

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

鲁新便¹, 荣元帅¹, 李小波¹, 吴 锋²

(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. 西南石油大学 油气藏与地质国家重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要:为了建立一套能够反映塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏复杂缝洞结构和连通关系的注采井网。从不同岩溶地质背景特征出发,通过分析风化壳型、断控型和暗河型储集体的缝洞空间结构特征、注采关系特点和井网形式,提出了“注采空间结构井网”的理论概念,即以缝洞体空间展布为基础,结合缝洞形态、尺度、连通结构等信息,在三维空间上构建注水井与采油井之间的配置关系,最大程度提高缝洞控制、水驱储量动用及采收率。研究认为:风化壳型注采关系以“低注高采,缝注孔洞采、小洞注大洞采”为特点,适宜建立“面状”注采井网;断控型注采井组以“等高注采、缝注洞采、边注中采”的注采关系为主,应建立“条带状”的注采井网;暗河型注采井组易形成“低注高采、洞注洞采”的注采关系,可建立“线状”注采井网。同时应形成与井网形式相匹配的差异化注水方式,以全面体现注采空间结构井网“多向注采、多段注采、立体注采”的构建目标。

关键词:注采关系;注水开发;注采井网;缝洞型油藏;提高采收率;塔河油田;塔里木盆地

中图分类号:TE324

文献标识码:A

Construction of injection-production well pattern in fractured-vuggy carbonate reservoir and its development significance: A case study from Tahe oilfield in Tarim Basin

Lu Xinbian¹, Rong Yuanshuai¹, Li Xiaobo¹, Wu Feng²

(1. Petroleum Exploration & Production Research Institute, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University,

Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: It is desirable to establish an injection-production well pattern that can reflect the complex fracture-vug structure and connectivity of the fractured-vuggy carbonate reservoir in Tahe oilfield. The fracture-vug spatial structure characteristics of reservoirs of weathering crust type, fault-controlling type and underground river type were comprehensively analyzed in the geological contexts of various karst types. These in combination with the analysis of characteristics of injection-production relationship and basic well patterns led to the concept of “injection-production spatial structure well pattern”. It is to establish the relationship of injector and producer in a three dimensional space based on the spatial distribution of fracture-vug complex and in combination with parameters of fracture-vug such as morphology, scale and connectivity, so as to maximize control of fracture-vug, producing reserves of waterflooding and recovery factor. The results show that the injector-producer relationship for reservoirs of weathering crust type is characterized by “injector at lower location and producer at higher location, injection through fractures and production through vugs, injection through smaller vugs and production through larger vugs, thus “plane” injection-production well pattern is suitable. The injector-producer relationship for reservoirs of fault-controlling type is characterized by “isoheight injection and production, injection through fractures and production through vugs”, thus banded injection-production well pattern should be adopted. The

收稿日期:2017-02-12;修订日期:2017-07-10。

第一作者简介:鲁新便(1963—),男,博士、教授级高级工程师,碳酸盐岩缝洞型油藏开发地质及油藏工程设计。E-mail:lxbsmail@.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05053);中石化控递减重大专项(ZDP17003)。

injector-producer relationship for underground river type is characterized by “injector at lower location and producer at higher location, injection through vug and production through vug”, thus linear injection-production well pattern is suitable. In addition, differential water injection schemes should be selected according to the well pattern, so as to realize the goal of this concept, i. e. multi-direction injection-production, multi-segment injection-production and spatial injection-production.

Key words: injection-production relationship, water flooding, injection-production well pattern, fractured-vuggy reservoir, EOR, Tahe oilfield, Tarim Basin

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,裂缝既是主要的储集空间,也是主要的连通通道^[1-4]。碳酸盐岩基质基本不具有储渗意义,储集空间形态多样,大小悬殊,分布不均,且具有很强的非均质性。它既不同于中东地区碳酸盐岩裂缝型油藏,也不同于中国东部典型的碳酸盐岩裂缝-孔洞型油藏,更不同于常规孔隙性砂岩油藏。目前,碎屑岩油藏已经形成了成熟的行列井网和面积井网为主的规则井网部署方法,而缝洞型油藏构建的为不规则注采井网,可借鉴的依据较少。鉴于碳酸盐岩缝洞型油藏在不同岩溶背景下形成的储集空间类型、缝洞结构和连通关系存在较大差异性,相应建立的井网形式、井组注采关系以及选择的注水方式和注采参数应该与之匹配^[5]。

