

引用格式:李小波,刘学利,杨敏,等.缝洞型油藏不同岩溶背景注采关系优化研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(2):37-42.

LI X B, LIU X L, YANG M, et al. Study on relationship optimization of injection and production in fractured-vuggy reservoirs with different karst background[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 37-42.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.02.006

## 缝洞型油藏不同岩溶背景注采关系优化研究

李小波<sup>1,2</sup>,刘学利<sup>1,2</sup>,杨敏<sup>1,2</sup>,谭涛<sup>1,2</sup>,李青<sup>1,2</sup>,刘洪光<sup>1,2</sup>,张艺晓<sup>1,2</sup>

(1.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;

2.中国石化碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室,新疆乌鲁木齐830011)

**摘要:**针对缝洞型油藏单元注水中油井单向受效为主、易沿主通道快速推进,导致水驱储量有效控制和高效动用程度低的难题,采用了物模和数值模拟的方法,分析了不同岩溶背景下缝洞结构分布和水驱开发效果的关系,形成了基于缝洞空间分布的差异化注采关系。研究认为:风化壳岩溶采取构造低部位注水、高部位采油,储集体不发育区注水、发育区采油,建立一注多采的注采关系;断层岩溶在平面上次级断裂区注水、主干断裂区采油,纵向上断裂深部注水、浅层采油,形成立体注采的注采关系;古暗河岩溶的主暗河段实施主干暗河段注水、分支暗河采油,多套暗河实施深部暗河注水、浅层暗河采油,构建分层注采的注采关系。缝洞型油藏不同岩溶背景下注采关系的建立为实现空间结构井网水驱控制储量最大化奠定重要的基础。

**关键词:**注采关系;空间结构井网;缝洞结构;缝洞型油藏;塔河油田

中图分类号:TE344

文献标识码:A

### Study on relationship optimization of injection and production in fractured-vuggy reservoirs with different karst background

LI Xiaobo<sup>1,2</sup>, LIU Xueli<sup>1,2</sup>, YANG Ming<sup>1,2</sup>, TAN Tao<sup>1,2</sup>, LI Qing<sup>1,2</sup>, LIU Hongguang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yixiao<sup>1,2</sup>

(1. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. Key Laboratory for EOR of Carbonate Fractured-Vuggy Reservoir of Sinopec, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract:** In the fractured-vuggy reservoir unit, the water injection mainly affects the oil well unidirectionally and is easy to advance rapidly along the main channel, leading to the problems of difficult to effective control the water drive reserves and low efficient production. By the methods of physical model and numerical simulation, the relation between the structure of fracture/cave and the development effect of water flooding in different karst background is analyzed, and the differential injection-production relation based on the spatial distribution of fracture/cave is formed. The results show that: in the crust karst reservoirs, the mode of water injection in the low part and oil production in the high part of the structure, and water injection in the undeveloped area and oil production in the developed area is adopted to establish the injection-production relation of one injection well to multiple production wells. In the fracture-controlled reservoirs, the mode of water injection in the secondary fault and oil production in the main fault, and water injection in the deep fracture area and shallow for oil production in the longitudinal direction is adopted to form the stereoscopic injection-production relation. In the ancient underground river reservoirs, the water injection in the main section and oil production in the branch are implemented in the main dark section, and the water injection in deep and oil production in shallow are implemented in multiple dark rivers, so as to establish the layered injection-production relation. The establishment of injection-production relation in different karst backgrounds of fractured-vuggy reservoirs lay an important foundation for maximizing water drive controlled reserves of spatial well pattern.

**Key words:** fracture cavity structure, injection production relationship, well pattern of spatial structure, fractured-vuggy reservoir, Tahe Oilfield

收稿日期:2019-12-27。

第一作者简介:李小波(1979—),男,副研究员,从事碳酸盐岩缝洞型油藏开发地质及油藏工程方法研究。通讯地址:新疆乌鲁木齐市市长春南路466号,邮政编码:830011。E-mail:lx969@163.com

