

# 陇东环县油区 M 井区长 8 储集层特征及单井产能预测

赵军龙<sup>1</sup>, 闫博<sup>1</sup>, 赵靖舟<sup>1</sup>, 王轶平<sup>2</sup>, 许登才<sup>3</sup>, 高秀丽<sup>1</sup>

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 中国石油 长庆油田分公司 第二采油厂, 甘肃 庆阳 745100;

3. 贵州省水城县煤炭局, 贵州 水城 553000)

**摘要:**为了制定陇东环县油区 M 井区长 8 储集层合理的单井生产方案、确保 M 井区产能最优化,将岩性、物性和含油性等储集层静态地质特征与渗流规律、生产状况等动态特征研究相结合,基于 M 井区的地质资料、岩心资料、相渗分析资料和测井资料等开展了储集层特征、剩余油分布规律及单井产能预测,预测了 M 井区合理的单井产量。研究表明:M 井区长 8 储集层具备典型的超低渗透储集层特征,测井响应特征较为显著,储集层呈现对油水的多重润湿性;M 井区油藏为构造岩性油藏,油水分布受到岩性控制作用,沿着河道方向,物性好、含油性好、在构造相对高部位含油性好;M 井区产量主要来自于 M 井区中-东南部,目前剩余油在平面上主要分布在 M 井区北部、中南部局部区域;物性参数法、试油资料折算法和试采法适合于 M 井区的单井产能预测。M 井区长 8 储层合理的单井产量为 3.5~4.0 t/d。研究成果为 M 井区长 8 储集层进一步开发奠定了重要的资料基础。

**关键词:**储集层特征;单井产能预测;M 井区;环县油区;陇东地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## Reservoir characteristics of Chang 8 and single-well productivity prediction of M wellblock in Huanxian oil district, Longdong area

Zhao Junlong<sup>1</sup>, Yan Bo<sup>1</sup>, Zhao Jingzhou<sup>1</sup>, Wang Yiping<sup>2</sup>, Xu Dengcai<sup>3</sup>, Gao Xiuli<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. No. 2 Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Qingyang, Gansu 745100, China;

3. Coal Bureau of Shuicheng County of Guizhou Province, Shuicheng, Guizhou 553000, China)

**Abstract:** For the purpose of making rational single-well production programs for Chang 8 reservoir of M wellblock in Huanxian oil district area, Longdong and optimizing productivity of M wellblock, we performed a comprehensive study through integrating static geologic features of the reservoir such as lithologies, physical properties, oil-bearing properties with dynamic features like seepage flow patterns and production performance. Based on the geological data, core data, logging data and phase permeability data of the M wellblock, we carried out the research on reservoir characteristics, residual oil distribution and single-well productivity, and predicted the reasonable single-well production of this area. Chang 8 reservoir of M wellblock shows typical ultra-low permeability, significant logging response features and double wettability to oil and water. The reservoirs in M wellblock are structural-lithological reservoirs and the oil-water distribution is controlled by lithology. Oil-bearing properties are good in reservoirs with good poroperm characteristics along the main channel and in reservoirs on relative structural highs. Current production of M wellblock is mainly from southeastern-central part of M wellblock, with residual oil mainly occurring in the northern part and local southern-central part. The physical parameter method, test data conversion method and production test method are suitable for the prediction of single-well production in the study area. The rational single-well production is 3.5~4.0 t/d. These results provide important data-base for the further development of Chang 8 reservoir.

