

# 超低渗油藏水平井网参数优化

苗万春\*, 吕娜娜, 田甜, 苏萌, 魏小东, 刘利娟#

长庆油田第十采油厂, 甘肃 庆阳

收稿日期: 2022年5月5日; 录用日期: 2022年6月17日; 发布日期: 2022年6月24日

## 摘要

华庆油田元284区块属于超低渗透油藏, 具有储层的物性较差, 非达西渗流特征明显, 存在启动压力梯度等特点; 使得油井见水后含水上升速度加快, 单井产能较低等问题。为了解决上述问题, 对该油藏的水平井的井网参数进行优化。采用油藏数值模拟方法, 对研究区的五点水平井网参数进行优化, 确定合理的水平井参数, 合理井距为400 m, 排距为140 m, 合理水平段长度为400 m。

## 关键词

超低渗透油藏, 井网优化, 数值模拟

# Parameter Optimization of Horizontal Well Pattern in Ultra-Low Permeability Reservoir

Wanchun Miao\*, Nana Lyu, Tian Tian, Meng Su, Xiaodong Wei, Lijuan Liu#

No. 10 Oil Production Plant of Changqing Oilfield, Qingyang Gansu

Received: May 5<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jun. 17<sup>th</sup>, 2022; published: Jun. 24<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Block Yuan 284 in Huaqing Oilfield is an ultra-low permeability reservoir with poor physical properties, obvious non-Darcy seepage characteristics, and a starting pressure gradient. As a result, the water rise rate of the oil well after seeing water is accelerated, and the production capacity of a single well is low. In order to solve the above problems, the well pattern parameters of the horizontal wells in the reservoir are optimized. Using the reservoir numerical simulation method, the five-point horizontal well pattern parameters in the study area are optimized, and the reasonable horizontal well parameters are determined. The reasonable well spacing is 400 m, the row spacing is 140 m, and the reasonable horizontal section length is 400 m.

\*第一作者。

#通讯作者。

## Keywords

Ultra-Low Permeability Reservoir, Well Pattern Optimization, Numerical Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国低渗透油藏资源储量丰富,但低渗油藏具有低渗、低压、低丰度的特征,同时具有显著的非达西渗流效应[1],这些因素加大了低渗油藏的开采难度。在开发过程中,低渗透油藏通常表现为储量动用难度大、可动用程度低、注水沿主渗流方向突进以及平面驱替不均衡的特点,导致了注水开发效果较差[2];近年来通过多个非常规油气藏的开发实践证明压裂水平井是非常规油气藏的主要开发技术[3]。华庆油田元 284 区块为典型的低渗-特低渗砂岩油藏,储层非均质性强,物性差且微裂缝较为发育;一般采用压裂投产方式进行开发,但是压裂投产后,开发效果也并不理想,随着后续开发,研究区出现了注水见效差、产能下降快以及油井见效后含水上升快等问题,为了解决上述问题,急要对研究区井网参数进行研究论证;在对水平井网进行优化的关键是要考虑储层的基本的渗流特征[4]-[9]。

目前对水平井网进行优化的研究主要采用油藏数值模拟方法,凌宗发[10]等采用油藏数值模拟方法对水平井注采井网的部署方案进行研究,得出水平井与直井注水相比较,水平井注采井网更有利于线性驱动的形成,提高波及效率,改善油藏开发效果,得到水平井网的井网优化方案。张枫[11]等结合目标区块的地质特征建立三维地质模型,采用油藏数值模拟方法,得到目标区块的合理井网参数。根据油藏的地质特征,采用油藏数值模拟方法,结合裂缝系统与井网系统的关系进行参数优化,得到研究区合理的水平井网参数。

## 2. 研究区概况

华庆油田是在鄂尔多斯盆地内部发现的,在划分盆地类型上,鄂尔多斯盆地是一个地台、台缘拗陷与台内拗陷多期叠置多旋回克拉通盆地;在构造层面上进行划分,主要为伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、天环拗陷、西缘冲断带以及中部伊陕斜坡六个一级构造单元[12]。研究区元 284 区块则位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡南部,研究区属于三叠系长 63 油层组,根据沉积旋回与岩相组合又将长 63 进一步划分为三个小层,分别为长 631、长 632、长 633;主力层为长 632 小层。前人对华庆油田长 6 油层组的沉积相研究结果表明:华庆油田延长组长 6 油组整体属于辫状河三角洲沉积[13][14][15];但是进一步对华庆油田长 63 砂层组的岩心观察以及测井资料的分析表明:华庆油田三叠系的延长组长 63 砂层组属于三角洲前缘快速堆积而成的沉积物由于滑塌所形成的湖底浊积扇沉积体系[16][17],即元 284 区块沉积体系主要为湖底浊积扇体系,主要沉积微相为浊积水道。天然裂缝较为发育,主要为高角度裂缝;通过室内岩芯测试、井下微地震、5700 测井等手段,获取华庆油田长 6<sub>3</sub> 油藏储层水平最大主应力方位平均为 N75°E~N77°E 左右。研究区长 6<sub>3</sub> 油层组平均孔隙度为 11.2%,平均渗透率为 0.34 mD。该油田开发初期主要采用定向井和水平井进行开发。本文主要研究水平井的井网形式,水平井网形式以五点水平井网和七点水平井网为主。

针对研究区储层物性差,需要对油井进行压裂才能进行投产等特点,考虑天然裂缝的因素,将裂缝

系统与井网系统的适配性进行优化，提高油田的开发效益。

### 3. 井网形式优化

根据收集的华庆油田实际地质资料，利用 Eclipse 油藏数值模拟软件，建立油藏数值模型。油藏、流体基本物性参数：油藏中深 2165 m，平均有效厚度 19.7 m，平均有效孔隙度 11.7%，平均渗透率 0.34 mD；原油地面粘度 6.4 mPa·s，原油地面密度 0.8537 g/m<sup>3</sup>；地面水密度 1000 Kg/m<sup>3</sup>，原始地层压力 15.8 MPa，岩石压缩系数饱和压力 10.7 MPa，溶解气油比 115.7 m<sup>3</sup>/t。网格划分为 250 × 250 × 1，网格步长 dx = dy = 5 m，dz = 20 m。

