

川东北地区须家河组致密砂岩储层 流体识别方法研究

凡睿¹,周林^{2*},吴俊³,曾韬¹,周晓峰²

(1.中国石化勘探南方分公司,四川成都610041;2.长江大学非常规油气湖北省协同创新中心,
湖北武汉430100;3.中国石油新疆油田分公司,新疆克拉玛依834000)

摘要:川东北地区须家河组储层孔隙度、渗透率较低,为典型的致密砂岩储层,其主要储层流体类型有气层(低阻气层)、气水同层、干层和水层。而在开发生产中如何准确识别致密砂岩储层流体类型却存在一定难度,制约着研究区须家河组的勘探开发。为此,分析了难以准确识别须家河组致密砂岩储层流体类型的原因,并在此基础上应用2种常规流体识别方法对川东北地区须家河组致密砂岩储层的流体进行了识别,分析了其优缺点;同时尝试应用Fisher判别分析法识别储层流体,结果发现:根据Fisher判别分析法建立的判别函数能很好地区分研究区储层流体类型,其判别结果与实际生产情况符合率达到了92.3%,表明Fisher判别分析法在致密砂岩储层流体识别中能取得较好的应用效果。

关键词:致密砂岩 流体识别 Fisher判别分析法 须家河组 川东北地区

中图分类号:TE112.221

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)03-0067-05

Research on tight sandstone reservoir fluids identification in Xujiache Formation, northeastern Sichuan basin

Fan Rui¹, Zhou Lin², Wu Jun³, Zeng Tao¹, Zhou Xiaofeng²

(1.Southern Exploration Company, SINOPEC, Chengdu City, Sichuan Province, 610041, China;

2.Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China; 3.Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang, 834000, China)

Abstract: The reservoirs of Xujiache Formation in northeastern Sichuan basin, with low porosity and permeability, are typical tight sandstone reservoirs. The exploration results show that the main types of reservoir fluid are gas (gas with low resistivity), gas-bearing water, dry layer and water. But there are difficulties in accurately identifying the types of fluid in tight sandstone reservoirs, which has become a restriction during the exploration and development of Xujiache Formation. Based on the above problems, after analyzing the reasons of the difficulties in accurately identifying reservoir fluids, two types of regular methods were proposed to identify Xujiache tight sandstone reservoir fluids in northeastern Sichuan basin and the advantages and disadvantages of each method were analyzed. At the same time, the paper attempted to use Fisher discriminatory analysis to identify reservoir fluid. The canonical functions derived from Fisher discriminatory analysis could be used to easily distinguish reservoir fluid. The coincidence of the obtained results were 92.3% with the actual production situation, which showed that better effects could be obtained by this method in identifying types of fluid in tight sandstone reservoirs in the work area.

Key words: tight sandstone; fluid identification; Fisher discriminatory analysis method; Xujiache Formation; northeastern Sichuan basin

川东北地区须家河组埋藏深,储层成岩作用 强;岩性的横向变化快,孔隙结构复杂;受长期挤压

收稿日期:2015-03-06。

作者简介:凡睿(1966—),男,湖北潜江人,高级工程师,从事油气地质综合研究与勘探管理工作。联系电话:(028)85164622, E-mail: zgcdfr@163.com。

*通讯作者:周林(1985—),男,湖北黄冈人,在读博士研究生。联系电话:(027)69111832, E-mail: 380026198@qq.com。

作用影响,研究区构造变形强烈,储层非均质性强、物性较差,为典型的低孔低渗透致密砂岩储层^[1-4]。众多学者对四川盆地须家河组致密砂岩储层类型和孔喉特征、储层成岩作用类型及特征、储层发育主控因素、储层致密化的原因和时间、致密砂岩储层评价等进行了较为系统、详细的研究^[5-10],但当前对于川东北地区须家河组致密砂岩储层流体识别方面的研究还有所欠缺。储层流体识别的方法^[11-14]有很多。但在川东北地区须家河组储层流体识别过程中却发现常规流体识别方法对低产气层、干层与水层进行识别时容易出现误判,难以取得较为理想的效果,笔者分析其主要原因有以下几点:①研究区须家河组发育低阻气层,而低阻气层的形成机理复杂且与气水同层电性界限模糊;②须家河组储层非均质性强,有效储层控制因素复杂,孔隙结构与测井响应关系不明确;③致密砂岩储层与非储层间电性特征差异较小,特征不明显。因此,需要探索新的适用于致密砂岩储层流体识别的方法。

