

文章编号: 0253-2697(2011)03-0484-05

# 页岩气测井解释和岩心测试技术 ——以四川盆地页岩气勘探开发为例

吴庆红<sup>1,2</sup> 李晓波<sup>3</sup> 刘洪林<sup>3</sup> 陈霞<sup>4</sup>

(1. 中国地质大学能源学院 北京 100083; 2. 中国石油煤层气有限责任公司 北京 100076;  
3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 河北廊坊 065007; 4. 中国石油华北油田分公司综合一处 河北廊坊 065007)

**摘要:** 利用页岩气专用测井技术对页岩气评价井进行了储层参数和气源参数的研究, 并利用岩心测试技术对测井结果进行验证及校正, 以更准确地反映储层物性参数。其中对四川盆地页岩气评价井的页岩有利层段进行了有利储层段划分以及硅质、脆性矿物、黄铁矿、含气量和 TOC 的测试。由于测井结果具有地域性差异, 借助页岩岩心资料对上述参数进行了验证并对部分参数进行了校正, 为合理开发页岩气提供了研究手段。

**关键词:** 岩心测试; 测井技术; 储层段; 硅质含量; 含气量测试

**中图分类号:** P631.8 **文献标识码:** A

## Log interpretations and the application of core testing technology in the shale gas: Taking the exploration and development of the Sichuan Basin as an example

WU Qinghong<sup>1,2</sup> LI Xiaobo<sup>3</sup> LIU Honglin<sup>3</sup> CHEN Xia<sup>4</sup>

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100076, China; 3. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China; 4. General Division I, PetroChina Huabei Oilfield Company, Langfang 065007, China)

**Abstract:** The present paper investigated source and reservoir parameters of shale gas evaluation wells by using professional logging techniques of the shale gas, and the result of logging was verified or calibrated by core testing technology so as to more accurately reflect physical property parameters of reservoirs. The paper introduced the application of key logging techniques to appraising favorable intervals of shales from some shale gas evaluation wells in the Sichuan Basin, which included division of favorable intervals of a reservoir, silica content testing, contents of fragile minerals, pyrite testing, gas content testing and TOC testing. All of the parameters mentioned above were verified and some of them were calibrated by using core data of shales because of the regional difference of well logging results. The present study provided the rational development of the shale gas with a research approach.

**Key words:** core testing; logging technology; reservoir section; silica content; gas content testing

## 1 页岩气测井识别技术

斯伦贝谢公司于 2004 年开展了页岩气测井解释, 通过北美 12 个页岩气田比较, 建立了页岩气测井系列, 包括伽马、中子、密度、电阻率、声波扫描、电阻率成像(FMI)、伽马能谱(HNGS)和元素俘获能谱测井(ECS), 其中声波扫描、电阻率成像、元素俘获能谱测井是页岩测井的关键技术<sup>[1-2]</sup>。

## 2 岩石实验技术在测井技术中应用

岩石实验技术的核心工作主要包括: ①页岩有利

储层段划分; ②硅质、脆性矿物、黄铁矿等含量的确定; ③含气量和总有机碳(TOC)的测定<sup>[3]</sup>。

测井所测得的参数属于储层的间接资料, 通过解释模型反演可得到储层地质参数。由于测井技术上的限制、反演中的多解性以及油气藏地质条件的多变性, 用测井资料反演储层地质参数时, 其解释方法和解释模型经常具有区域性, 必须通过岩心资料进行刻度或检验, 成像测井技术可直接通过测井获取井筒的部分地质现象, 测井获得的信息已不再完全属于间接资料。但目前测井技术还不能对页岩地层的孔隙度、渗透率、饱和度、TOC、硅质含量、游离气、吸附气体

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05018)资助。

第一作者及通讯作者: 吴庆红, 女, 1968 年 9 月生, 1991 年 7 月毕业于西南石油学院, 现在中国石油煤层气有限责任公司工作, 中国地质大学(北京)能源学院在读博士, 主要从事非常规油气勘探开发方面的研究工作。E-mail: wqh69@petrochina.com.cn