结合同类超低渗透油藏开发成功的经验：微裂缝的相对发育会导致地层渗透率具有显著的方向性，生产井压裂投产在井底附近会形成明显的人工裂缝。考虑裂缝对注水开发的影响，我们在对后面的开发技术政策进行论证时，对油藏数值模型采取以下处理：a：设计裂缝方向为 X 方向，该方向的渗透率为 Y 方向的 5 倍；b：所有生产井在井底附近形成沿 X 反向分布、裂缝半长 100 m，人工裂缝的渗透率为地层渗透率的 100 倍。数值模拟研究如下：

井网形式：五点井网形式、七点井网形式。

根据矿场实践和经验，设计了两种水平井井网形式，包括五点水平井网(如图 1 所示)、七点水平井网(如图 2 所示)共 2 种模拟方案，水平井压裂裂缝的设计如图 3 所示。

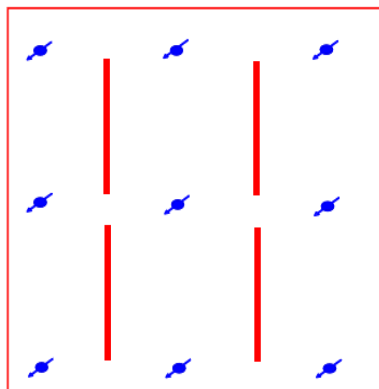


Figure 1. Deployment diagram of five-point horizontal well pattern  
图 1. 五点水平井网部署图

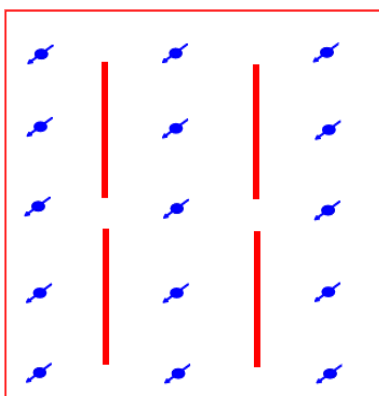
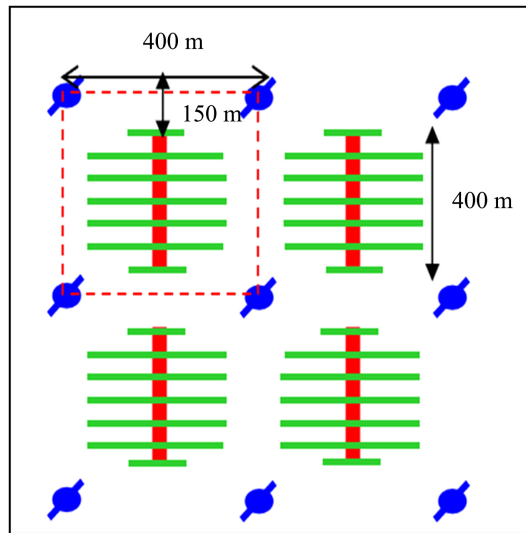


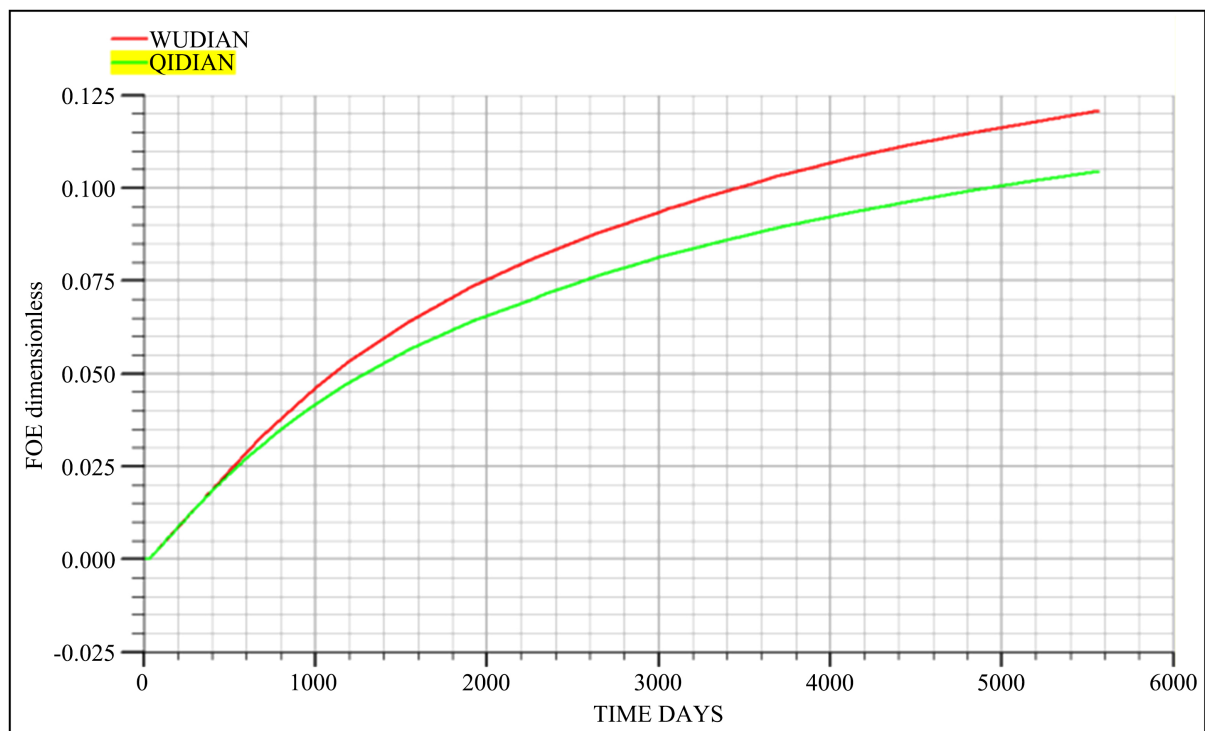
Figure 2. Deployment diagram of seven-point horizontal well pattern  
图 2. 七点水平井网部署图



