

# 最小流动孔喉半径法确定低渗储层物性下限

高阳<sup>1</sup>, 蒋裕强<sup>2</sup>, 杨长城<sup>3</sup>, 程方敏<sup>4</sup>

1. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东东营 257061
2. 西南石油大学资源与环境学院, 成都 610500
3. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司勘探开发研究院, 成都 610051
4. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司重庆气矿, 重庆 400021

**摘要** 常规研究方法在低渗储层物性下限确定中有较大局限性, 为了准确界定该类储层的物性下限, 以压汞实验、水锁实验和核磁共振实验为基础, 建立了以最小流动孔喉半径确定该类储层物性下限的方法, 即从岩石的微观孔隙特征出发, 首先利用实验方法确定含气层段的最小流动孔喉半径, 进而根据实测数据建立孔喉半径与孔隙度、渗透率相关关系, 从而确定储层的孔隙度和渗透率下限。应用该方法对川南河包场须家河组气藏的低渗储层物性下限进行研究, 确定了河包场地区须二、四、六段有效储层孔隙度下限分别为 5.5%, 5%, 3.8%; 渗透率下限分别为  $0.03 \times 10^{-3}$ ,  $0.11 \times 10^{-3}$ ,  $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

**关键词** 储层有效性; 低渗储层; 须家河组; 河包场地区; 储层下限

**中图分类号** TE112.23

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.04.04

## Minimum Flow Pore Throat Radius for Determination of the Lower Limits of Parameters in Low Permeability Reservoir

GAO Yang<sup>1</sup>, JIANG Yuqiang<sup>2</sup>, YANG Changcheng<sup>3</sup>, CHENG Fangmin<sup>4</sup>

1. College of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China
2. School of Resources and Environment College, Southwest Petroleum University, Chengdu, 610500, China
3. Exploration and Development Research Institute, Southwest Oil & Gas Field, China National Petroleum Corporation, Chengdu 610051, China
4. Chongqing Gas Filed, Oil & Gas Field Southwest Branch, China National Petroleum Corporation, Chongqing 400021, China

**Abstract** The lower limit parameters of a reservoir play an important role in the reservoir exploration and development. Conventional methods are greatly limited in determining the lower limits of low porosity and low permeability reservoirs. In this paper, based on the mercury penetration experiment, water-blocking experiment and NMR experiment, the methods of determining the lower limit parameters within the low permeability reservoir are proposed by using the minimum flow pore throat radius. That is, considering low permeability reservoir's microscopic characteristics, the minimum flow pore throat radius of the gas-bearing section is first determined, and then the relationships between porosity, permeability and median radius are established in order to calculate the low limits of porosity and permeability. Using this method, the lower limits of porosity and permeability of the Xujiahe Formation ( $T_3x$ ) gas reservoir in Hebaochang area are determined: the lower limits of porosity in  $T_3x^2$ ,  $T_3x^4$  and  $T_3x^6$  Formation are 5.5%, 5% and 3.8%, and the lower limits of permeability are  $0.03 \times 10^{-3}$ ,  $0.11 \times 10^{-3}$  and  $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

**Keywords** effectiveness of reservoir; low permeability reservoir; Xujiahe Formation; Hebaochang area; low limit parameters of reservoir

收稿日期: 2010-09-19; 修回日期: 2011-01-13

基金项目: 国家油气重大专项(2008zx5001)

作者简介: 高阳, 博士研究生, 研究方向为储层地质及天然气成因与成藏, 电子信箱: swap124@163.com

### 0 引言

在碎屑岩地层中,低渗储层通常是指渗透率小于  $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的砂岩储层,它具有孔隙喉道小、非达西渗流等特点<sup>[1-2]</sup>。中国油气已探明储量中,低渗油气藏占较大比例<sup>[3-4]</sup>,在每年新增探明储量中,低渗和特低渗油气藏约占 2/3<sup>[5]</sup>,随着各盆地勘探程度的增加,中、高渗透率为主的老油田逐渐进入中高含水期,低渗油气藏的重要性日益明显。