**Key words:** reservoir characteristics, single-well productivity prediction, M wellblock, Huanxian oil district, Longdong area

我国陆相储集层特征及其评价技术研究始于 20 世纪 80 年代<sup>[1]</sup>。80 年代后期,裘怿楠针对储集层研究做了大量工作,形成系统、成熟的陆相储集层研究体

系<sup>[2]</sup>。通常储集层研究主要包括储集层类型、特征、成因、分布、演化、测试、预测和评价 7 个方面<sup>[1]</sup>。储集层研究是综合勘探与开发、宏观与微观,协同地质、物探、

收稿日期:2013-06-29;修订日期:2013-07-29。

第一作者简介:赵军龙(1970—),男,博士、教授,地球物理测井、测井地质。E-mail:zjl1970@163.com。

基金项目:陕西省教育厅科研计划项目(11JK0781)。

测井、油藏工程等专业的一门综合性研究课题<sup>[3]</sup>。做好储集层的研究有利于提高研究水平,解决生产中的实际难题<sup>[1]</sup>。

随着国际石油科技的发展,超低渗油田油气储量的比重日益加大,超低渗油田的储集层研究也日益重要。超低渗油田储集层具备矿物类型多样、储集空间类型复杂及非均质性强等特点<sup>[3-6]</sup>,建立适合超低渗储集层的储集层研究评价技术势在必行。

文中将 M 井区长 8 特低渗油藏的储集层特征研究和单井产能预测结合,实现了储集层地质“静态特征”研究和单井产能“动态特征”研究相结合,研究成果为 M 区长 8 储集层进一步开发奠定了重要基础。

1 地质与开发概况

陇东环县油区 M 井区位于盆地西部,处于大同一环县断裂带上,局部构造为西倾单斜,地层倾角小,在此构造背景之上,由于压实作用而形成的砂体鼻隆配置,成为油气聚集的有利场所。环县油区长 8 地层沉积特征和油藏分布特征受盆地总体基底断裂控制<sup>[7]</sup>。晚三叠世长 8 沉积期间,环县油区主要接受来自于西部和西南部两个物源区的碎屑沉积。岩心观察、单井测井相和沉积相的综合研究表明,M 井区为浅水三角洲内前缘沉积,微相包括水下分流河道、水下分流间湾和天然堤等。

M 井区长 8 油藏目前处于开发初期,井网部署尚未完成,2012 年正式以七点法水平井网开发,区块面积 10.57 km<sup>2</sup>,地质储量 600 余万吨,可采储量 100 余万吨,标定采收率 18.0%。2013 年 2 月油井开井 18 口,日产液 82 m<sup>3</sup>,日产油 57 t,总含水量 30.6%,水井开井数 17 口,日注水 174 m<sup>3</sup>,月注采比 1.56。

2 储集层特征

2.1 岩性特征

M 井区延长组长 8 含油层岩石类型主要为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩,含少量的岩屑砂岩,长石、石英、岩屑的比例接近于 1:1:1(图 1)。砂岩以细-中粒为主,极细-细粒和细粒次之,分选以中等-好为主,磨圆度以次棱角状为主,接触方式主要为点-线接触、线接触,胶结类型以孔隙式为主。