**Figure 3.** Schematic diagram of five-point horizontal well pattern and fracture layout

**图 3.** 五点水平井网布缝示意图

针对不同的井网形式即五点井网和七点井网，进行数值模拟研究，开发模拟生产 15 年，从图 4 两种井网形式的开发效果对比：五点水平井网开发预测 15 年后，采收率可达 12.18%，且五点水平井网采出程度略高于七点水平井网；从图 5 两种井网形式的累产油曲线来看：五点水平井网形式的累产油量高于七点水平井网形式；因此建议改区块的水平井网形式选取五点水平井网能够获得较好的开发效果。



**Figure 4.** Comparison of recovery factors of different well patterns

**图 4.** 不同井网形式采收率对比

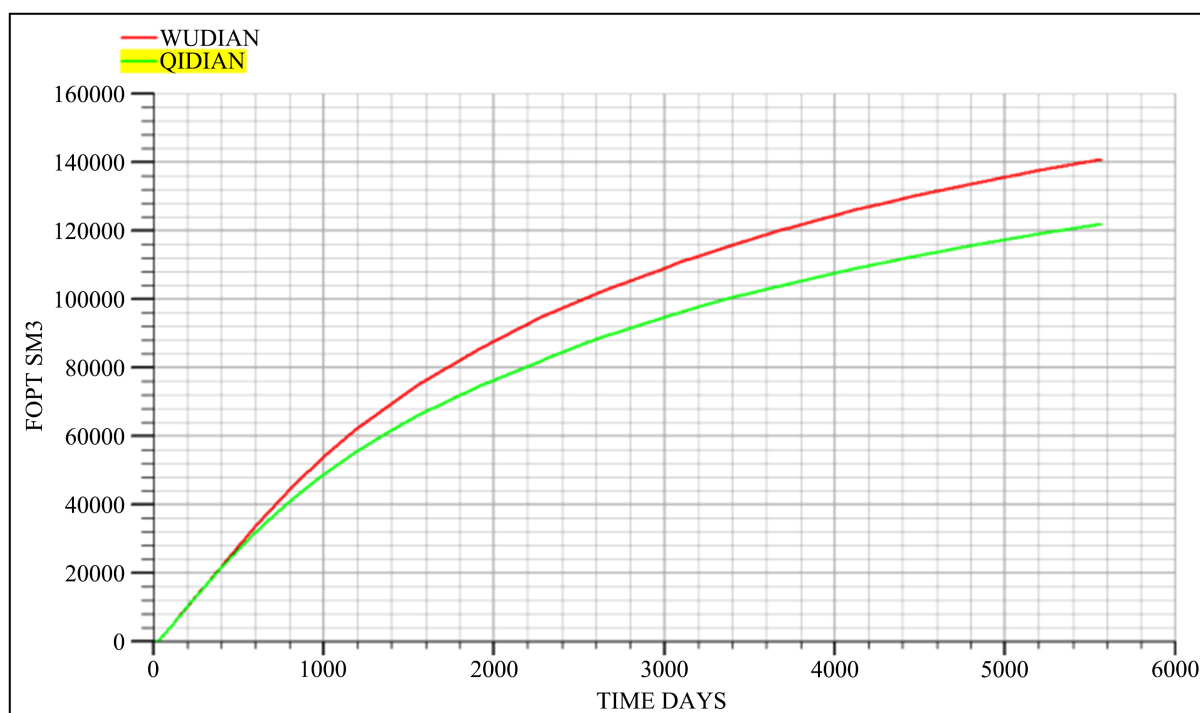


Figure 5. Comparison of cumulative oil production of different well patterns

图 5. 不同井网形式累产油对比

### 3.1. 井距优化

根据不同的开发需求，井网制定方案可能会不同，对于低渗透油藏的开发，要建立有效的驱替，在区块中的注采井之间建立有效的驱替，首先要注意的是两井之间的井距不能太大，其次还要考虑到油田在开采过程中的经济效益，即井网密度亦不能太大，根据实际开发过程中存在的矛盾以及油田的经济效益，所以需要井网井距进行优选。

研究区五点水平井网的井距普遍为 400 m 左右，结合矿场实际情况，设计不同井距方案 4 套(见表 1)，分别为：320、360、400、440 m。开发模拟生产 15 年，数值模拟结果表明：从图 6 可以看出：随着井距的不断增大，日产油量的递减速率在逐渐减小，当井距超过 400 m 时，日产油量反而降低；从图 7 可以得出：随着井距的不断增大，采收率也在不断的增大，当井距超过 400 m 时，采收率反而减小，这是因为井距为 440 m 时由于井网密度减小，日产油和采收率均较低，同时根据模拟的剩余油饱和度场分布图(图 8)可以看出，水平井网井距为 400 m 时，剩余油饱和度分布面积较大，动用面积大，效果最好；综上所述，研究区合理的井距为 400 m。

Table 1. Scheme design of horizontal well pattern with different well spacing

表 1. 水平井网不同井距方案设计

方案名	井网	井距(m)	排距(m)	生产方式
方案 1	水平井网	320	150	定流压
方案 2	水平井网	360	150	定流压
方案 3	水平井网	400	150	定流压
方案 4	水平井网	440	150	定流压

