

# 薄互储层油藏层间干扰定量化表征新方法

康 凯, 刘 超, 许万坤, 申春生, 郑金定

(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459)

**摘要:**为了获得更高的经济性,海上大部分薄互层油藏均采用多层大段合采的开发方式。由于层间物性、流体、厚度和压力的差异性,多层合采时层间干扰、注入水突进、储量动用程度低等层间矛盾日益突出。在注水开发和综合调整中,定量描述层间干扰有助于薄互层油藏合理划分开发层系和改善开发效果。运用物理实验模拟、生产动态反演法和油藏工程法对层间干扰系数进行了定量化表征,并应用于渤海湾 PL 油田的开发调整,取得了良好效果。

**关键词:**薄互储层 层间干扰 多层合采 开发层系划分 定量表征

**中图分类号:**TE343 **文献标志码:**A

## New quantitative characterization method for interlayer interference of thin interbedded reservoir

KANG Kai, LIU Chao, XU Wankun, SHEN Chunsheng, ZHENG Jinding

(CNOOC Ltd., Tianjin Branch, Tianjin 300459, China)

**Abstract:** For higher economy, the development model of multilayer commingled production is often adopted for most of offshore thin interbedded reservoirs. However, due to the differences in the interlayer physical property, fluid, thickness and pressure, the interlayer contradictions are becoming more and more serious, which are interlayer interference in multilayer commingled production, breakthrough of injected water, low level of reserves producing, etc. During the water-flooding and comprehensive adjustment, the quantitative description of interlayer interference can be helpful to rationally divide the series of development strata and improve the development effect. By the use of physics simulation experiments, dynamic inversion method and reservoir engineering method, the interlayer interference coefficient was quantitatively characterized. The results were applied in the development adjustment of PL Oilfield in Bohai Bay, which has obtained good effect.

**Key words:** thin interbedded reservoir; interlayer interference; multilayer commingled production; series of development strata division; quantitative characterization

渤海湾薄互储层砂岩油田在海上油田的开发中占据重要地位,以 PL 油田为代表的一批大型油田都是典型的薄互层状油藏,具有纵向含油井段长、含油层系多,各层系之间储层类型和流体性质差异大的特点。受限于海上油田开发的高投入,为了提高经济性,早期往往采用一套层系大段合采的开发方式<sup>[1-2]</sup>,开发过程中层间干扰十分严重。由于层间物性、流体、厚度、压力等重要指标差异很大,有的储层产能不能充分释放,降低了采油速度,并造成剩余油在被干扰层大量富集。基于动态监测资料的层间干扰定性研究无法满足精细开发调整的需求,因此,进行层间干扰定量表征成为薄互层油藏层系重组开

发调整的关键<sup>[3-4]</sup>。

李波将过去采用的渗透率表征纵向非均质性拓展为利用原油在地层中流动难易程度的流动系数来描述纵向非均质性的方法<sup>[5]</sup>。罗宪波对于海上油田多层油藏层间物性差异大,产能干扰严重的问题,

收稿日期:2018-12-11; 改回日期:2019-02-12。

**第一作者简介:**康凯(1978—), 硕士, 高级工程师, 主要从事油气田开发方面研究。E-mail: kangkai@cnooc.com.cn。

**基金项目:**国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”渤海油田高效开发示范工程子课题(2016ZX05058-001-005)部分研究成果。

利用层间矛盾主控因素判断层间干扰程度的强弱<sup>[6]</sup>。刘洪杰基于油井压恢测试结果、开发动态数据等,对多层合采层间干扰系数进行分析<sup>[7]</sup>。

前人的研究偏重于定性判断,缺少针对薄互层油藏的量化表征。目前矿场为了量化层间干扰,往往采用下分采管柱并进行开关滑套作业,同时结合产能测试来进行,费时费力,成本很高,且受限于海上平台作业,工作量大,实际操作困难。本文通过室内物理模拟实验法、油藏工程法和动态反演法,分析层间干扰主控因素及干扰机理,创新了薄互层油藏合采层间干扰定量描述理论,为油田剩余油挖潜和综合调整的层系划分提供理论指导。

