

隔夹层成因、特征及其对油田开发的影响 ——以塔中地区海相砂岩储层为例

徐寅¹, 徐怀民¹, 郭春涛², 牛玉杰³, 昌伦杰³, 韩涛³

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029
3. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000

摘要 储层隔夹层是流体在储层中流动的重要影响因素之一。开展储层隔夹层认识和表征研究对油田中后期剩余油分布研究及开发方案的编制有着重要意义。本文针对塔里木盆地塔中地区东河砂岩段海相砂岩储层,以岩心观察为基础,分析隔夹层的成因机理,将其分为沉积作用和成岩作用形成的两大类隔夹层。从岩心井隔夹层识别入手,开展电性特征对比、物性分析资料研究,识别出泥质、钙质和物性3类隔夹层,确立了非取心井隔夹层划分识别标准。进一步探讨了隔夹层的厚度、分布范围、垂向渗透率和产状4个主要因素在油田开发中的控制作用。隔夹层对油水的封堵能力与厚度、分布范围呈明显的正相关,垂向渗透率决定着注入水向上向下的波及程度和速度,顺夹层倾向方向注水往往易形成剩余油富集区。

关键词 塔中地区;东河砂岩;隔夹层;油田开发

中图分类号 TE122.2

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.15.001

Origin, Characteristics and Effects on Oilfield Development of Interlayer of Shore Sandstone Reservoir in Tazhong Area

XU Yin¹, XU Huaimin¹, GUO Chuntao², NIU Yujie³, CHANG Lunjie³, HAN Tao³

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
3. Petrochina Exploration and Development Research Institute of Tarim Oilfield Company Limited, Kuerle 841000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Abstract The reservoir interlayer is an important factor in the flow in the reservoir. The reservoir interlayer and the characterization of the oil field are closely related to the oil distribution remained from the mid-later period and the development of the oilfield. Based on the core observation, in view of the Tarim basin in Donghe Marine sandstone reservoir in Tazhong area, this paper analyzes the mechanism of the origin of the interlayer, which is divided into two major types, formed by deposition and diagenesis. With electrical characteristics comparisons and the data of physical properties, three types of interlayer are identified, including mud, calcium and properties, and an inter-layer identification standard of non-core wells is established. Its role in the control of the oilfield development is discussed from the aspects of the thickness, distribution, vertical permeability and the attitude of the interlayer. The sealing capacity of oil and water of the interlayer has positive relationships with its thickness and distribution. Vertical permeability decides the degree and speed of the injection water moving up and down. Water injection along the tendency direction of the interlayer is often liable to form the remaining oil-rich region.

Keywords Tazhong area; Donghe sandstone; interlayer; oilfield development

收稿日期: 2012-03-23;修回日期:2012-05-02

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX5001-3)

作者简介: 徐寅,博士研究生,研究方向为油气田开发地质学,电子邮箱:xuyin209@163.com;徐怀民(通信作者),教授,研究方向为油藏地质评价、油田开发地质,电子邮箱:xuhuaimin@sina.com

0 引言

隔夹层特别是夹层在空间分布具有较大的随机性,其类型和性质受到沉积、构造运动、生物、化学等多种作用影响,不容易预测。目前针对隔夹层的研究主要集中在陆相特别是河流相^[1-3],多数学者认为陆相地层更加复杂,隔夹层分布也更具有不确定性,而对于海相地层的隔夹层研究则相对较弱^[4-7]。

塔里木盆地是中国最大的内陆含油气盆地,蕴藏丰富的油气资源。在目前已经发现的工业油流的各个层系中,石炭系东河砂岩油藏占有重要地位。东河砂岩是中国首例获高产工业性油气流的海相滨岸沉积,是石炭纪初期海侵阶段的沉积产物,包括底部砾岩、中部块状砂岩和上部含砾砂岩沉积^[8-9]。塔中各区块大多以开采东河砂岩储层为主,在油田生产过程中,随着开发程度的不断深入,储层内油水运动规律变得越来越复杂,水淹情况严重,剩余油分布零散。因此,搞清楚储层内部隔夹层的成因机理、类型特征及其对流体及能量的分隔作用,对油田开发具有十分重要的意义。