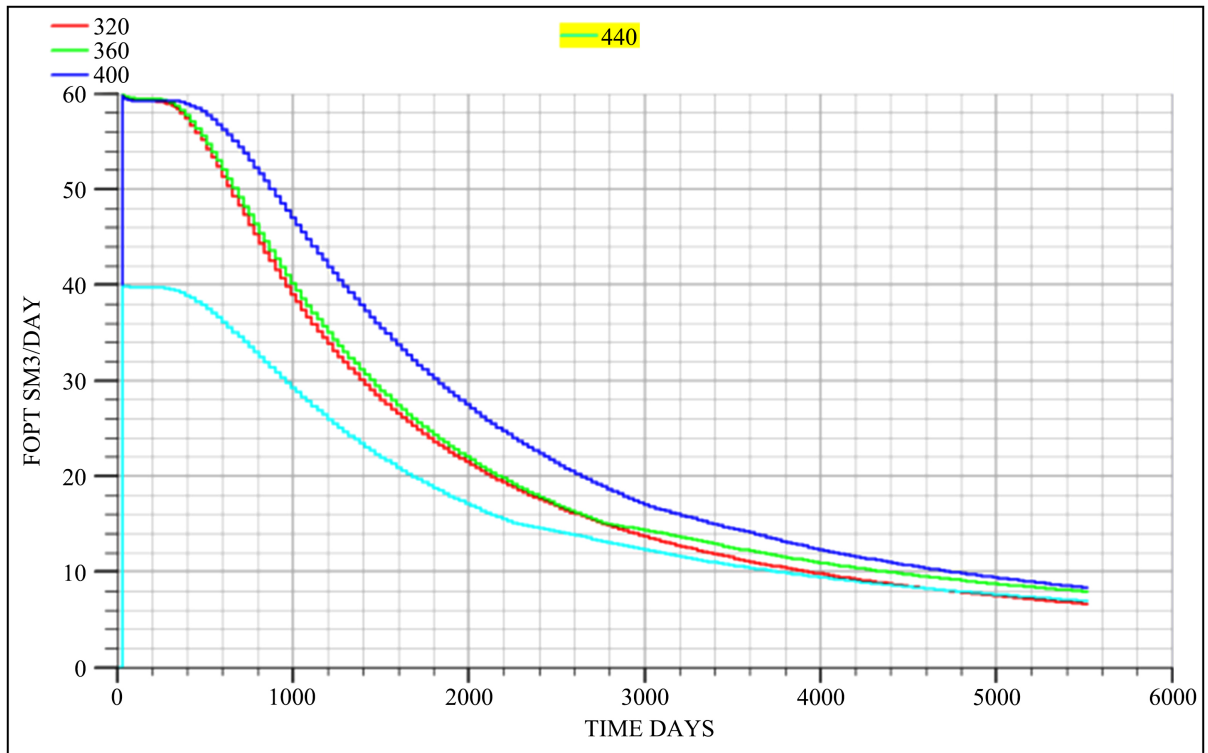


Figure 6. Daily oil production curves of blocks with different well spacings  
图 6. 不同井距区块日产油曲线