为此,笔者在系统分析碳酸盐岩缝洞型油藏缝洞结构、注采关系和基础井网形式的基础上,结合现场注水开发实际,提出了碳酸盐岩缝洞型油藏构建“注采空间结构井网”的理念概念,其综合考虑碳酸盐岩缝洞型油藏缝洞空间类型和缝洞结构的差异性,在三维空间上优化配制注水井和采油井的注采关系。本概念提出的意义在于突破了仅以平面部署注采井网的思想,将井网从二维平面结构发展到三维空间结构,建立了适应缝洞储集体空间结构展布特点的注采井网,为碳酸盐岩缝洞型油藏高效注水开发提供技术支撑。

1 缝洞型油藏结构特征及注采关系特点

1.1 缝洞结构的特殊性

碳酸盐岩缝洞型油藏储集体以缝洞为主,非均质性极强,不同于碎屑岩连续分布的砂体。碎屑岩油藏以源岩机械搬运沉积为主,原生孔隙为主要储集空间,储集空间尺度相对均匀,储集体发育相对连续^[6]。塔河油田碳酸盐岩油藏储集体以缝洞为主,溶洞是主要的储集空间,裂缝是主要的连通通道和连通路径;平面

上不同区域主要岩溶作用方式和强度存在差异,呈分区分带分布;塔河油田主体区(岩溶高地)以地表风化淋滤岩溶为主,多发育大型溶洞呈现片状和网状分布,溶洞之间的连通性好,展布范围广^[7];外围区(岩溶斜坡)以断裂控制的岩溶为主,缝洞发育沿断裂带呈条带状、树枝状的形式分布,溶洞的规模较小,整体连通性较差^[8]。纵向上受多期岩溶作用存在分段特征,浅层剥蚀区保留表层岩溶带、中深层断控岩溶区保留垂向渗滤带、深部的潜流溶蚀带和径流溶蚀带以岩溶暗河形态保留。

1.2 开发基础井网的构建

塔河油田碳酸盐岩油藏以缝洞单元为开发和管理目标,实施“按洞布井、逐洞开发”原则,构建了该类油藏的开发基础井网。缝洞单元是由一个溶洞或若干个由裂缝网络沟通的溶洞所组成的相互连通的缝洞储集体,具有统一压力系统和油水关系,是一个独立的油藏,自成油水体系^[9]。在缝洞单元开发中,以缝洞储集体的展布特征为依据,实施逐洞开发部署开发井。对风化壳型储集体的岩溶残丘溶洞优先部署、裂缝和孔洞次之;断控缝洞型储集体的主干断裂优先部署、次级断裂次之;暗河型储集体的主暗河段和深部暗河优先部署、分支暗河和浅层暗河次之。对不同岩溶地质背景下的缝洞储集体,逐步形成不规则的开发井网形式。

1.3 注采井网和注采关系的特殊性

碳酸盐岩缝洞型油藏注水井的部署遵循“缝洞结构空间展布,考虑停产、低产低效和试注井逐步完善注采井网,整体部署、分步实施、调整优化”的原则初步形成了注采基础井网。由于缝洞型油藏储集体具有较强的非均质性特征和不规则的开发基础井网,所以构建的注采井网为不规则注采井网,其明显不同于砂岩油藏行列注采井网和面积注采井网。在注采关系上,砂岩油藏分层注采,注采对应关系清楚;缝洞型油藏注入井与采出井对应关系复杂、不明确。

2 注采空间结构井网的提出及构建

2.1 注采空间结构井网理论概念的提出及意义

目前的注采井网是基于产能建设期以大洞为主要动用对象的基础井网,相对独立的小尺度缝洞控制程度低,平面上水驱以局部单向注水为主,纵向上为表层注采为主,注采井网对储量有效控制及动用较低。基于缝洞型油藏缝洞结构的复杂性以及在空间分布的不规则性,提出了缝洞型油藏构建注采井网为“注采空间结构井网”,即以缝洞体空间展布为基础,结合缝洞形态、尺度、连通结构等信息,在三维空间上构建注水井与采油井之间的配置关系,最大程度提高缝洞控制、水驱储量动用及采收率。“注采空间结构井网”提出的意义在于突破了仅以平面部署注采井网的思想,将井网从二维平面结构发展到三维空间结构,建立了适应缝洞储集体空间结构展布特点的注采井网。