储层物性下限研究是客观认识低渗气藏的基础,合理界定物性下限对气藏分布和储量计算意义重大。储层物性下限是指储集层能够成为有效储层应具有最低物性条件,通常用孔隙度和渗透率来度量。自石油工业诞生以来,确定储层物性下限的方法就在不断探索之中。早期学者们粗略规定碳酸盐岩储层孔隙度下限为 3%,而砂岩储层为 5%<sup>[6]</sup>;而后 Rockwood 等<sup>[7]</sup>提出应用试油试气资料,根据不同层段孔隙度和水饱和度相关关系曲线的拐点确定孔隙度下限,该方法简单易用,一直沿用至今;20 世纪 60—70 年代,石油实验技术得到长足发展, Murray, Stout, Arps, Chilingar 等<sup>[8-11]</sup>先后提出了以压汞、相渗等实验为基础,以孔隙结构理论、相对渗透率理论为指导的储层下限确定方法;20 世纪 90 年代至今,关于储层物性下限确定方法的研究停滞不前,目前常用的方法包括生产测试法、经验统计法、含油产状法、泥质含量法、钻井液侵入法、孔隙结构法等<sup>[12-15]</sup>,这些方法在具体应用中都有限制条件,因此在确定储层物性下限时多采用综合分析的方法,由于缺少确切的定量方法,储层物性下限往往具有统计学特征,给气藏评价和有效储量评估带来不确定性,准确界定储层物性下限始终是油气田开发工作者努力的方向。

“最小流动孔喉半径”的提出建立在对生产测试资料和孔隙结构资料统计研究的基础上,由于它能准确表征储集岩的渗流能力,因此被广泛应用于确定储层物性下限<sup>[16]</sup>。

河包场地区须家河组 ( $T_{3x}$ ) 气藏是典型的低渗气藏,具有低孔隙度、低渗透率、束缚水饱和度高的特点,有效储层的分布控制了气藏的富集<sup>[17]</sup>,针对研究区储层的特点,通过压汞实验、含水状态下的水锁实验和核磁共振实验相结合的方法,综合确定了储层最小流动孔喉半径,进而根据压汞资料建立孔喉半径与孔隙度、渗透率的关系,从而确定研究区储层的孔隙度、渗透率下限。

### 1 低渗储层特征

河包场地区须二 ( $T_{3x^2}$ )、须四 ( $T_{3x^4}$ )、须六段 ( $T_{3x^6}$ ) 砂体发育,是主要的储气层段,总的来说是一套成分成熟度和结构成熟度都较高的陆源碎屑岩,岩性主要为长石岩屑砂岩、长石石英砂岩和岩屑石英砂岩 (图 1 (a)), 石英含量为 60%~80%,长石含量为 5%~15%,岩屑含量为 10%~20% (图 1 (b)), 成分成熟度指数高 (石英/长石+岩屑为 2.5~3)。结构成熟度高表现为碎屑颗粒分选、磨圆好,粒度较细 (主要为中-细砂),杂基含量少 (一般 <6%),反映了沉积物经历长距离搬运、缓慢堆积的特点。

研究区须家河组是低孔低渗、特低渗储层,  $T_{3x^2}$  孔隙度明显高于  $T_{3x^4}$ 、 $T_{3x^6}$ ,渗透率三者相仿。  $T_{3x^2}$  平均孔隙度 9.75%,平均渗透率为  $0.214 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,而  $T_{3x^4}$ 、 $T_{3x^6}$  平均孔隙度分别为 5.93% 和 5.83%,平均渗透率分别为  $0.23 \times 10^{-3}$  和  $0.38 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙类型以原生孔隙为主、次生孔隙为辅。