积等进行直接采集, 仍然须借助岩心资料进行验证或校正<sup>[4]</sup>。

2 1 页岩气有利储层段划分

斯伦贝谢公司在四川盆地志留系和寒武系页岩气储层进行了专项测井<sup>[5-6]</sup>。从图 1 可以看出, 四川盆地北部志留系龙马溪组页岩气藏特征非常明显, 从测井处理成果看, 第 ①道的 GR(自然伽马测井) 值在 100~300 API 之间, 说明放射性元素含量高, 是典型的泥岩特征; 第 ②道是电阻率曲线, 电阻率在页岩气层明显升

高; 第 ③道是 TNPH(热中子孔隙度) 和 PEX 曲线(指中子、密度、电阻率); 第 ④道是 FMI(成像测井) 曲线; 第 ⑤道是铀、钍、钾含量, 铀含量增高是海相地层发育的标志; 第 ⑦道是 ECS(元素俘获能谱测井) 岩性, 包含黄铁矿含量、碳酸盐含量、硅质含量、泥质含量等。从 FMI 成像测井成果可看出, 该层段部分裂缝发育, 且发育一套页岩气藏, 气层段为 1 503. 6 ~ 1 543. 3 m, 页岩气藏内裂缝不发育, 主要以基质孔隙为主。