1 隔夹层的成因

由于沉积、成岩等地质作用不同,相应地也会形成不同的隔夹层。不同隔夹层的成因、特征和分布有较大的差异,对油水运动的控制也有所不同^[10-11]。根据研究区岩心观察结果分析,可将隔夹层按成因分为两大类6小类。

1.1 沉积作用形成的泥质隔夹层

(1) 单一沉积环境形成的隔夹层

由于沉积环境稳定,水体能量弱,常形成水平或块状层理,厚度、延伸长度和面积都较大,呈连片分布,泥质含量高,往往形成良好的隔层,泥坪和下临滨微相都可以广泛发育这类隔夹层。

(2) 沉积旋回内隔夹层

受沉积作用影响,在每一个沉积旋回的下部,砂体广泛发育并侧向叠加连片,形成广泛发育的有利储层。而在旋回的中上部,泥质含量增加,砂质减少,砂体分布受局限且连续性变差,形成相对分布面积较大的泥质、粉砂质和钙质沉积。这类隔夹层一般厚度相对较大,有一定的延伸长度和面积,能在局部或大面积范围内起到阻挡油气水垂向或水平流动的作用。

(3) 韵律层内泥质夹层

由于水动力条件的周期性变化,储层内部常形成粒度相对较细的泥质薄夹层,在垂向上形成厚度不大的正韵律或者反韵律。泥质薄夹层广泛分布于研究区各种沉积环境形成的韵律层中,如临滨亚相、混合坪亚相等,常呈平行的或者斜交的渗流屏障,使油气采出更加困难(图1)。

(4) 层理构造中的泥质纹层或条带层

由于水动力条件的变化,在砂质纹层之间可能形成含泥质纹层的夹层。主要特点是夹层的厚度小、数量多、分布极不

规则、延伸长度和面积非常小,储层非均质性很强,增大了油气采出的难度(图2)。



图1 韵律层内泥质夹层, TZ4-7-19井, 3576.56m

Fig. 1 Mud interlayer inside rhythmite, well TZ4-7-19, 3576.56m



图2 层理构造中的泥质纹层, TZ4-8-H8井, 3288.5m

Fig. 2 Mud lamina in bedding, well TZ4-8-H8, 3288.5m

1.2 成岩过程中形成的隔夹层

这类隔夹层包括钙质条带、硅质条带或黏土胶结条带等,其原岩岩性往往相对较粗,但由于成岩胶结作用较强而使粗粉级以上的砂岩物性变差,储层的渗透率变得很低而成为隔夹层,即所谓的“物性夹层”。

(1) 薄层砂体全胶结型物性隔夹层

沉积物成岩过程中,来源于上下岩层中的离子能够使薄砂岩层重新胶结成岩,或受较大的构造力作用重新胶结,这使原砂岩物性被改造、破坏,形成低渗透或不渗透的致密砂岩层。如图3所示,在均质的砂岩层中出现约1cm厚的物性夹层。

(2) 砂体内分散胶结型物性夹层

厚层砂体内部具有分散胶结的泥岩、钙质团块。在成岩过程中,来自泥岩、钙质团块和上下砂岩层中的各种离子使其发生胶结、交代、重结晶作用,形成低渗透的物性夹层(图4)。



图3 砂岩内物性夹层, TZ4-7-19井, 3575.72m

Fig. 3 Physical property interlayer inside sandstone, well TZ4-7-19, 3575.72m



图4 粉砂岩物性夹层, TZ4-6-14井, 3558.8m

Fig. 4 Siltstone physical property interlayer, well TZ4-6-14, 3558.8m

2 隔夹层的类型、特征

根据取心井的岩心、薄片等分析化验资料在研究区识别出泥质、钙质和物性 3 类隔夹层。但由于岩心资料相对较少,而测井资料相对丰富,因此对于非取心井,根据测井曲线特征识别上述隔夹层更具有普遍意义。

