

文章编号:1009-9603(2019)03-0123-06

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.03.017

陆相油藏全生命周期动力协同递进 开发模式研究及应用

穆立华¹,张雪娜²,毕永斌²,王秋语²

(1.中国石油冀东油田分公司,河北唐山 063000; 2.中国石油冀东油田分公司 勘探开发研究院,河北唐山 063000)

摘要:陆相油藏是中国油藏开发的主要对象,由于其自身特点,该类油藏在开发过程中面临多种挑战,并且不同开发阶段面临的主要矛盾各异,因此,以动力递进主导的全生命周期全要素协同开发是提高该类油藏开发效果的理论基础。在研究系统动力协同递进开发规律的基础上,提出油藏开发动力协同递进开发原理,认为层系细分和井网适应是油藏开发的主要引导力,介质超越是油藏开发的主要推动力。借助室内实验和数值模拟手段,就介质超越提出六大油藏开发驱替介质序列和五种油藏开发驱替介质动力协同递进典型组合。在此基础上,结合介质超越、层系细分与井网适应等油藏开发六大要素,应用金字塔原理,建立了油藏开发系统全要素协同开发宝塔图版,直观形象地阐明了油藏全生命周期动力协同递进开发模式,2010年依据该图版,按照正常接替递进典型组合模式,在柳赞北区实施气驱开发,阶段末采出程度达到23.4%,在水驱的基础上提高了14.8%。

关键词:动力递进序列;全生命周期;开发系统全要素;协同开发;产量生长模型

中图分类号:TE32

文献标识码:A

Research and application of dynamic synergetic progressive development model for whole life-cycle of continental reservoir

MU Lihua¹, ZHANG Xuena², BI Yongbin², WANG Qiuyu²

(1. PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan City, Hebei Province, 063000, China; 2. Research Institute for Exploration and Development, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan City, Hebei Province, 063000, China)

Abstract: The continental reservoirs are major development objects in China. There are a variety of challenges during this types of reservoirs development and the principle contradictions vary at different development stages. Therefore the theoretical basis of developing the reservoirs with high efficiency is to regard the development process as a whole life cycle with a priority to dynamic progressive. Based on the research on systematic dynamic synergetic progressive development rule, the principle of the dynamic synergetic progressive development was proposed, with the major leading force as the subdivision of series of strata and the adaptation of well patterns, and the driving force as the media transcendence. Six sequences on displacement media and five classical combinations about its progressive capacity were optimized through library experiment and numerical simulation. Based on these, combining with six development elements on the media transcendence, subdivision of series of strata, and adaptation of well patterns, etc., a pagoda-like chart about all the development elements by pyramid principle was established, which illuminates the synergetic development pattern of all the development elements in whole life-cycle dominated by dynamic progress. In 2010, according to the chart and normal replacement progressive typical combination model, the development of gas flooding was implemented in north Liuzan block. The percentage recovery of OOIP at the end of the stage reached 23.4%, which increased by 14.8% than that of water flooding.

Key words: dynamic progressive sequence; whole life-cycle; all development elements; synergetic development; production growth model

收稿日期:2019-03-15。

作者简介:穆立华(1962—),男,天津人,教授级高级工程师,博士,从事油气田开发研究及管理工作。联系电话:(0315)8766016,E-mail: mulihua@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地黄骅坳陷滩海开发技术示范工程”(2011ZX05050)。

中国油田大多数属于陆相沉积油藏,该类油藏具有油层层数多、非均质性强、水驱效率较低和天然能量较小等特点,使得油藏全生命周期开发过程中面临多种难题,而且随着油藏开发的深入,不同阶段面临的主要矛盾不同^[1-3]。目前关于油藏全生命周期开发对策的研究成果鲜有报道,已有的研究成果也仅限于项目全生命周期或是单井全生命周期^[4-5],忽略了油藏全生命周期各阶段要求。为此,笔者从唯物辩证法和系统学入手,研究系统发展的主要动力,创新提出油藏动力协同递进开发原理,研究油藏协同开发组合模式,设计全要素协调开发宝塔图版,按照该图版制定相应的开发对策,以期为实现油藏全生命周期科学、高效开发提供依据。