2.2 物性特征

M 井区长 8 储集层孔隙类型多样,主要包括粒间孔、长石溶孔、岩屑溶孔、晶间孔、微裂隙等多种孔隙类型,其中以前 3 种孔隙类型为主(图 2)。

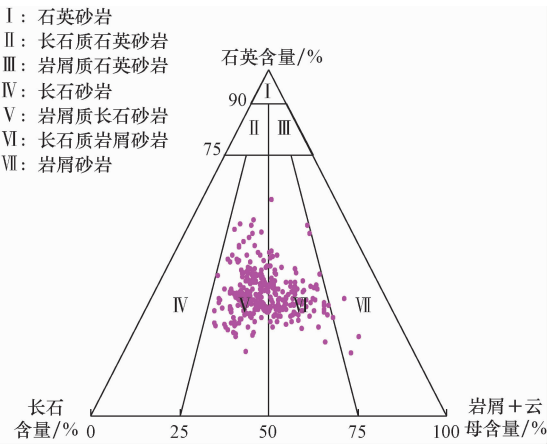


图 1 长 8 砂岩岩石类型三端元图

Fig. 1 Triangle diagram of Chang 8 sandstone types

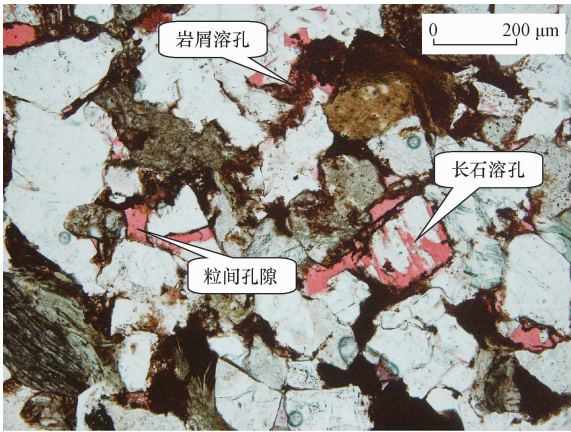


图 2 M 井区 F 井, 2 325.48 m, 长 8<sub>1</sub><sup>2</sup>粒间孔和溶孔

Fig. 2 Intergranular pores and solution pores of cores sampled from Chang 8<sub>1</sub><sup>2</sup> reservoir at 2 325.48 m in Well F in M wellblock

岩石物性测试分析表明,M 井区长 8 储集层孔隙度主要分布在 4.5%~15.6%,平均为 8.9%;M 井区长 8 储集层渗透率在主要分布在 0.05×10<sup>-3</sup>~3.40×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,平均为 0.50×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,为典型的超低渗透储集层(图 3)。

2.3 含油性特征

岩石资料分析表明 M 区含油层岩性主要为细砂岩,包括:1)浅灰色油迹细砂岩,成分以长石、石英为主,少量暗色矿物及白云母碎片,无原油浸染色、油脂感弱、含油较饱满、油味较浓,含油面积 2%~3%,无原油外渗、微污手,现场定级油迹;2)灰褐色油斑细砂岩,成分以长石、石英为主,少量暗色矿物及白云母碎片,灰褐色原油浸染色,油脂感弱,含油较饱满,油味较浓,含油面积 10%~15%,无原油外渗、微污手,现场定级油斑。