(1) 泥质隔夹层

主要包括泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和含砂、砾泥岩。该类隔夹层主要是由于水动力减弱细粒悬浮物质沉积形成,在研究区主要存在 3 种情况:① 在水体较深、能量较小的区域,如滨外陆棚带。此种泥岩一般颜色较深,灰色、灰绿色为主,多发育水平层理或者块状层理;② 水体较浅、能量较小或者暴露区域,典型代表为泥坪、混合坪沉积。多发育水平层理或水平波状层理,生物化石发育,扰动现象强烈,在厚层泥岩沉积中可见薄的砂质层;③ 水深多变,水体能量较强区域,如前滨凹槽、前滨滩、临滨凹槽、临滨滩等。沉积物粒度相对较粗,且常常含有薄砂层或者呈现薄细砂层与泥岩互层。

泥质隔夹层在测井曲线上主要表现为泥岩特征,微电极曲线平稳幅度低,深侧向电阻值有明显下降,自然伽马值呈高值,声波时差高值,井径曲线明显扩径。

(2) 钙质隔夹层

该类隔夹层主要为钙质胶结砂岩,岩性致密,与沉积物碳酸盐胶结作用、溶解作用等成岩作用不均匀性有关,碳酸盐岩充填孔隙并交代碎屑颗粒,分布随机性强。从取心资料看,该类隔夹层在本区分布频率不高。

钙质隔夹层由于岩性致密,密度大,导电性差,渗透率低,在测井曲线上主要表现为:井径无扩径值,电阻率相对高于邻近油层电阻率值。自然伽马低值,但高于油层自然伽马值。感应测井 3 条电阻率曲线均为高值,并高于油层电阻率值,且 3 条电阻率曲线基本重叠。密度测井高值,中子测井和声波时差低值,微电位和微梯度与邻层的比值一般超过 1.2。

(3) 物性隔夹层

该类隔夹层岩性以细粉砂、泥质和钙质为主,具有一定的孔隙度和渗透率,但未达到有效储层物性下限,在本区发育较广泛。此类隔夹层可由两种情况产生,一种是沉积时砂岩层中的细粒薄砂岩重胶结物性变差形成;另一种是成岩过程中泥质或钙质团块受交代或重结晶作用改造,使渗透率下降而形成的隔夹层。

物性隔夹层测井响应特征介于泥质隔夹层和钙质隔夹层之间,自然电位略高于泥质隔夹层,自然伽马低于泥质隔夹层。

3 隔夹层对油田开发的控制作用

隔夹层对储层流体渗流具有不同程度的影响和控制作用,主要取决于隔夹层的厚度、延伸规模、垂向渗透率、产状与注采井组的关系等,而其不同的特征又对开发有着不同的影响。

3.1 隔夹层厚度和分布范围

油井生产见水后,含水上升快慢的一个决定因素就是射孔层段内隔夹层的发育状况。当底水上升到油层时,若隔夹层的厚度小、延伸范围小且层数少,则不能对底水的上升起到很强的抑制作用,只是使底水经过时发生绕流,对油水运动影响不大,含水上升很快。若隔夹层的厚度大、分布范围广且层数众多,则对底水的上升起到明显的抑制作用,使油井具有较长的无水 and 低含水采收期,且含水上升慢,且随着分布范围的扩大,它对底水的遮挡作用也越来越明显,但当延伸半径接近或大于井距时,相当于连续夹层,油层完全被分层,含水上升机理发生变化,含水上升速度又增加。