1 开发原理

从哲学、系统论和协同学等理论可知,系统发展的必然趋势是从简单到复杂、从无序到有序,最终达到新的平衡。系统发展的主要动力是引导力和推动力,分别主导系统发展路径方向和长度。如果引导力和推动力始终保持协同,系统发展就能顺利递进。否则,发展过程就会迂回曲折。这种动力协同递进的发展规律被称为系统动力协同递进规律。

陆相油藏的开发过程,是持续细分层系、不断完善井网来引导介质驱动方向并提高介质驱动能力的过程。层系细分与井网适应对油藏开发起主要引导作用,是油藏开发的主要引导力;提高介质的驱动能力,使接替介质性能不断超越被接替介质,对油藏开发起主要推动作用,是油藏开发的主要推动力。如果层系细分、井网适应和介质超越三者始终保持协同,油藏开发就能顺利递进。否则,开发过程迂回曲折。系统动力协同递进规律在油藏开发中应用,被称为油藏动力协同递进开发原理。

2 驱替介质动力递进序列及驱替动力协同递进组合

众所周知,提高采收率是油藏开发的永恒追求,驱替介质是影响采收率的主要因素。因此研究驱替介质动力递进关系就显得格外重要。

2.1 驱替介质动力递进序列

地层中剩余油的流动性是一个不断退化的过程,一方面受原油组分流动性差异的影响,容易流动的组分总是优先被采出;另一方面受地层非均质性的影响,渗透性较好的储层空间中的原油总是被

优先采出,因此,驱替介质动力递进是剩余油开采的必然需求。要求驱替介质对剩余油的溶解能力不断进化,通过互溶增强剩余油的流动能力,减少黏滞力和毛管压力等流动阻力,以适应剩余油开采的需要。另外,还需要驱替介质与剩余油的混相性不断增强,通过与剩余油的混相消除界面张力,从而提高剩余油的流动能力。因此溶解混相能力是判断驱替介质动力递进的重要依据。

溶解性是一种物质与一种或多种流体混合,并形成一种单一均质相的能力。物质按照溶解能力从小到大依次分为难溶、微溶、可溶、易溶和极易溶。混相性是两种或更多种流体以所有比例混合时形成单一均质相的能力^[4-5]。混相驱的驱油效果高于非混相驱^[6-7]。综合考虑溶解性和混相性,设计驱替介质能力递进序列,按驱替能力递进关系依次为难溶-非混相、微溶-非混相、可溶-非混相、可溶-混相、易溶-混相和极易溶-混相六大类。

目前常用的涉及到人工驱替介质的驱替方式有水压驱动、化学驱动和气压驱动等,对应的驱替介质有12种,水压驱动介质为水,化学驱动介质包括聚合物、表面活性剂、碱水、化学复合驱体系和泡沫5种,气压驱动介质包括氮气、烟道气、二氧化碳、干气、湿气和液化石油气6种。笔者借助室内实验和数值模拟法研究常见驱替介质在原油中的溶解混相能力与驱油动力之间的关系。

2.1.1 室内实验法

众所周知,气体介质更能满足介质易溶易混的发展要求,因此通过开展地层油与注入气体系统相态实验、最小混相压力实验及驱油实验,得到不同气体介质在原油中的溶解混相能力和驱替动力。