2.4 电性特征

基于地质约束测井、岩心刻度测井原则,分析了不同流体性质的常规测井响应差异(表 1)。

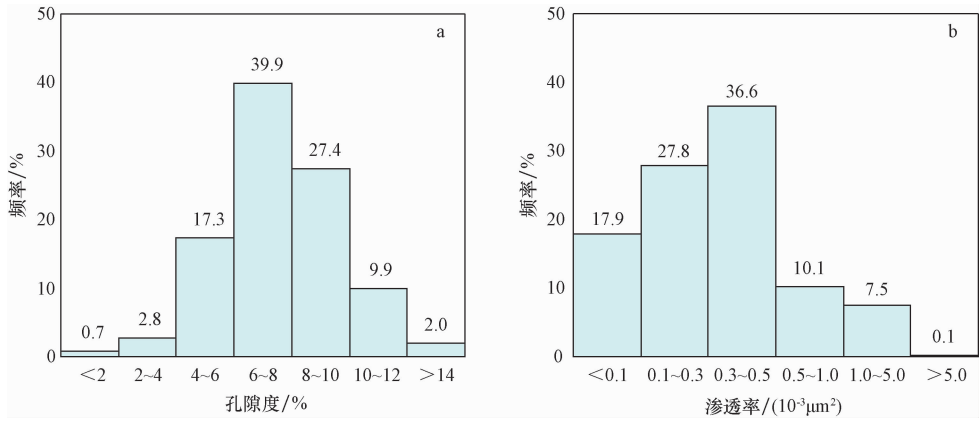


图 3 M 井区长 8 储集层物性分布特征

Fig. 3 Physical properties of Chang 8 reservoir in M wellblock

a. M 井区长 8 孔隙度直方图; b. M 井区长 8 渗透率直方图

表 1 不同岩性及不同流体性质的测井响应特征

Table 1 Logging response characteristics of different rocks and different fluids

| 分析对象 |     | 自然电位特征 | 自然伽马特征 | 声波时差特征     | 深探测视电阻率特征 |
|------|-----|--------|--------|------------|-----------|
| 岩性   | 泥岩  | 曲线靠近基线 | 高幅值    | 高幅值、曲线变化剧烈 | 曲线呈锯齿状、低值 |
|      | 砂岩  | 显著负异常  | 低幅值    | 曲线平稳       | 较平稳、较高幅值  |
| 流体性质 | 含油层 | 一定负异常  | 低幅值    | 曲线平稳、较高幅值  | 较高视电阻率    |
|      | 含水层 | 较显著负异常 | 低幅值    | 曲线平稳、较高幅值  | 较低视电阻率    |

2.5 渗流特征

储集层渗流特征主要通过油、水相渗曲线来反应储集层和流体的渗透率、孔隙结构、表面润湿性等特点。在超低渗储集层中,油、水渗流系统因为储集层微细孔道比重较大、粘土矿物含量高等影响因素导致与中、高渗储集层渗流系统特性不同,所以开展超低渗储集层的渗流特征研究,分析油、水相渗曲线特征和采收率曲线,可为下步的单井产能预测提供可靠依据(图 4)。

M 井区 C 井岩心相渗实验分析表明:1) M 井区长 8 储集层表现为对油和水的双重润湿性,含油饱和度下限约为 60%;2) 当含水饱和度增加时,油的相对渗透率( $K_{ro}$ )下降很快,能够允许低含水采油的饱和度范围很窄;3) 随注入倍数的增加驱油效率增加,注入倍数达到 6.47 PV 后驱油效率增加趋势变缓,注入倍数达

到 23.09 PV 后驱油效率达最大值 62.6%。

3 剩余油分布特征及单井产能预测

3.1 剩余油分布规律

3.1.1 剩余油剖面分布

结合前人研究工作,M 井区油藏为构造岩性油藏,岩性因素及构造因素决定着油藏的平面和纵向分布规律。油水分布受到岩性控制作用,沿着河道方向,物性好、含油性好;同时,油水分布也受到构造的影响,在构造相对高部位含油性好(图 5)。