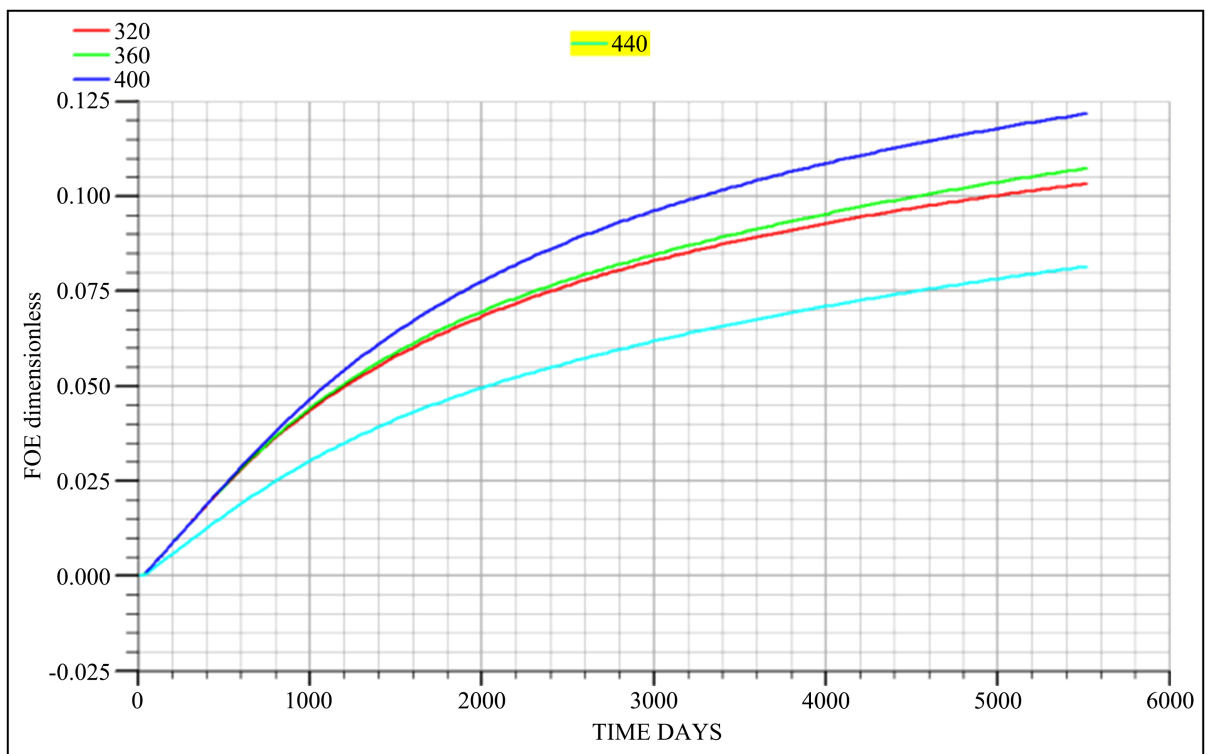


Figure 7. Recovery factor curves of different well spacings  
图 7. 不同井距采收率曲线

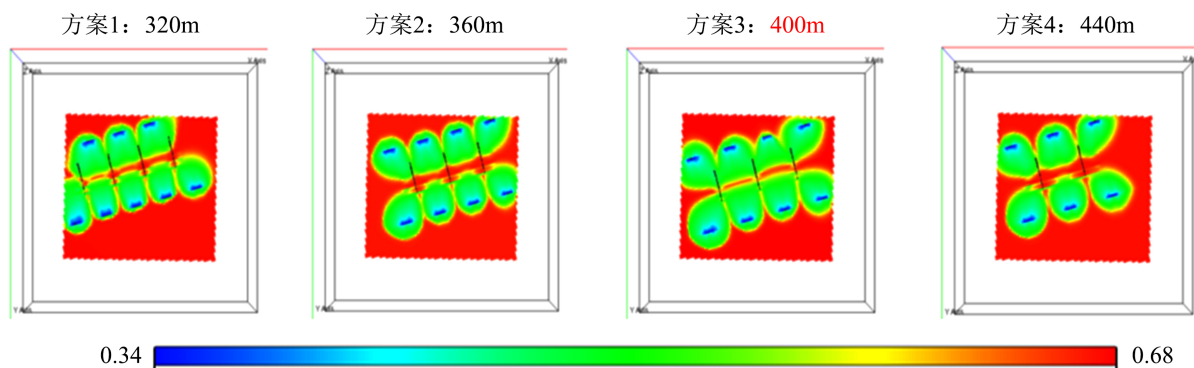


Figure 8. Comparison of oil saturation under different well spacings

图 8. 不同井距下含油饱和度对比图

### 3.2. 排距优化

#### 1) 启动压力梯度法

根据华庆长  $6_3$  油藏储层的启动压力测定实验结果如图 9 所示, 考虑启动压力梯度的影响, 形成合理排距的理论图版, 进行合理排距的优化, 如图 10 所示。现场注水为保证建立起有效的驱替压力系统, 要求注采井间任一点的驱替压力梯度均大于启动压力梯度。其中华庆长  $6_3$  物性 0.34 mD, 根据图 10 的合理排距理论图版, 确定华庆长  $6_3$  油藏储层合理排距 140 m 左右。

#### 2) 油藏数值模拟

研究区排距普遍为 150 m 左右, 结合矿场的实际情况, 进行水平井排距的优化, 定井距 400 m, 设计不同的排距方案 4 套(见表 2), 分别为 100、120、140、160 m, 开发模拟生产 15 年, 从图 11 日产油变化曲线可以看出: 随着排距的不断增大, 日产油在逐渐减少, 但日产油递减速率也在逐渐减缓, 当排距超过 140 m 时, 日产油递减速率反而增大; 从图 12 采收率变化曲线可以看出: 随着排距的不断增大, 采收率也在不断的增大, 由于排距为 100 m 时, 井网密度较大, 所以采收率偏高, 当排距超过 140 m 时, 采收率反而降低; 同时根据模拟的剩余油饱和度场分布图(图 13)可以看出, 水平井网排距为 140 m 时, 剩余油饱和度分布面积较小, 动用面积大, 效果最好; 综上所述: 研究区合理排距为 140 m。

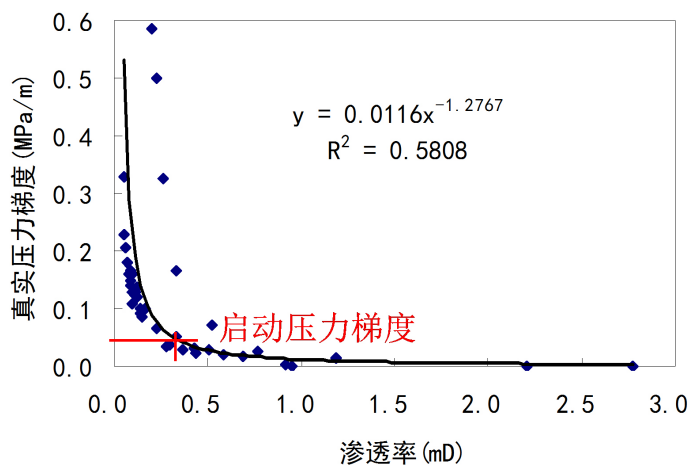


Figure 9. Relationship between true threshold pressure gradient and permeability

图 9. 真实启动压力梯度与渗透率关系图

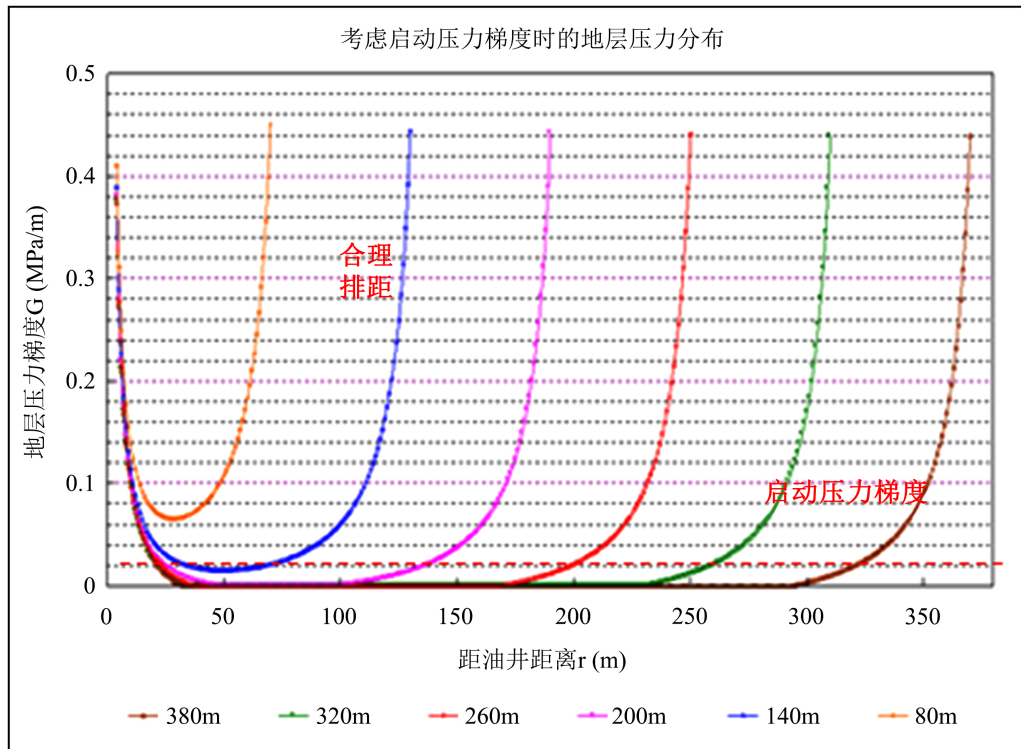


Figure 10. Relationship between row spacing and formation pressure gradient ( $K = 0.3 \text{ mD}$ )

图 10. 排距与地层压力梯度关系( $K = 0.3 \text{ mD}$ )