基金项目:“十三五”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”(2011ZX05053)。

塔河缝洞型油藏不同的岩溶主控因素导致岩溶缝洞储集体的形态、规模和空间分布的差异,加大了油藏开发中缝洞结构和连通关系认识的难度。在缝洞型油藏注水开发中,鲁新便等<sup>[1]</sup>首次总结提出了空间结构井网的构建理念,从缝洞结构和连通关系的角度,提出了面状、网状和条带状的井网形式。在立体开发<sup>[2]</sup>的思想基础上,通过高效井网构建实现采收率的大幅提高。在注采关系研究方面,国内外的碎屑岩油藏大多采用行列井网和面积井网为主的井网形式,建立分层注采,注采对应关系清楚<sup>[1-3]</sup>。缝洞型油藏采取笼统注采为主,且注入井与采出井对应关系复杂、不清楚,在注采关系的研究方面文献少见报道。

为此,以不同岩溶背景下的缝洞结构和分布特征为基础,系统分析缝洞型油藏缝洞连通结构特点、注采井网构建原则、注采井部署方式,采用物理模拟和数模相结合的方法,开展风化壳岩溶、断控岩溶、古暗河岩溶的注采关系优化研究。通过结合现场实践,进一步明确了适合不同类型油藏缝洞结构和井网形式的注采关系,为缝洞型油藏高效空间结构井网的构建提供支撑。

## 1 缝洞型油藏缝洞结构及井网特点

### 1.1 缝洞型油藏缝洞结构特点

塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏储集体以构造变形产生的构造裂缝与岩溶作用形成的孔、洞、缝为主,其中大型洞穴是最主要的储集空间,裂缝既是储集空间,也是主要的连通通道<sup>[4-6]</sup>。受古地貌、古水系和深大断裂的综合作用,形成了以构造控制的风化壳岩溶、断裂控制的断控岩溶和古水系控制的古暗河岩溶类型。不同岩溶背景下主要岩溶作用方式和强度存在差异,平面上呈分区、分带分布特点。风化壳岩溶以地表风化淋滤岩溶为主,发育的大型溶洞呈片状和网状分布,缝洞结构具有面状展布、空间离散分布,缝洞之间的多向连通,展布范围广泛的特点<sup>[6-8]</sup>。

断控岩溶受主干断裂控制形成岩溶缝洞体系,断裂带平面呈条带状、纵向呈树枝状的形式展布,溶洞沿断裂分布,缝洞结构受裂缝的展布控制,局部单向或多向连通关系好。古暗河岩溶受早期古水系影响,发育大尺度厅堂洞,经过后期多期岩溶改造作

用,导致局部充填性较强,整体上在平面分布主干和分支暗河,纵向形成浅层和深部暗河,溶洞展布具有明显的方向性特征,局部连通性较强<sup>[9-10]</sup>。缝洞结构上空间发育一套或两套暗河系统,且局部纵向裂缝沟通,暗河未充填溶洞发育,但是局部充填垮塌导致平面具有分隔性。

### 1.2 缝洞型油藏注采井网特征

由于塔河缝洞型油藏非均质性极强,缝洞在空间上呈离散分布、连通方式多样、缝洞结构复杂,其开发井网有别于碎屑岩油藏的面积井网、排状井网等规则井网形式。

在缝洞型油藏的开发中,早期的基础井网以产能建设为主,实施的按洞部井,逐洞开发的思路,形成了不规则井网;进入注水、注气开发提高采收率阶段后,利用低产、低效井进行转注,依据储集体展布和井洞关系进行注采关系的设计和注水井的部署。基于缝洞型油藏缝洞结构的复杂性和空间分布的不规则性,在开发理念上属于体积开发<sup>[2]</sup>,不同于常规砂岩油藏“层”的开发思想。因此,提出了针对缝洞型油藏的“空间结构井网”理念<sup>[1]</sup>。其井网构建的核心思想是体现“立体化和结构化”。“立体化”主要反映缝洞的空间分布和配置关系,“结构化”重点是体现井洞融合关系、缝洞融合关系和洞洞融合关系。空间结构井网的构建理念为缝洞型油藏高效注采井网的构建提供了方向。

### 1.3 缝洞型油藏井网部署方式

空间结构井网考虑缝洞与注采井的优化配置建立适宜的井洞关系。井网构建主要遵循井控储量和开发效益最大,多向注采和分层注采,矢量配置,低注高采、缝注洞采,兼顾注水、注气和后期注采互换的构建原则,实现有效控制、高效动用、均衡驱替的构建目标。