3.1.2 剩余油平面分布

依据油井动态生产资料,汇总分析了 M 井区各井

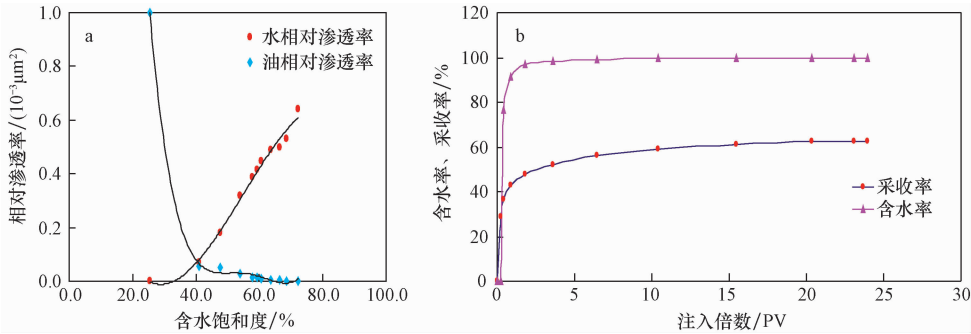


图 4 C 井相渗实验结果

Fig. 4 Results of relative permeability experiment of C well

a. M 区块岩心油水相渗曲线; b. 岩心注入倍数与含水率及采收率曲线

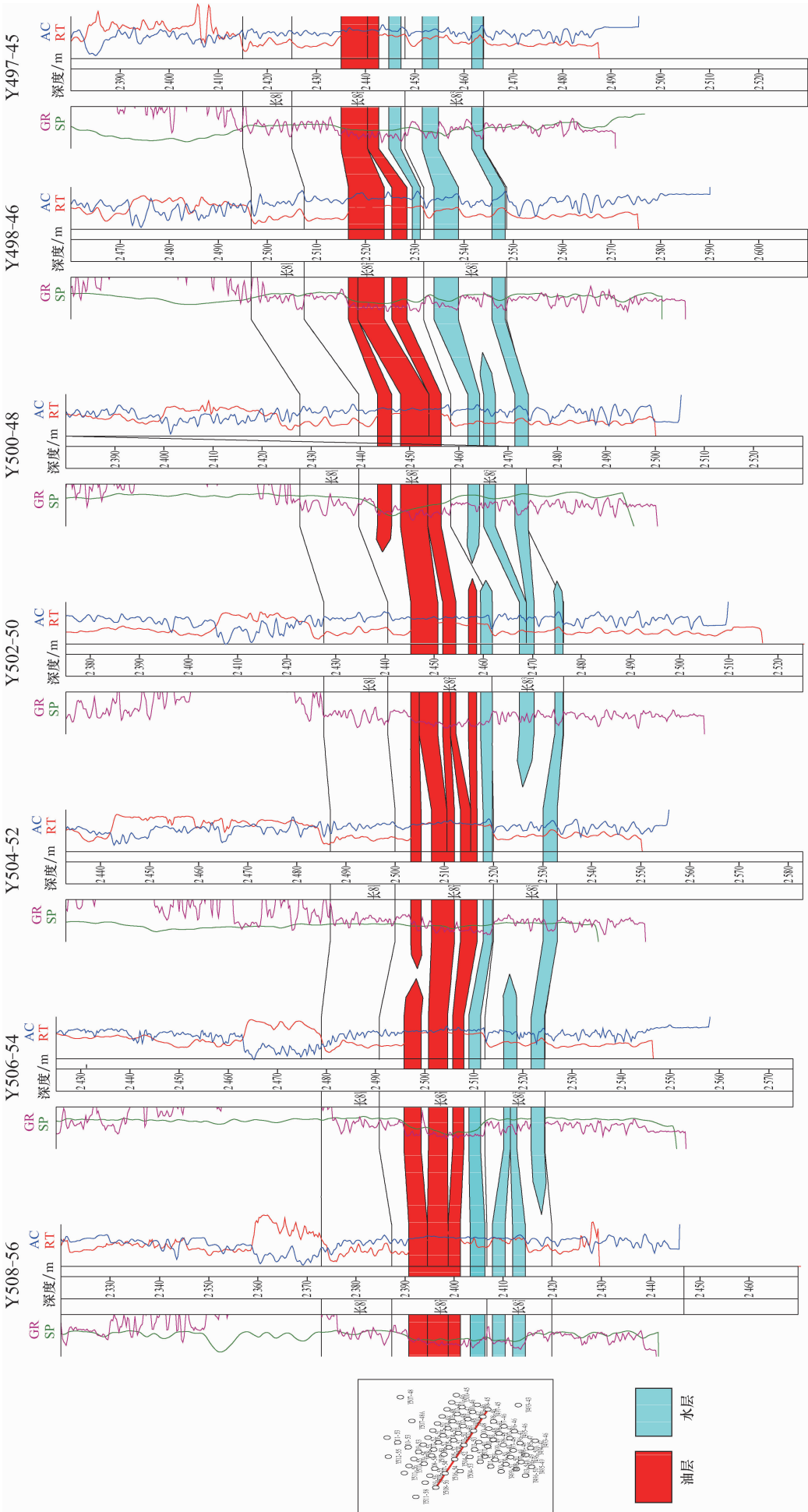


图5 M井区油藏剖面实例 (剖面上井作了抽稀处理)