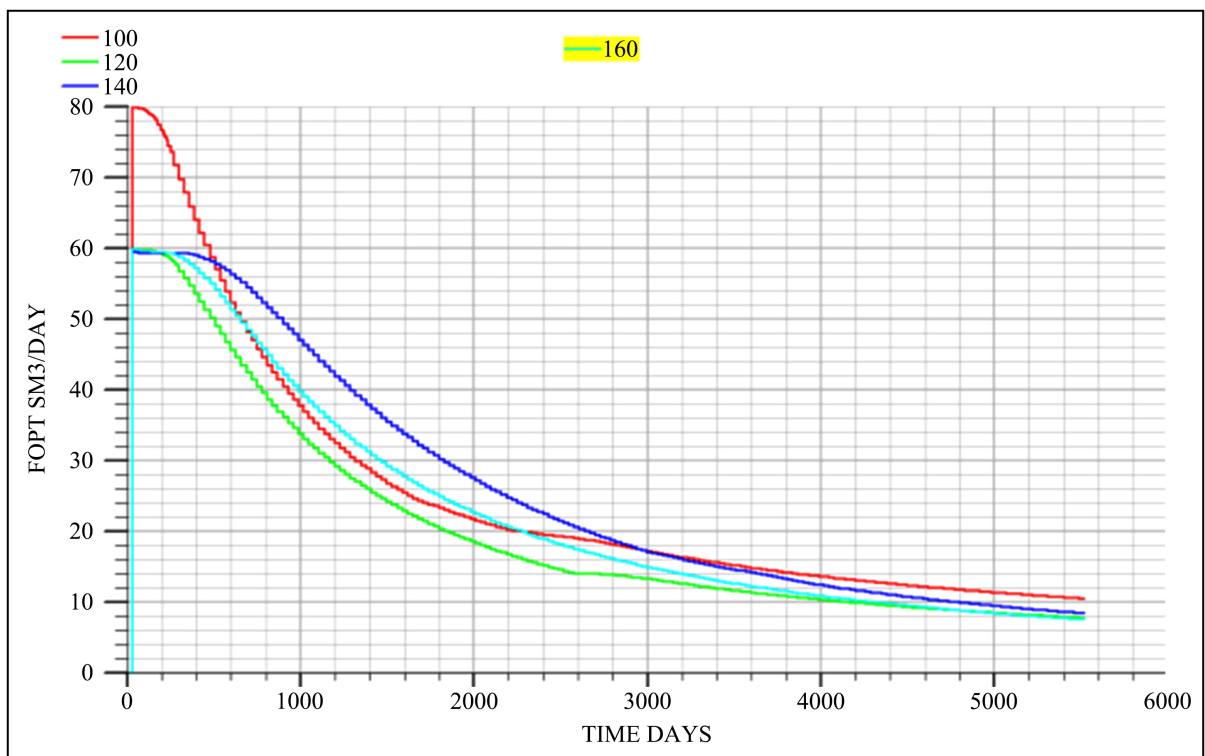


Figure 11. Daily oil production curves of blocks with different row distances

图 11. 不同排距区块日产油曲线



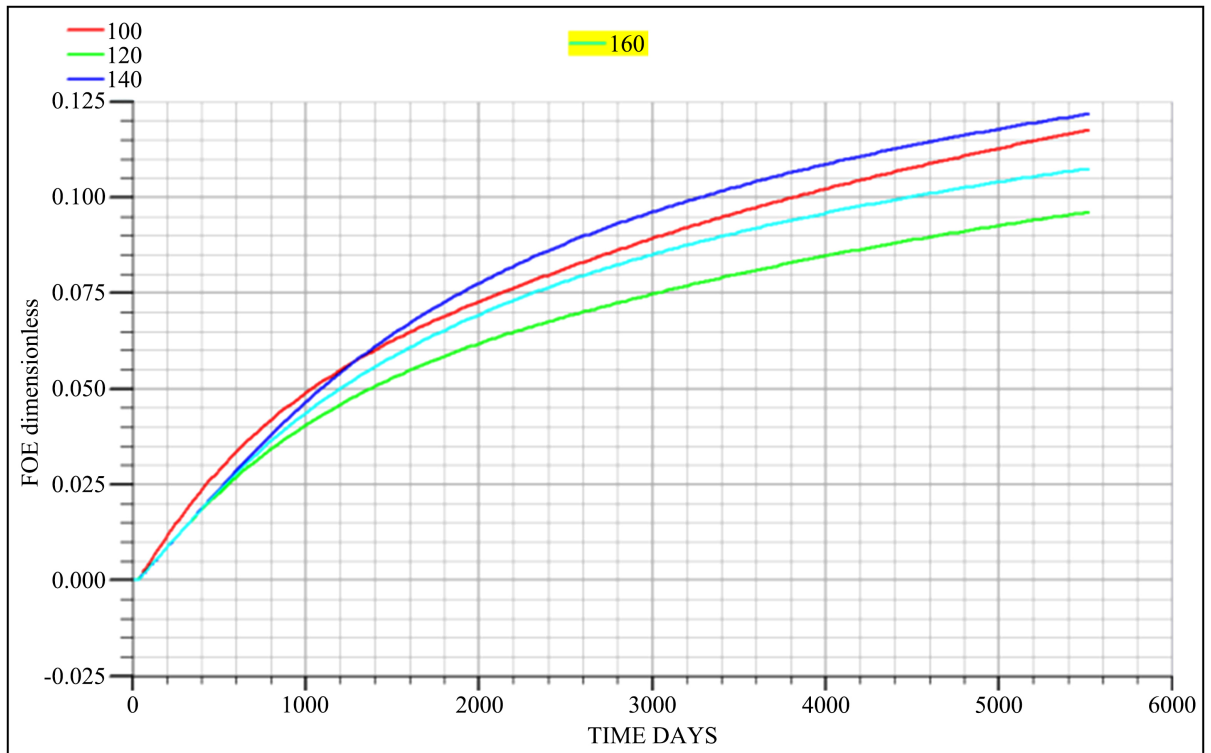


