

高邮凹陷南断阶特低渗透油藏储层微观孔隙结构特征及分类评价

刘桂玲¹, 孙军昌², 熊生春², 何英², 皇甫晓红²

(1.中国石化江苏油田分公司地质科学研究院,江苏扬州 225009; 2.中国石油勘探开发研究院廊坊分院,河北廊坊 065007)

摘要:针对高邮凹陷南断阶特低渗透油藏储层物性较差、不同区块开发难易程度差异较大等问题,综合应用恒速压汞、核磁共振、离心实验及油水驱替等实验技术对储层微观孔隙结构、油水渗流机理及核磁共振可动流体百分数等进行了系统研究,并根据五元分类系数法对不同区块进行了储层评价和分类优选。结果表明,南断阶特低渗透油藏泰州组储层物性优于阜宁组,不同渗透率储层喉道发育特征差异较大而孔道分布特征基本相同,渗透率越小则微孔隙越发育;储层主流喉道半径与渗透率之间具有较好的指数关系。泰州组和阜宁组储层可动流体百分数平均值分别为67.2%和32.9%,阜宁组可动流体百分数从大到小依次为陈2、竹墩、许庄、方巷和徐31区块。水驱过程中油相渗透率随含水饱和度的增加而急剧减小,但水相渗透率增加幅度很小,水驱油效率平均值为54.1%;水驱后储层较大孔隙空间仍含有一定量残余油,而微小孔隙中的原油基本未被驱替出来。研究区特低渗透油藏不同区块储层开发难易程度从低到高依次为:竹墩区块泰州组,陈2、许庄、竹墩、方巷和徐31区块阜宁组。

关键词:特低渗透油藏 储层评价 恒速压汞 核磁共振 油水相渗 孔隙结构

中图分类号: TE112.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)04-0037-05

在目前探明石油地质储量中,低、特低渗透油藏所占比例较大^[1-3]。与常规中、高渗透油藏储层不同,低、特低渗透油藏储层物性差、微观孔隙结构复杂,导致储层岩石比表面较大、束缚水饱和度较高、毛管力作用明显,流体在低渗透致密储层中的渗流机理与常规储层存在明显差异,使得低、特低渗透油藏开发难度较大,开发成本增加^[3]。因此,在低渗透油藏开发前期进行综合性的精细储层特征研究、储层评价和优化分类研究,对于指导该类油藏的合理开发具有重要作用^[1-2]。高邮凹陷南断阶特低渗透油藏储层物性较差,不同区块开发难易程度差异较大。为此,笔者综合利用恒速压汞、核磁共振、离心实验及油水驱替等实验技术对研究区不同区块泰州组和阜宁组储层微观孔隙结构特征、核磁共振可动流体百分数和油水渗流机理等进行了系统研究,建立了高邮凹陷南断阶以主流喉道半径、核磁共振可动流体百分数、渗透率、启动压力梯度及粘土矿物含量为标准的五元参数储层评价方法,并根据该方法对不同区块储层进行了定量分析和优选评价,以期研究区特低渗透油藏的合理开发提供

依据。

1 储层微观孔隙结构特征

1.1 物性参数特征

高邮凹陷南断阶特低渗透油藏主要发育在泰州组和阜宁组,其中竹墩区块发育泰州组和阜宁组,陈2、方巷、许庄和徐31区块仅发育阜宁组。对泰州组和阜宁组储层岩心常规物性分析表明,泰州组7块岩心的孔隙度和渗透率平均值分别为22.2%和 $50.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于中孔、中渗透储层^[3];阜宁组129块岩心的孔隙度和渗透率平均值分别为10.6%和 $2.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于典型的低孔、特低渗透储层^[3],泰州组储层物性明显优于阜宁组。阜宁组储层物性参数从优到劣依次为陈2、许庄、竹墩、方巷和徐31区块,渗透率平均值分别为 7.492×10^{-3} , 3.142×10^{-3} , 2.142×10^{-3} , 0.535×10^{-3} 和 $0.324 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,后者属于超低渗透储层范围。

