

文章编号: 0253-9985(2005)01-0125-04

动态法划分流动单元 ——以现河庄油田为例

王志高^{1,2}, 靳彦欣³

(1. 石油大学, 山东东营 257061; 2. 中国石化胜利油田有限公司勘探处, 山东东营 257001;

3. 中国石化胜利油田有限公司采油工艺研究院, 山东东营 257000)

摘要: 根据单采层无水采油期每米采油指数、分布特征以及所对应的空气渗透率和相对渗透特征, 将河 43 断块沙河街组二段储层分为 5 类流动单元: iv 类储层渗透性最好, ㊦类储层渗透性较好, ㊧类储层渗透性一般, ㊨类储层渗透性较差, ㊩类储层渗透性差。平面上, 厚度大于 3.5 m 的主力小层主要以 iv, ㊦和 ㊧类流动单元为主, 厚度小于 3.5 m 的非主力小层主要以 ㊨和 ㊩类流动单元为主; 垂向上, 流动单元分布复杂, 甚至同一口井 5 类流动单元都有。这一特征说明河 43 断块沙河街组二段储层具有较强的非均质性。不同的流动单元, 其相相对渗透特征不同, 物性好的流动单元油相相对渗透率下降较缓, 水相相对渗透率上升较快; 反之则油相相对渗透率下降较快, 水相相对渗透率上升较缓。

关键词: 流动单元; 储层表征; 储层评价; 油藏描述; 每米采油指数

中图分类号: TE313.5

文献标识码: A

Dynamic division of flow units: taking Xianhezhuang oilfield as an example

Wang Zhigao^{1,2}, Jin Yanxin³

(1. University of Petroleum, Dongying, Shandong; 2. Shengli Oilfield Ltd. Co., SINOPEC, Dongying, Shandong;

3. Institute of Recovery Technology, Shengli Oilfield Ltd. Co., SINOPEC, Dongying, Shandong)

Abstract: The 2nd member of Shahejie Formation in He 43 block is divided into 5 flow units according to productivity index per meter of single layer production during water-free oil production period, distribution characteristics and the corresponding characteristics of air-permeability and relative permeability. Permeability of type iv flow unit is the best, that of type ㊦ is relatively good, type ㊧ medium, type ㊨ relatively poor, and type ㊩ poor. Laterally, the major subzones with thickness of over 3.5 m are mainly of type iv, ㊦ and ㊧ flow units, while the non-major subzones with thickness of less than 3.5 m are mainly of type ㊨ and ㊩ flow units. Vertically, the distribution of flow units are complex, and even all of the five types of flow units can exist concurrently in a single well. This characteristic shows that the reservoirs in the 2nd member of Shahejie Formation in He 43 block have strong heterogeneity. Different flow units have different relative permeability characteristics. Oil-phase relative permeability in flow units with good poroperm characteristics decline slowly, while water-phase relative permeability goes up quickly. On the contrary, oil-phase relative permeability declines quickly, while water-phase relative permeability goes up slowly.

Key words: flow unit; reservoir parameter; reservoir evaluation; reservoir characterization; productivity index per meter

流体流动单元研究是精细油藏描述研究的有效手段。自从提出流动单元概念以来, 国内外众多的学者提出了多种识别和划分流动单元的方法,

一般分为两类: 一类是定性的研究方法, 如精细沉积学法等^[1]; 另一类是定量的研究方法, 如流动分层指数法^[2]、渗流系数法、存储系数法、净毛

基金项目: 国家 973 基础发展规划项目“大幅度提高石油采收率基础研究”(G1999022508)

第一作者简介: 王志高, 男, 42 岁, 高级工程师(博士), 地质综合研究

收稿日期: 2005-01-13

厚度比三参数法^[3]、进汞饱和度为 35%时的孔喉半径(R_{35})分析法^[4]、井间流动能力指数法及物性特征综合法^[5~7]等。这些方法的共同特点是首先从取心井入手进行流动单元的识别与划分,然后再通过不同的途径推广到非取心井,从而实现全区流动单元的识别与划分。但是,针对现河庄油田河 43 断块沙河街组二段储层没有取心井的情况,用上述这些方法划分流动单元就很困难。因此,本文提出了一种利用生产动态资料和生产压力测试资料定量识别和划分流动单元的新方法。该方法原理明确,划分方法比较简单,划分结果比较实用,量化程度较高。