气体介质在原油中的溶解能力 由图1可见,在相同饱和和压力下,3种气体在原油中的溶解能力由大到小依次为二氧化碳、湿气和氮气。

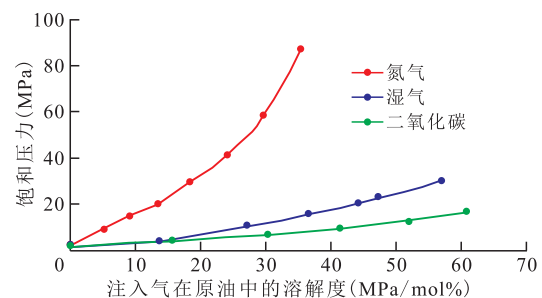


图1 气体介质在原油中的溶解能力

Fig.1 Soluble capacity of gas medium in crude oil

气体介质混相能力对比 通过3种气体介质与3个油样的最小混相压力实验,对比在同等条件下不同气体介质混相能力。测试结果(表1)表明,二

氧化碳和湿气最易混相,氮气不易混相。

表1 不同油样与3种气体介质最小混相压力测试结果

Table1 Test results of minimum miscible pressure in different media of different oil samples MPa

油样来源	二氧化碳	氮气	湿气
高深南区	33.27	> 40	37.91
NP1-29断块 Ng 油藏	16.45	> 25	19.59
NP1-5区 Ed ₁ 油藏	27.89	> 32	31.79

不同驱替介质驱油动力对比 不同驱替介质的驱油实验结果(表2)表明:在9种介质中,提高采收率最高的是混相条件下的湿气和二氧化碳;其次为非混相条件下的化学复合驱体系、湿气和二氧化碳;表面活性剂、泡沫和碱水次之;氮气、聚合物和水提高采收率幅度最低。

表2 不同驱替介质驱油实验结果

Table2 Experimental result of oil displacement efficiency of different media %

驱替介质	混相与否	水驱采收率	最终采收率	提高采收率
水	非混相	49.20		
聚合物	非混相	54.39	55.36	0.97
表面活性剂	非混相	50.17	66.01	15.84
碱水	非混相	51.55	63.71	12.16
化学复合驱体系	非混相	50.08	78.08	28.00
泡沫体系	非混相	46.78	60.61	13.83
氮气	非混相	49.85	51.82	1.97
二氧化碳	非混相	51.18	73.17	21.99
湿气	非混相	49.17	72.45	23.28
湿气	混相	45.10	76.10	31.00
二氧化碳	混相	45.90	76.20	30.30

2.1.2 数值模拟结果

在精细拟合室内相态实验的基础上,借助数值模拟手段,研究干气、烟道气、液化石油气、湿气、二氧化碳、氮气和水7种不同介质的驱油动力。从最终提高采收率幅度(表3)来看,提高采收率幅度由大到小依次为液化石油气、湿气、二氧化碳、干气、烟道气和氮气。

2.1.3 驱替介质动力递进序列分类

根据室内实验和数值模拟研究结果,将12种常见驱替介质按其溶解混相能力和驱油动力分为六大驱替介质动力递进序列(图2),这六大系列驱替介质的驱油动力是逐级递进关系。

2.2 驱替介质动力协同递进组合

驱替介质序列协同递进接替应用,有利于提高最终采收率。按照油藏开发驱替介质动力递进序列设计自然绿色递进、自然清洁递进、绿色递进、清洁

表3 不同驱替介质驱油效果对比

Table3 Comparison of oil displacement results in different media

驱替方式	产油量 (10 ⁴ t)	增油量 (10 ⁴ t)	极限采收率 (%)	提高采收率 (%)
水驱	0.31		30.87	
液化石油气驱	3.38	3.07	39.49	8.62
湿气驱	2.11	1.80	35.94	5.07
二氧化碳驱	2.05	1.75	35.77	4.90
干气驱	1.50	1.19	34.21	3.34
烟道气驱	0.81	0.50	32.26	1.39
氮气驱	0.72	0.41	32.03	1.16