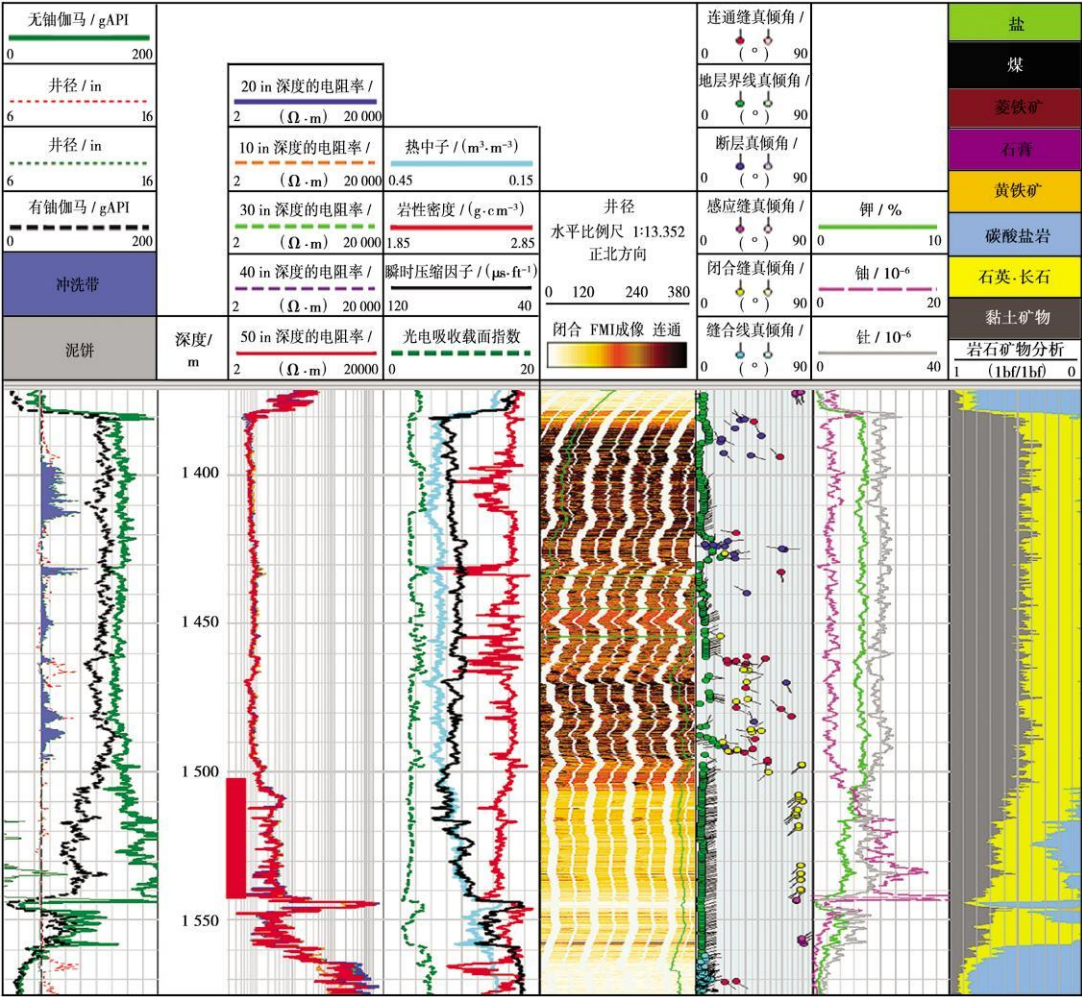


图 1 四川盆地页岩气评价井测井曲线

Fig. 1 Logging curves of shale gas evaluation well of Sichuan Basin

2 2 硅质、脆性矿物含量的测定

斯伦贝谢公司测井解释认为, 龙马溪组岩性为灰黑色、黑灰色、黑色页岩, 硅质含量高达 20%~30%, 灰岩含量也较高。硅质含量是页岩气选区重要指标之一, 美国选区评价指标中认为岩石脆性好, 硅质含量大于 35%, 页岩的脆性矿物(石英、方解石、白云石)含量、变质程度、敏感性甚至岩层组合都影响页岩的被改造能力, 压裂成功与否关系到能否大幅度地提高页岩

气单井产量。硅质含量需要用岩心实验室进行全岩 X-衍射分析报告数据校正, 同时测定出黏土矿物相对含量<sup>[7]</sup>。四川盆地龙马溪组评价井进行了 22 块样品的 X-衍射分析(图 2), 矿物组成中石英含量最高, 平均为 36.7%, 黏土含量为 36.5%, 脆性矿物石英和方解石及白云石总量为 55.7%。这表明该套页岩具有很好的脆性岩石组分, 易于压裂, 也进一步证实测井解释硅质含量高达 20%~30%, 不需要校正。

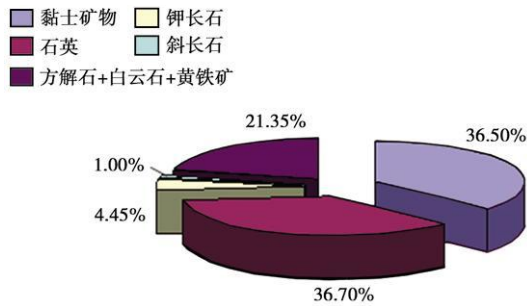


图 2 龙马溪组岩心矿物含量饼状图

Fig.2 Distribution of mineral content in cores of Longmaxi Formation

2 3 黄铁矿含量测定

斯伦贝谢公司在四川盆地寒武系地层进行评价并进行了核磁共振测井<sup>[8,9]</sup>。通过分析比较认为,寒武系地层发育浅海陆棚相沉积,水平层理发育。从 ECS 和 FMI 图像来看,黄铁矿(图 3 中黑色斑点)含量为 3% 左右。为了校对黄铁矿含量,对四川盆地寒武系 27 块岩心样品进行了黄铁矿矿物含量测定。实验结果表明,黄铁矿含量占总全岩总量的 3.06%,验证了斯伦贝谢公司测井解释结果,不需要重新对黄铁矿含量进行校正。