1 区域地质概况

中三叠世以前四川盆地尚未形成,其地理位置相当于华南板块中部,为碳酸盐台地发展时期的海相沉积。中三叠世末期受印支运动影响古特提斯洋海水自“四川盆地”西部逐渐退出,古龙门山由岛链隆升为陆进而为山,川东北地区由之前的海相沉积过渡为海陆交互相,之后过渡为陆相沉积^[15-18]。川东北地区须家河组须一段以灰黑色泥岩、泥质粉砂岩,夹黑色炭质页岩为主,为河口湾—潮坪相沉积(小塘子组);须二段至须三段为一套以砂、泥岩为主的辫状河三角洲沉积,须四段至须六段主要为冲积扇—辫状河三角洲沉积,龙门山发育以碳酸盐为主要成分的砾岩、砂岩,米仓山—大巴山发育以硅质为主要成分的砾岩、砂岩。其中,研究区须六段因后期抬升遭受剥蚀而缺失。

2 常规流体识别方法识别致密砂岩储层流体

2.1 直观识别法

直观识别法是指常用的、传统的定性识别气层的方法,由于该方法快速、直观、简单易行而得到广泛应用^[19-22]。在直观识别方法中又以补偿中子—声波时差曲线重叠法最为常用。其原理是:天然气的

存在会使声波时差增大从而导致声波孔隙度增大,而补偿中子由于气体的挖掘效应导致中子孔隙度减小,因此在非气层段两者差距很小,而在气层段会存在很大的差异,据此可以根据声波时差和补偿中子曲线的重叠来识别气层。图1为川东北地区X1井气层识别结果,埋深为4 325~4 328和4 329~4 331 m井段的声波时差值明显增大,补偿中子值减小,同时地层电阻率表现为正差异,气测也有显示,从而定性识别为气层;而在埋深为4 448~4 461 m井段的补偿中子值较高,且补偿中子曲线位于声波时差曲线左侧,深浅电阻率为低值无差异,气测也无含气显示,定性识别为水层。虽然直观识别方法优点突出,但其漏判率较高,特别是当地层中有裂缝存在、天然气分布不均匀、岩石泥质含量较高时,对气层的识别尤为不明显。

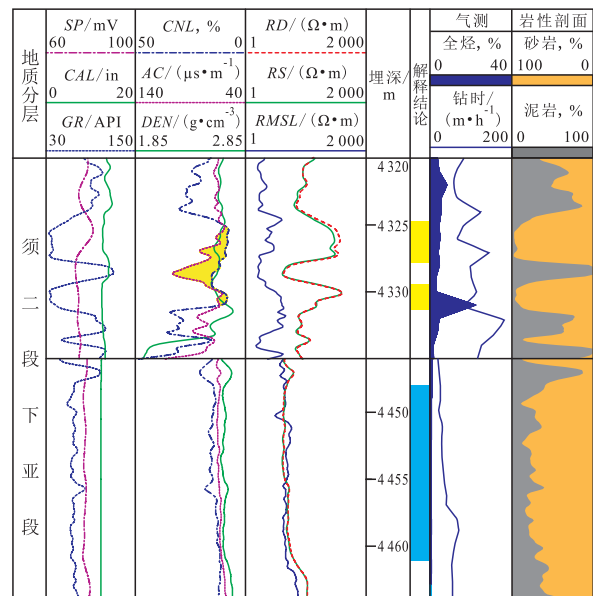


图1 川东北地区X1井须二段下亚段测井解释结果

Fig.1 Log interpretation results of the lower second sub-member of Xujiahe Formation drilled by Well X1