为了实现注采井的合理部署,结合现场的注水开发实践,考虑缝洞储集体展布、注采方式、井网形式等方面,形成了注采井的部署方式:裂缝展布与驱替方向匹配、溶洞规模与注采井类型匹配、连通方式与注采方式匹配、缝洞结构与注采井网匹配。部署方式主要目的是将缝洞储集体空间展布特点和注采井的优化设计结合起来,实现在动态和静态上的系统匹配,井网构建原则和部署方式的确定为合理注

采关系的建立提出了要求,建立注采关系是实现空间结构井网建设的关键<sup>[11-14]</sup>。

## 2 不同岩溶背景下的注采关系研究

### 2.1 风化壳岩溶注采关系

风化壳岩溶是塔河油田主要的岩溶模式,其储集体主要发育在风化面0~60 m内,具有岩溶强度大、影响范围广、呈面状分布的特点。裂缝、孔洞、残余溶洞为主要的储集空间,井间的裂缝和岩溶管道是井间的主要连通通道(图1)。

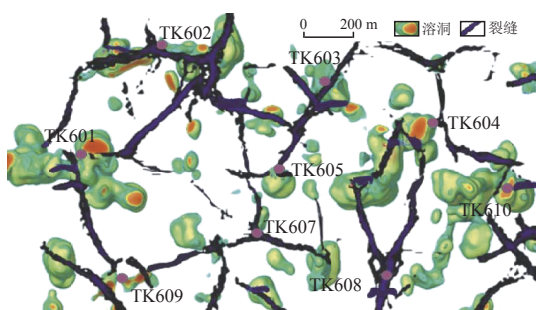


图1 风化壳岩溶背景缝洞结构

Fig. 1 Fractured-vuggy structure in crust karst

设计裂缝—孔洞组合的物理模型,裂缝作为溶洞间的连通通道,开展不同注采位置的水驱物模实验。从实验过程分析发现,采取低部位注水高部位采油时,油水界面缓慢上升,孔洞内油水界面发生明显重力分异现象,注水能逐渐波及溶洞,实现较大范围的水驱波及。采取高部位注水低部位采油时,裂缝内油水界波动,重力分异作用不明显,驱替后孔洞中赋存剩余油,注水波及范围有限,整体上较低注高采方式驱油效率高(图2)。同时开展储集空间类型的模拟对比实验,采取尺度较小的孔洞注水,尺度较

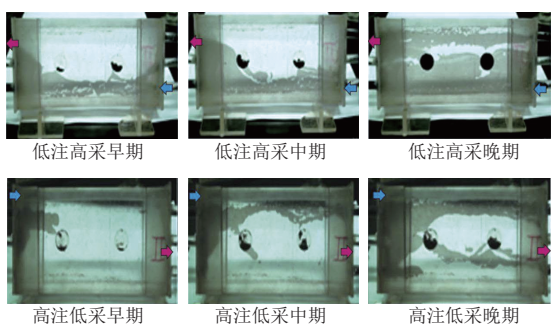


图2 低注高采和高注低采注采关系不同驱替阶段孔洞中剩余油分布对比

Fig. 2 Comparison of residual oil distribution in different displacement stages with different injection-production relation

大的溶洞采油,实验发现储集体发育程度差的部位向发育好的部位注水,能充分利用油水密度差异,发挥重力分异的作用,增大注水波及范围,提高水驱动用程度。

实验分析认为,风化壳岩溶采取构造低部位注水、高部位采油(低注高采),储集体不发育区注水、发育区采油(缝注洞采),可实现高效的注水驱油。

### 2.2 断控岩溶注采关系

断控岩溶的储集体展布具有明显的方向性。根据断裂样式和规模分为单支板状断裂和枝干型断裂,采用数值模拟方法进行注采关系优化模拟研究。

#### 2.2.1 单支板状断裂

单支板状断裂在剖面上以一条主干断裂为主,伴生的次级断裂不发育,小尺度裂缝较发育,溶洞和孔洞沿主干断裂分布(图3a)。设计顺断裂面的油藏剖面模型,模拟浅注浅采和深注浅采两种注采关系。