1.2 微观孔喉特征

储层微观孔喉分布是影响渗流能力的主要因

收稿日期:2013-05-10。

作者简介:刘桂玲,女,高级工程师,从事油田开发研究。联系电话:(0514)87762385,E-mail:liugl661002@yahoo.com.cn。

基金项目:中国石化重大专项“高邮凹陷南部断裂带阜宁—泰州组低渗—特低渗油藏有效开发技术研究”(JS10049)。

素,储层中较大孔隙越发育则油水渗流阻力越小,储层开发难度越小,孔喉大小发育越均匀则水驱效率越高,同时,宏观物性参数如孔隙度、渗透率等相近的储层其开发难度和水驱效率也可能存在较大差异^[4-6]。为了进一步从微观上研究南断阶特低渗透储层特征及其对水驱效率的影响,选取了泰州组和阜宁组共24块岩心进行恒速压汞实验。

从24块岩心中选取有代表性的3块岩心,由其孔道和喉道发育特征(图1)可以看出,不同渗透率储层孔道半径差别不大,渗透率相差2个数量级的岩心的主体孔道半径均为100~150 μm,且其孔道半径分布曲线均近似呈正态分布,反映出储层微观孔道发育特征对渗透率的影响较小。但3块不同渗透率岩心喉道发育特征差异明显,渗透率越大,喉道半径分布范围越宽且分布峰值越低,喉道趋于均匀分布。随着岩心渗透率的减小,喉道半径分布范围减小且峰值增加,渗透率越小则微孔喉发育数量越多。渗透率为 $29.983 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心喉道半径为0.5~6.7 μm,喉道半径峰值为3.6 μm;渗透率为 $1.200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心喉道半径仅为0.3~1.4 μm,喉道半径峰值为0.9 μm。因此,不同渗透率级别特低渗透储层微观孔喉发育特征的差异主要集中在喉道半径上。根据恒速压汞实验结果,特低渗透储层

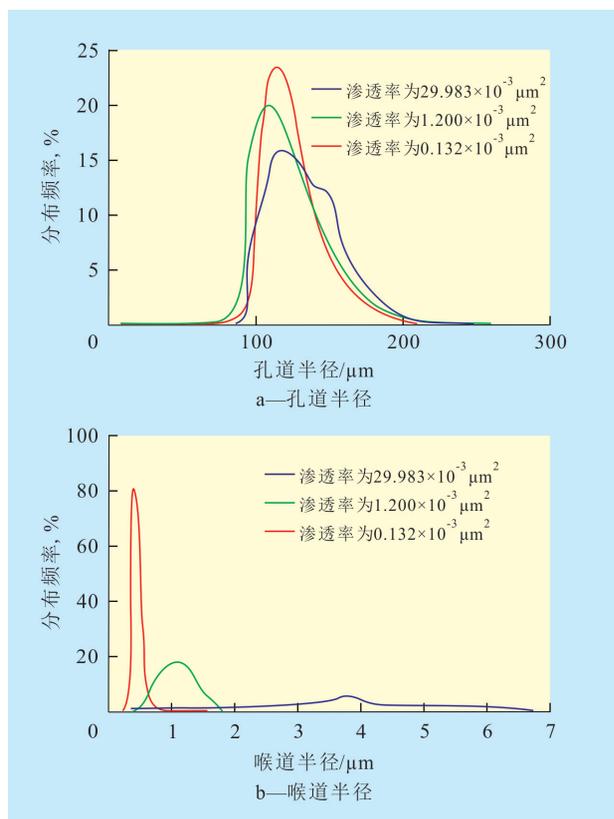


图1 高邮凹陷南断阶不同渗透率储层孔道和喉道发育特征

渗流能力主要受喉道发育特征所控制,孔道半径及其发育特征对储层渗流能力影响较小^[1]。

1.3 主流喉道半径特征

喉道半径越大其对渗流能力的贡献越大,喉道半径越小则其对渗流能力的贡献越小^[1,3]。恒速压汞技术对喉道发育个数的精确统计促使了主流喉道半径概念的提出,在一系列不同大小的孔隙中总是存在一个对储层渗透率贡献最大的理想的孔隙,此即为主流喉道半径^[5]。