2.2 不同储集体类型下空间结构井网的构建

由于碳酸盐岩缝洞型油藏主要可分为风化壳型储集体、断控型储集体和暗河型储集体类型,其不同储集体中的缝洞结构和连通状况均不同,所以注采井网的空间展布形态也应不同。

风化壳型:储集体连通方向多样,注采井网为不规则的“面状”井网形式。表层岩溶带上发育的风化壳型储集体是塔河油田主要的储集体发育模式,其主要发育在风化面0~60 m内,具有岩溶强度大,影响范围广,基于局部构造呈面状分布的特点^[10]。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

是井间主要的连通介质,在注采井间具有多向连通、多向受效,受效特征明显和有效期较长的特点,所以构建的注采井网形式为“面状”井网。如TK611井区,发育的溶洞和裂缝使井区缝洞结构整体呈面状分布,同时溶洞之间存在多条连通通道,根据储集体的分布特征,建立“面状”的注采井网,可实现对缝洞最大程度的控制(图1a)。

断控型:储集体沿断裂方向展布,注采井网为“条带状”井网形式。断控型储集体主要包含了主干断裂带和次级断裂带缝洞。主干断裂带为岩溶作用提供了主要通道,伴生的次级断裂为岩溶的发育提供了有利条件,油气运移后形成了油气富集且规模较大的沿断裂带分布的油气富集带。断控型储集体的裂缝和孔洞比较发育,特别是方向性的裂缝为井间主要连通通道和连通路径,导致注采井组具有受效方向单一、注水井控制有限的特点^[11];因此,在断控型储集体上构建的注采井网主要为“条带状”井网形式。如TP226X井区,储集体受主干断裂控制,溶洞沿断裂延展方向分布;注水井主要部署在裂缝上,油井主要部署在溶洞上,建立“条带状”的注采井网形式(图1b)。

暗河型:储集体为岩溶暗河,注采井网为沿暗河展布的“线状”井网形式。在潜流溶蚀带上的古暗河岩溶储集体的形成是受地表水系和地下暗河的双重作用,在平面上分为主暗河和分支暗河、纵向上分浅层暗河和深部暗河^[12]。暗河岩溶主要在距风化面60~220 m的中深部,以较大规模溶洞为主;同时通过纵向高角度裂缝局部沟通形成了浅层暗河和深部暗河连通的岩溶暗河系统。岩溶暗河上的注采井

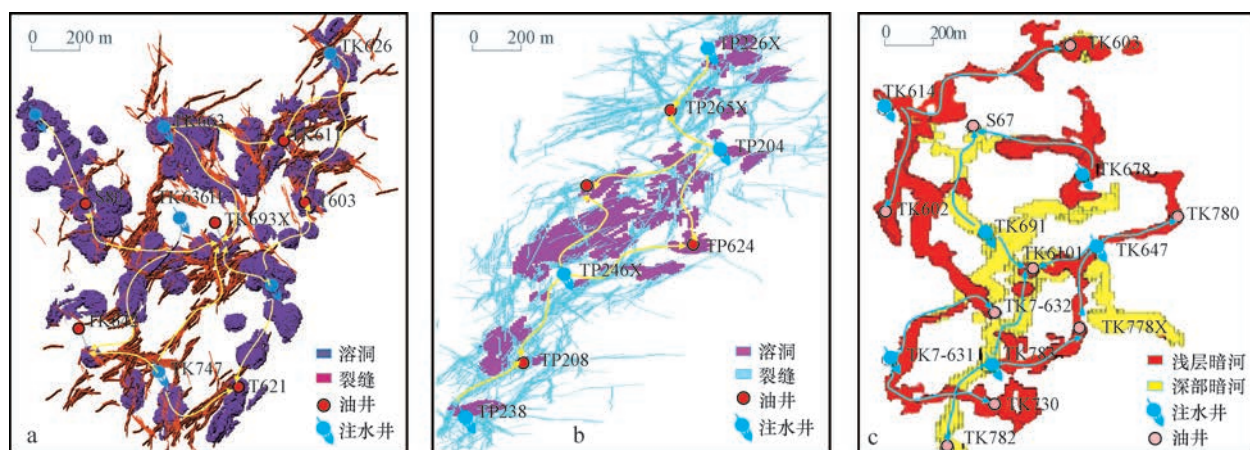


图1 塔河油田3种岩溶地质背景下的井网形式

Fig. 1 Well patterns in three kinds of karst geological backgrounds in Tahe oilfield