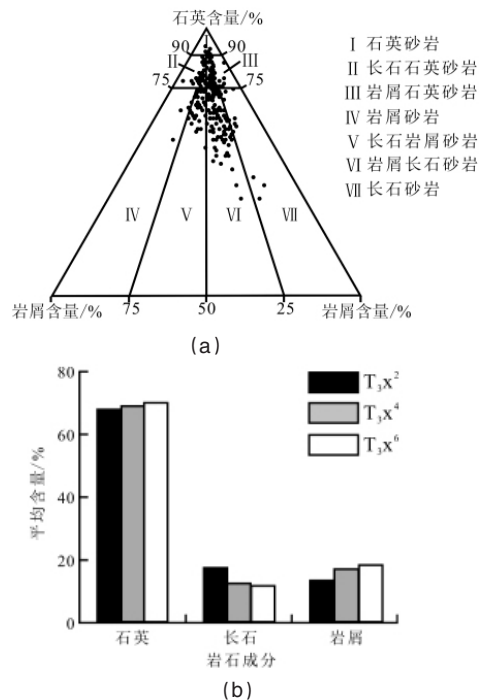


图 1 河包场须家河组砂岩类型和成分  
Fig. 1 Type and composition of sandstone of  $T_{3x}$  in Hebaochang area

由压汞资料分析可知,研究区须家河组储层孔喉有单峰状分布、细歪度、分选差、峰低、似正态分布的特点 (表 1)。当孔隙度小于 6% 时,中值半径介于  $0.015 \sim 0.31 \mu\text{m}$ ;孔隙度为 6%~8% 时,中值半径介于  $0.04 \sim 0.52 \mu\text{m}$ ;孔隙度 8%~10% 且

表 1 不同孔隙度级别砂岩的压汞数据  
Table 1 Mercury data of sandstone of different porosity levels

孔隙范围	孔隙度/%	渗透率 / $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	门槛压力 /MPa	最大孔喉半径 / $\mu\text{m}$	中值压力 /MPa	中值半径 / $\mu\text{m}$
>10%	最大	17.28	45.7	2.92	25.28	22.38
	最小	10.47	0.02	0.03	0.25	0.49
	平均	13.6	3.9	0.53	4.73	3.82
8%~10%	最大	9.84	0.79	1.81	2.62	12.16
	最小	8.16	0.01	0.28	0.41	1.88
	平均	9.16	0.17	1.16	0.87	6.97
6%~8%	最大	7.85	3.42	1.81	6.14	19.61
	最小	6.14	0.01	0.12	0.41	1.43
	平均	6.84	0.48	0.68	1.58	6.03
<6%	最大	5.99	1.18	4.5	2.63	50.24
	最小	2.09	0.002	0.28	0.164	2.39
	平均	4.456	0.23	1.27	0.98	15.86

透率大于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时, 中值半径主要为  $0.06 \sim 0.39 \mu\text{m}$ ; 当孔隙度大于 10% 且渗透率高于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时, 中值半径为  $0.03 \sim 1.48 \mu\text{m}$ 。

## 2 物性下限研究

既能储集又能使烃类流体渗流的最小孔隙通道称为烃类的最小流动孔喉半径, 根据恒速压汞实验、水锁和核磁共振实验可确定岩石的微观孔隙特征, 从而确定气层的最小流动孔喉半径, 再根据孔喉半径与孔隙度、渗透率模型, 可得到气层物性下限。

### 2.1 J 函数法

J 函数法是以压汞实验数据为基础确定岩石孔喉特征的方法<sup>[18]</sup>。通常而言, 实验室测定小尺寸岩样所得毛管压力曲

线仅能表征气层中的一个点, 要得到整个气层的毛管压力, 就须将气层岩心所有毛管压力综合平均。为了准确表征气层的毛管压力特征, Leverett 提出了 J 函数计算式:

$$J = \frac{31.62 p_c}{\sigma \cos \theta} \sqrt{\frac{K}{\Phi}} \quad (1)$$

其中,  $J$  为 J 函数, 无因次;  $p_c$  为毛管压力, MPa;  $K$  为渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $\Phi$  为孔隙度, %;  $\sigma$  为界面张力, mN/m;  $\theta$  为润湿接触角。由于压汞实验为汞-空气系统, 可取  $\sigma = 0.048 \times 10^{-3} \text{mN/m}$ ,  $\theta = 140^\circ$ 。

用 J 函数法对包 36、包 46、包浅 001-1、包浅 001-6、包浅 001-11 和包浅 001-16 井  $T_3x^2$ 、 $T_3x^4$ 、 $T_3x^6$  的含气层压汞资料进行处理, 得到 J 函数曲线 (图 2(a)) 和气层平均毛管压力曲线 (图 2(b)), 再利用 Purcell 法和 Wall 法计算气层的最小流动孔喉半径。