2.2 交会图法

交会图法实际上是半定量的直观识别方法,主要利用气层与水层的测井曲线数值进行交会,找出气层的测井响应范围,进而识别气层^[19-22]。川东北地区须家河组气层、水层的测井响应特征主要体现在深浅电阻率的差异和声波时差与补偿中子的差异上,因此利用测井解释结果和试气资料建立了研究区深浅电阻率比值与声波时差的交会图(图2)、声波时差—补偿中子孔隙差值与深浅电阻率比值的交会图(图3)。从图2和图3可见,交会图能较好地地区分出特征明显的气层、水层和干层,但其中低阻气层、气水同层和水层重叠较多,说明该方法也

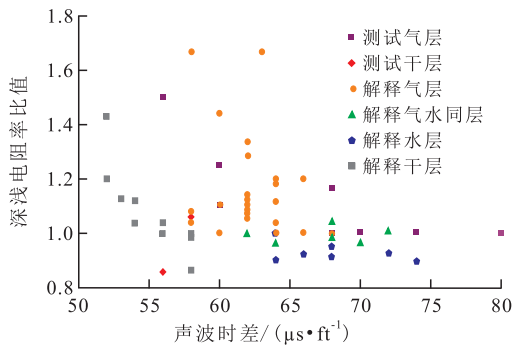


图2 声波时差与深浅电阻率比值交会

Fig.2 Crossplot of acoustic and the ratio between deep and shallow resistivity

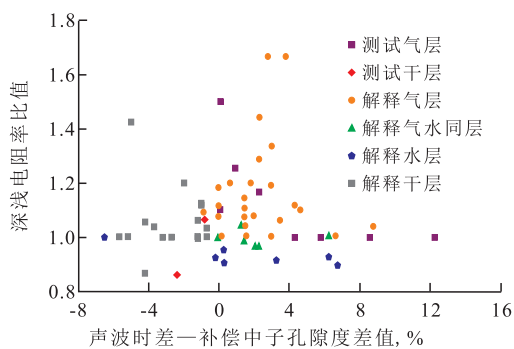


图3 声波时差-补偿中子孔隙度差值与深浅电阻率比值交会

Fig.3 Crossplot of the porosity difference of acoustic-neutron and the ratio between deep and shallow resistivity

难以完全准确识别研究区致密砂岩储层流体类型。

3 Fisher 判别分析法识别致密砂岩储层流体

3.1 Fisher 判别分析法的原理

Fisher 判别分析法的基本思路是投影,针对 N 维空间中的某点 $x=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_j)$ 寻找一个能使它降为一维数值的线性函数 $y(x)=\sum C_j x_j$ (C_j 为常数),然后应用这个线性函数把 P 维空间中的已知类别总体以及求知类别归属的样本都变换为一维数据,再根据其间的亲疏程度把未知归属的样本点判定其归属。这个线性函数应该能够在把 N 维空间中的所有点转化为一维数值之后,既最大限度地缩小同类中各个样本点之间的差异,又最大限度地扩大不同类别中各个样本点之间的差异,最终获得较高的判别效率^[23-25]。

3.2 Fisher 判别分析法识别应用

根据测试资料,川东北地区储层流体类型主要有气层、气水同层、水层和干层 4 种。Fisher 判别分

析法是根据已有观测样本的若干数量特征(判别因子)对新获得的样本进行识别,判断其属性的预测分析方法。其能最大限度地缩小同类中各个样本点之间的差异,又能最大限度地扩大不同类别中各个样本点之间的差异。鉴于此,笔者尝试从统计学的角度出发,以 Fisher 判别分析法来寻找气层、水层和干层在测井响应上的内在差异,进而识别致密砂岩储层流体类型。

3.2.1 测井系列的选择

根据对川东北地区须家河组储层的岩性及气水特征的分析可知:自然伽马(GR)能很好地反映储层的岩性,自然电位幅度差(ΔSP)反映储层的渗透性,声波时差(AC)、补偿中子(CNL)和深电阻率(RD)能较好地反映储层的气水特征,因此选择这 5 条曲线作为致密砂岩储层流体识别的基础曲线(其中因电阻率值变化很大,对其进行取对数处理)。选取 8 口井 13 个测试层段 235 个采样点作为样本,利用 Fisher 判别分析法建立川东北地区须家河组致密砂岩储层流体识别模型。