a. 风化壳岩溶井网形式;b. 断控岩溶井网形式;c. 暗河岩溶井网形式

组具有连通方向明确,受效期长的特点,因此岩溶暗河上构建的注采井网呈“线状”分布,以实现平面主暗河、分支暗河和纵向浅层暗河、深部暗河的有效控制。如 S67 井区,发育浅层和深部暗河,且局部暗河段纵向连通,注水井主要部署在暗河低部位,实施暗河平面分段,纵向分层驱替,构建“线状”注采井网形式(图 1c)。

3 注采空间结构井网下注采关系的建立及开发对策

3.1 不同空间结构井网下注采关系的建立

基于不同岩溶地质背景构建了相应的井网形式,但不同空间结构井网下注采关系受储集体类型影响,仍然存在一定差异性。从开发实践中认识到,在表层风化壳岩溶发育带上,以裂缝、孔洞、残余溶洞为储集空间,岩溶管道和发育的裂缝连通井间,井组注采关系以“低注高采,缝注孔洞采、小洞注大洞采”为特点;如 TK652 - TK605CH 注采井组,TK605CH 在表层漏失自然投产,TK652 井在距风化面 40 ~ 60 m 酸压,并后期转注水,井组建立缝注洞采,低注高采的注采关系,注水后 TK605CH 井日产油量从 22 t/d 上升到 50 t/d,含水率从 30% 下降到零(图 2)。

在断控型储集体发育区,方向性的断裂连通溶洞,

注采井组建立以“等高注采、缝注洞采、边注中采”的注采关系为主。如 TK836CH - TK743 注采井组,油井产层段均在距风化面 60 m 以内,TK836CH 井位于裂缝之上,TK743 井位于溶洞之上,TK836H 井转注后,沿裂缝延展方向的 TK743 井明显见效,日油水平从注水前的 10 t/d,上升到 40 t/d,含水率从 80% 下降到 20%,注采效果显著(图 3)。

在岩溶暗河储集体发育区,平面上形成分段的暗河管道储集体,沿暗河局部连通的注采井易形成“低注高采、洞注洞采”的注采关系。如 TK440 - TK449H 注采井组,TK440 井在深部暗河累计产油 4×10^4 t,TK449 井在浅层暗河段漏失投产,TK440 在暗河段转注后,实施大排量持续注水,TK449H 井日产油量从 5 t/d 上升到 100 t/d,含水率从 95% 下降为零,并且保持长期的稳定受效(图 4)。

3.2 注采空间结构井网下的开发对策

注采空间结构井网倡导立体注水开发是鉴于缝洞型油藏缝洞结构在“体”上的复杂性,区别于碎屑岩油藏“层”的开发方式,根据储集体发育规律、致密段分布、剩余油分布及连通状况,构建立体的注水开发井网。由于储集体展布的不规则性,建立不同储集体类型下的注采井网形式一定要与储集体的空间发育规律相匹配^[13],同时考虑井间连通性和剩余油分布,使建立的注采井网在空间上形成较好的对应关系。