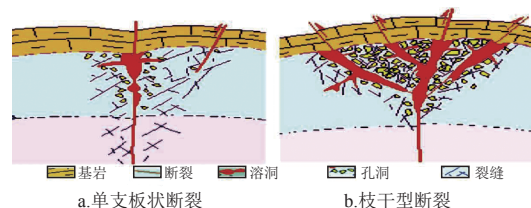


图3 断控岩溶缝洞结构模式

Fig. 3 Fractured-vuggy structure models of fracture-controlled karst

从浅注浅采的初期和末期阶段含油饱和度对比图看出,注入水易沿裂缝面横向驱替,导致油井见水时间较早,同时无井控制区域易形成局部高压或封存剩余油,注水波及范围有限(图4a)。在深注浅采的阶段含油饱和度对比图上可看出,注入水从深部裂缝横向推进,可均匀抬升油水界面,增大了注水波及范围(图4b)。从两种注采关系驱替末期的含油饱

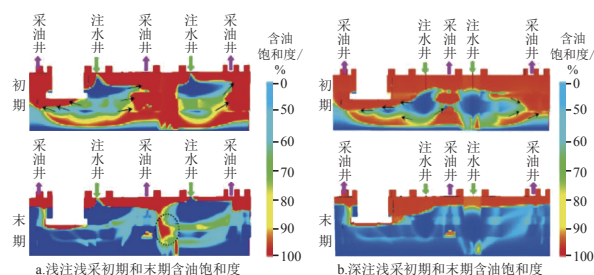


图4 单支板状断控岩溶注采关系模拟

Fig. 4 Simulation of injection-production relation of single-support plate-shaped fracture-controlled karst

和度图看出,在单支板状断裂油藏中深部注水浅层采油的注采关系能实现最大的水驱波及剩余油,提高驱替效率。

### 2.2.2 枝干型断裂

枝干型断裂在剖面上呈现主干和伴生次级断裂都较发育,主干断裂发育深度最大,溶洞和孔洞发育程度较高(图3b)。在单支板状断裂注采关系认识的基础上,对枝干型断裂结构主要考虑平面注采关系对注水效果的影响。模拟主干断裂伴生两个次级断裂形成的核部+两过渡带的组合结构。

模型设计4种注采关系模拟方案(图5),从数值模拟实验对比曲线可以看出,在不同的平面部署方式下,水驱效果存在明显的差异性。在水驱采收率变化曲线上,边部注核部采>核部注核部采>核部注+1过渡带采>核部注+2过渡带采,其中注水井部署在过渡带,采油井部署在核部的注采关系具有最高的累产油量和较慢的含水上升速度(图6)。分析认为对枝干型断控岩溶,岩溶核部的主干断裂储集体最发育,过渡带上次级断裂储集体欠发育,但是通过裂缝通道可实现主干与分支断裂连通,所以注水井选择在过渡带深部注水,利用油水密度差异,充分发挥

重力分异的作用,可驱替高效井间剩余油。

整体上对断控岩溶,在平面上次级断裂区注水、主干断裂区采油,纵向上断裂深部注水、浅层采油,形成立体注采的注采关系。

### 2.3 古暗河岩溶注采关系

古暗河岩溶背景下的储集体平面具有分段性,纵向局部具有分层性。结合缝洞结构特点设计了主干和分支暗河、浅层和深部暗河的注采关系优化数值模拟方案。从注采关系优化对比图看出,采取主干暗河注水分支暗河采油的注采关系在见水后中、低含水期较长,含水上升相对缓慢,具有较好的控水效果;而分支暗河注水主干暗河采油的注采关系下,则含水快速上升(图7a)。分析认为主要原因在于主干暗河较分支暗河溶洞更发育,且位置低更易连通强底水,实施主干暗河注水不仅可抑制底水抬升,而且可利用重力分异原理,驱替剩余油,提高驱替效率。同时对纵向发育两层暗河的古暗河岩溶系统,从笼统注水和分段注水的控水效果明显看出,实施分段注水能达到较好的控制含水上升速度,提高水驱的有效动用,增大注水波及范围的作用(图7b)。