研究区存在 2 套广泛分布的隔夹层,其中含砾砂岩段顶部的隔夹层在塔中 4 井区平均厚度 9.6m,基本全区发育,对油水的运动有明显的影 响。TZ4-48-16 井顶部 3719.41—3732.7m 层段发育 13.29m 的隔夹层,在 2000 年和 2001 年的两次测试过程中,发现紧邻隔夹层的下部 3732—3736.5m 层段含油饱和度变化小,剩余油富集,而靠下的 3737—3742m 层段含油饱和度变化较大(图 5)。

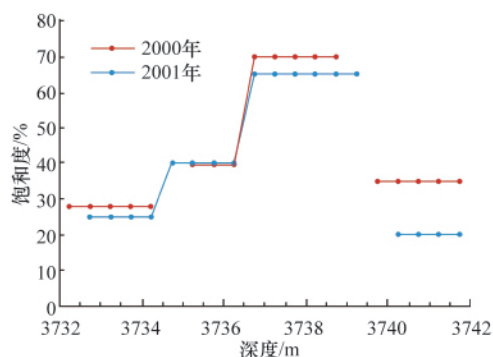


图 5 TZ4-48-16 井含油饱和度变化

Fig. 5 Oil saturation changes of TZ4-48-16 well

另外一套为 3、4 小层之间的隔夹层,塔中 4 井区基本全区发育,最大钻遇厚度 15.83m,平均 3.44m;塔中 40、47、10 井区也基本发育,最大钻遇厚度 11.87m,平均 5.14m。此隔层之上 0—3 小层具有明显的层状油藏的性质,4—5 小层具有块状底水油藏的性质。

TZ4-47-20 井 1996 年 9 月投产,射孔层位距原始油水界面 24m,生产过程中油水界面上升迅速。2001 年中子寿命测油水界面上升了 16.5m,平均每年上升 3.3m,当底水上升至含砾砂岩段时,由于 4—5 小层间和 5 小层底部的隔层由于分布范围小,不能对底水的上升起到较好的抑制作用,底水迅速上升,2005 年中子寿命测油水界面又上升了 30m,平均每年上升 7.5m。生产特征上,含水从 2001 年 11 月的 24%上升至 2005 年 6 月的 91%,平均月含水上升率 1.75%。

选取了 12 口关键井,对其 3、4 小层间隔夹层的厚度、频率和含水上升的关系进行了统计分析,可以得出隔夹层的平均厚度与月含水上升率存在一定的负相关性(图 6)。

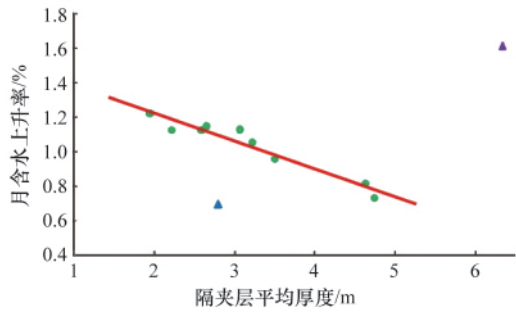


图 6 月含水上升率与隔夹层平均厚度关系
Fig. 6 Relationship between average thickness of interlayer and monthly rate of water rising

3.2 隔夹层垂向渗透率

隔夹层也有一定的渗透率,其垂向渗透率决定了注入水

向上、下波及的程度和速度。当夹层的渗透率小于“正常”储层的 $1/100$, 即 $K_v/K_h > 100$ 时, 夹层的作用接近于非渗透率夹层^[2]。通过对部分取心井渗透率和开发历史的分析, 发现垂向渗透率对油井含水率的变化有明显的影