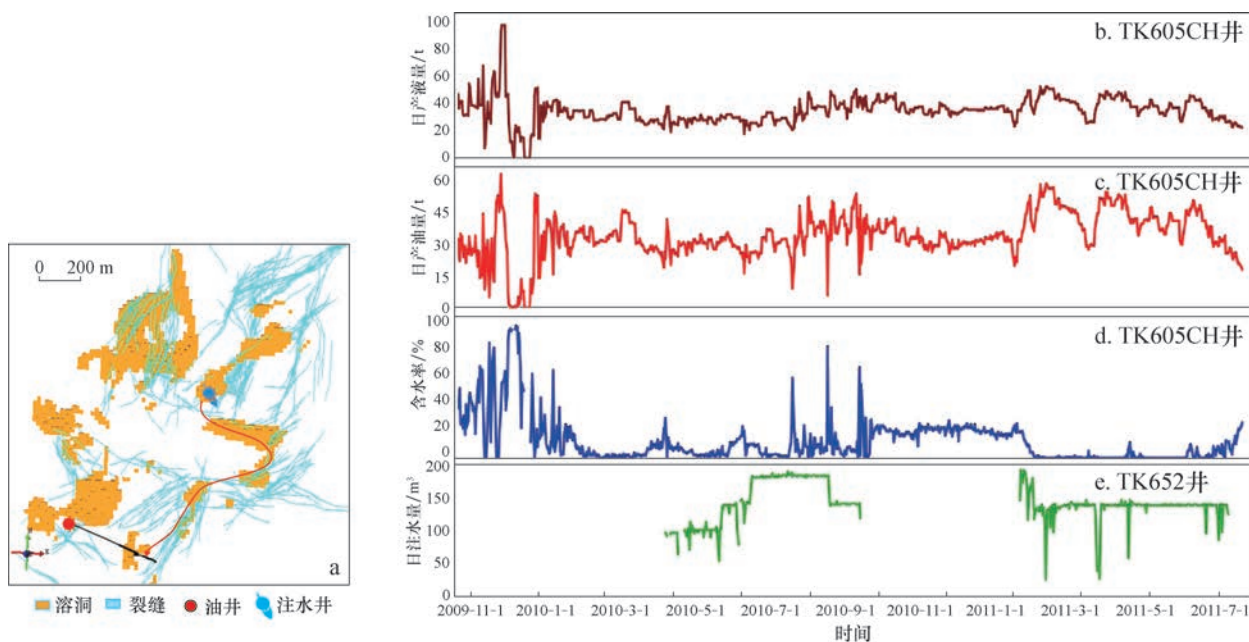


图2 塔河油田风化壳岩溶背景 TK652 - TK605CH 井区缝洞结构(a)和注采曲线(b-e)

Fig. 2 Fracture-vug structure (a) and injection-production curves (b-e) of TK652-TK605CH wellblock in weathered crust background in Tahe oilfield

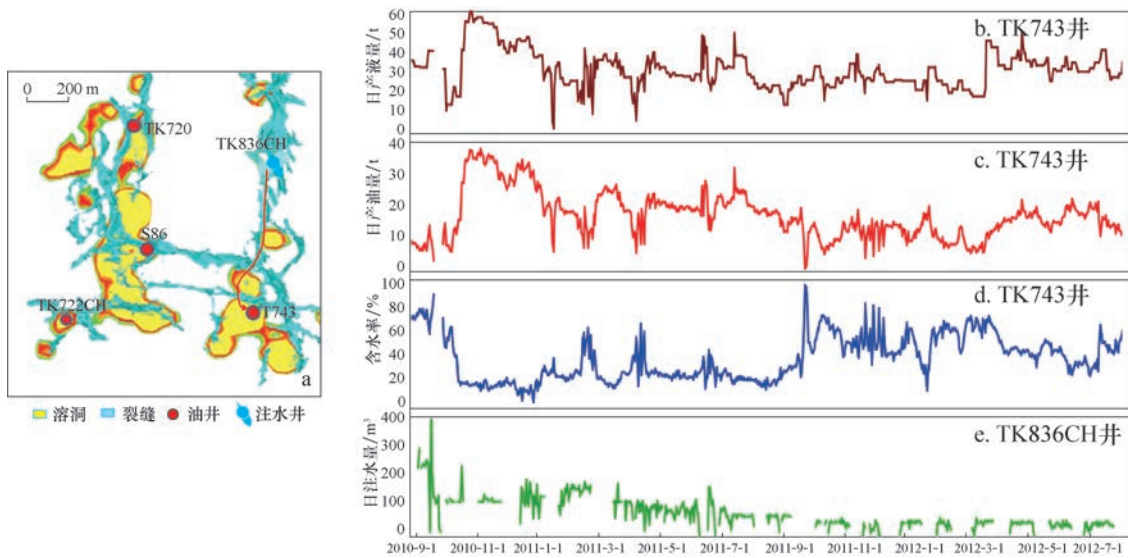


图3 塔河油田断控岩溶背景 TK836CH - TK743 井区缝洞结构(a)和注采曲线(b—e)
Fig.3 Fracture-vug structure (a) and injection-production curves (b—e) in TK836CH-TK743 wellblock in fault-controlling karst background in Tahe oilfield