从高邮凹陷南断阶储层主流喉道半径与渗透率的关系(图2)可以看出,渗透率随主流喉道半径的增加呈明显增加的趋势,比常规使用的平均喉道半径能够更加准确地反映储层渗流能力。当渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,储层主流喉道半径均小于1 μm,且随渗透率的减小而急剧减小。这就从微观和宏观2个尺度上反映出渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 是低渗透储层开发难易程度的一个分界线,当储层渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时开发难度会成倍增加。

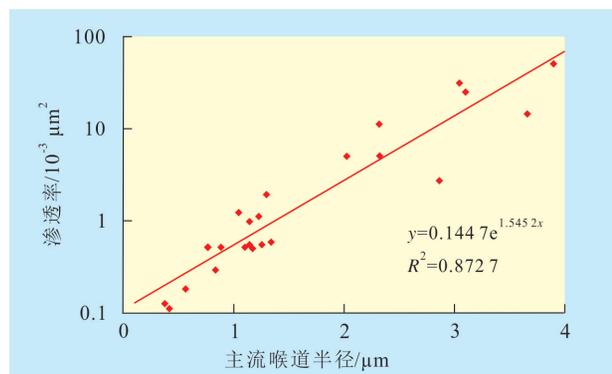


图2 高邮凹陷南断阶储层主流喉道半径与渗透率的关系

从高邮凹陷南断阶不同区块储层喉道发育特征统计结果(表1)可以看出,南断阶特低渗透油藏储层以微细—中喉道为主,泰州组储层属于中—粗喉道,阜宁组储层喉道较细,5个不同区块中竹墩和陈2区块喉道半径相对较粗,许庄区块次之,方巷和

区块	地层	喉道半径/ μm	微观特征	平均喉道半径/ μm	主流喉道半径/ μm
竹墩	泰州组	3.198~4.348	中—粗喉道	3.773	3.534
陈2	阜宁组	1.046~3.300	细—中喉道	2.173	2.040
竹墩	阜宁组	2.358~2.878	中喉道	2.618	2.384
方巷	阜宁组	0.391~1.907	微细—细喉道	1.103	1.064
许庄	阜宁组	0.849~3.692	微细—中喉道	1.652	1.576
徐31	阜宁组	0.524~1.099	微细—细喉道	0.844	0.796

徐31区块喉道半径较细,其中方巷区块主流喉道半径约为 $1\ \mu\text{m}$,分布在开发难易程度分界线附近,而徐31区块主流喉道半径小于 $1\ \mu\text{m}$,开发难度最大。

2 核磁共振可动流体百分数分析

将核磁共振技术与常规实验技术相结合,不仅可以快速、无损地定量获得渗流过程中流体饱和度的变化,而且可以观察得到原始束缚水和水驱后的残余油微观分布状态^[6-7]。

2.1 核磁共振可动流体 T_2 截止值标定

核磁共振可动流体 T_2 截止值($T_{2\text{cutoff}}$)是核磁共振 T_2 谱上可动流体与束缚流体的分界线, T_2 弛豫时间大于 $T_{2\text{cutoff}}$ 的流体为可动流体^[6],其与岩心总孔隙流体的比值即为可动流体百分数,表征了油气藏储层潜在的开发能力和原始含油(气)饱和度的上限值,其更适合于评价低、特低渗透油气藏储层的开发潜力^[2]。应用核磁共振技术获取储层可动流体百分数的关键是获得适合研究区的可动流体 T_2 截止值,然后用该值计算可动流体百分数。

研究区某典型的特低渗透岩心孔隙度为20%,渗透率为 $2.207\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,由其饱和水状态及1.38 MPa离心后的核磁共振 T_2 谱(图3)可以看出,饱和水状态核磁共振 T_2 谱具有双峰特征,其左、右峰分别代表微小孔隙和较大孔隙流体;离心后,较大孔隙的绝大多数流体被离心出来,此即为可动流体,而微小孔隙流体减小幅度很小,其代表了储层原始束缚水饱和度及其微观分布。根据离心前后核磁共振信号计算得到该岩心可动流体 T_2 截止值为16.68 ms。对泰州组和阜宁组6块岩心核磁共振标定表明,其可动流体 T_2 截止值分布在5.57~16.68 ms,平均值为9.91 ms。