Fig.5 Reservoir profile of M wellblock

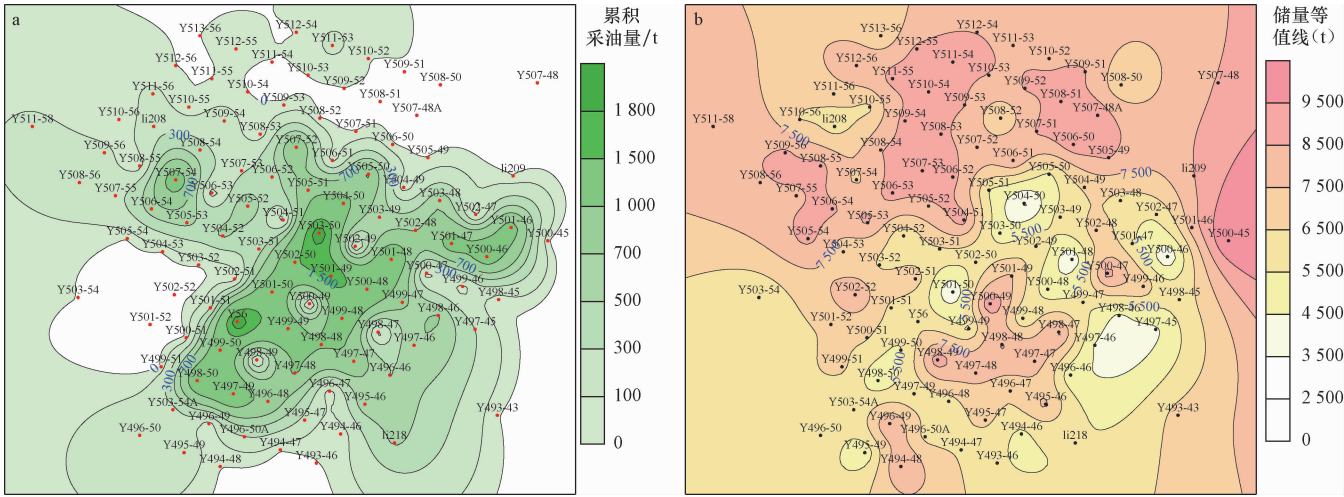


图 6 M 井区累积采油量及单井剩余可采储量

Fig. 6 Cumulative oil production and single-well remaining recoverable reserves of M wellblock

a. 单井累积采油量; b. 单井剩余可采储量等值线(t)

累积采油情况及单井剩余可采储量等值线(图 6)。

根据 M 井区各井累采图可以看出,M 井区之前的产量主要来自于中部、东部和南部。并且由于物性开发条件等因素的影响,现今剩余油主要在 M 井区北部沿东西方向及南部局部井区分布。

3.2 单井产能预测

1) 测试法:试井单井产能评价、电缆地层测试产能评价等,可以直接获得储集层真实的产能,但具有成本高的缺点不宜大面积推广使用。

2) 渗流理论方法:焦翠华、徐朝晖(2006)<sup>[8]</sup>等利用达西渗流理论对储集层单井进行预测,充分利用测井、录井等资料得到有效厚度、油相有效渗透率、原油粘度、体积系数等参数,根据实际生产动态计算单井产能。这种方法高效、易于操作,但只适用于中、高孔渗储集层。

3) 公式法:李松泉(2008)、程林松(2008)<sup>[9-11]</sup>、闫庆来、何秋轩(1990)<sup>[12]</sup>等人针对低渗、特低渗储集层特点,根据渗流理论并考虑启动压力梯度和应力敏感系数进行公式推导,计算储集层产能。这种方法基于理论计算,计算过程中参数取值非常严格。

4) 地球化学理论以及实验分析方法:王印(2000)<sup>[13-14]</sup>等从影响油层产能的机理和储油岩石热解参数与油层产能参数的内在关系出发,结合达西渗流规律,建立热解参数预测单井原油产能的模型。