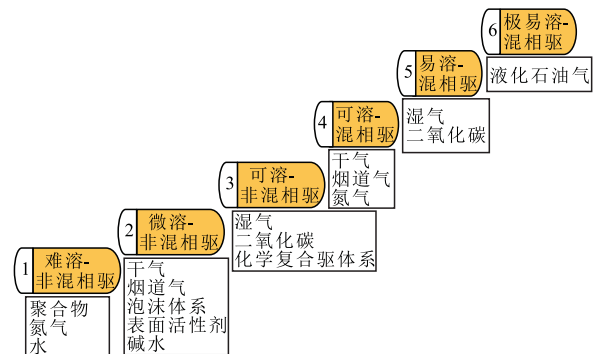


图2 常见驱替介质动力递进序列

Fig.2 General oil displacement efficiency progressive sequence

递进和正常接替递进五种全生命周期开发动力协同递进组合,分析了每种组合方式的优缺点(图3)。

类别	形式	优点	缺点
自然绿色递进典型组合	弹性驱, 二氧化碳驱, 烟道气驱, 干气驱, 液化石油气驱, 湿气驱, 人工水驱, 天然水驱	自然、绿色、效果好	处理复杂、安全性较差
自然清洁递进典型组合	弹性驱, 干气驱, 湿气驱, 液化石油气驱, 天然水驱	自然、简单、效果好	经济性较差
绿色递进典型组合	弹性驱, 溶解气驱, 烟道气驱, 二氧化碳驱	绿色、经济、效果好	处理复杂、安全性较差
清洁递进典型组合	弹性驱, 溶解气驱, 干气驱, 湿气驱, 液化石油气驱	清洁、简单、效果好	经济性较差
正常接替递进典型组合	弹性驱, 人工水驱, 烟道气驱, 二氧化碳驱	自然、绿色、经济	处理复杂、安全性较差

图3 砂岩油藏全生命周期开发动力协同递进组合及优缺点

Fig.3 Dynamics combination model of whole life-cycle development in sandstone reservoir and its advantages and disadvantages

3 开发模式

陆相油藏开发的主要推动力是驱替介质,但只

有开发系统全要素协同,才能保障油藏开发稳定有序进行^[8-11]。

3.1 全生命周期开发阶段划分

3.1.1 全要素协同

陆相油藏全生命周期开发应针对不同开发阶段不同矛盾,从层系组建、井网构建和驱替介质三大要素入手,以阶段采收率递进协同,极限采收率最大化为发展动力,最终按照动力阶段递进、动力极限向导的开发模式,实现动力递进主导的油藏全生命周期全要素协同开发。因此,驱替对象、驱替手段、驱替介质、发展方式、发展动力和开发模式是油藏开发系统的全要素。油藏开发系统全要素协同主要体现在3个方面:①主观与客观的协同。层系、井网和驱替介质是以客观为主的油藏开发要素。发展方式、发展动力和发展模式是以主观为主的油藏开发要素,是开发工作者在长期实践摸索中由感性认识到理性认识的升华。②统领与支撑的协同。驱替对象、驱替手段、驱替介质、发展方式和动力是在发展模式统领下环环联动、协同共荣。③共时与历时协同。油藏各要素在同一时间

相互联系、相互制约,体现油田开发的系统性;同时油田开发是一个过程的集合体,同一要素随着时间递进演变,体现要素内部的历时协同。

3.1.2 开发阶段划分

按照陆相油藏全生命周期全要素协同开发理念,可将油藏从初始平衡状态到废弃平衡状态全生命周期划分为7个开发阶段,依次分别为天然驱层系组合阶段、正能驱层系组合阶段、正能驱层系细分阶段、超能驱层系组合阶段、超能驱层系细分阶段、极限驱层系组合阶段和回收有利介质阶段。按照该开发阶段有序进行,可实现油藏的协同高效开发。

3.2 油藏开发系统全要素协同开发宝塔图版

陆相油藏涉及到层系、井网和驱替介质等全要素的协同开发。笔者在文献[12-13]的基础上,综合考虑油藏动力协同递进开发原理和全生命周期全要素协同开发两个方面,研究形成了分析陆相油藏动力递进主导的全生命周期全要素协同递进开发的方法——油藏开发系统全要素协同递进开发宝塔图版。该图版采用金字塔原理进行构思^[14-15],共分为6层21环(图4)。自下而上,第1—3层为层