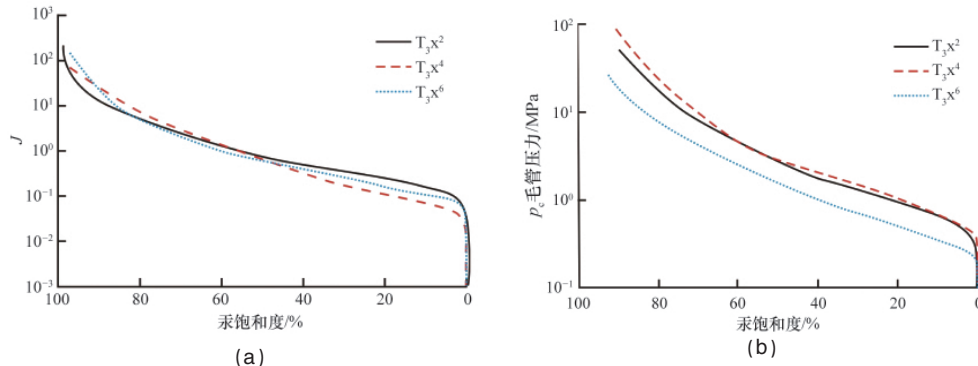


图 2 须家河组含气层段 J 函数曲线(a)和平均毛管压力曲线(b)

Fig. 2 J-function curve and averaging capillary pressure curve of  $T_3x$  gas-bearing section

Purcell 法从压力与进汞量角度反映不同孔喉半径对渗透能力的贡献, 当累计渗透率贡献值达 99.99% 时, 对应的孔喉半径即为此气层的最小流动孔喉半径, 计算公式如下<sup>[19]</sup>:

$$\sum_{i=1}^n \Delta K_i = \Delta K_1 + \Delta K_2 + \dots + \Delta K_n$$

$$\Delta K_i = \frac{\Delta K_{fi}}{\sum_{i=1}^n \Delta K_{fi}} \quad (2)$$

$$\Delta K_{fi} = \frac{\Delta S_{i-i+1}}{2(p_{ci}^2 + p_{ci+1}^2)}$$

其中,  $\sum_{i=1}^n \Delta K_i$  为累积渗透率贡献,  $\Delta K_i$  为区间渗透值,  $\Delta S_{i-i+1}$  为

区间进汞量。据此求取须家河组含气层段的最小流动孔喉半径约为  $0.0386 \mu\text{m}$  (图 3(a))。

Wall 法从孔喉半径和进汞量的关系出发, 反映不同孔喉半径对渗透能力的贡献。当渗透率累计贡献值达 99.99% 时, 对应的孔喉半径可作为气层的最小流动孔喉半径<sup>[19]</sup>。计算公式为

$$\sum_{i=1}^n \Delta K_i = \frac{r_1^2 + 3r_2^2 + \dots + (2n-1)r_n^2}{\sum_{i=1}^n (2i-1)r_i^2} \quad (3)$$

其中,  $r_i$  为  $i$  区间相应的孔喉半径。

应用 Wall 法计算  $T_3x^2$ 、 $T_3x^4$ 、 $T_3x^6$  气层的最小流动孔喉半径分别为  $0.0183$ 、 $0.0196$  和  $0.0177 \mu\text{m}$  (图 3(b))。