1 流动单元的划分

1.1 确定参数

由流动单元概念可知,相同流动单元内部不仅具有相同(似)的沉积特征,而且具有相同(似)的渗流特征,这是储层岩石物理特征的综合反映^[8]。储层的渗流特征主要包括储层渗流能力的大小和渗流规律两方面^[9,10]。在生产初期,无水采油期内的每米采油指数为单位生产压差下每米油层的日产油量,它客观上反映了束缚水状态下单位厚度油层渗流能力的大小,可以作为划分流动单元的参数。

1.1.1 关键井

根据每米采油指数和有界地层平面径向拟稳态流的产量公式^[11]可知,每米采油指数主要与储层的油相相对渗透率、油层厚度、原油的粘度、体积系数和井筒半径有关。所以计算每米采油指数的关键井应满足以下条件: ①具有较为准确的生产数据和压力测试资料; ②为了保证垂向流动单元的区分精度,油井在生产过程中需有单层生产的历史; ③油井在单层生产初期为无水生产; ④具备原油分析化验资料。

此次流动单元的划分共收集了河 43 断块沙河街组二段储层符合关键井条件的 8 口井的生产资料和压力测试资料,计算了每口井的无水采油期每米采油指数(表 1)。

1.1.2 生产井

对整个油藏来说,油井单层开采是少数,大多数情况下为多油层大井段合采。因此,多油层合采井每米采油指数的求取主要通过丰富的测井信

表 1 河 43 断块沙河街组二段每米采油指数计算基础数据表

Table 1 List of basic data for calculation of productivity index per meter in the 2nd member of Shahejie Formation in He 43 block

井号	生产层位	有效厚度 /m	油层静压/MPa	井底流压/MPa	日产油量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	每米采油指数/ $[\text{m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{MPa} \cdot \text{m})^{-1}]$
H43-1	S ₂₄ ²	2.0	21.34	19.16	23.1	5.30
H43-2	S ₂₂ ⁴	5.3	20.26	18.63	26.7	3.09
H43-4	S ₂₄ ⁵	5.0	20.72	18.64	152.4	14.65
H43-8	S ₂₃ ⁶	6.8	20.15	17.57	95.7	5.45
H43-X9	S ₂₄ ⁷	4.1	22.64	20.67	103.1	12.76
H43-13	S ₂₄ ³	3.6	18.71	13.22	142.2	7.19
H43-14	S ₂₄ ³	4.3	21.46	10.59	176.9	3.78
H43-X22	S ₂₁ ¹	2.9	20.89	18.58	50.1	7.47

息获得,即首先在关键井建立每米采油指数与某种测井响应的相关关系,然后在合采井段利用此相关关系求每米采油指数。本次研究在关键井建立了每米采油指数与校正的自然电位曲线幅度差与声波时差的统计相关关系及交会图(图 1, 2),实现了合采层段内每米采油指数的求取。

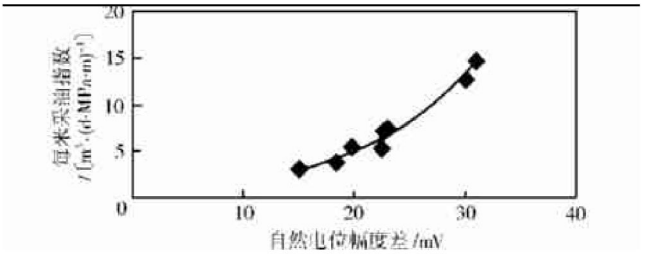


图 1 每米采油指数与校正的自然电位曲线幅度差的关系交会图
Fig.1 Crossplot of productivity index per meter vs. corrected amplitude difference of SP curve