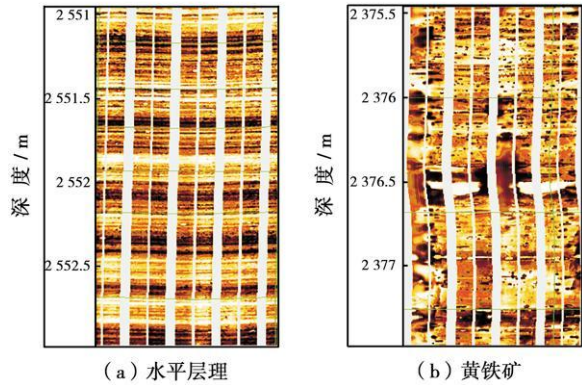


图 3 成像测井显示水平层理和黄铁矿

Fig.3 The horizontal bedding and pyrite in FMI

2 4 含气量和 TOC 测定

常规页岩裂缝性气藏中的天然气主要以游离状态赋存于页岩裂缝中,页岩气在储层中主要以吸附状态存在。页岩的吸附能力通常与页岩的总有机碳含量、有机质热演化程度、储层温度、地层压力、页岩原始含水量和天然气组分等因素相关,其中有机碳含量和地层压力是最主要的影响因素。吸附气量与有机碳含量和地层压力成正比:压力越大,含气量越大,选区条件越优越。温度也是重要的影响因素:温度越高,游离气越多,吸附气越少。

斯伦贝谢公司吸附气量测井方法是根据地区的等温吸附曲线和测井得到地层温度、压力计算地层的吸附气量<sup>[10-12]</sup>。等温吸附曲线是在特定的温度和压力

下得到的,因此确定地层条件下的吸附气含量,须经过一系列的校正<sup>[13]</sup>。在精确得到黏土矿物含量及其类型和地层孔隙度的基础上,利用双水模型,采用 ELANplus 优化解释程序,得到游离气饱和度<sup>[14]</sup>。通过 ECS 和常规测井解释,可以计算得到 TOC 含量。页岩气主要包括游离气和吸附气,TOC 和吸附气相关,通过朗格缪尔气体体积和 TOC 关系,转换为一定温度、压力下的吸附气体积。图 4 是斯伦贝谢公司处理的龙马溪组页岩层段实例。中间道给出了 TOC 含量(测试平均值为 2.45%),最后一道得出吸附气、游离气和总气体量。

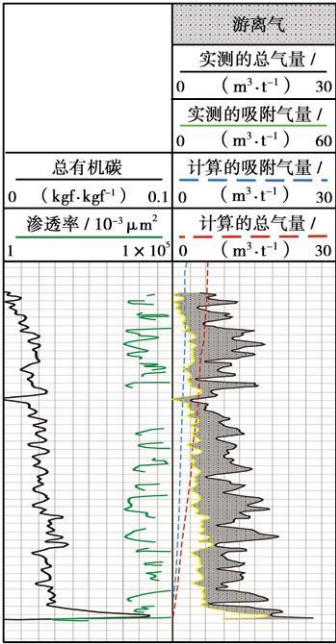


图 4 龙马溪组总含气量和游离气、吸附气含量

Fig.4 Content of total gas, free gas and adsorbed gas in Longmaxi Formation

美国富气页岩 TOC 一般大于 2%, Barnett 页岩 TOC 为 4.5。选取了龙马溪组页岩有利层段 15 块样品,深度范围为 1 400~2 800m。分析结果表明,TOC 值位于 2%~2.5% 之间的区间频率最高,其次是 TOC 小于 2% 的区间(图 5)。实验室测定龙马溪组 TOC 平均