响。TZ4-28-12 井在纵向上有 7 套隔夹层(图 7(a)), 其中 2、3、5、6 号隔夹层的垂向渗透率小于相应小层全区平均水平渗透率的 1%, 对油水运动起到封隔作用。由于 6 号隔夹层的封隔作用, 该井具有 4 年多的无水生产期。即使进入含水阶段之后, 由于 2、3、5 号 3 层共 3.8m 厚隔夹层的作用使含水不能快速上升, 该井保持了 4 年多的低含水期, 到 2007 年 6 月时含水只有 33% 低于井区平均含水(图 7(b))。从该井近 10 年的唯一一次产液剖面(图 7(c))上看, 由于 2、3 号隔夹层的封隔作用, 其上层层位含水都比较低, 平均只有 14.0%, 其下部层位含水都比较高, 平均达 66.6%。

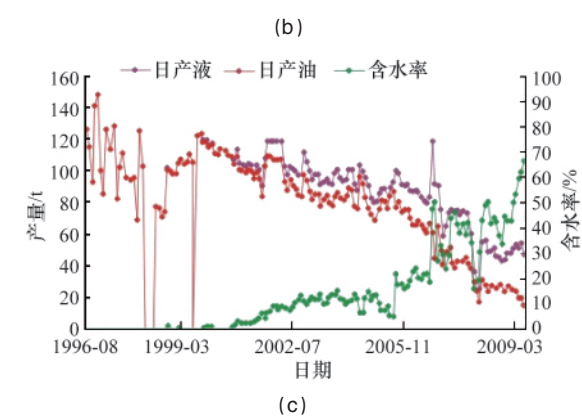
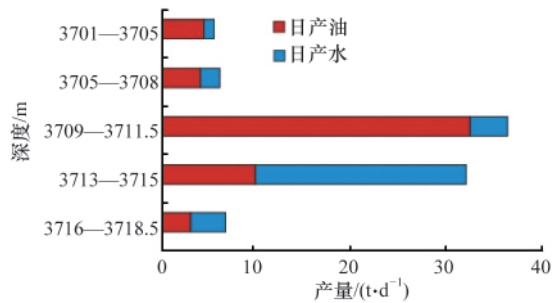
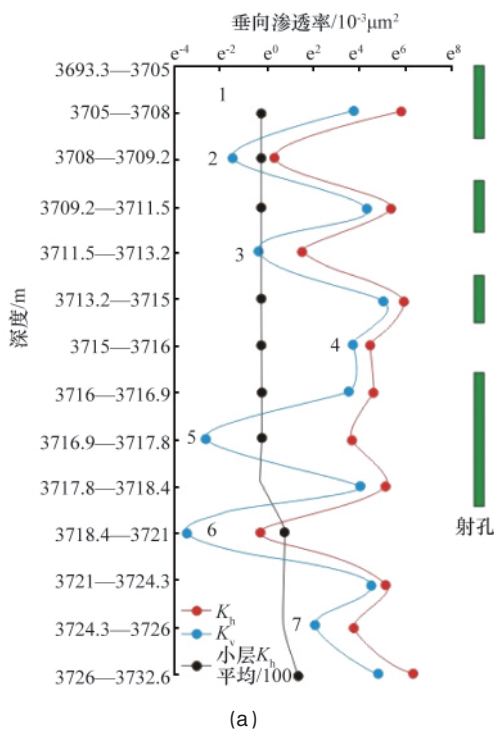


图 7 TZ4-28-12 井垂向渗透率与生产关系

Fig. 7 Relationship between vertical permeability and production of TZ4-28-12 well

3.3 隔夹层产状

剩余油富集区的大小、数量及分布位置受储集体内隔夹层平面位置、油水井射孔方式的控制^[13-14]。总的来看, 若隔夹层斜交地层层面, 逆夹层倾向方向注水时, 波及系数和采收率略大; 顺夹层倾向方向注水时, 波及系数和采收率略小; 当采油井钻遇夹层时, 其波及系数及采收率更小, 剩余油相对富集。因此, 顺夹层倾向方向注水往往易形成剩余油富集区。