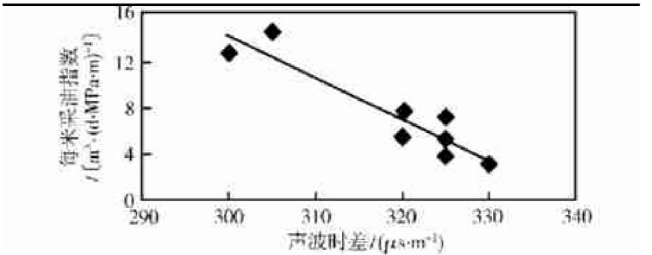


图 2 每米采油指数与声波时差交会图
Fig.2 Crossplot of productivity index per meter vs. interval transit time

每米采油指数与校正的自然电位曲线幅度差的关系,当相关系数为 0.958 3 时

$$J_{oi} = 0.6989e^{0.0981\Delta U_{sp}} \quad (1)$$

式中 J_{oi} 为每米采油指数, $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa}\cdot\text{m})$; ΔU_{sp} 为自然电位幅度差, mV 。

每米采油指数与声波时差的关系, 当相关系数为 0.8703 时

$$J_{oi} = -0.368\Delta t + 124.76 \quad (2)$$

式中 Δt 为声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

1.1.3 结果验证

采用 3 口井 8 个小层共 16 个单砂体生产资料和测井资料对每米采油指数的实际值和理论计算值进行了对比验证。其中, 合采层段的实际值由生产动态资料直接算出, 理论计算值由各单砂体的测井计算值通过厚度加权平均得出(表 2)。可以看出, 每米采油指数的实际值和计算值的相对误差一般不超过 10%, 说明每米采油指数的计算结果和储层流动单元的划分结果是可靠的。

表 2 河 43 断块沙河街组二段储层每米采油指数求取结果验证统计表

Table 2 Verification statistics of the calculation results of productivity index per meter in the 2nd member of Shahejie Formation in He 43 block

井号	砂体数	计算值 / [$\text{m}^3\cdot(\text{d}\cdot\text{MPa}\cdot\text{m})^{-1}$]	实际值 / [$\text{m}^3\cdot(\text{d}\cdot\text{MPa}\cdot\text{m})^{-1}$]	相对误差 / %
H43-4	9	3.76	3.92	4.08
H43-8	2	5.27	5.67	7.05
H43-13	5	4.21	4.03	-4.47

1.2 划分标准

建立流动单元划分标准即要考虑每米采油指数的大小, 又要考虑不同流动单元的渗流规律。流动单元的渗流规律主要由岩石的相对渗透率曲线决定, 对于河流和三角洲相储层, 岩石相对渗透率曲线的特征参数与空气渗透率的对数呈线性关系^[12]。因此, 要使同一流动单元内具有相似的渗流规律, 需要在 J_{oi} 的低值区划分较密的流动单元, 在 J_{oi} 的高值区划分较疏的流动单元。利用河 43 断块沙河街组二段储层 14 口井的测井资料, 计算了 276 个层点 J_{oi} 值。在此基础上先对其进行 Q 型聚类分析^[13], 然后综合考虑物性及相对渗透率特征, 对各类流动单元的划分界线进行了适当的调整, 从而可确定流动单元的 J_{oi} 分类标准。第 iv

类流动单元的 $J_{oi} \geq 9.4$; 第 ㉔类流动单元的 J_{oi} 为 $4.7 \leq J_{oi} < 9.4$; 第 ㉕类流动单元的 J_{oi} 为 $2.3 \leq J_{oi} < 4.7$; 第 ㉖类流动单元的 J_{oi} 为 $1.3 \leq J_{oi} < 2.3$; 第 ㉗类流动单元 $J_{oi} < 1.3$ 。

2 流动单元分布

按照划分标准, 对河 43 断块沙河街组二段储层 276 个层点进行了流动单元划分, 绘制了流动单元平面和剖面分布图。

在平面上, 储层厚度大于 3.5 m 的主力小层主要以 iv, ㉔, ㉕类流动单元为主, 储层物性好, 渗流能力高, 属于好储层; 储层厚度小于 3.5 m 的非主力小层主要以 ㉖和 ㉗类流动单元为主, 储层物性较差, 渗流能力比较低, 属于比较差的储层。对于某一层来说, 往往有多种流动单元, 而且好储层中常夹有差的流动单元, 差储层中亦可出现好的流动单元, 说明河 43 断块沙河街组二段储层具有较强的非均质性(图 3)。