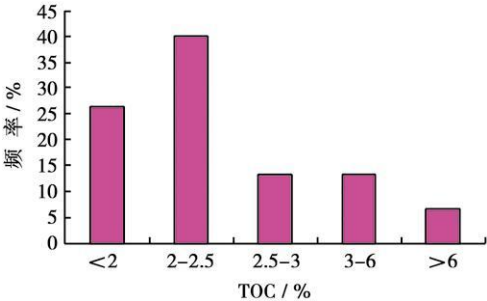


图 5 龙马溪组总有机碳量

Fig.5 TOC content of Longmaxi Formation



含量为 2.68%, SLB 测井计算结果 TOC 为 2.45%, 比对证实 TOC 测井测试稍微偏小, 须要适当校正。

由于压力在页岩气吸附中的作用要远大于温度的影响, 因此, 可利用页岩地面样品的等温压力吸附实验模拟不同压力阶段页岩的吸附气量。对页岩层段龙马溪组 5 块页岩岩心做了等温吸附实验, 实验分析的目的是测定页岩总含气量, 以确定区块内 TOC、压力和吸附量气量之间的内在关系<sup>[15]</sup>。

岩心的实验室测量方法是根据 langmuir 回归方程:

$$p/V = p/V_L + p_L/V_L$$

式中:  $p$  为气体压力, MPa;  $V$  为压力  $p$  条件下吸附量,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $V_L$  为最大吸附容量,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $p_L$  为 Langmuir 压力, MPa。

理论上, 最大吸附气体储量由特定产气页岩的朗格缪尔体积  $V_L$  决定。美国 Marcellus 页岩的朗格缪尔体积  $V_L$  和 TOC 之间线性正相关关系(图 6)。

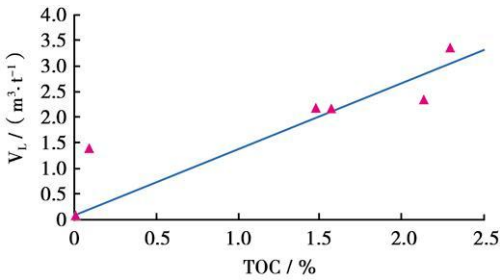


图 6 龙马溪组朗格缪尔体积  $V_L$  与 TOC 关系

Fig. 6 The relationship of Langmuir volume(  $V_L$  ) and TOC in Longmaxi Formation

拟合结果表明, 龙马溪组 TOC 与朗格缪尔体积之间也有类似线性正相关性(图 7)。

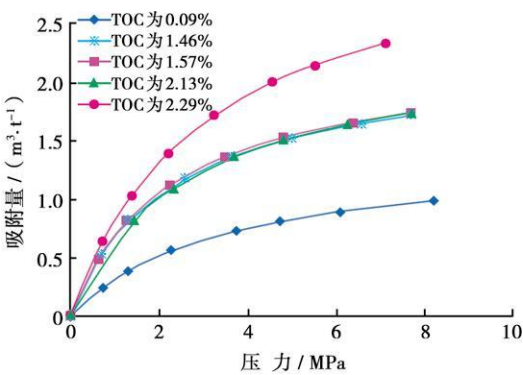


图 7 龙马溪组压力、TOC 与吸附量拟合曲线

Fig. 7 The fitting curves of pressure, TOC and adsorbed gas in Longmaxi Formation

拟合实测数据后发现, 页岩中吸附气含量、压力和有机碳含量呈正相关性。测试结果区间值为 0.249~2.33  $\text{m}^3/\text{t}$ , 平均吸附气量为 1.26  $\text{m}^3/\text{t}$ 。

美国五大盆地地质评价参数与四川盆地志留系龙马溪组页岩层段对比结果表明(表 1), 深度基本相当, 厚度可观, TOC 含量稍低, 镜质体反射率( $R_o$ )处在生气阶段。石英硅质含量适当, 含气量仅次于 Barnett, 储量丰度与资源量无法精确界定, 随着勘探程度的深入, 落实二维、三维地震, 可进一步评价。四川盆地龙马溪组页岩层段前景可观, 具有良好的勘探前景<sup>[16]</sup>。

表 1 美国五大页岩气盆地与四川盆地龙马溪组地质评价参数统计

Table 1 Geological evaluation parameters in 5 great shale gas basins of United States and Longmaxi Formation of Sichuan Basin