## 1 薄互层油藏三维物理模拟

针对薄互层油藏各层厚度、物性、流体和压力差异等因素导致的层间矛盾,开展多层水驱油三维物理模拟实验,分析多层合采时的驱油效率,为油田开发方案研究提供理论支持。本实验选取 PL 油田真实地层压力和油藏参数作为实验条件,注采井距、油

层厚度等采用等比例缩小模型,与实际油藏情况相比具有相似性和可对比性。

利用三维大平板填砂模型制作了一套模拟地层条件水驱油的三维成像及监测实验系统<sup>[8]</sup>。在设备设计中,加大模型承受压力条件,以期模拟真实地层压力条件下水驱开发,同时为了更好地表征薄互层油藏水驱开发,扩大模型的模拟地层范围和层数,实现了分层注水分层开采,分层计量、砂粒自动压实的装置和模型可调节功能。

在监测系统上,增加电极分布层数和平面上的电极数量,电极组采用 8 横 8 列的方式均布在底板,电极组单元包括 4 个长短不一的电极,64 个 4 路继电器输出模块可对 256 个电极进行电极扫描控制,从而生成电阻三维图像。此外,模型增加了压力监测系统,8 个 10 MPa 压力传感器分布在底板,可随时检测压力变化情况。通过对设备研制、模型设计和监测系统的创新改进,大幅提高了三维物理模拟实验的研究精度,更加接近真实地层条件下的薄互层水驱开发情况(见图 1)。

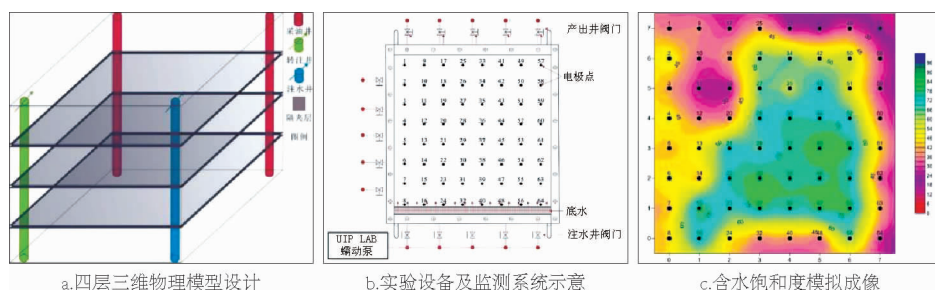


图1 薄互层油藏三维物理模拟实验设计及成像系统

填取不同物性、厚度的物理模型以模拟薄互层油藏,用不同黏度的模拟油饱和不同物理模型以形成层间流体差异,三维模型模拟反九点面积井网开发(1注3采)的方式,注入端模拟注水井多层合注,以恒定流量注入水;出口端在各层设置虚拟井以记录各层采出情况,同时在各虚拟井分别接入抽泵机,设置不同流压,模拟各层不同生产压差。在实验过程中记录出口端采液速度、含水情况,同时记录累积

采油量,计算各模拟层驱油效率,反映不同条件下的薄互层层间干扰情况。

通过多层并联三维物理模型实验,可以看出随着储层渗透率级差、黏度级差、层间压力级差的增大,低渗层、高粘层、薄差层和亏空层都明显受到压抑,模型整体驱油效率受到不同程度的影响(见图 2),获得了薄互层油藏多层合注合采时层间驱油效率的量化差异。