研究区属于海相沉积, 多发育平行地层层面的隔夹层。当其位于注水井和采油井中间时, 对剩余油的控制作用最小。若只有采油井钻遇夹层, 则因夹层的隔档作用, 剩余油主

要富集在远离注水井的夹层下部, 特别是注水井射孔部位位于夹层以上时, 剩余油更为富集; 若只有注水井钻遇夹层, 且注水井只在夹层以上部位射孔注水, 则夹层对剩余油的分布影响最大, 油井与水井之间的夹层下部多富集剩余油。

TZ4-8-14 井于 1998 年 2 月投注, 注水层位为 3、4、5 小层, 井组油井 TZ4-8-H15 井射孔 3、4 小层。注入水在岩层内受重力作用有向下流动趋势, 所以在 TZ4-8-H15 井区域 1—3 小层富集剩余油最多, 其次是 4—5 小层(图 8(a))。生产特征上也显示了该特点。该井 2006 年 6 月投产时 8mm 油嘴日产液 130t, 含水 19%。从 2007 年 4 月产液剖面上看(图 8

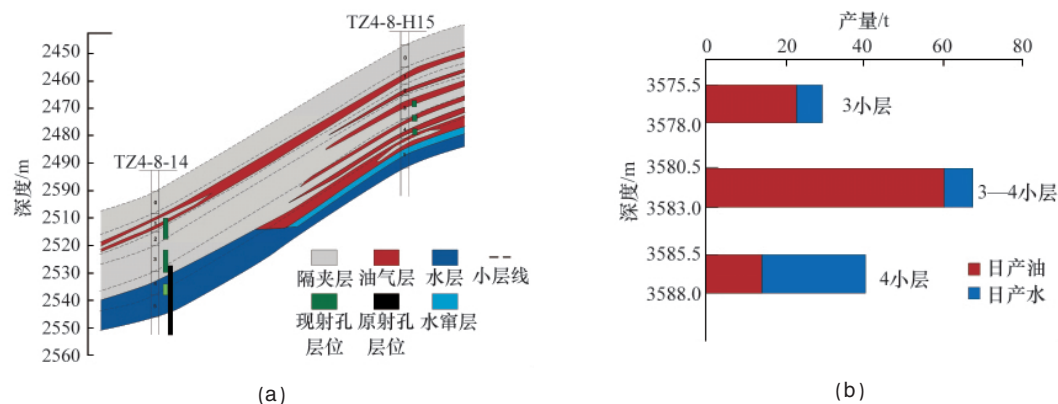


图8 TZ4-8-14、TZ4-8-H15 井间隔层发育状况及 TZ4-8-14 井产液剖面图

Fig. 8 Interlayer between TZ4-8-14 and TZ4-8-H15 and fluid production section of TZ4-8-14 well

(b)), 3 小层水淹程度低, 而 4 小层水淹程度则比较高。但是由于边部 TZ4-8-14 井注入水进入底水后, 推动底水向油藏中脊流动, 在 TZ4-8-H15 井附近形成底水锥进造成 5 小层部分水淹。

4 结论

本文通过对塔中地区东河砂岩段海相砂岩储层的岩心观察, 分析隔夹层的成因机理, 从岩心井隔夹层识别入手, 开展电性特征对比、物性分析资料研究, 确立了隔夹层划分识别标准。并在此基础上对隔夹层在油田开发中的作用进行了研究, 得出以下结论。

(1) 海相厚层砂岩储层中隔夹层的成因机理大致可以分为两大类, 一类是由沉积作用形成, 另一类受成岩作用控制。

(2) 根据岩心资料及测井响应特征分析, 建立隔夹层测井识别标准, 将塔中地区海相砂岩储层隔夹层类型分为发育泥质、钙质和物性 3 种。其中以泥质和物性隔夹层为主, 钙质隔夹层发育较少。