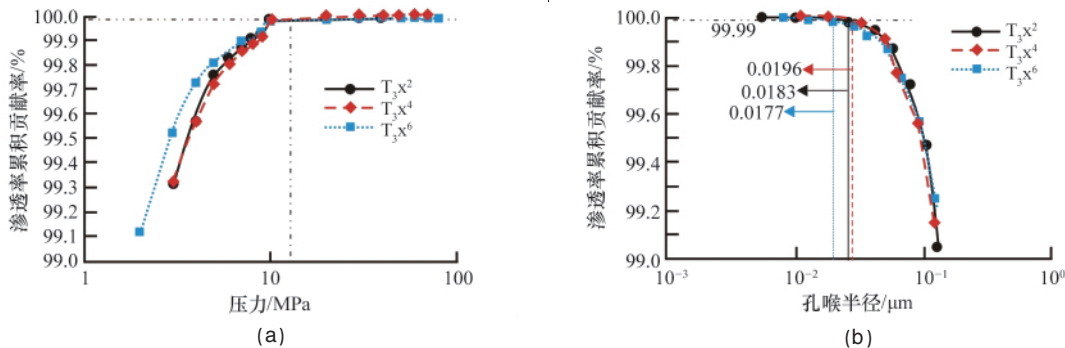


图 3 Purcell 法(a)和 Wal 法(b)计算结果

Fig. 3 Results of Purcell (a) and Wall (b) methods

### 2.2 束缚水膜法

通常而言,束缚水饱和度高是低渗透储层的显著特征之一,只有半径大于束缚水膜厚度的孔隙才是储集油气的有效空间,否则,孔隙将被束缚水充填而失去含油气价值,因此束缚水膜厚度可作为最小流动孔隙半径的下限。针对研究区储层情况,应用恒速压汞实验得到符合包界地区储层岩石的比

表面积,通过气驱、水锁和核磁共振实验可得到岩心在不同含水饱和度下的动态水膜厚度。实验结果表明,水锁实验和核磁共振实验结果相差小, $T_{3x^2}$ 段束缚水饱和度约为34%,束缚水膜厚度为0.0188~0.0571 $\mu\text{m}$ ;  $T_{3x^4}$ 段束缚水饱和度约36%~42%,束缚水膜厚度仅为0.0169~0.0319 $\mu\text{m}$ ;  $T_{3x^6}$ 段饱和度约34%~39%,束缚水膜厚度仅为0.0142~0.0296 $\mu\text{m}$ (表2)。

表2 水锁和核磁共振实验结果

Table 2 Results of water-blocking and NMR experiments

实验方法	井号	束缚水饱和度/%			水膜厚度/ $\mu\text{m}$		
		$T_{3x^6}$	$T_{3x^4}$	$T_{3x^2}$	$T_{3x^6}$	$T_{3x^4}$	$T_{3x^2}$
水锁实验	Bq001-1	39.9	46.4	25.1	0.0241	0.0319	0.0188
	Bq001-6	42.2	38.3	41.3	0.0254	0.0208	0.0254
	Bq001-11	—	38.7	29.3	—	0.0238	0.0193
	Bq001-16	37.2	44.4	41.1	0.0296	0.0215	0.0298
	平均	39.8	42.0	34.2	0.0264	0.0245	0.0233
核磁共振实验	Bq001-1	26.17	36.86	31.63	0.0142	0.0217	0.0328
	Bq001-6	—	37.45	34.63	—	0.0169	0.0273
	Bq001-11	—	25.66	28.92	—	0.0198	0.0362
	Bq001-16	42.03	44.25	46.31	0.0175	0.0305	0.0571
	平均	34.1	36.1	35.4	0.0159	0.0222	0.0384

### 2.3 孔隙度、渗透率与中值半径模型

孔隙度和渗透率是直观表征储层性能的参数,为方便评价有效储层物性下限,利用压汞资料和孔隙度、渗透率分析资料建立孔喉中值半径与孔隙度及渗透率的关系式(图4,表3)。

将Purcell法、Wall法、水锁实验和核磁共振实验得出的

气层最小流动孔喉半径代入表3孔隙度与中值半径的关系式中,计算得到 $T_{3x^2}$ 、 $T_{3x^4}$ 、 $T_{3x^6}$ 有效储层孔隙度和渗透率下限如表4所示。