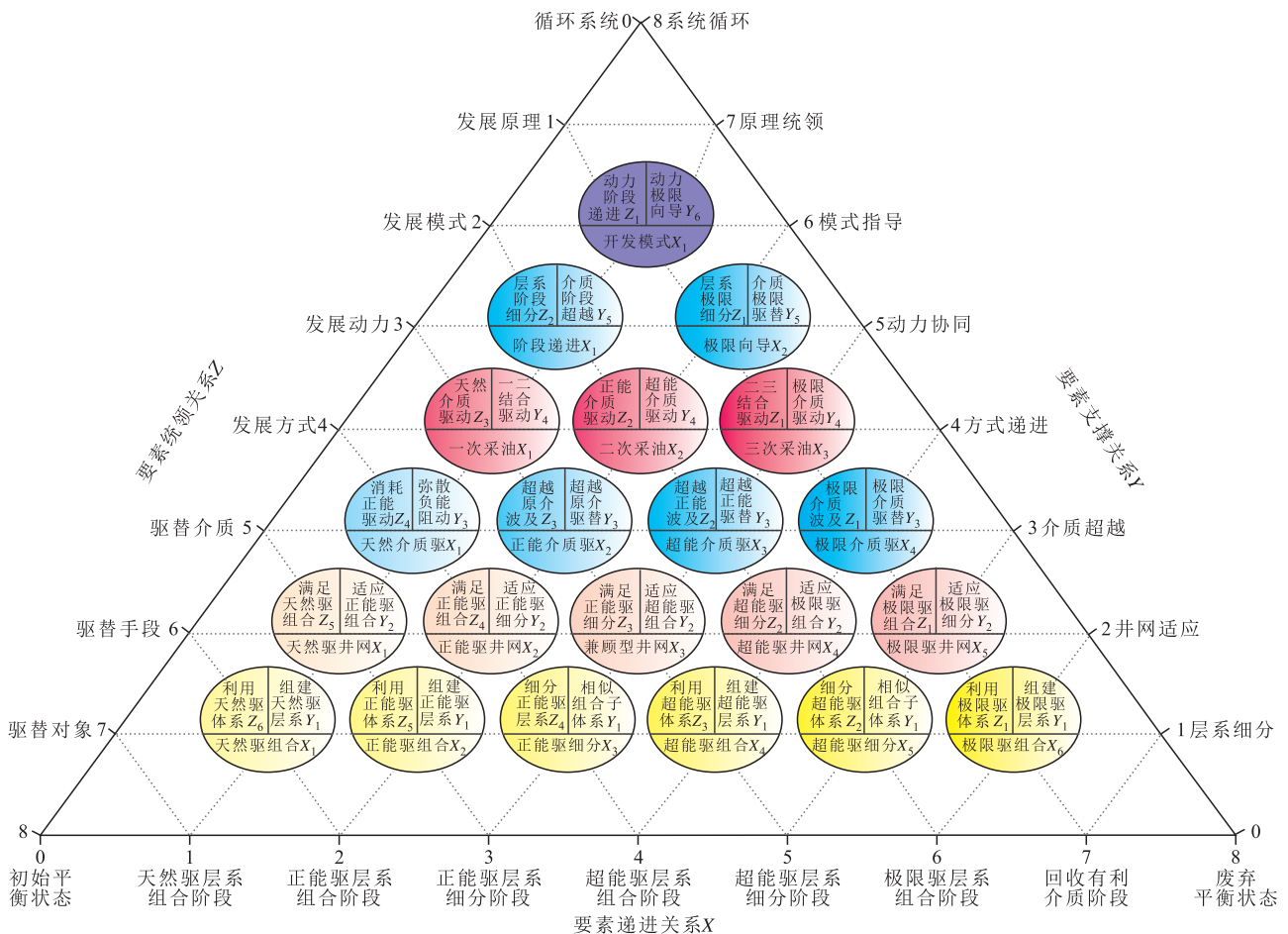


图4 油藏开发系统全要素协同递进开发宝塔图版

Fig.4 Pagoda-like chart about synergetic development of all elements in reservoir production system