参 数	Barnett 密西西比系	Ohio 泥盆系	Antrim 泥盆系	New alban 泥盆系	Lewis 白垩系	志留系 龙马溪组
深度/m	1 950~ 2 550	600~ 1 500	180~ 720	180~ 1 470	900~ 1 800	1 300~ 1 600
有效厚度/m	15~ 61	9~ 20	21~ 37	15~ 30	61~ 91	40~ 60
总有机碳/%	4.5	0~ 4.7	0.2~ 2.4	1~ 2.5	0.45~ 3.5	2.68
$R_o$ /%	1.0~ 1.9	0.4~ 1.3	0.4~ 0.6	0.4~ 1.0	1.6~ 1.88	1.2~ 2.88
石英含量/%	38~ 55	35~ 47	26~ 50	26~ 58	22~ 52	20~ 30
含气量/ ( $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ )	8.5~ 9.9	1.7~ 2.8	1.1~ 2.8	1.1~ 2.3	0.4~ 1.3	1.73~ 3.28
储量丰度/ ( $10^8\text{m}^3\cdot\text{km}^{-2}$ )	3.28~ 4.37	0.55~ 1.09	0.66~ 1.64	0.77~ 1.09	0.87~ 5.47	—
所属盆地	Fort worth	Appalachian	Michigan	Illinois	San Juan	四川盆地

3 结 论

- (1) 斯伦贝谢 Elanplus 解释有利页岩气储层深度为 1 503.6~1 543.3 m, 裂缝较为发育。
- (2) 对四川盆地龙马溪组 22 块样品利用 X-衍射方法分析得到脆性矿物石英和方解石及白云石总量为

55.7%。这表明该套页岩具有很好的脆性岩石组分, 易于压裂, 并进一步证实硅质含量高达 20%~30% 的测井解释结果。根据 27 块样品的黄铁矿矿物含量测试实验结果, 黄铁矿含量占总全岩总量的 3.06%, 验证了斯伦贝谢公司的测井解释结果, 黄铁矿的出现也被认为是地层发育浅海陆棚相沉积的标志。水平层理

发育,也表明地层处于水动力活动弱的还原环境。

(4) 选取了龙马溪组页岩有利层段 15 块样品,实验分析表明,龙马溪组 TOC 含量平均 2.68%。斯伦贝谢公司 TOC 测井分析结果为 2.45%,对比结果证实 TOC 测试较为准确。

(5) 对页岩层段龙马溪组 5 块页岩岩心做了等温吸附实验。试验分析的目的是测定页岩总含气量,确定区块内 TOC、压力和吸附量气量内在关系。页岩岩心实验结果表明,测井得出的 TOC 需要进行校正,含气量测定的分析结果预示着四川盆地龙马溪组具有良好的勘探前景。