5) 数理统计方法:如多元回归法、神经网络法、灰色理论都可用来进行产能评价。

根据实际资料,选择了物性参数法(属于公式法)、试油资料折算法(属于测试法)和 M 井区试采法(属于测试法)等开展单井产能预测。

3.2.1 物性参数法

借鉴邻区资料得到 M 井区长 8 油层单井产量与

物性参数,利用油层厚度、测井解释渗透率和地层系数关系式,预测 M 井区长 8 油藏单井产量。

1) 利用地层系数确定单井产量,实际产量与地层系数的关系式:

$$Q = 0.996 \ln(Kh) + 2.748 \quad (1)$$

式中:Q 为单井产量,t;K 为地层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;h 为地层厚度,m。

2) 利用有效厚度确定单井产量,实际产量与油层厚度的关系式:

$$Q = 2.7869e^{0.0518h} \quad (2)$$

3) 利用渗透率确定单井产量,实际产量与地层渗透率的关系式:

$$Q = 1.4050 \ln(K) + 4.8818 \quad (3)$$

由上述三公式计算出 M 井区长 8 单井产量分别为 5.3,4.9 和 4.6 t。

3.2.2 试油产量折算法

统计分析了鄂尔多斯盆地已开发区块试采与试油(排液)产量的关系,三叠系油层初期单井产能为试油产量的 1/4 ~ 1/5 左右。统计 M 井区 60 口油井的试油资料可知,区块主要试油层位为长 8。M 井区长 8 油藏 60 口井试油结果表明,油井压裂后单井日产油 1.2 ~ 59.7 t 不等,平均日产油 17.3 t;单井日产水 0 ~ 34.8 m<sup>3</sup>,平均单井日产水 2.2 m<sup>3</sup>;区块试油期间累计产油 2 746.3 t,平均单井 45.8 t,区块累计排液 8 449.6 m<sup>3</sup>,平均单井排液 140.8 m<sup>3</sup>。

从以上统计资料看,M 井区平均单井日产油 17.3 t,则对应设计单井日产量为 3.5 ~ 4.3 t。

3.2.3 试采分析法

M 井区长 8 早期投产探评价井在没有注水的条件下初期日产油 4.0 t 左右。

综合上述物性参数法、试油产量折算法和试采分析法 3 种方法,M 井区长 8 单井产量取值分别为 4.9, 3.5 和 4.0 t。

利用物性参数法计算的单井产能是在超前注水的基础上得到的,试油产量折算及探井、评价井试采代表了自然能量开发条件下的产量。综合考虑 M 井区储集层特征,参照同类油藏单井日产量设计为 3.5~4.0 t。

4 结论

1) M 井区长 8 含油层岩石类型为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩,含少量的岩屑砂岩,长 8 储集层孔隙类型主要有粒间孔、长石溶孔、岩屑溶孔、晶间孔、微裂隙;长 8 储集层孔隙度平均为 8.9%,渗透率平均为  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2) M 井区含油层岩性主要为细砂岩;油层对应测井响应特征较为显著,即自然电位呈现一定负异常、自然伽马曲线呈现低幅值、声波时差曲线平稳具有较高幅值、深探测视电阻率呈现较高幅值;长 8 储集层表现为对油和水的双重润湿性。

3) M 井区油藏为构造岩性油藏,油水分布受到岩性控制作用,沿着河道方向,物性好、含油性好、在构造相对高部位含油性好;M 井区之前产量主要来自于 M 区中-东南部,现今剩余油在平面上主要分布在 M 区北部、中南部局部区域。

4) 物性参数法、试油资料折算法和试采法适合于 M 区的单井产能预测,M 井区长 8 储层合理的单井日产量为 3.5~4.0 t。研究成果为 M 区长 8 储集层进一步开发奠定了重要的基础。

参 考 文 献

[1] 裴泽楠,薛叔浩. 油气储集层评价技术[M]. 石油工业出版社, 1997:1-2.  
Qiu Yinan, Xue Shuhao. Evaluation technology of oil and gas reservoir[M]. Petroleum Industry Press, 1997:1-2.

