,影响着古水系的分布;在垂向上,断裂是沟通地表水和深层热液的有效通道,并且断裂附近裂缝较发育,是

岩溶作用的有利部位。各方面因素导致断裂附近岩溶储层发育,进而对暗河的发育具有明显的控制作用。因此,在平面上,暗河的走向与断裂的走向具有较高的一致性(图4),暗河河道常沿断层附近发育;垂向上,古水系受古地貌的控制,构造低部位是古水系的优势发育方向,而古水系的分布又对地下水的活动区域产生影响,所以暗河主河道有向构造低部位延伸发育的趋势(图9)。

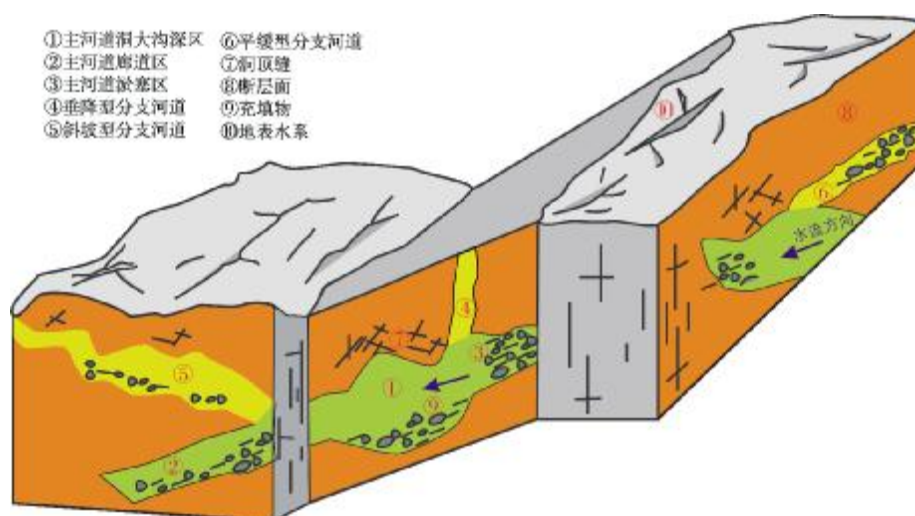


图9 塔里木盆地轮古潜山暗河系统模式图

本次研究将暗河系统细分为暗河主河道、暗河分支河道和暗河洞顶缝。根据暗河分支河道汇入主河道垂向上的角度大小,将暗河分支河道分为垂降型、斜坡型和平缓型,这3种类型分支河道的水动力条件依次逐渐变弱,充填程度逐渐增强,储集条件也逐渐变差。对于暗河主河道,根据河道规模的大小及充填程度,将其分为洞大沟深区、廊道区和淤塞区,这3个区域的储集条件依次变差(图9)。整体来看,在暗河系统中,暗河主河道的洞大沟深区,分支河道的垂降型和斜坡型,以及暗河的洞顶缝,具有保存岩溶储集空间的有利条件,是油气富集的有利场所。

## 4 结论

本次研究综合地震及钻井、录井、测井、生产动态等资料,对塔里木盆地轮古潜山暗河进行了精细刻画,并在此基础上深入探讨了暗河与油气富集的关系。获得了以下成果认识:

(1) 轮古潜山区暗河十分发育,共刻画暗河 174 条,暗河面积达 70.37 km<sup>2</sup>,暗河系统的发育受断裂

控制明显。

(2) 暗河系统包括暗河主河道、暗河分支河道和暗河洞顶缝。统计结果表明:暗河分支河道的开发效果最好,其次为洞顶缝,而钻遇主河道的井常因被砂泥质半充填或完全充填而导致低效或失利。

(3) 根据暗河主河道洞道规模大小及充填程度将其分为洞大沟深区、廊道区和淤塞区,根据暗河分支河道汇入主河道的垂向角度差异将其分为垂降型、斜坡型和平缓型。钻探实践表明:暗河主河道的洞大沟深区,暗河分支河道的垂降型和斜坡型,以及暗河洞顶缝,具有保存岩溶储集空间的有利条件,是油气富集的有利场所。

### 参考文献

- [1] 韩长城,林承焰,鲁新便,等.塔河油田奥陶系岩溶地貌对储集层的控制作用[J].新疆石油地质,2016,37(4): 417-422.
- [2] 韩长城,林承焰,鲁新便,等.塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶斜坡断控岩溶储层特征及形成机制[J].石油与天然气地质,2016,37(5): 644-652.
- [3] 马奎,胡素云,刘刚,等.塔北哈拉哈塘奥陶系岩溶储层类型

- 与特征及控制因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(4): 119-128.
- [4] 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.
- [5] 郑多明, 张庆玉, 赵宽志, 等. 塔北哈拉哈塘地区奥陶系层间改造区岩溶古水文条件分析[J]. 中国岩溶, 2015, 34(2): 179-186.
- [6] 康志宏, 鲁新便, 唐湘蓉, 等. 塔河油田奥陶系古洞穴垮塌体地震反射结构与识别[J]. 新疆地质, 2014, 32(4): 540-545.
- [7] 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, 147.
- [8] 景建恩, 梅忠武, 李舟波. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育模式的测井分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(2): 236-241.
- [9] 高军, 杨雨, 代双和, 等. 碳酸盐岩溶洞系统地震识别、特征描述及成因分析[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(增刊1): 104-108.
- [10] 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.
- [11] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347-355.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 巫波, 李正民, 荣元帅. 不同岩溶缝洞油藏剩余油类型及开发对策[J]. 特种油气藏, 2016, 23(2): 93-96, 155.
- [15] 郭纯青. 中国岩溶地下河系及其水资源[J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(5): 43-45.
- [16] 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.
- [17] 孟祥霞, 王宏斌, 姚清洲, 等. 塔北隆起构造演化特征及对奥陶系碳酸盐岩的控储控藏作用[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(增刊 1): 109-120.
- [18] 张云鹏, 任建业, 阳怀忠, 等. 塔里木盆地轮南低凸起构造特征及演化[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 440-447.

编辑: 黄革萍

## Development characteristics of underground river and its relationship with oil and gas accumulation in Lungu buried-hill, Tarim Basin

LUO Xiao, LIU Junfeng, HAN Jie, ZHANG Lei, PENG Tao, CHENG Lin

**Abstract:** Based on the data of seismic, drilling, logging and production performance, underground river in Lungu Ordovician buried-hill of Tarim Basin are described in detail, and 174 rivers are identified, and the river area is up to 70.37 km<sup>2</sup>. It is also expounded that the development of the underground rivers are obviously controlled by faults. At the same time, the underground river system is divided into main channel, branch channel and cave roof fissure. According to the size and filling degree of the tunnel, the main channel is further divided into deep zone of the big ditch, corridor zone and silting zone. The branch channel is further divided into vertical type, slope type and flat type according to the vertical angle of the branch channel entering the main channel. Statistical analysis and drilling practice showed that the deep zone of the big ditch of the main channel, the vertical and slope types of the branch channel, and the cave roof fissure of the underground river are the most favorable development area of karst reservoir and the favorable play for oil and gas accumulation.

**Key words:** underground river; buried-hill; karst reservoir; Ordovician; Lungu; Tarim Basin

LUO Xiao: MSc, Engineer. Engaged in research of carbonate petroleum geology. Add: No. 26, Petrochemical Avenue, Korla, Xinjiang 841000, China