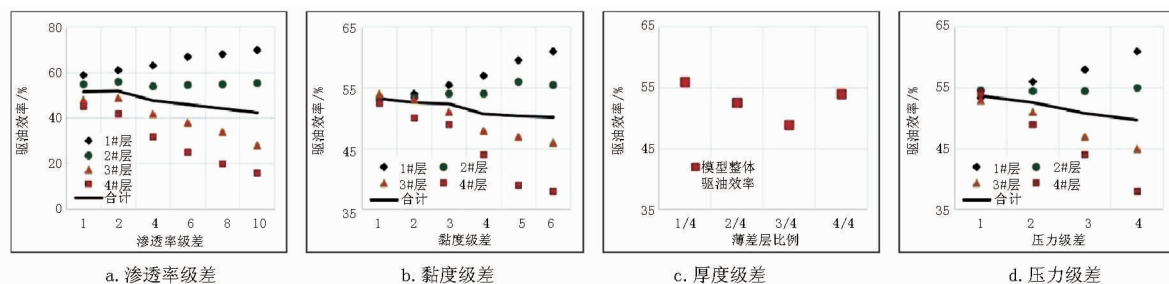


图2 三维物理模拟实验不同条件下驱油效率对比

## 2 基于生产动态反演法定量表征层间干扰因子

目前利用生产动态对层间干扰进行表征的方法大多是针对单一影响因素展开研究,不能直接指导油田开发。针对渤海湾薄互层油藏采用大段多层合采开发方式,各层系之间厚度、储层物性、流体性质和层间压力差异大的特征,分析多层合采过程中不同含水阶段层间干扰对油井产能的影响,建立多层合采层间干扰定量表征理论,为油田层系划分提供指导<sup>[9-12]</sup>。

根据油田开发特征,引入干扰因子概念,以更直观地描述不同含水阶段层间干扰对合采效果的影响。干扰因子随含水率的变化实际反映的是多层合采过程中层间干扰对油井整体产油能力的影响随含水率的变化,干扰因子计算式<sup>[13-15]</sup>:

$$\alpha_o = \frac{\sum_{i=1}^n J_{di_o} - \sum_{i=1}^n J_{hi_o}}{\sum_{i=1}^n J_{di_o}} \quad (1)$$

式中: $\alpha_o$ 为层间干扰因子; $J_{di_o}$ 为第*i*层无干扰时产能; $J_{hi_o}$ 为第*i*层合采时产能。

现有的定向井产能计算方法仅适用于单层开采,没有考虑薄互层的层间干扰和稠油的启动压力,不适合预测多层合采的油井产能。通过引入干扰因

子和启动压力,对单层的定向井产能公式进行修正,得到定向井多层合采产能计算式:

$$Q = \frac{542.87(1 - \alpha_o) \sum_{i=1}^n \frac{K_i K_{ri}(p_e - p_w - G_i - R_{iDV})}{\mu_{oi} B_{oi}}}{\ln \frac{R_{ev}}{r_{we}} + S_{\theta c} + S} \quad (2)$$

进一步对式(2)进行整理,得到层间干扰因子定量表征计算式:

$$\alpha_o = 1 - \frac{Q_o \frac{\ln \frac{R_{ev}}{r_{we}} + S_{\theta c} + S}{542.87 \sum_{i=1}^n \frac{K_i K_{ri}(p_e - p_w - G_i - R_{iDV})}{\mu_{oi} B_{oi}}}}{1} \quad (3)$$

式中: $\alpha_o$ 为层间干扰因子; $K_{roi}$ 为第*i*层油相相对渗透率; $K_i$ 为第*i*层渗透率, $\mu\text{m}^2$ ; $h_i$ 为第*i*层有效厚度,m; $\mu_{oi}$ 为第*i*层地下流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ; $p_e$ 为油藏压力,MPa; $p_w$ 为井底流动压力,MPa; $R_{ev}$ 为油藏供给半径,m; $r_{we}$ 为生产井井筒半径,m;油藏启动压力梯度  $G_i = 0.1231 \left( \frac{K_i}{\mu_i} \right)^{-0.6288}$ 。