系细分、井网适应和介质超越,包括15项动力协同递进开发模式,揭示了不同开发阶段、不同开发要素的协同顺序,明确了路径规划研究时相辅相成、相互作用的战术及做法。第4层为方式递进,以驱替介质为基础,提出了一次采油、二次采油和三次采油协同开发理念。第5层为动力协同,层系阶段细分、介质阶段超越指导了油藏开发中前期开发阶段的有序递进,层系极限细分、介质极限驱替指导了油藏开发后期开发阶段的有序递进。第6层为模式指导,动力阶段递进、动力极限向导是油藏开发

全生命周期的发展模式。

3.3 全生命周期动力协同递进开发特征

陆相油藏全生命周期动力协同递进开发是全过程的开发协同,协同的标准就是产量的平稳叠加、衰减,因此陆相油藏开发特征曲线具有典型的扇贝型特征(图5)。陆相油藏开发以该特征曲线为评判标准,若与曲线相符则为协同开发,反之则为不协同开发,应根据不协同开发的程度建立相应的评价系统进行准确、有效的判断,并因地制宜、辩证施策,制定出有针对性的协同计策,改善开发效果,

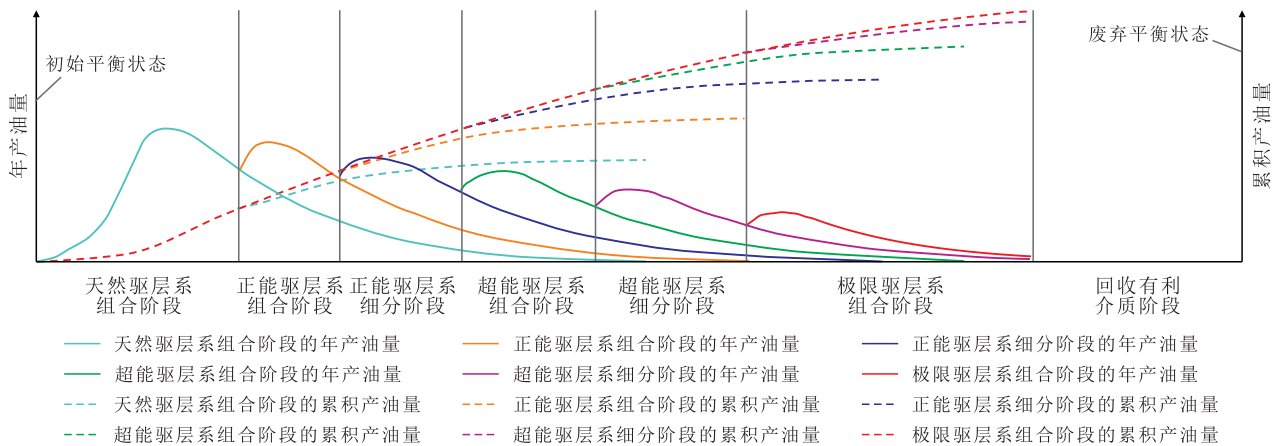


图5 全生命周期动力协同递进开发模式产量生长模型

Fig.5 Model of production growth in dynamic synergetic progressive development model of all elements in whole life-cycle