3.2.2 判别特征的确定

根据 Fisher 判别分析法求解原理对研究区所选取样本的测井数据进行分析,得到 Fisher 典则判别函数特征值和方差贡献率(表 1)。

表1 样本典则判别函数特征值与方差贡献率
Table1 Eigenvalue of canonical function and the distribution of variance contribution

典则判别函数	特征值	方差贡献率, %	累积方差贡献率, %
1	9.233	86.4	86.4
2	1.328	12.5	98.9
3	0.120	1.1	100.0

由表 1 可见,第 1、第 2 典则判别函数特征值累积方差贡献率达 98.9%,包含了绝大部分变量信息,第 3 典则判别函数特征值方差贡献率较低,对综合判断结果影响不大,同时考虑到简化判别过程,因此选择第 1 和第 2 典则判别函数作为储层流体识别的特征变量。第 1 和第 2 典则判别函数分别为

$$F1 = -0.531GR + 1.454\Delta SP + 0.708AC + 0.195CNL - 0.423 \lg RD \quad (1)$$

$$F2 = 0.421GR - 0.5\Delta SP + 0.467AC + 0.688CNL + 0.565 \lg RD \quad (2)$$

式中: $F1$ 和 $F2$ 分别为第 1 和第 2 典则判别函数; GR 为自然伽马, API; ΔSP 为自然电位幅度差, mV; AC 为声波时差, $\mu s/ft$; CNL 为补偿中子, v/v ; RD 为深电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

经过 Fisher 判别分析法处理后,各样品的第 1

与第2典则判别函数交会结果如图4所示,从中可以看出,气、水层以及干层之间界限明显,相对于常规交会图,其区分度大幅提高。

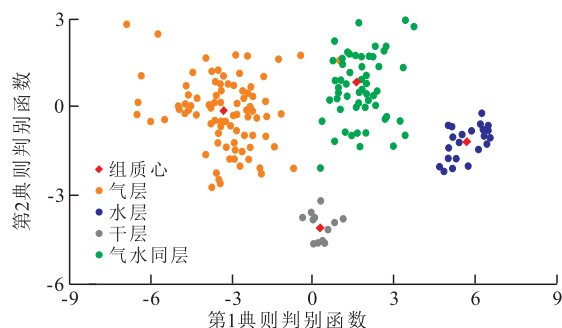


图4 样本第1与第2典则判别函数交会

Fig.4 Crossplot of the first and the second canonical functions in the test zone

3.2.3 判别模型的建立

储层流体的识别是根据试气数据的不同类别及对应的测井值求出判别函数,利用判别函数对储层未知的流体类别进行识别的过程。根据Fisher判别分析理论,运用Forward测井解释软件进行分析,得出4类储层流体的判别函数分别为

$$P1 = 1.055GR + 1.605\Delta SP + 6.847AC - 2.652CNL + 0.274 \lg RD - 256.839 \quad (3)$$

$$P2 = 0.822GR + 2.243\Delta SP + 7.660AC - 1.821CNL + 0.156 \lg RD - 326.505 \quad (4)$$

$$P3 = 0.649GR + 2.924\Delta SP + 8.153AC - 2.278CNL - 0.056 \lg RD - 383.765 \quad (5)$$

$$P4 = 0.642GR + 2.280\Delta SP + 6.912AC - 3.379CNL - 0.013 \lg RD - 225.354 \quad (6)$$

式中: $P1, P2, P3$ 和 $P4$ 分别为气层、气水同层、水层和干层的判别函数。

对于未知流体类型的储层,将其测井值代入式(3)一式(6)分别计算其判别函数值,然后进行比较,判别函数值最大的流体类型就是其所属类别,利用所建立的判别模型对研究区进行储层流体识别。

3.3 应用效果

利用建立的储层流体类型判别模型对川东北地区须家河组储层流体类型进行判别,并与8口井13个测试层段的试气结果进行对比(表2)。从表2可以看出:气层的符合率为80%,气水同层为100%,水层为100%,干层为100%,其整体符合率达到了92.3%,误判率为7.7%。表明利用Fisher判别分析法识别川东北地区须家河组致密砂岩储层的流体类型是适用的,建立的判别模型有效。