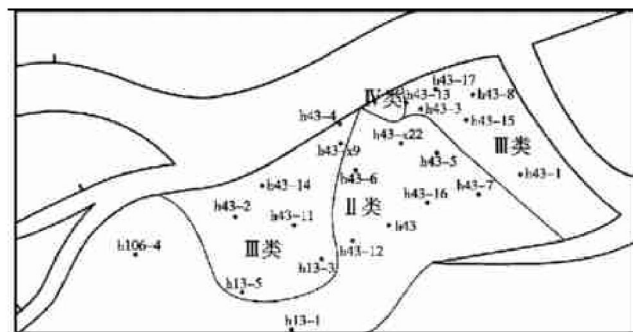


图 3 河 43 断块 $S_2^{75^2}$ 小层流动单元平面分布

Fig. 3 Plane distribution of flow units in $S_2^{75^2}$ subzone in He 43 fault block

在垂向上, 河 43 断块沙河街组二段储层流动单元分布更为复杂, 对于同一口井, 往往有各类流动单元, 如 H43-12 井从 $S_2^{63^1}$ 小层至 S_2^8 小层就同时有 5 类流动单元。此外, 即使在同一砂组内也往往存在多类流动单元, 如 H43-12 井在 S_2^8 砂组就存在 iv, ㉔, ㉕三类流动单元(图 4), 说明河 43 断块沙河街组二段储层在垂向上也存在强烈的非均质性。

3 相渗特征

不同流动单元之间储层的渗流能力有明显的

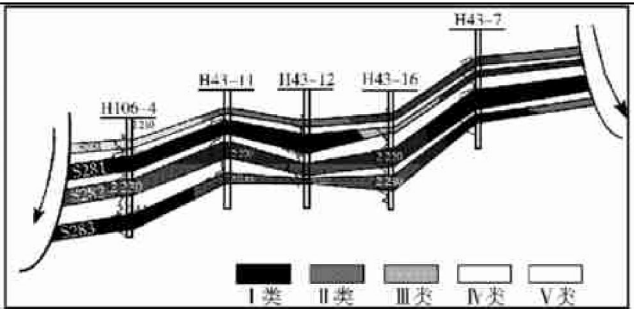


图 4 河 43 断块 S₂⁸ 砂组流动单元剖面分布

Fig. 4 Cross section of flow units in S₂⁸ layer in He 43 fault block

差异, 渗流规律也不相同。油水两相的相对渗透率的大小是储层渗流规律的主要决定因素, 所以对不同的流动单元存在不同的相对渗透率曲线。确定相对渗透率曲线的方法主要有实验室方法、经验公式计算法和矿场资料计算法等。采用矿场资料算法中的甲型水驱曲线法^[14], 并结合我国三角洲相储层相对渗透率曲线的特点^[12], 计算了河 43 断块沙河街组二段储层不同流动单元所对应的相对渗透率曲线。

相对渗透率曲线形式采用最常用的指数形式^[15], 即

$$K_{ro} = K_{ro}(S_{wi}) \left| \frac{1 - S_{or} - S_w}{1 - S_{or} - S_{wi}} \right|^n \quad (3)$$

$$K_{rw} = K_{rw}(S_{or}) \left| \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \right|^n \quad (4)$$

式中 K_{ro} 为油相相对渗透率, 无因次; K_{rw} 为水相相对渗透率, 无因次; S_w 为水相饱和度, 无因次; S_{wi} 为束缚水饱和度, 无因次; S_{or} 为残余油饱和度, 无因次; $K_{ro}(S_{wi})$ 为束缚水饱和度下油相相对渗透率, 无因次; $K_{rw}(S_{or})$ 为残余油饱和度下水相相对渗透率, 无因次; m, n 为指数项, 无因次。