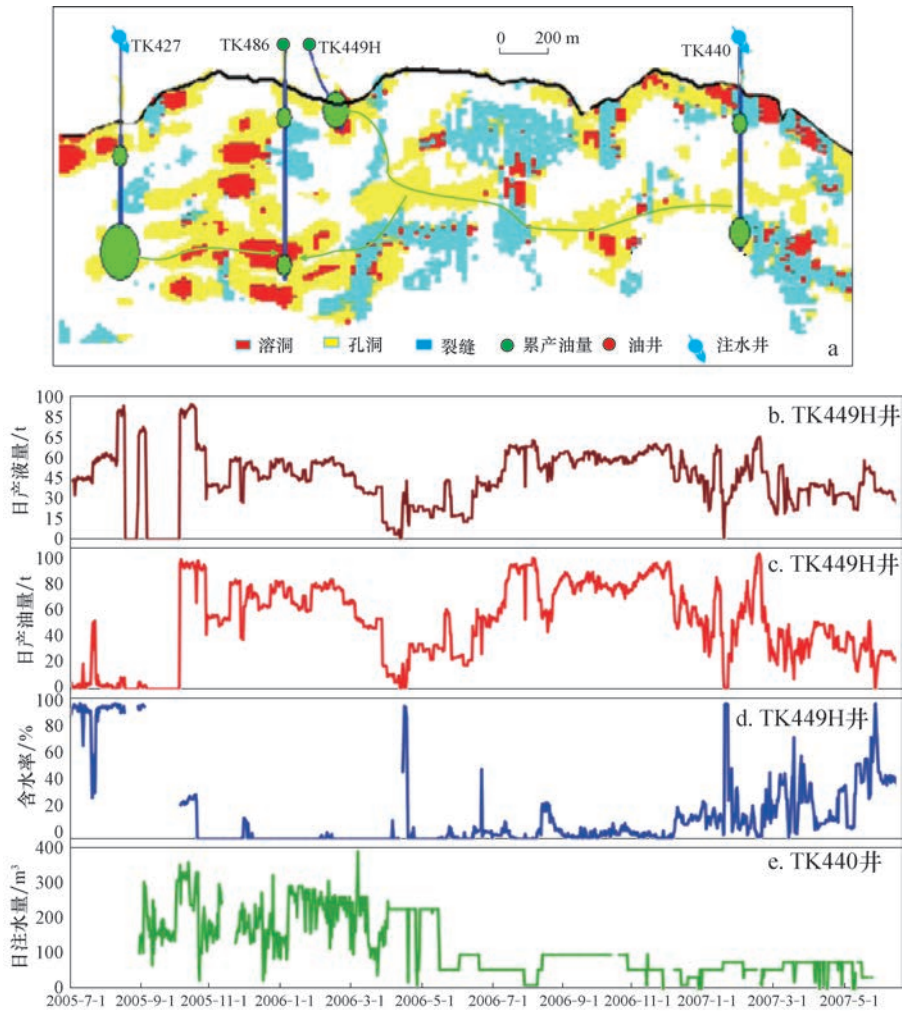


图4 塔河油田暗河岩溶背景 TK440 - TK449H 井区缝洞结构(a)注采曲线(b—e)
Fig.4 Fracture-vug structure (a) and injection-production curves (b—e) in TK440-TK449H wellblock in underground karst cave background in Tahe oilfield

表 1 塔河油田注采空间结构井网下的差异化注水方式表
Table 1 Differential water injection schemes for the spatial structure well pattern in Tahe oilfield

储集体类型	风化壳型	暗河型	断控缝洞型
井网形式	面状	线状	条带状
受效阶段	受效初期	连续注水	连续注水
	受效中期	周期注水	连续注水
	受效后期	非对称不稳定注水	换向注水

在注水方式上,根据不同的井网形式和受效阶段选择差异化的注水方式,如表 1 所示,风化壳型储集体的“面状”井网,在受效初期采取连续注水,以弥补亏空,建立连通关系为主;在受效中期实施周期注水,以增大波及体积,改驱替效率;在受效后期转换为非对称不稳定注水,实施短注长停,改变井间液流场分布,动