Figure 12. Recovery factor curves of different row spacings

图 12. 不同排距采收率曲线

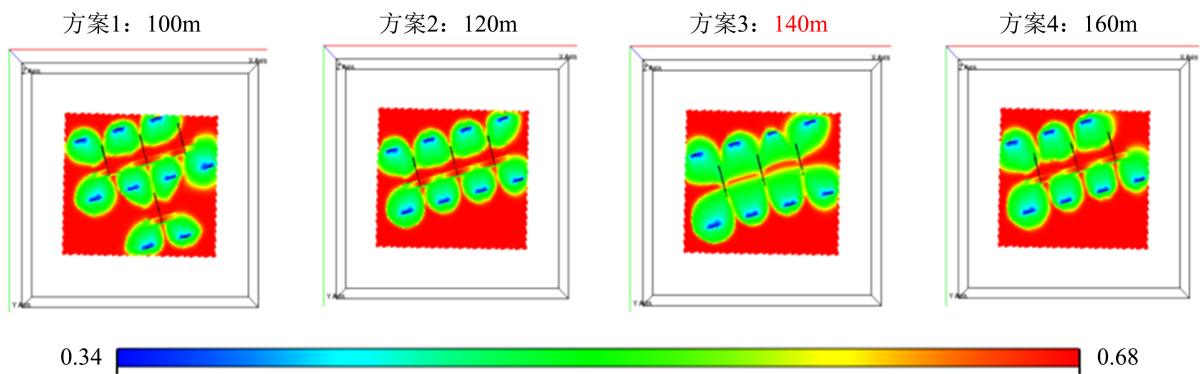


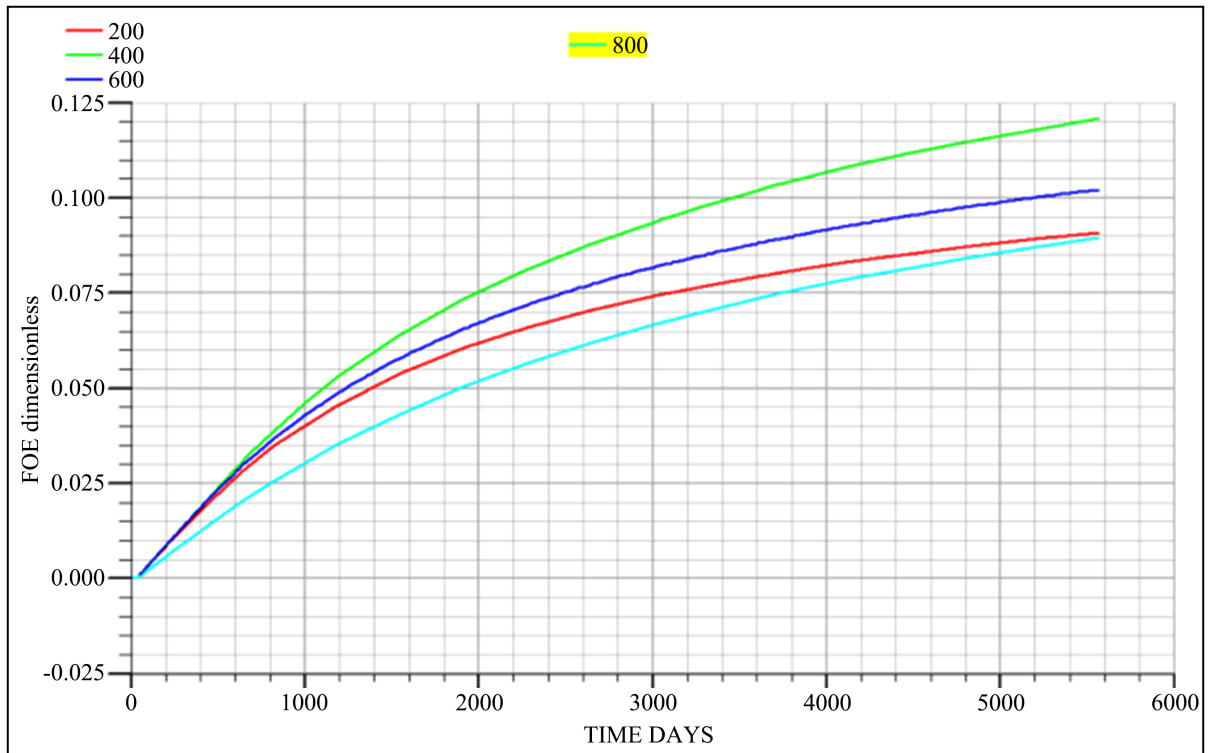
Figure 13. Comparison of oil saturation under different row spacings