表2 川东北地区须家河组致密砂岩储层流体判别结果与测试结果对比

Table2 Comparison between identification results and test results of fluid in tight sandstone reservoirs of Xujiache Formation in northeastern Sichuan basin

井号	P1	P2	P3	P4	判别结果	试气结果
X1	243.08	242.80	231.68	250.83	干层	气层
X1	261.80	251.27	225.58	248.67	气层	气层
X1	243.18	232.71	208.81	233.57	气层	气层
X2	231.64	214.87	183.66	215.69	气层	气层
X3	245.67	247.20	240.08	257.86	干层	干层
X4	315.99	329.22	319.59	316.43	气水同层	气水同层
X4	317.06	330.40	320.77	317.40	气水同层	气水同层
X4	293.88	307.63	299.31	297.38	气水同层	气水同层
X5	248.97	231.45	196.13	231.89	气层	气层
X6	298.39	314.49	308.15	304.75	气水同层	气水同层
X7	339.74	373.81	385.86	362.88	水层	水层
X7	337.64	365.22	374.62	356.86	水层	水层
X8	230.29	232.20	225.51	247.87	干层	干层

4 结束语

针对致密砂岩储层流体识别难点,讨论了常规流体识别方法(直观法、交会图法)识别致密砂岩储层流体的优缺点,发现其往往难以较好地区分川东北地区致密砂岩储层流体类型。因此从统计学的角度出发,以Fisher判别分析法来寻找气层、水层和干层在测井响应上的内在差异,以期找到较为有效的识别致密砂岩储层流体的方法。结果表明:经过Fisher判别分析法处理后,气层、水层、干层、气水同层各样本的第1、第2典则判别函数值之间的界限明显,易于区分,且相对于交会图法,其区分度大幅提高;通过对判别结果进行回判检验,其符合率为92.3%,表明Fisher判别分析法能够较为准确地识别出研究区的流体类型,其结果对于致密砂岩储层流体的识别有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 贾跃玮.川东北地区陆相地层致密砂岩储层预测[D].北京:中国地质大学(北京),2010.
Jia Yuewei.Tight sand reservoir prediction of terrestrial formation in the northeast Sichuan[D].Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2010.
- [2] 范存辉,郭彤楼,王本强,等.四川盆地元坝中部地区须家河组储层裂缝发育特征及控制因素[J].油气地质与采收率,2013,20(5):52-54.
Fan Cunhui, Guo Tonglou, Wang Benqiang, et al.Characteristics