分析认为古暗河岩溶在主暗河段,采取主干暗

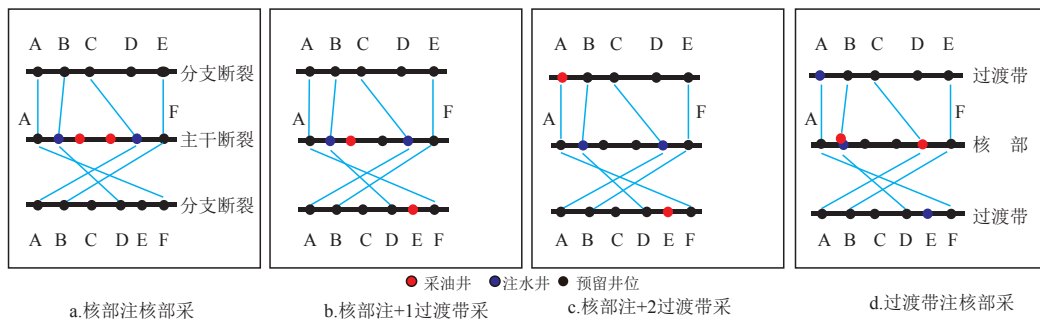


图5 枝干型断裂平面注采关系方案设计

Fig. 5 Injection-production relation design for branch fracture plane

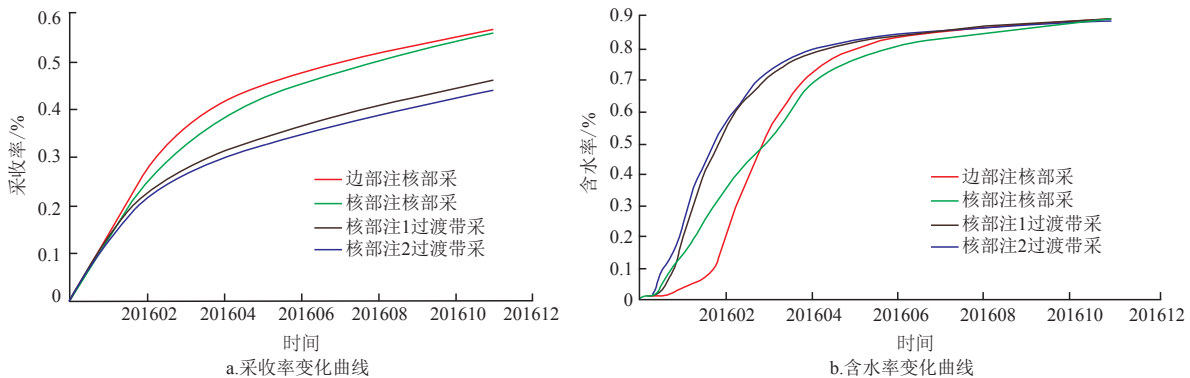


图6 枝干型断裂注采关系方案效果对比曲线

Fig. 6 Comparison curve of injection-production relation for branch fracture

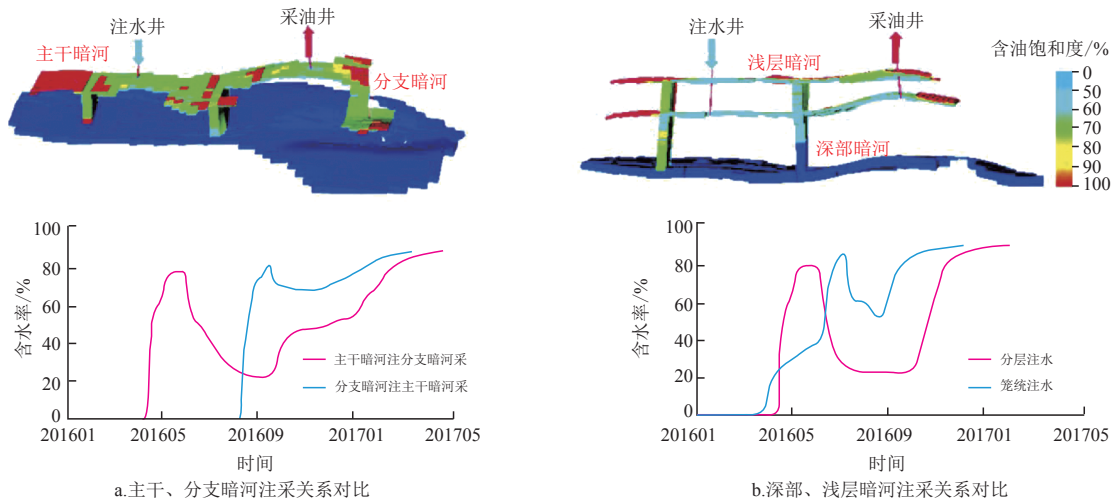


图7 古暗河岩溶注采关系优化对比

Fig. 7 Optimization contrast of karst injection–production relation for ancient underground river