(3) 每套隔夹层由于厚度、面积、垂向渗透率、产状等地质因素的不同, 其对油井的生产控制程度、方式各不相同, 起关键作用的方面也不相同。另外当射孔层段位于隔夹层中时, 高强度的注水也可能使隔夹层内微观结构发生变化, 渗透率逐渐增大, 封隔作用受到破坏, 造成油井含水不断升高或者水淹。因此在油田开发过程中, 隔夹层对剩余油分布的控制及其对油水运动的影响应该从以上多个方面进行综合分析。

参考文献 (References)

- [1] 张昌民, 尹太举, 张尚锋. 泥质隔层的层次分析[J]. 石油学报, 2004, 25(3): 48-52.
Zhang Changmin, Yin Taiju, Zhang Shangfeng. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(3): 48-52.
- [2] 马世忠, 孙雨, 范广娟. 地下曲流河道单砂体内部薄夹层建筑结构研究方法[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 632-638.
Ma Shizhong, Sun Yu, Fan Guangjuan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(4): 632-638.

- [3] 王延章, 林承焰, 温长云. 夹层分布模式及其对剩余油的控制作用[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(5): 6-10.
Wang Yanzhang, Lin Chengyan, Wen Changyun. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2006, 28(5): 6-10.
- [4] Geehan G W. Geologic prediction of shale continuity. prudhoe bay field: reservoir characterization[J]. *Academic Press Inc*, 1986, 19(9): 162-168.
- [5] Schumm S A. River response to baselevel change: Implications for sequence stratigraphy[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(3): 279-294.
- [6] 李保树. 低渗透率夹层对厚油层水淹特征的影响 [J]. 大庆油田, 1982, 1(2): 110-120.
Li Baoshu. *Daqing Oil Field*, 1982, 1(2): 110-120.
- [7] 吕晓光, 马福士, 田东辉. 隔层岩性、物性及分布特征研究[J]. 石油勘探与开发. 1994, 21(5): 80-87.
Lv Xiaoguang, Ma Fushi, Tian Donghui. *Petroleum Exploration and Development*, 1994, 21(5): 80-87.
- [8] 朱筱敏, 张强, 赵澄林. 塔里木盆地中部地区东河砂岩段沉积特征和沉积环境演变[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 27-35.
Zhu Xiaomin, Zhang Qiang, Zhao Chenglin. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39(1): 27-35.
- [9] 李国永, 徐怀民, 牛玉杰. 哈得逊地区东河砂岩沉积微相特征及其对流动单元的控制作用[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(5): 35-37.
Li Guoyong, Xu Huaimin, Niu Yujie. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2008, 15(5): 35-37.
- [10] 张吉, 张烈辉, 胡书勇. 陆相碎屑岩隔夹层成因、特征及其识别[J]. 测井技术, 2003, 27(3): 221-224.
Zhang Ji, Zhang Liehui, Hu Shuyong. *Well Logging Technology*, 2003, 27(3): 221-224.
- [11] 束青林. 孤岛油田馆陶组河流相储层隔夹层成因研究 [J]. 石油学报, 2006, 27(3): 100-103.
Shu Qinglin. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(3): 100-103.
- [12] 熊光勤, 徐建政, 毕建福. 陈堡油田 K_{21}^3 厚油层内隔夹层研究与利用 [J]. 石油地质与工程, 2005, 19(4): 26-29.
Xiong Guangqin, Xu Jianzheng, Bi Jianfu. *Petroleum Geology and Engineering*, 2005, 19(4): 26-29.
- [13] 付志国, 石成方, 赵翰卿. 喇萨杏油田河道砂岩厚油层夹层分布特征 [J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(4): 55-58.
Fu Zhiguo, Shi Chengfang, Zhao Hanqing. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(4): 55-58.
- [14] 杜庆军, 陈月明, 侯键. 胜坨油田厚油层内夹层分布对剩余油的控制作用[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(4): 111-114.
Du Qingjun, Chen Yueming, Hou Jian. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2006, 28(4): 111-114.

(责任编辑 吴晓丽)