用弱通道井间剩余油。通过分阶段的优化注水方式在注采井网中,以全面体现注采空间结构井网“多向注采、多段注采、立体注采”的构建目的。

如风化壳岩溶地质背景下的 TK617CH - TK629 注采井组,初期采取 350 m³/d 注水强度连续注水,受效初期 TK629 井见效缓慢、特征不明显,含水率从 95%下降为 70%;在受效中期采取对称型周期注水方式,增大了注水波及范围,见效后 TK629 井含水率从 80%下降为 25%,并且油井受效持续时间长达 12 个月;在 TK629 井含水率开始回升后,转换注水方式为短注长停的非对称不稳定注水方式,油井含水上升速度得到有效的控制(图 5)。

4 结论

提出了碳酸盐岩缝洞型油藏“注采空间结构井网”的构建理念概念,该概念以缝洞体空间展布为基

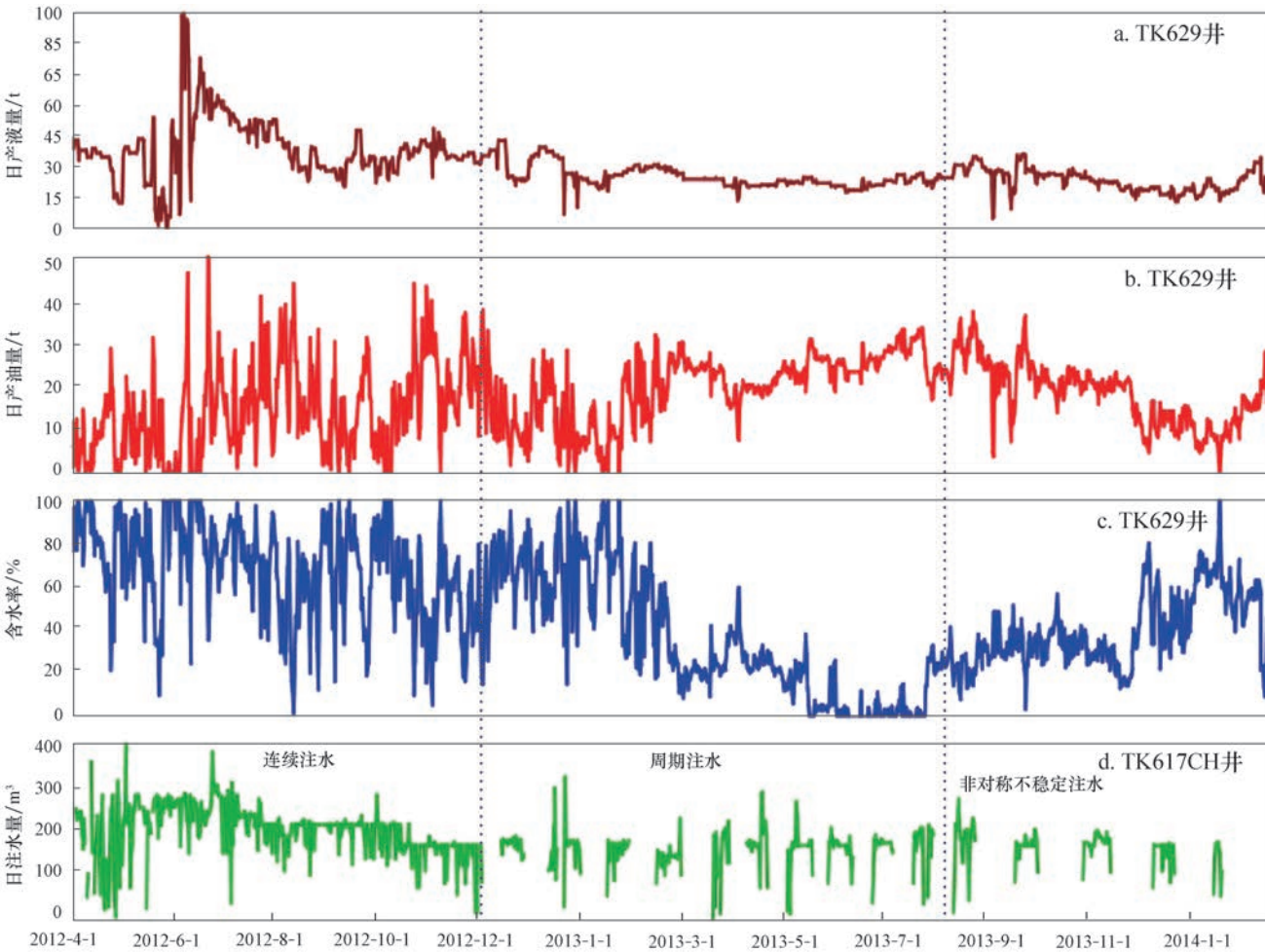


图 5 塔河油田风化壳岩溶背景 TK617CH - TK629 井组注采曲线

Fig. 5 Injection-production curves of TK617CH-TK629 well group in karst background of weathered crust in Tahe oilfield

础,考虑缝洞形态、尺度、结构、连通状况的差异性,构建不同缝洞结构下的井网形式、注采关系及开发对策,为碳酸盐岩缝洞型油藏高效注水开发提供重要参考。

在缝洞型油藏开发建设的生命周期内,注采井网系统的构建贯穿油田开发始终。碳酸盐岩缝洞型油藏注采空间结构井网的提出的意义在于突破了仅以平面部署注采井网的思想,将井网从二维平面结构发展到三维空间结构;建立了适应缝洞储集体特征的注采井网形式。但是,要实现不同井网形式下的高效注水开发还需要建立与井网形式相匹配的注水技术政策。

参 考 文 献

- [1] 漆立新. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 771-779.
Qi Lixin. Exploration practice and prospects of giant carbonate field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 771-779.
- [2] 黄太柱, 蒋华山, 马庆佑. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩油气成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 780-787.
Huang Taizhu, Jiang Huashan, Ma Qingyou. Hydrocarbon accumulation characteristics in Lower Paleozoic Carbonate reservoirs of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 780-787.
- [3] 吕海涛, 丁勇, 耿锋. 塔里木盆地奥陶系油气成藏规律与勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 798-805.
Lü Haitao, Ding Yong, Geng Feng. Hydrocarbon accumulation patterns and favorable exploration areas of the Ordovician in Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 798-805.
- [4] 王大鹏, 陆红梅, 陈小亮, 等. 海相碳酸盐岩大中型油气田成藏体系及分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 363-371.
Wang Dapeng, Lu Hongmei, Chen Xiaoliang, et al. Petroleum accumulation systems and distribution of medium to large marine carbonate fields[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 363-371.
- [5] 刘月田. 各向异性油藏注水开发布井理论与方法[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 101-104.