若采用归一化形式, 则 $K_{ro}(S_{wi}) = 1$, 可计算各参数(表 3)。

由表 3 可知, 河 43 断块沙河街组二段储层从Ⅸ类流动单元到Ⅳ类流动单元, 束缚水饱和度逐渐降低, 残余油饱和度逐渐增高, 残余油饱和度下的水相相对渗透率逐渐增大。对于指数项 m 和 n 来说, 随流动单元类型的变好, m 逐渐变小, 说明随着含油饱和度的降低油相相对渗透率下降变缓, n 逐渐变大, 说明随着含水饱和度的增大水相相对渗透率上升加快, 并且相对油相渗透率的变

表 3 河 43 断块沙河街组二段储层相对渗透率求取数据表

Table 3 Calculation results of relative permeability of reservoirs in the 2nd member of Shahejie Formation in He 43 block

流动单元类型	S_{wi}	S_{or}	$K_{rw}(S_{or})$	m	n
iv	0.319 2	0.209 5	0.233 5	1.190 6	2.107 9
⑨	0.333 9	0.211 8	0.223 3	1.389 7	1.971 3
⑧	0.355 7	0.215 2	0.208 2	1.683 3	1.769 8
⑦	0.375 4	0.218 2	0.194 6	1.949 6	1.587 0
⑥	0.397 1	0.221 6	0.179 6	2.243 2	1.385 5

化程度要大于水相相对渗透率的变化程度。

参 考 文 献

- 1 Scott Hamlin H, Shirley P D, Robert J S, et al. Depositional controls on reservoir properties in a braid delta sandstone, tirrawarra oilfield, South Australia[J]. AAPG Bull, 1996, 80(2): 139~ 156
- 2 Jude O A, Mehmet A, Djebbar T, et al. Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells [J]. SPE 26436, 1993. 205~ 220
- 3 Guangning T, Ogbe D O, Hatzignation D G. Use of flow units as a tool for reservoir description: a case study[J]. SPE 26919, 1995. 122~ 128
- 4 Alden J M, Stephen T S, Dan J H. Characterization of petrophysical flow units in carbonate reservoir[J]. AAPG Bull, 1997, 81(5): 734~ 756
- 5 张兴. 储层数据谱分析在段六拔油田的应用[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 155~ 163
Zhang Xing. Application of reservoir data spectrum analysis in Duanliubo oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 1995, 16(2): 155~ 163
- 6 尹太举, 张昌民. 建立储层流动单元模型的新方法[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 170~ 175
Yin Taiju, Zhang Changmin. A new method for founding the model of flow unit reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(2): 170~ 175
- 7 窦松江, 于兴河, 李才雄. 流动单元研究在北大港油田中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 26~ 30
Dou Songjiang, Yu Xinghe, Li Caixiong. Flow unit study at middle and late development stages in northern Dagang oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 26~ 30
- 8 Ebanks W J J. Flow unit concept-integrated approach to reservoir description for engineering projects[J]. AAPG Bull(Ann Mtg, Los Angeles), 1987, 71(5): 551~ 552
- 9 俞启泰. 一种处理油水相对渗透率曲线的新方法[J]. 新疆石油地质, 1994, 15(4): 361~ 365
Yu Qitai. A method for treating oil-water relative permeability curves [J]. Xijiang Petroleum Geology, 1994, 15(4): 361~ 365
- 10 Schneider F N. Three procedures enhance relative permeability data [J]. Oil & Gas, 1987, 4: 45~ 51

- 11 葛家理. 现代油藏渗流力学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 65~ 71
- 12 俞启泰, 罗洪, 冯明生. 我国油田河流相与三角洲相储层参数统计研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(1): 29~ 31
Yu Qitai, Luo Hong, Feng Mingsheng. Statistical study on reservoir parameter of fluvial and delta facies of oilfield in china[J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 1999, 18(1): 29~ 31
- 13 李汉林, 赵永军. 石油数学地质[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998. 55~ 70
- 14 张晓丽, 闫静华, 杜永波. 用甲型水驱特征曲线计算油水相对渗透率曲线[J]. 江汉石油学院学报, 2001, 23(增刊): 100~ 102
Zhang Xiaoli, Yan Jinghua, Du Yongbo. Calculation of relative permeability plot with first water drive characteristic curve[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute. 2001, 23(sup): 100~ 102
- 15 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001. 123~ 144