[2] 朱筱敏,钟大康,张琴,等. 济阳拗陷古近系碎屑岩储集层特征和评价[M]. 北京:科学出版社,2008:3-5.  
Zhu Xiaomin, Zhong Dakang, Zhang Qin et al. Features and evaluation of Paleogene clastic reservoir in Jiyang Depression[M]. Beijing: Science Press, 2008:3-5.

[3] 王树寅,李晓光,石强,等. 复杂储集层测井评价原理和方法[M]. 北京:石油工业出版社,2006:1-2.  
Wang Shuyan, Li Xiaoguang, Shi Qiang, et al. Logging evaluation theory and method of complex reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006:1-2.

[4] 罗晓容,张刘平,杨华,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长 8<sub>1</sub> 段低渗油藏成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 770-778, 837.  
Luo Xiaorong, Zhang Liuping, Yang Hua, et al. Oil accumulation process in the low-permeability Chang 8<sub>1</sub> member of Longdong area, the

Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 770-778, 837.

[5] 廖纪佳,唐洪明,朱筱敏,等. 特低渗透砂岩储层水敏实验及损害机理研究——以鄂尔多斯盆地西峰油田延长组第 8 油层为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 321-328.  
Liao Jijia, Tang Hongming, Zhu Xiaomin, et al. Water sensitivity experiment and damage mechanism of sandstone reservoirs with ultra-low permeability: a case study of the eighth oil layer in the Yanchang Formation of Xifeng oilfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 321-328.

[6] 侯瑞云,刘忠群. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密低渗透层评价与开发对策[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 118-128.  
Hou Ruiyun, Liu Zhongqun. Reservoir evaluation and development strategies of Daniudi tight sand gas field in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 118-128.

[7] 赵文智,胡素云,汪泽成,等. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集中的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 1-5.  
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Key role of basement fault control on oil accumulation of Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 1-5.

[8] 焦翠华,徐朝晖. 基于流动单元指数的渗透率预测方法[J]. 测井技术, 2006, 30(4): 317-319.  
Jiao Cuihua, Xu Zhaohui. An approach to permeability prediction based on flow zone index[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(4): 317-319.

[9] 许建红,程林松,周颖,等. 一种求解低渗透油藏启动压力梯度的新方法[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(5): 594-597.  
Xu Jianhong, Cheng Linsong, Zhou Ying, et al. A new method for calculating kick off pressure gradient in low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5): 594-597.

[10] 李松泉,程林松,李秀生,等. 特低渗透油藏非线性渗流模型[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 606-612.  
Li Songquan, Cheng Linsong, Li Xiusheng, et al. Non-linear seepage flow models of ultra-low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 606-612.

[11] 李松泉,程林松,李秀生,等. 特低渗透油藏合理井距确定新方法[J]. 西南石油大学学报, 2008, 30(5): 93-96.  
Li Songquan, Cheng Linsong, Li Xiusheng, et al. A new method determining the rational well spacing in the extra-low permeability reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2008, 30(5): 93-96.

[12] 闫庆来,何秋轩,尉立岗,等. 低渗透油层中单相液体渗流特征的研究[J]. 西安石油学院学报, 1990, 5(2): 1-6.  
Yan Qinglai, He Qiuxuan, Wei Ligang, et al. A laboratory study on percolation characteristics of single phase flow in low-permeability reservoirs[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 1990, 5(2): 1-6.

[13] 王印,李洪文. 储油岩热解参数预测油层产能方法探讨[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(6): 62-64.  
Wang Yin, Li Hongwen. Discussion on the method for forecasting reservoir productivity with pyrolytic parameter of oil reservoir[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2001, 8(6): 62-64.

[14] 王道富. 鄂尔多斯盆地低渗透油田开发[M]. 北京:石油工业出版社, 2007:6-7.  
Wang Daofu. Development of low permeable oilfield in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007:6-7.