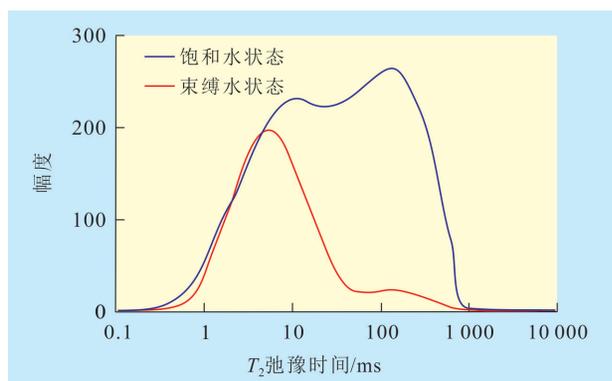


图3 高邮凹陷南断阶某典型岩心核磁共振 T_2 谱

2.2 可动流体百分数实验结果

根据核磁共振标定的可动流体 T_2 截止值,对高

邮凹陷南断阶53块岩心可动流体百分数进行了计算,从其与渗透率的关系(图4)可以看出,可动流体百分数随渗透率的增大而增大,二者之间具有较好的对数函数关系。同时,储层渗透率越大,其与可动流体百分数的相关性越好,而渗透率小于 $0.1\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 时渗透率与可动流体百分数的相关性略有减小。

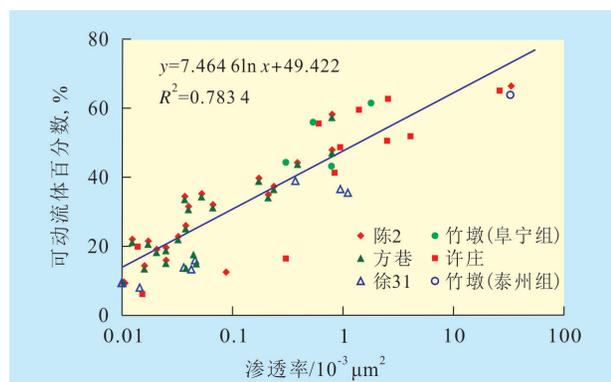


图4 高邮凹陷南断阶储层可动流体百分数与渗透率的关系

对泰州组和阜宁组可动流体百分数统计结果表明,泰州组可动流体百分数明显高于阜宁组,其平均值分别为67.2%和32.9%。不同区块阜宁组可动流体百分数从大到小依次为陈2、竹墩、许庄、方巷和徐31,对应的可动流体百分数平均值分别为55.5%,54.0%,49.9%,45.3%和36.2%。

3 油水两相渗流规律

3.1 油水相渗实验结果

对高邮凹陷南断阶特低渗透储层有代表性的14块岩心进行了油水相渗实验,由方4-7井103-2号岩心(渗透率为 $2.897\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$)的油水相渗实验结果(图5)可以看出,随着含水饱和度的增加,油相相对渗透率急剧减小,水相相对渗透率增加幅度较小,油水相相对渗透率等渗点含水饱和度大于0.5。水

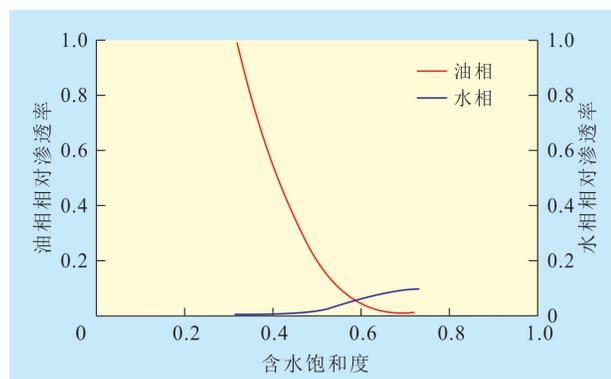


图5 方4-7井103-2号岩心油水相渗曲线

驱结束后残余油状态的水相端点渗透率较小,残余油对水相渗流影响很大。

对14块岩心油水相渗实验结果统计表明,南断阶特低渗透储层束缚水饱和度平均值为32.8%,残余油饱和度为20.1%~43.5%,平均值为30.9%,最终水驱效率为41.2%~66.7%,平均值为54.1%,残余油状态下的水相相对渗透率为0.015~0.227,平均值为0.098。对比不同区块阜宁组储层油水相渗实验结果可知,储层物性参数、主流喉道半径及核磁共振可动流体百分数较高的陈2和竹墩区块水驱结束后水相相对渗透率均大于0.1,而方巷、许庄和徐31区块最终水相相对渗透率均小于0.1。表明陈2和竹墩区块注水开发难度较小,而方巷、许庄和徐31区块水驱开发难度较大。