图 13. 不同排距下含油饱和度对比图

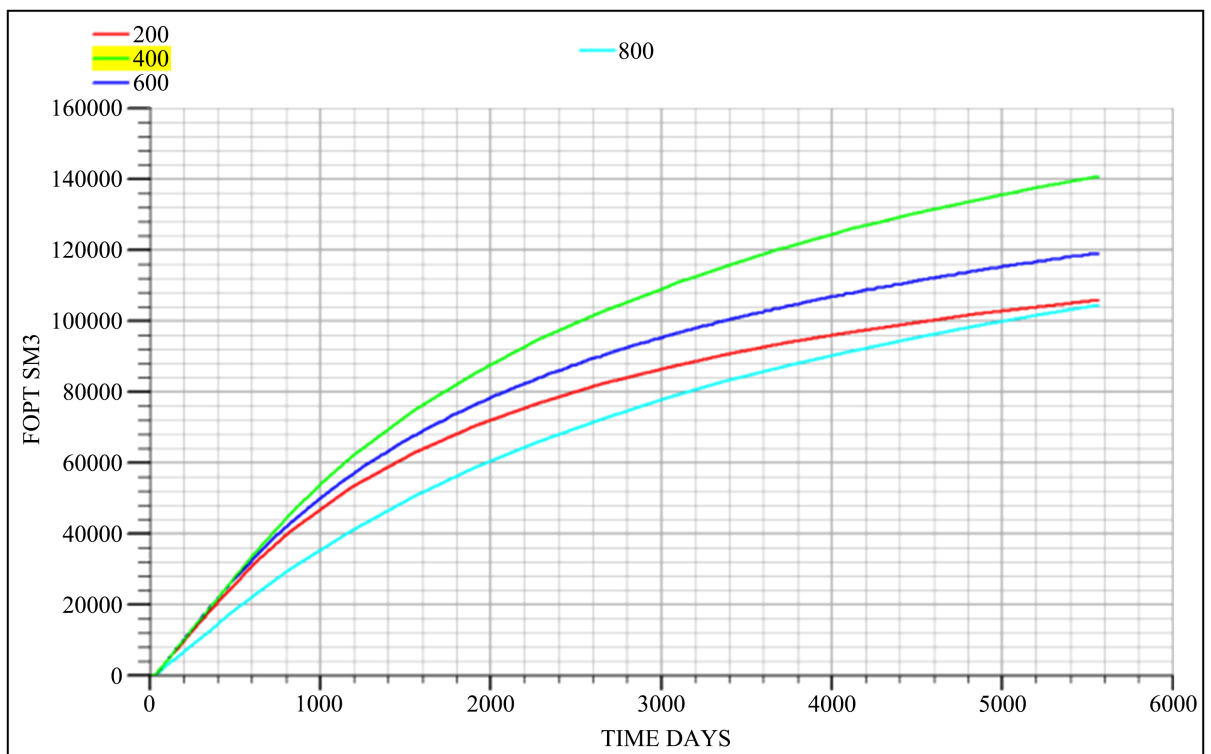
Table 2. Scheme design of horizontal well pattern with different well spacing and row spacing

表 2. 水平井网不同井距排距方案设计

方案名	井网	井距(m)	排距(m)	生产方式
方案 1	水平井网	400	100	定流压
方案 2	水平井网	400	120	定流压
方案 3	水平井网	400	140	定流压
方案 4	水平井网	400	160	定流压



**Figure 14.** Recovery factor curves of different horizontal section lengths  
**图 14.** 不同水平段长度采收率曲线



**Figure 15.** Cumulative oil production curves of different horizontal section lengths  
**图 15.** 不同水平段长度累产油曲线

### 3.3. 水平段长度优化

研究区五点水平井网的水平段长度为 600 m, 根据矿场的实际情况, 进行水平井水平段长度优化, 设计不同的水平段长度方案 4 套, 分别为: 200、400、600、800 m, 开发模拟生产 15 年, 从图 14 采收率曲线可以看出: 随着水平段的不断增大, 采收率也在不断的增大, 当水平段长度超过 400 m 时, 采收率反而降低; 从图 15 累产油变化曲线来看, 随着水平段长度的不断增加, 累产油量也在不断的增加, 当水平段长度超过 400 m 时, 累产油量反而降低; 综上所述: 研究区合理的水平段长度为 400 m。

## 4. 结论

1) 针对研究区开发矛盾, 对水平井网形式进行优化, 在相同的生产制度情况下, 五点井网的采收率为 12.18% 高于七点井网, 累产油量也高于七点井网。采用五点井网进行开发, 有利于提高元 284 区块的开发效益。

2) 根据井网优化结果表明: 当井距为 400 m、排距为 140 m 时, 五点井网的采收率以及区块日产油量达到最优; 水平段长度为 400 m 时, 区块采收率及累产油量均较高; 采用优化后的井网参数能够有效提高油藏的采收率。

## 参考文献

- [1] 杨清立, 杨正明, 王一飞, 戢红霞. 特低渗透油藏渗流理论研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(6): 52-54, 144.
- [2] 王任一. 基于生产动态数据的井间储层连通性识别方法[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 443-450.
- [3] 侯启军, 何海清, 李建忠, 杨涛. 中国石油天然气股份有限公司近期油气勘探进展及前景展望[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(1): 1-13.
- [4] 杨仁锋, 姜瑞忠, 孙君书, 刘小波, 刘世华, 李林凯. 低渗透油藏非线性微观渗流机理[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(2): 90-93, 97, 117.
- [5] 高辉, 孙卫, 路勇, 田育红, 任国富. 特低渗透砂岩储层油水微观渗流通道与驱替特征实验研究——以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(1): 58-62, 115.
- [6] 汪全林, 唐海, 吕栋梁, 彭得兵, 郭粉转. 低渗透油藏启动压力梯度实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(1): 97-100, 117-118.
- [7] 刘启国, 王瑞, 李邗, 刘晓旭. 考虑启动压力梯度和高速非达西效应的低渗透气藏水平井产能[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 53-56, 114.
- [8] 孙建芳. 胜利油区稠油非达西渗流启动压力梯度研究[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(6): 74-77, 116.
- [9] 赵宏军, 廖新维, 王绍平, 左冰心. 低渗透油藏不稳定产量递减分析[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(2): 87-89, 116-117.
- [10] 凌宗发, 胡永乐, 李保柱, 王丽娟. 水平井注采井网优化[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 65-72.
- [11] 张枫, 李治平, 董萍, 田秀霞, 贾玉梅, 秦建敏. 水平井整体开发井网研究——以大港油区关家堡油田为例[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 621-625.
- [12] 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 林冬娟. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. 特种油气藏, 2012, 19(5): 15-20, 151.
- [13] Yu, J., Yang, Y. J. and Du, J.L. (2012) Sedimentary Characteristics of Lake Transgression in Yanchang Formation of Late Triassic in Ordos Basin. *Special Oil and Gas Reservoirs*, **19**, 15-20.
- [14] Deng, X.Q., Li, W.H., Li, S.X., et al. (2010) Characteristics of Deep-Water Sedimentary Assemblage of Yanchang Formation 6 in Huaqing Oilfield, Ordos Basin. *Geological Science*, **24**, 745-756.
- [15] Xie, S.H., Li, W., Len, F., et al. (2019) Study on the Occurrence Law and Restricting Factors of Movable Fluid in Tight Sandstone Reservoir. *Geological Science and Technology Information*, **11**, 105-114.
- [16] 陈冲. 华庆地区长 6 储层沉积微相及储层特征研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2013.
- [17] 李璐. 华庆油田 XX 井区长 6 储层油藏描述[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2014.