用干扰因子定量表征计算式,本项目系统分析了渤海湾 PL 油田层间干扰情况,在此基础上,形成了渤海湾 PL 油田干扰因子评价图版(见图3)。

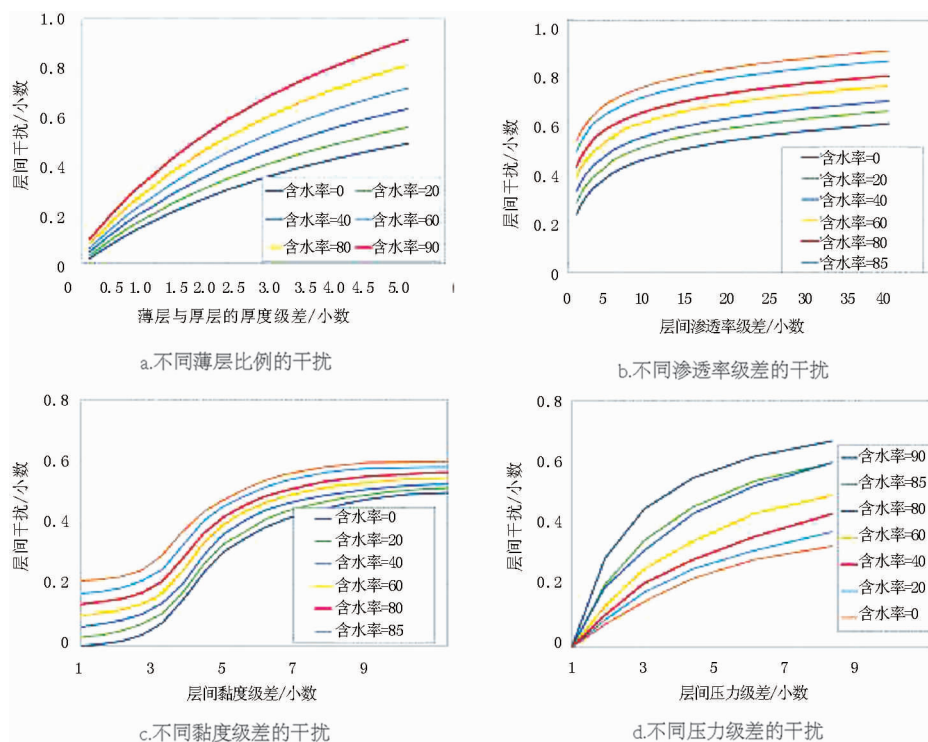


图3 渤海湾 PL 油田多层合采层间采出程度干扰因子评价模板

从图版可以看出:(1)渤海湾 PL 油田多层合采主要存在厚度差异、黏度差异、渗透率差异和层间压力差异导致的层间干扰;(2)多层合采过程中,主力层通过层间干扰对非主力层的产油能力有一定的负面作用,随着含水率的上升负面作用逐渐增强,因此在中高含水期进行分层系开发很有必要;(3)渗透率级差(黏度级差、厚度级差、压力级差)越大,在相同含水情况下的层间干扰程度越明显。因此,针对渗透率级差(黏度级差、厚度级差、压力级差)较大的油层进行分层系开发,以减少层间干扰。

### 3 基于油藏工程方法研究多层合采波及系数

薄互层状油藏在开发过程中,受限于层间客观存在的储层厚度、储层物性、流体和地层压力的差异,引起水驱开发过程中不同层位的水驱前缘推进速度不同,从而导致开发效果不同。基于贝克雷理论,分析了多层油藏合采开发效果的影响因素,形成了薄互层水驱开发理论模型,为油田进行分层系开发调整提供理论指导<sup>[16-19]</sup>。

在油水两相渗流理论的基础上,建立了多层油藏水驱油模型,对多层油藏在定液量条件下的合采与分采进行模拟,并对不同开发阶段各油层的产液

(油)量、产液(油)指数、渗流阻力、采出程度等进行求解。

多层油藏水驱油模型多层合采时产量为:

$$E_v = \frac{\sum_{i=1}^M \pi R_o^2 h_i \phi_i + \sum_{i=M+1}^N \pi (R_o^2 - r_{fi}^2) h_i \phi_i}{\sum_{i=1}^N \pi R_o^2 h_i \phi_i} \quad (4)$$

多层合采时油藏纵向波及系数为:

$$E_v = \frac{\sum_{i=1}^M \pi R_o^2 h_i \phi_i + \sum_{i=M+1}^N \pi (R_o^2 - r_{fi}^2) h_i \phi_i}{\sum_{i=1}^N \pi R_o^2 h_i \phi_i} \quad (5)$$

多层合采时油藏采出程度为:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^M \pi R_o^2 h_i \phi_i (\bar{S}_{wi} - S_{wci}) + \sum_{i=M+1}^N \int_0^t Q_i dt}{\sum_{i=1}^N \pi R_o^2 h_i \phi_i (1 - S_{wci})} \quad (6)$$

利用多层水驱开发模型对合采和分采条件下的开发效果进行对比,为多层油藏制定合理的分采界限提供指导。如图4所示,薄互层级差、渗透率级差、黏度级差和压力级差越大,合采与分采波及系数差异也越大,结合油田特点给出层系划分的薄层占厚层比例小于0.6左右,渗透率级差小于5左右,黏度级差小于3左右,层间压力级差小于1.2左右。