3.2 水驱机理的核磁共振实验结果

将常规水驱油实验与核磁共振实验相结合,采用去氢煤油作为模拟油研究水驱动用规律和残余油微观分布特征。由于去氢煤油中不含氢元素,因此进行核磁共振实验时获得的仅是岩石孔隙中模拟地层水的信号,不同水驱状态核磁共振T₂谱分布变化特征就可以反映出岩心孔隙中油、水的微观分布状态^[7]。

从徐31井76号岩心不同水驱状态核磁共振T₂谱(图6)可以看出,特低渗透岩心饱和油后油主要分布在较大孔隙空间中,束缚水主要分布在微小孔

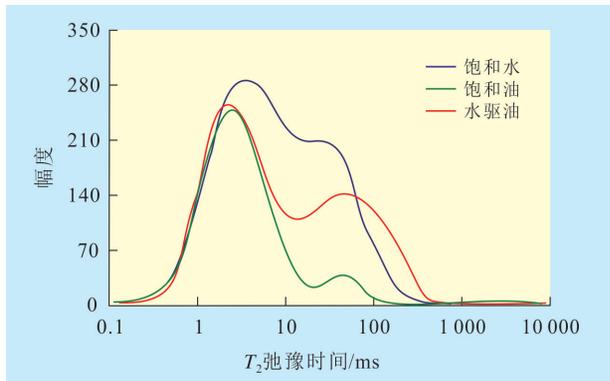


图6 徐31井76号岩心不同水驱状态核磁共振T₂谱

隙中。饱和油状态和水驱结束后图谱差异表明水驱动用的是较大孔隙空间中的原油,较小孔隙中的原油基本未被驱替出来^[8-9]。水驱结束后除了在微小孔隙中分布部分残余油外,较小孔隙和中等孔隙中也有一定的残余油。

4 储层评价及分类优选

根据研究区特低渗透储层微观孔隙结构、核磁共振可动流体百分数实验结果,并对其粘土矿物及启动压力梯度进行了测试,结合不同区块原油特征,提出以主流喉道半径、核磁共振可动流体百分数、渗透率、启动压力梯度及粘土矿物含量5个参数为标准的特低渗透储层五元分类系数法^[10],即

$$Feci = \ln \frac{s_o \times r_m \times K}{s_{o\max} \times r_{m\max} \times K_{\max}} \times \frac{\lambda}{\lambda_{\max}} \times \frac{m}{m_{\max}} \quad (1)$$

式中: Feci 为五元分类系数; s_o 为核磁共振可动流体百分数,%; r_m 为主流喉道半径,μm; K 为渗透率,10⁻³ μm²; λ 为启动压力梯度,MPa/m; m 为粘土矿物含量,%。

根据室内物理模拟实验结果,将各参数代入式(1)进行计算,得到研究区泰州组和阜宁组五元分类系数(表2)。竹墩区块泰州组储层五元分类系数最高,为3.738,表明该油藏属于物性特征最好和渗流能力最高的较易开发的一类储层;陈2、许庄和竹墩区块阜宁组五元分类系数次之,分别为-1.734,-2.623和-2.637,属于物性较好、渗流能力较高和较易开发的二类储层;方巷和徐31区块阜宁组五元分类系数较低,尤其是徐31区块最低,表明其开发难度最大。根据经典渗透率分类标准,徐31区块属于超低渗透油藏,常规水驱难以有效动用。