通过上述分析可知,利用不同方法计算所得各层位有效储层孔隙度、渗透率下限相差不大。

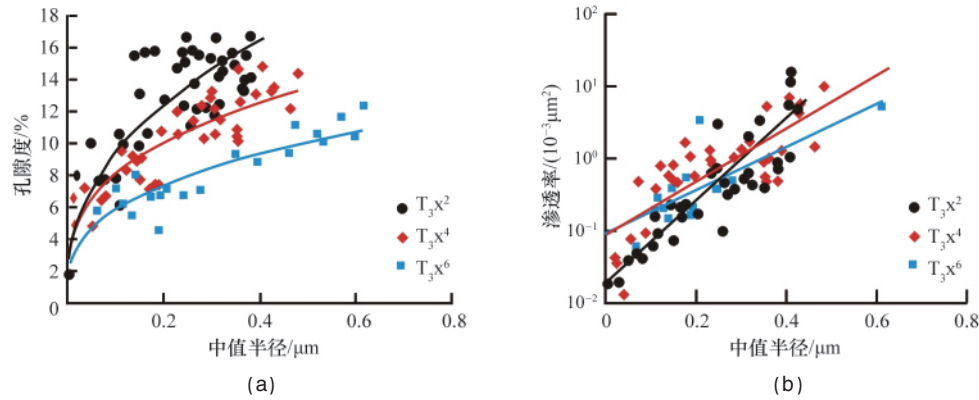


图4 中值半径与孔隙度(a)、渗透率(b)关系图

Fig. 4 Relationships between porosity (a), permeability (b) and median radius

表3 孔隙度、渗透率与中值半径关系式  
Table 3 Porosity–median radius and permeability–median radius relations

层位	孔隙度	渗透率
$T_{3x^2}$	$y=23.835x^{0.4094} (R^2=0.7772)$	$y=0.0183e^{13.086x} (R^2=0.6806)$
$T_{3x^4}$	$y=16.807x^{0.3213} (R^2=0.7759)$	$y=0.0888e^{8.2958x} (R^2=0.6898)$
$T_{3x^6}$	$y=12.644x^{0.3354} (R^2=0.4536)$	$y=0.0944e^{6.8598x} (R^2=0.5913)$

综上所述,确定河包场地区 $T_{3x^2}$ 有效储层孔隙下限为5.5%,渗透率下限为 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $T_{3x^4}$ 孔隙度下限为5%,渗透率下限为 $0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $T_{3x^6}$ 孔隙度下限为3.8%,渗透率下限为 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

### 3 结论

以压汞实验、水锁实验和核磁共振实验为基础,建立了以最小流动孔喉半径确定低渗透储层物性下限的研究方法,即

表 4  $T_3x$  有效储层孔隙度和渗透率下限

 Table 4 Low limits of porosity and permeability of  $T_3x$  effective reservoirs

方法	最小流动孔喉半径/ $\mu\text{m}$			孔隙度/%			渗透率/ $(10^{-3}\mu\text{m}^2)$		
	$T_3x^2$	$T_3x^4$	$T_3x^6$	$T_3x^2$	$T_3x^4$	$T_3x^6$	$T_3x^2$	$T_3x^4$	$T_3x^6$
Purcell 法	—	0.0386	—	6.3	5.9	4.2	0.03	0.12	0.12
Wall 法	0.0183	0.0196	0.0177	4.6	4.8	3.2	0.02	0.10	0.11
水锁实验	0.0264	0.0245	0.0233	5.4	5.1	3.6	0.03	0.11	0.11
核磁共振	0.0159	0.0222	0.0384	4.4	4.9	4.2	0.02	0.11	0.12

首先利用实验方法确定储层的最小流动孔喉半径,进而根据实测数据建立孔隙度、渗透率与中值半径的相关关系,最小流动孔喉半径对应的孔隙度和渗透率值即为该储层的物性下限值。通过该方法对蜀南河包场地区须家河组低渗储层的物性下限进行确定,得到须二段、须四段和须六段储层渗透率下限分别为  $0.03 \times 10^{-3}$ 、 $0.11 \times 10^{-3}$  和  $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度下限分别为 5.5%、5% 和 3.8%。