重新实现协同开发。

4 应用实例

柳赞北区断层根部于2000年投入开发,初期采用弹性开发,但地层能量不足,产量下降快,阶段末采出程度为2.2%,日产油量为7 t/d。2004年实施注水开发,油井见效明显,注水初期日产油量达60 t/d,由于笼统注采,单层突进严重,层间矛盾逐步显现,之后实施层系细分,开发效果有所好转,采出程度为8.6%。2010年后,以油藏开发系统全要素协同递进开发宝塔图版为指导,以动力阶段递进、动力极限向导为发展模式,以层系阶段细分和介质阶段超越为发展动力,确定采用三次采油开发方式,结合精细地质研究成果及开发历程,按照正常接替递进典型组合模式,考虑气体介质来源,确定后续驱替介质为二氧化碳。根据剩余油富集程度及地层倾角,确定气驱层位为 $E_{s_3}^3IV_2$ 油组。顶部部署注气井6口,低部位注水井8口,对应生产井20口。注气使该试验区取得较好的开发效果,截至2018年1月,气驱见效井为11口,注气初期日产油量为110 m³/d,

单井最长有效期达1 524 d,单井最高增油量为1.9×10⁴ t,阶段末采出程度达到23.4%,在水驱的基础上提高了14.8%,该油藏在弹性驱层系组合阶段、水驱层系组合阶段和水驱层系细分阶段、二氧化碳驱层系组合阶段递进协同作用下(图6),实现了高效开发的理念。

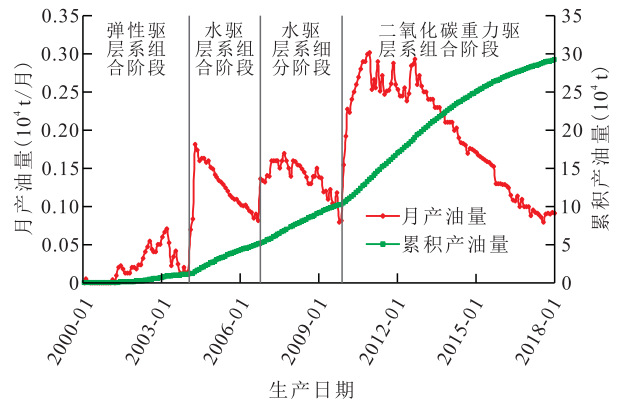


图6 柳赞北区断层根部 $E_{s_3}^3IV_2$ 油组生产曲线

Fig.6 Production curve of $E_{s_3}^3IV_2$ oil group at root of fault in the north of Liuzan block