与核磁共振可动流体百分数分类结果相比,陈2区块均属于阜宁组开发潜力最大和开发难度最小的二类储层,而方巷和徐31区块均属于物性较差、

表2 高邮凹陷南断阶特低渗透油藏不同区块五元分类系数计算结果

区块	地层	渗透率/10 ⁻³ μm ²	核磁共振可动流体百分数, %	主流喉道半径/μm	启动压力梯度/(MPa·m ⁻¹)	粘土矿物含量, %	五元分类系数
竹墩	泰州组	50.780	67.2	3.534	0.004	9	3.738
陈2	阜宁组	7.490	55.5	2.040	0.043	14	-1.734
竹墩	阜宁组	2.142	54.0	2.384	0.069	7	-2.637
方巷	阜宁组	0.535	45.3	1.064	0.097	8	-5.481
许庄	阜宁组	3.142	49.9	1.576	0.061	7	-2.623
徐31	阜宁组	0.324	36.2	0.796	0.108	11	-6.923

开发潜力一般和开发难度较大的三一四类储层。许庄区块储层物性略好于竹墩区块,但由于其主流喉道半径较小使该区块储层核磁共振可动流体百分数稍小于竹墩区块,因此五元分类系数综合评价使得许庄区块分类系数略大于竹墩区块。总体对比来看,核磁共振可动流体百分数储层开发潜力评价结果与五元分类系数法综合评价结果基本一致。

5 结论

高邮凹陷南断阶特低渗透油藏泰州组储层物性优于阜宁组,前者属于中孔、中渗透油藏,而后者属于低孔、特低渗透油藏;阜宁组物性特征从好到差依次为陈2、许庄、竹墩、方巷和徐31区块。研究区不同渗透率储层孔道发育特征差异不大,但喉道发育特征具有明显差异,渗透率越小则微孔喉越发育,且其分布峰值越大,主流喉道半径与储层渗透率之间具有较好的指数关系。

泰州组与阜宁组核磁共振可动流体百分数平均值分别为67.2%和32.9%,阜宁组可动流体百分数从大到小依次为陈2、竹墩、许庄、方巷和徐31区块。

油水相渗研究表明,研究区储层亲水性较强,油相相对渗透率随含水饱和度增加而急剧减小,但水相相对渗透率增加幅度较小,不同储层束缚水饱和度差异较大,最终水驱效率平均值为54.1%;不同水驱状态核磁共振实验结果表明,水驱过程中动用的仍然是较大孔隙中的原油,但水驱结束后较大孔隙中仍滞留有一定量的残余油。

五元分类系数法储层评价和分类结果显示,泰

州组储层五元分类系数最高,表明该油藏属于物性特征最好和渗流能力最高的较易开发的一类储层;陈2和许庄以及竹墩区块阜宁组五元分类系数次之,属于物性较好、渗流能力较高和较易开发的二类储层;方巷和徐31区块阜宁组五元分类系数较低,尤其是徐31区块最低,其开发难度最大。

参考文献:

- [1] 蔡玥,赵乐,肖淑萍,等.基于恒速压泵的特低—超低渗透储层孔隙结构特征——以鄂尔多斯盆地富县探区长3油层组为例[J].油气地质与采收率,2013,20(1):32-35.
- [2] 王为民,郭和坤,叶超辉.利用核磁共振可动流体评价低渗透油田开发潜力[J].石油学报,2001,22(6):40-44.
- [3] 黄延章.低渗透油藏渗流机理[M].北京:石油工业出版社,1998.
- [4] 王瑞飞,陈明强.特低渗透砂岩储层可动流体赋存特征及影响因素[J].石油学报,2008,29(4):558-561.
- [5] 杨胜来,魏俊之.油层物理学[M].北京:石油工业出版社,2007.
- [6] 肖立志.我国核磁共振测井应用中的若干重要问题[J].测井技术,2007,31(5):401-407.
- [7] 郭共建,谷长春.水驱油孔隙动用规律的核磁共振实验研究[J].西安石油大学学报:自然科学版,2005,20(5):45-48.
- [8] 杨仁锋,姜瑞忠,孙君书,等.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.
- [9] 高辉,孙卫,路勇,等.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.
- [10] 何英,杨正明,刘学伟,等.低渗透油田考虑启动压力梯度计算井网产量[J].西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(3):163-166.

编辑 经雅丽

欢迎广大科技人员踊跃投稿