河段注水、分支暗河采油;两层暗河,采取深部暗河注水、浅层暗河采油,可构建分层注采的注采关系<sup>[5]</sup>。

### 3 应用效果

塔河油田自2005年开始实施单元注水开发以来,注水规模逐步扩大到134个缝洞单元,水驱控制储量达到 $6.1 \times 10^8$  t,年均增油达到 $32 \times 10^4$  t。目前采用空间结构井网的构建思路,优化井与溶洞的配置关系,建立适宜的注采关系实现水驱储量控制的最大化、提高强非均质油藏的水驱效率。

从现场注采井组的注采关系统计表可以看出(表1),在三大岩溶背景下,不同注采关系对应的井

表1 矿场不同岩溶地质背景下注采关系与效果统计  
Table 1 Statistics of injection–production relation and effect under different karst geological background

岩溶背景	注采关系	井组数/对	有效率/%	平均井组增油/ $10^4$ t
风化壳岩溶	低部位注高部位采	34	80	2.8
	高部位注低部位采	12	65	1.2
	裂缝注水溶洞采油	37	85	3.2
	溶洞注水裂缝采油	9	60	0.8
古暗河岩溶	主干注水分支采油	16	68	1.8
	分支注水主干采油	8	54	1.4
	笼统注水	18	60	1.1
断控岩溶	分层注水	6	72	2.2
	次级断裂注水、主干断裂采油	36	85	1.7
	主干断裂注水、次级断裂采油	25	63	1.2
	深部注水、浅层采油	26	85	1.8
	浅层注水、深部采油	12	53	0.5
	浅注注水、浅层采油	23	46	0.7

组有效率和平均井组增油效果差异大。整体上风化壳岩溶采低部位注水高部位采油、裂缝注水溶洞采油;古暗河岩溶采取主干注水分支采油和分层注水;断控岩溶采取次级断裂注水主干断裂采油和深部注水浅层采油的注采关系最好。

如塔河油田A1断溶体井组受北东—南西向的次级断裂控制,为典型的单板块状断控岩溶。油藏裂缝和孔洞型储集体比较发育,且在断裂深部发育大尺度的孔洞,沿断裂面形成一个扇形的储集体发育区(图8)。

根据断溶体油藏带状井网的部署思路,设计了沿断裂的“深部注水、浅层采油”的注采关系,对位于裂缝储集体上的A3井深部注水井,邻井A1、A2、A4为设计采油井。前期A1井组的A3井含水快速上升,导致暴性水淹,邻井A1、A2、A4均低压自喷,无水生产。通过对A3井采取温和不稳定注水后,邻井A4和A2井相互继见效,A4井从20 t/d上升到40 t/d,且注水有效期维持在1年左右,分析认为A4井方向裂缝

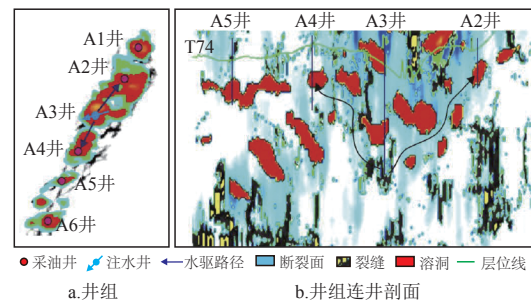


图8 单板块状断控岩溶缝洞结构剖面注采关系

Fig. 8 Injection–production relation of fractured–vuggy structure profile controlled by a single plate

为主要早期主要驱替方向。在A4井受效期间,A2井保持了产量的稳定生产,当A4井效果逐步变差的同时,A2井方向开始见效,产油量从18 t/d上升到38 t/d,见效时间从2017年8月持续到目前,分析认为,通过深部注水浅层采油的注采关系,一方面抑制底水的快速抬升,另一方面补充能量驱替井间剩余油(图9)。