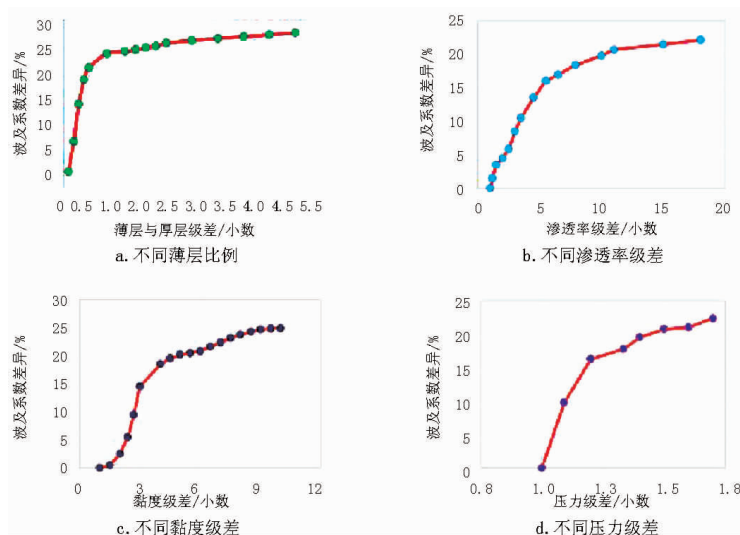


图4 渤海湾 PL 油田不同油层合采与分采效果对比

在多层合采驱油效率、波及系数和干扰系数定量表征的基础上划开开发层系,将储层类型、储层物性、流体性质和压力差异大的油层分采,采取纵向油、水井彻底细分开发层系的产液结构调整策略,由原来的一套开发层系调整为三套开发层系,把不同

储层类型、不同流体性质和不同压力差异的油层进行分采(见图5),日增油 2 675 m<sup>3</sup>,累积增油 351.5 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,油田水驱采收率提高了 2.3%,在油田中高含水期实现了稳油控水,明显提高了油田开发效果<sup>[20-23]</sup>。



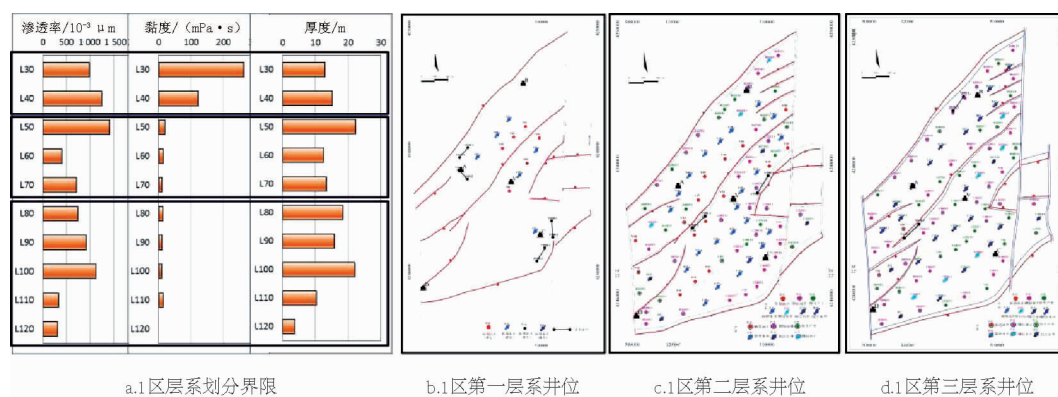


图5 渤海湾 PL 油田开发层系组合与划分示意

## 4 结论

(1) 物理实验模拟法结论清晰,但不能直接应用于矿场;生产动态反演法数据可靠,但需要大量统计数据,难以推广应用到其他油田;油藏工程法逻辑严谨、易于推广,但偏于理想。在实际应用中,需要将这三种方法相互对比、印证,利用生产动态反演法和物理实验模拟法对油藏工程法进行校正,使之更加符合矿场实际,并易于推广应用。

(2) 本文根据渤海湾薄互层水驱砂岩油藏特点,利用物理实验模拟法、生产动态反演法和油藏工程法,加入薄互层分布比例、启动压力、含水率阶段、压力差异等主控因素,实现了对薄互层油藏层间干扰系数的定量化表征。