- and controlling factors of reservoir fractures in Xujiahe formation, central Yuanba of Sichuan basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(5): 52-54.
- [3] 李士祥, 胡明毅, 李浮萍. 川西前陆盆地上三叠统须家河组砂岩成岩作用及孔隙演化[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(4): 535-539.
- Li Shixiang, Hu Mingyi, Li Fuping. Diagenesis and porosity evolution of upper Triassic Xujiahe Formation sandstone in western Sichuan foreland basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(4): 535-539.
- [4] 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. New method for determining cut-off parameter in hydrophilic and low permeable sandstone reservoir—case of gas reservoir, Hebaochang area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(5): 57-60.
- [5] 唐立章, 张贵生, 张晓鹏, 等. 川西须家河组致密砂岩成藏主控因素[J]. *天然气工业*, 2004, 24(9): 5-7.
- Tang Lizhang, Zhang Guisheng, Zhang Xiaopeng, et al. Main control factors of forming the tight sandstone gas reservoirs in Xujiahe Formation in West Sichuan Depression [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(9): 5-7.
- [6] 何琰. 基于模糊综合评判与层次分析的储层定量评价——以包界地区须家河组为例[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18(1): 23-25, 29.
- He Yan. A quantitative reservoir evaluation method based on fuzzy comprehensive appraisal and analytical hierarchy process—case of Xujiahe formation in Baojie area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(1): 23-25, 29.
- [7] 张响响, 邹才能, 陶士振, 等. 四川盆地广安地区上三叠统须家河组四段低孔渗砂岩成岩相类型划分及半定量评价[J]. *沉积学报*, 2010, 28(1): 50-57.
- Zhang Xiangxiang, Zou Caineng, Tao Shizhen, et al. Diagenetic facies types and semiquantitative evaluation of low porosity and permeability sandstones of the fourth member Xujiahe Formation Guangan area, Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(1): 50-57.
- [8] 曾富英, 金惠, 杨威, 等. 川中—川南地区须家河组有利储集砂体地震识别及其分布预测[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18(1): 30-33.
- Zeng Fuying, Jin Hui, Yang Wei, et al. Seismic identification and distribution of favorable reservoir sandbodies, Xujiahe formation, central Sichuan—south Sichuan region [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(1): 30-33.
- [9] 肖开华, 冯动军, 李秀鹏. 川西新场须四段致密砂岩储层微观孔隙与可动流体变化特征[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(1): 77-82.
- Xiao Kaihua, Feng Dongjun, Li Xiupeng. Micro pore throat characteristics and moveable fluid variation of tight sandstone in 4th member of Xujiahe Formation, Xinchang Gas Field, western Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(1): 77-82.
- [10] 李阔, 曾韬, 潘磊. 川东北地区须家河组储层特征研究[J]. *岩性油气藏*, 2012, 24(1): 46-51.
- Li Kuo, Zeng Tao, Pan Lei. Reservoir characteristics of Xujiahe Formation in northeastern Sichuan Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2012, 24(1): 46-51.
- [11] 刘洪亮, 鱼红侠, 崔红珠, 等. 红台地区低孔低渗储层测井流体识别方法研究[J]. *石油天然气学报*, 2007, 29(3): 93-96.
- Liu Hongliang, Yu Hongxie, Cui Hongzhu, et al. A method for fluid identification by logging in reservoir with low porosity and low permeability in Hongtai area [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(3): 93-96.
- [12] 邹文, 贺振华, 陈爱萍, 等. 定量交会图技术及其在流体识别中的应用[J]. *石油物探*, 2008, 47(1): 45-48.
- Zou Wen, He Zhenhua, Chen Aiping, et al. Application of quantitative crossplot technique in fluid identification [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2008, 47(1): 45-48.
- [13] 陈洪斌. 测井识别储层流体性质的方法研究及应用[J]. *天然气勘探与开发*, 2003, 26(3): 36-42.
- Chen Hongbin. The method and application of reservoir fluid identification by logging [J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2003, 26(3): 36-42.
- [14] 薛凤玲, 李中冉, 王亚茹, 等. 测井储层流体识别方法及其在低渗透油藏描述中的应用[J]. *大庆石油学院学报*, 2004, 28(6): 92-94.
- Xue Fengling, Li Zhongran, Wang Yaru, et al. Log reservoir fluid identification method and its application to low permeability reservoir description [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2004, 28(6): 92-94.
- [15] 李熙喆, 张满郎, 谢武仁, 等. 川西南地区上三叠统须家河组沉积相特征[J]. *天然气工业*, 2008, 28(2): 54-57.
- Li Xizhe, Zhang Manlang, Xie Wuren, et al. Sedimentary facies of upper Triassic Xujiahe Formation in southwest Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(2): 54-57.
- [16] 郑荣才, 李国晖, 雷光明, 等. 四川盆地须家河组层序分析与地层对比[J]. *天然气工业*, 2011, 31(6): 12-20.
- Zheng Rongcai, Li Guohui, Lei Guangming, et al. Sequence analysis and stratigraphic correlation of Xujiahe Formation in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(6): 12-20.
- [17] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. Formation and evolution of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [18] 刘金华, 张世奇, 孙耀庭, 等. 川西前陆盆地上三叠统须家河组地层的划分对比及沉积演化[J]. *地层学杂志*, 2007, 31(2): 190-196.
- Liu Jinhua, Zhang Shiqi, Sun Yaoting, et al. Correlation and evolution of the upper Triassic Xujiahe Formation in the West Sichuan Foreland Basin [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(2): 190-196.
- [19] 石玉江, 李长喜, 李高仁, 等. 特低渗透油藏源储配置与富集区优选测井评价方法[J]. *岩性油气藏*, 2012, 24(4): 45-50.