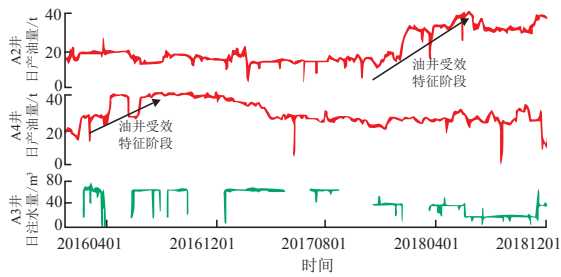


图9 A1断溶体并组A3-A2、A4注采关系

Fig. 9 Injection-production relation of well A3-A2 and A4 in broken solution well group A1

## 4 结论

1) 风化壳岩溶采取构造低部位注水,高部位采油,储集体不发育区注水,发育区采油,建立一注多采的注采关系。

2) 断控岩溶在平面上采取次级断裂区注水、主干断裂区采油,纵向上断裂深部注水、浅层采油,整体形成立体注采的注采关系。

3) 古暗河岩溶的主暗河段采取主干暗河段注水、分支暗河采油;多套暗河实施深部暗河注水、浅层暗河采油,构建分层注采的注采关系。

缝洞型油藏缝洞连通关系复杂,空间结构井网为不规则井网,在室内研究和现场实践的基础上认识了不同岩溶背景下注采关系,但是要实现缝洞型油藏高效注水开发,还需要建立匹配岩溶特征的井网构建原则、部署方式、构建流程、注水技术政策等相关匹配技术。

### 参考文献

[1] 鲁新便,荣元帅,李小波,等. 碳酸盐岩缝洞型油藏注采井网构建及开发意义——以塔河油田为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 658-664;  
LU X B, RONG Y S, LI X B, et al. Construction of injection-production well pattern in fractured-vuggy carbonate reservoir and its development significance: A case study from Tahe oilfield in Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 658-664.

[2] 焦方正. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏体积开发实践与认识[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 552-558.  
JIAO F Z. Practice and knowledge of volumetric development of deep fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tarim Basin, NW

China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 552-558.

- [3] 吴浩,姜汉桥,乔岩,等. 封闭油藏不同含水期的井网方案优化[J]. 断块油气田, 2019, 26(3): 342-345.  
WU H, JIANG H Q, QIAO Y, et al. Optimization of well pattern design at different water-cut stage of closed reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(3): 342-345.
- [4] 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 Y. The theory and method for development of carbonate fractured-cavity reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 115-121.
- [5] 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 Y, JIN Q, ZHONG J H, 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.
- [6] 郑松青,杨敏,康志江,等. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏水驱后剩余油分布主控因素与提高采收率途径[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 746-754.  
ZHENG S Q, YANG M, KANG Z J, et al. Controlling factors of remaining oil distribution after water flooding and enhanced oil recovery methods for fracture-cavity carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 746-754.
- [7] 张云峰,谭飞,屈海洲,等. 岩溶残丘精细刻画及控储特征分析——以塔里木盆地轮古地区奥陶系风化壳岩溶储集层为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5): 716-726.  
ZHANG Y F, TAN F, QU H Z, et al. Karst monadnock fine characterization and reservoir control analysis: A case from Ordovician weathering paleokarst reservoirs in Lungu area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 716-726.
- [8] 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 X B, HE C J, DENG G X, et al. Development features of karst ancient river system in Ordovician reservoirs, Tahe Oil Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 268-274.
- [9] 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.  
HAN C C, LIN C Y, LU X B, et al. Characterization and genesis of fault-controlled karst reservoirs in Ordovician carbonate karst slope of Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 644-652.
- [10] 鲁新便,胡文革,汪彦,等. 塔河地区碳酸盐岩断控岩溶特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347-355.  
LU X B, HU W G, WANG Y, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347-355.
- [11] 刘洪光. 缝洞型碳酸盐岩油藏注水开发水平分级标准初探[J]. 新疆石油天然气, 2019, 15(2): 44-48.  
LIU H G. Preliminary study on classification standard of water flooding development level for paleo-cave carbonate reservoir[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2019, 15(2): 44-48.
- [12] 宋兆杰,杨柳,侯吉瑞,等. 缝洞型油藏裂缝内油水两相流动 (下转第53页)