Liu Yuetian. Well location in water-flooring anisotropic oil reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 101-104.
- [6] 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 Changcheng, Lin Chengyan, Lu Xinbian, 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.
- [7] 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.
Lu Xinbian, Hu Wenge, Wang Yan, 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.
- [8] 鲁新便, 何成江. 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. Development features of karst ancient river system in Ordovician reservoirs, Tahe Oil Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 268-274.
- [9] 窦之林. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
Dou Zhilin. Development technology of carbonate slope-cave reservoir in Tahe Oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [10] 李源, 鲁新便, 王莹莹, 等. 塔河油田海西早期岩溶水文地貌特征及其演化[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 674-683.
Li Yuan, Lu Xinbian, Wang Yingying, et al. Hydrogeomorphologic characterization and evolution of the Early Hercynian karstification in Tahe oilfield, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 674-683.
- [11] 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(2): 22-25.
Lu Xinbian, Cai Zhongxian. A study of the paleo-cavern system in fractured-vuggy carbonate reservoirs and oil/gas development[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 22-25.
- [12] 金强, 田飞, 鲁新便, 等. 塔河油田奥陶系古径流岩溶带垮塌充填特征[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 729-735.
Jin Qiang, Tian Fei, Lu Xinbian, et al. Characteristics of collapse breccias filling in caves of runoff zone in the Ordovician karst in Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 729-735.
- [13] 王德龙, 郭平, 汪周华, 等. 非均质油藏注采井组均衡驱替效果研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(5): 122-125.
Wang Delong, Guo Ping, Wang Zhouhua, et al. Study on equilibrium displacement effects of injection-production well group in heterogeneous reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology edition, 2011, 33(5): 122-125.

(编辑 张亚雄)