5 结论

层状非均质砂岩油藏的开发要遵循油藏动力

协同递进开发原理,层系细分和井网适应是油藏开发的主要引导力,介质超越是油藏开发的主要推动力。

从驱替介质溶解混相能力和驱油动力入手,建立油藏开发驱替介质能力递进六大序列,推导出五种油藏开发驱替介质能力递进典型组合。

全生命周期动力协同递进开发过程中全要素共时协同、单要素历时递进,油藏全生命周期可划分为7个开发阶段。

油藏开发系统全要素协同递进开发宝塔图版,涵盖了陆相油藏开发过程中六大要素协同应变方法,全生命周期动力协同递进开发模式能够指导油藏协同递进开发。

参考文献

- [1] 许宁.油藏立体开发现状及研究进展[J].断块油气田,2014,21(3):322-325.
XU Ning.Present situation and research progress of tridimensional reservoir development[J].Fault-Block Oil & Gas Field,2014,21(3):322-325.
- [2] 王端平,杨勇,许坚,等.复杂断块油藏立体开发技术[J].油气地质与采收率,2011,18(5):54-57.
WANG Duanping, YANG Yong, XU Jian, et al.Three-dimensional development techniques in complicated fault-block reservoir[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2011,18(5):54-57.
- [3] 张攀攀.胜利油田东辛油田辛10复杂断块油藏立体开发研究[J].科技经济导刊,2017,25(4):133.
ZHANG Panpan.Three-dimensional development technology for Xin10 block of Dongxin oil field in Shengli[J].Technology and Economic Guide,2017,25(4):133.
- [4] 刘斌,易维容,梁生朗,等.SAGD项目经济评价模式探讨[J].特种油气藏,2013,20(1):143-145.
LIU Bin, YI Weirong, LIANG Shenglang, et al.Study on methods of economic evaluation for SAGD[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2013,20(1):143-145.
- [5] 王业飞,高苗,谭龙.裂缝-基质模型CO₂混相注入提高原油采收率[J].油气地质与采收率,2018,25(5):87-92.
WANG Yefei, GAO Miao, TAN Long.Experimental investigation of miscible CO₂ injection for enhanced oil recovery in fracture-matrix model[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2018,25(5):87-92.
- [6] 布雷德利H B.石油工程手册下册:油藏工程[M].北京:石油工业出版社,1996:900-906.
BRADLEY H B.Petroleum engineering handbook (Volume2):reservoir engineering[M].Beijing:Petroleum Industry Press,1996:900-906.
- [7] 吕成远,王锐,赵淑霞,等.低渗透油藏CO₂非混相驱替特征曲线研究[J].油气地质与采收率,2017,24(5):111-114.
LÜ Chengyuan, WANG Rui, ZHAO Shuxia, et al.Study on displacement characteristic curve in CO₂ immiscible flooding for low permeability reservoirs[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2017,24(5):111-114.
- [8] 周锡生,张海霞,张福玲,等.三低油藏水驱精细挖潜技术[J].大庆石油地质与开发,2018,37(4):44-49.
ZHOU Xisheng, ZHANG Haixia, ZHANG Fuling, et al.Fine potential tapping technique for water-flooded three-low oil reservoirs[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2018,37(4):44-49.
- [9] 赵树成.杏树岗油田厚油层顶部剩余油水平井强碱三元复合驱试验效果[J].大庆石油地质与开发,2017,36(6):109-114.
ZHAO Shucheng.Experimental effects of the horizontal-well strong alkaline ASP flooding for the remained oil on the top of thick reservoirs of Xingshugang Oilfield[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2017,36(6):109-114.
- [10] 刘遥,荣元帅,杨敏.碳酸盐岩缝洞型油藏缝洞单元储量精细分类评价[J].石油实验地质,2018,40(3):431-438.
LIU Yao, RONG Yuanshuai, YANG Min.Detailed classification and evaluation of reserves in fracture-cavity units for carbonate fracture-cavity reservoirs[J].Petroleum Geology and Experiment,2018,40(3):431-438.
- [11] 常少英,朱永峰,曹鹏,等.地质工程一体化在剩余油高效挖潜中的实践及效果——以塔里木盆地YM32白云岩油藏为例[J].中国石油勘探,2017,22(1):46-52.
CHANG Shaoying, ZHU Yongfeng, CAO Peng, et al.Application of geology-engineering integration in high-efficiency remaining oil potential tapping and its results: a case study on YM32 dolomite oil reservoirs in Tarim Basin[J].China Petroleum Exploration,2017,22(1):46-52.
- [12] 穆立华,苏景学,张梅,等.陆相层状砂岩油藏全生命周期协同开发[J].断块油气田,2017,24(1):51-55.
MU Lihua, SU Jingxue, ZHANG Mei, et al.Synergetic development of continental lamellar sandstone reservoirs in whole lifecycle[J].Fault-Block Oil & Gas Field,2017,24(1):51-55.
- [13] 穆立华,张梅,毕永斌.陆相层状砂岩油藏开发计策协同组合研究[J].特种油气藏,2016,23(1):81-86.
MU Lihua, ZHANG Mei, BI Yongbin.Collaborative combination study on developing strategy of continental layered sandstone reservoir[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2016,23(1):81-86.
- [14] 芭芭拉 明托.金字塔原理[M].汪洱,高愉,译.海口:南海出版公司,2013:14-25.
BARBARA Minto.Pyramid principle[M].WANG Er, GAO Yu, trans.Haikou:Nanhai Publishing Company,2013:14-25.
- [15] 李红玥,王超.信息系统业务需求编写要点探讨[J].金融电子化,2016,24(7):74-75.
LI Hongyue, WANG Chao.Discussion on composing key points of business requirements in information systems[J].Financial Computerizing,2016,24(7):74-75.

编辑 常迎梅