#### 参考文献 (References)

- [1] 黄延章. 低渗透油层非线性渗流特征[J]. 特种油气藏, 1997, 4(1): 9-14.  
Huang Yanzhang. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 1997, 4(1): 9-14.
- [2] 赵辉. 低渗透油藏非线性渗流理论及其应用[D]. 大庆: 东北石油大学, 2006.  
Zhao Hui. Theory and application on nonlinear porous flow in low permeability reservoir[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2006.
- [3] 蒋凌志, 顾家裕, 郭彬程. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征和形成机理[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 13-18.  
Jiang Lingzhi, Gu Jiayu, Gu Bincheng. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 13-18.
- [4] 李道品. 低渗透油田高效开发决策论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 3-8.  
Li Daopin. Effective development technique of low permeability oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 3-8.
- [5] 胡志明. 低渗透储层的微观孔隙结构特征研究及应用 [D]. 廊坊: 中国科学院渗流流体力学研究所, 2004.  
Hu Zhiming. Study and Application on microscopic pore structures in low permeability reservoir [D]. Langfang: Institute of Fluid Seepage Science, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [6] 向丹. 碎屑岩储层物性下限研究及储量计算[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.  
Xiang Dan. Research on petrophysical property cutoffs of clastic reservoir and reserves calculation[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [7] Rockwood S H, Lari G H, Langford B J, et al. Reservoir volumetric parameters defined by capillary pressure studies [J]. *AIIME*, 1957, 210: 252-259.
- [8] Murray R C. Origin of porosity in carbonate rocks [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1960, 30(1): 59-84.
- [9] Stout J L. Pore geometry as related to carbonate stratigraphic traps[J]. *AAPG Bulletin*, 1964, 48(2): 329-337.
- [10] Arps J J. Engineering concepts useful in oil finding [J]. *AAPG Bulletin*, 1964, 48(2): 157-165.
- [11] Chilingar G V, Mannon R W, Rieckell H H. Oil and gas production from carbonate rocks [M]. New York: American Elsevier Publishing Company, 1972.
- [12] 肖思和, 周文, 王允诚, 等. 天然气有效储层下限确定方法[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2004, 31(6): 672-674.  
Xiao Sihe, Zhou Wen, Wang Yuncheng, et al. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2004, 31(6): 672-674.
- [13] 高阳, 蒋裕强, 缪灏, 等. 河包场地区上三叠统须家河组储层下限研究[J]. 西部探矿工程, 2008, 20(12): 95-97.  
Gao Yang, Jiang Yuqiang, Miao Hao, et al. *West-China Exploration Engineering*, 2008, 20(12): 95-97.
- [14] 段新国, 王洪辉, 胡永章, 等. 储层参数下限确定方法——以河南安棚油田为例 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2003, 30 (2): 169-173.  
Duan Xinguo, Wang Honghui, Hu Yongzhang, et al. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2003, 30(2): 169-173.
- [15] 魏小微, 谢继容, 唐大海, 等. 低孔渗砂岩储层基质物性下限确定方法研究——以川中 LA 构造沙一段油藏为例 [J]. 天然气工业, 2005, 25(S1): 28-31.  
Wei Xiaowei, Xie Jirong, Tang Dahai, et al. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(S1): 28-31.
- [16] 蒋裕强, 高阳, 徐厚伟, 等. 基于启动压力梯度的亲水低渗透储层物性下限确定方法——以蜀南河包场地区须家河组气藏为例[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 57-60.  
Jiang Yuqiang, Gao Yang, Xu Houwei, et al. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(5): 57-60.
- [17] 蒋裕强, 王立恩, 高阳, 等. 荷包场地区须家河组须二段有效储层研究[J]. 天然气技术, 2009, 3(3): 17-20.  
Jiang Yuqiang, Wang Lien, Gao Yang, et al. *Natural Gas Technology*, 2009, 3(3): 17-20.
- [18] 廖敬, 彭彩珍, 吕文均, 等. 毛管压力曲线平均化及 J 函数处理[J]. 特种油气藏, 2008, 15(6): 73-75.  
Liao Jing, Peng Caizhen, Lu Wenjun, et al. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2008, 15(6): 73-75.
- [19] 高阳. 河包场地区须家河组须四段有效储层研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2008.  
Gao Yang. Research on effective reservoir in the 4th member of Xujiahe Formation, upper Triassic system of Hebaochang area [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2008.

(责任编辑 刘志远)