### 参 考 文 献

- [1] Pemper R, Han Xiaogang, Mendez F, et al. The direct measurement of carbon in wells containing oil and natural gas using a pulsed neutron mineralogy tool[R]. SPE 124234, 2009.
- [2] 韩琳. 元素俘获谱测井(ECS)在火成岩岩性识别与储层评价中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.  
Han Lin. Element captured spectrum logging(ECS) in igneous rock lithology identification and application of reservoir evaluation[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [3] 潘仁芳, 伍媛, 宋争, 等. 页岩气勘探的地球化学指标及测井分析方法初探[J]. 中国石油勘探, 2009(3): 6-9.  
Pan Renfang, Wu Yuan, Song Zheng, et al. Geochemical parameters for shale gas exploration and basic methods for well logging analysis[J]. China Petroleum Exploration, 2009(3): 6-9.
- [4] 刘洪林, 王莉, 王红岩, 等. 中国页岩气勘探开发适用技术探讨[J]. 油气井测试, 2009, 18(4): 68-71.  
Liu Honglin, Wang Li, Wang Hongyan, et al. A discussion on applicable technology for exploration and development of shale gas in China[J]. Well Testing, 2009, 18(4): 68-71.
- [5] 牛虎林, 胡欣, 徐志强, 等. 基岩油气藏裂缝性储层的成像测井评价与裂缝预测[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 264-269.  
Niu Hulin, Hu Xin, Xu Zhiqiang, et al. Evaluation of imaging logging and fracture prediction in fractured basement reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 264-269.
- [6] 黄继新, 彭仕宓, 王小军, 等. 成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用[J]. 石油学报, 2006, 27(6): 65-69.  
Huang Jixin, Peng Shimi, Wang Xiaojun, et al. Applications of imaging logging data in the research of fracture and ground stress[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 65-69.
- [7] 孙建孟, 李召成, 关隹. 用测井确定储层敏感性[J]. 石油学报, 1999, 20(4): 34-38.  
Sun Jianmeng, Li Zhaocheng, Guan Ju. Reservoirs sensitivity determination by well logging[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(4): 34-38.
- [8] 肖立志, 刘堂宴, 傅容珊. 利用核磁共振测井评价储层的捕集能力[J]. 石油学报, 2004, 25(4): 38-41.  
Xiao Lizhi, Liu Tangyan, Fu Rongshan. Application of nuclear magnetic resonance log to trapping capability evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(4): 38-41.
- [9] 姜瑞忠, 姚彦平, 苗盛, 等. 核磁共振 T2 谱奇异值分解反演改进算法[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 57-59.  
Jiang Ruizhong, Yao Yanping, Miao Sheng, et al. Improved algorithm for singular value decomposition inversion of T2 spectrum in nuclear magnetic resonance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 57-59.
- [10] 石强, 李剑, 李国平, 等. 利用测井资料评价生油岩指标的探讨[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 30-32.  
Shi Qiang, Li Jian, Li Guoping, et al. Evaluating source rock indexes by log data[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 30-32.
- [11] 杨兴旺, 赵杰. 火山岩气层孔隙度计算方法探讨[J]. 测井技术, 2009, 33(4): 350-354.  
Yang Xingwang, Zhao Jie. Porosity estimation in volcanic gas reservoir[J]. Well Logging Technology, 2009, 33(4): 350-354.
- [12] 刘传平, 郑建东, 杨景强. 徐深气田深层火山岩测井岩性识别方法[J]. 石油学报, 2006, 27(S1): 62-65.  
Liu Chuanning, Zheng Jiandong, Yang Jingqiang. Lithology identification of well logging for deep volcanic reservoir in Xushen Gas Field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(S1): 62-65.
- [13] 赵俊峰, 赵伟祥, 范瑞虹. 用测井方法评价储层的敏感性[J]. 断块油气田, 2004, 11(3): 85-88.  
Zhao Junfeng, Zhao Weixiang, Fan Ruihong. Evaluate reservoir sensitivity in method of well logging[J]. Fault block Oil & Gas Field, 2004, 11(3): 85-88.
- [14] 刘红歧, 彭仕宓, 王建国, 等. 基于测井曲线元的裂缝定量识别[J]. 测井技术, 2004, 28(4): 306-309.  
Liu Gongqi, Peng Shimi, Wang Jianguo, et al. Quantitative discrimination of fractures based on log curve unit[J]. Well Logging Technology, 2004, 28(4): 306-309.
- [15] 钱凯, 赵庆波, 汪泽成, 等. 煤层气甲烷气勘探开发理论与实验测试技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 119-130.  
Qian Kai, Zhao Qingbo, Wang Zecheng, et al. CBM methane exploration and development theory and experiment technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 119-130.
- [16] 王红岩, 刘洪林, 赵庆波, 等. 煤层气富集成藏规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 100-102.  
Wang Hongyan, Liu Honglin, Zhao Qingbo, et al. Coalbed methane enriching and reservoir regularity[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 100-102.

(收稿日期 2010-10-18 改回日期 2010-12-09 责任编辑 黄小娟)