(3) 层间干扰定量化表征可以定量描述油田剩余油分布规律,确定重点挖潜部位,优选调整井井位。尤其可为纵向分布层数多、厚度大的薄互层油藏的分层系开发提供层系划分依据。

(4) 定量表征新方法在渤海湾 PL 油田的剩余油挖潜和开发调整中的应用获得了良好效果,对今后此类型油藏的开发具有重要的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 郭太现,杨庆红,黄凯,等. 海上河流相油田高效开发技术[J]. 石油勘探与开发,2013,40(6):708 - 714.
- [2] 安桂荣,许家峰,周文胜,等. 海上复杂河流相水驱稠油油田井网优化[J]. 中国海上油气,2013,25(3):28 - 31.
- [3] 吴小张,张建民,江聪,等. 海上河流相油田分层系增产策略研究与应用[J]. 石油地质与工程,2018,32(3):74 - 75.
- [4] 邓景夫,李云鹏,贾晓飞,等. 海上高含水期油田细分层系技术界限研究[J]. 特种油气藏,2018,25(2):117 - 118.
- [5] 李波,罗宪波,刘英,等. 判断层间非均质性的新方法[J]. 中国海上油气,2007,19(2):93 - 95.
- [6] 罗宪波,赵春明,武海燕,等. 海上油田多层合采层间干扰系数确定[J]. 大庆石油地质与开发,2010,36(1):102 - 104.
- [7] 刘洪杰. 常规油藏多层合采层间干扰系数确定新方法[J]. 石

油地质与工程,2013,27(5):81 - 82.

- [8] 于春生,李闯,乔国安,等. 纵向非均质油藏水驱油实验研究[J]. 西南石油大学学报,2009,31(1):85 - 86.
- [9] 张金庆,安桂荣,耿站立,等. 中国近海陆相典型沉积类型油田水驱高效开发模式探讨[J]. 中国海上油气,2017,29(2):71 - 72.
- [10] 杨承林,许春娥,许寻,等. 多层砂岩油藏高含水期剩余油分布的数值模拟研究[J]. 海洋石油,2006,26(12):74 - 76.
- [11] 张运来,廖新武,胡勇,等. 海上稠油油田高含水期开发模式研究. 岩性油气藏,2018,30(4):120 - 126.
- [12] 刘超,赵春明,廖新武,等. 海上油田大井距条件下曲流河储层内部构型精细解剖及应用分析[J]. 中国海上油气,2014,26(1):58 - 64.
- [13] 许亚南,龙明,于登飞,等. 渤海 Q 油田层间干扰定量表征技术及应用[J]. 石油地质与工程,2017,31(2):79 - 80.
- [14] 蔡晖,阳晓燕,张占华,等. 层间干扰定量表征新方法在渤南垦利区域的应用[J]. 特种油气藏,2018,25(4):92 - 93.
- [15] 王守磊,耿站立,安桂荣,等. 海上稠油油藏层间干扰系数确定新方法[J]. 中国海上油气,2017,29(5):91 - 93.
- [16] 程林松,杨乃群,李忠兴,等. 层系间窜流的诊断分析[J]. 石油大学学报,2002,26(2):51 - 52.
- [17] 许家峰. 多层合采砂岩稠油油藏层间干扰动态表征及应用[J]. 中国海上油气,2016,28(4):49 - 50.
- [18] 罗宪波,赵春明,刘英等. 海上稠油油田投产初期产能评价研究[J]. 断块油气田,2011,18(5):630 - 632.
- [19] 周文胜,李倩茹,耿站立,等. 合采井层间干扰现象数学模拟研究[J]. 西南石油大学学报,2017,39(6):110 - 112.
- [20] 贾晓飞,苏彦春,邓景夫,等. 多层合采砂岩油藏动态干扰及其影响因素[J]. 断块油气田,2016,23(3):335 - 337.
- [21] 余华杰,朱国金,谭先红,等. 砂岩油藏多层合采层间干扰及开发策略研究[J]. 西南石油大学学报,2014,36(1):102 - 104.
- [22] 苏彦春,李廷礼. 海上砂岩油田高含水期开发调整实践[J]. 中国海上油气,2016,28(3):83 - 90.
- [23] 周守为. 海上稠油高效开发新模式研究及应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2007,29(5):1 - 4.

(编辑 谢 葵)