(上接第 119 页)

- 11 林青, 林壬子, 王培荣, 等. 塔中北斜坡西部原油类型及主力油源层[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 150~ 153
Lin Qing, Lin Renzi, Wang Peirong, et al. Crude types and main source rocks in west part of north slope, central Tarim[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(2): 150~ 153
- 12 赵靖舟. 塔里木盆地北部寒武系~ 奥陶系烃源岩重新认识[J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 117~ 124
Zhao Jingzhou. Evaluation on the Cambrian-Ordovician marine source rocks from the north Tarim basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(1): 117~ 124
- 13 马安来, 张永昌, 张大江, 等. 轮南、塔河油田稠油油源对比[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 31~ 38
Ma Anlai, Zhang Shuichang, Zhang Dajiang, et al. Oil and source correlation in Lunan and Tahe heavy oil fields[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 31~ 38
- 14 James N P, Choquette P W. Paleokarst[M]. New York: Springer, 1988
- 15 代宗仰, 周翼, 陈景山, 等. 塔中中上奥陶统礁、滩相储层的特征及评价[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(4): 1~ 4
Dai Zongyang, Zhou Yi, Chen Jingshan, et al. The characteristics and evolution of Middle-Upper Ordovician reef and shoal related carbonate reservoir in Tazhong northern slope, Tarim Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2001, 23(4): 1~ 4
- 16 王兴志, 王振宇, 马青, 等. 塔里木盆地中部生物屑灰岩段滩体特征及储集性[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 58~ 62
Wang Xinzh, Wang Zhenyu, Ma Qing, et al. Characteristics and reservoir property of bioclastic limestone banks in central Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(1): 58~ 62
- 17 徐杰, 李涛, 陈国光, 等. 塔里木盆地轮南潜山构造特征[J]. 石油学报, 2002, 23(5): 14~ 18
Xu Jie, Li Tao, Cheng Guoguang, et al. Structural features of the buried hill in Lunan area of Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(5): 14~ 18
- 18 顾家裕, 周兴熙, 刘雯林, 等. 塔里木盆地轮南潜山古岩溶作用及油气分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 67~ 187
- 19 叶德胜, 林忠明. 塔里木盆地北部寒武系-奥陶系碳酸盐岩储层特征及油气远景[M]. 成都: 四川大学出版社, 2000
- 20 林忠民. 塔里木盆地塔河油田奥陶系大型油气藏形成条件[J]. 地质论评, 2002, 48(4): 371~ 376
Lin Zhongmin. Formation condition of large-scale oil-gas pool in Ordovician carbonate rock in the Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Geological Review, 2002, 48(4): 371~ 376
- 21 牟泽辉, 熊海河, 朱宏权, 等. 塔里木盆地阿克库勒凸起的油气成藏演化[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(3): 228~ 242
Mu Zehui, Xiong Haihe, Zhu Hongquan, et al. Evolution of oil reservoiring in Akekule uplift, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(3): 228~ 24
- 22 王建宝, 郭汝泰, 肖贤明, 等. 塔里木盆地轮南低隆起早古生代油气藏的形成期次与时间研究[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 320~ 332
Wang Jianbao, Guo Rutai, Xiao Xianming, et al. Timing and phases of hydrocarbon migration and accumulation of the formation of oil and gas pools in Lunan low uplift of Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 320~ 332
- 23 吕修祥. 塔里木盆地塔中低凸起志留系油气成藏机理初探[J]. 石油实验地质, 1997, 19(4): 328~ 331
Lu Xiuxiang. Preliminary investigation on the formation mechanism of Silurian reservoir in Tazhong low-uplift of Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1997, 19(4): 328~ 331
- 24 刘洛夫, 赵建章, 张永昌, 等. 塔里木盆地志留系沉积构造及沥青砂岩的特征[J]. 石油学报, 2001, 22(6): 11~ 17
Liu Luofu, Zhao Jianzhang, Zhang Yongchang, et al. The depositional and structural settings and the bituminous sandstone distribution characters of the Silurian in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(6): 11~ 17