

# 川南地区页岩气测井技术系列研究

张正玉, 黎泽刚, 缪祥禧

中石化经纬有限公司西南测控公司, 四川 成都

收稿日期: 2023年2月28日; 录用日期: 2023年3月30日; 发布日期: 2023年4月10日

## 摘要

测井在页岩气勘探开发过程中发挥着至关重要的作用, 经济合理的测井系列将直接关系到储层的综合评价, 并对一个地区的勘探开发效果产生重要影响, 同时也间接决定后期资金的投入。目前, 川南威远-永川地区页岩气仍处于勘探开发阶段, 勘探阶段丰富的测井资料能较好地支撑储层精细评价; 随着开发阶段测井项目逐渐减少后, 有限测井资料不足以满足地质工程评价需求的矛盾日益突出。本文从各类页岩气测井项目的用途出发, 结合实际案例开展系列优选方案研究, 总结出适合川南地区页岩气勘探开发的测井系列, 期望为后期施工提供参考。

## 关键词

川南地区, 页岩气, 测井技术

# Study on Shale Gas Logging Technology Series in Southern Sichuan

Zhengyu Zhang, Zegang Li, Xiangxi Miao

Sinopec Matrix Xinan MWD/LWD & Logging Corporation, Chengdu Sichuan

Received: Feb. 28<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 30<sup>th</sup>, 2023; published: Apr. 10<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Logging plays a vital role in the exploration and development of shale gas. Economical and reasonable logging series will directly affect the comprehensive evaluation of the reservoir, have an important impact on the exploration and development effect of a region, and indirectly determine the investment in the later stage. At present, the shale gas in Weiyuan-Yongchuan area in southern Sichuan is still in the exploration and development stage, and the rich logging data in the exploration stage can better support the fine reservoir evaluation; With the gradual reduction of logging projects in the development stage, the contradiction that the limited logging data is not enough to

meet the needs of geological engineering evaluation has become increasingly prominent. This paper starts from the purpose of various shale gas logging projects, carries out a series of optimization scheme studies in combination with actual cases, summarizes the logging series suitable for shale gas exploration and development in southern Sichuan, and hopes to provide reference for later construction.

## Keywords

Southern Sichuan, Shale Gas, Logging Technology

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

川南威远 - 永川与涪陵焦石坝五峰组 - 龙马溪组页岩气藏具有类似特征。该地区五峰组 - 龙马溪组地层厚度约 420 m~480 m, 横向展布稳定。纵向上, 通过标准化石、古生物含量、岩性组合特征、电性特征以及地震响应特征, 从下往上可进一步划分出龙一段、龙二段、龙三段[1] [2] [3]。主力产层埋藏深度在 3400~4100 米之间, 属深层页岩气田, 具有地应力复杂、缝网体积改造难度大等特点[4], 勘探开发阶段均需要不同类型的测井资料支撑地质工程评价; 由于部分进入开发阶段的区域测井项目逐渐减少, 导致目前解释面临有限的测井资料与综合评价需求之间的问题不断升级。从调研情况看, 张博等人[5]在陆相页岩油储层针对油藏岩性复杂(页岩、白云岩、碳酸盐、砂岩)、非均质严重、低孔低渗的特点曾开展过测井系列优化设计, 冯爱国等人[6]结合涪陵页岩气工区油气勘探、开发的需要, 对测井系列进行过优化探讨, 对川南工区的复杂储层对象有一定的参考作用, 但不能直接照搬应用。因此, 有必要针对对该区地质工程背景的页岩气测井系列开展优化研究, 以便科学指导威远 - 永川地区页岩气田的勘探和开发。

## 2. 测井系列分类及作用

根据测井采集数据的内容可以将测井划分为常规测井系列和特殊测井系列。常规测井系列主要包括岩性测井、孔隙度测井、电阻率测井等; 特殊测井系列主要包括电成像、偶极横波、元素俘获等技术。在页岩气评价方面主要包括矿物含量计算、地质地化参数、岩石弹性参数、地应力参数、井旁构造、裂缝分析等。勘探开发中根据实际地质和工程问题选择不同的测井系列, 下面将各测井项目的用途及局限性进行分析。

### 2.1. 岩性测井系列

(1) 自然伽马测井: 主要用于识别岩性和计算泥质含量以及测井深度标定(标志层)等。但由于水平井钻井采用油基泥浆的影响, 水平井测井普遍伽马测值偏高, 造成轨迹评价多解, 因此采用伽马建立井眼轨迹模型需要结合其它测井曲线辅助判断。该项目适用于各种复杂井眼状况及钻井液条件, 是科研生产中最基本的测井项目。

(2) 自然伽马能谱测井: 测量地层的自然放射性总量及放射性元素 U、Th、K 的含量; U、Th、K 在地层中的分布与地层岩性、地层水的活动以及有机质含量有着紧密关系, 利用其测量值, 结合岩心化验分析资料及地质资料可用来确定粘土矿物类型, 分析沉积环境; KTH 可精准计算地层的泥质含量, 建立

岩性剖面, 精确划分储集层, 定性判别高放射性、裂缝性储层[7] [8]。在页岩气测井评价中 U 可用于地层有机碳大小的计算。该项目较适用于新区的沉积环境、沉积相等研究中。

WY35-1HF 井 3709.5~3714.0 米 GR 显示出高值, 能谱反映高 TH 是造成高 GR 的部分原因, 相对低 U, K 呈现高值(图 1)。Th/K 交会图粘土类型以伊蒙混层为主, TH/U 介于 2~4、岩心 TOC 分布在 3%~6% (图 2), 指示地层沉积环境为强还原到半还原环境, 为富有有机质页岩, 但并非优质页岩气层段。

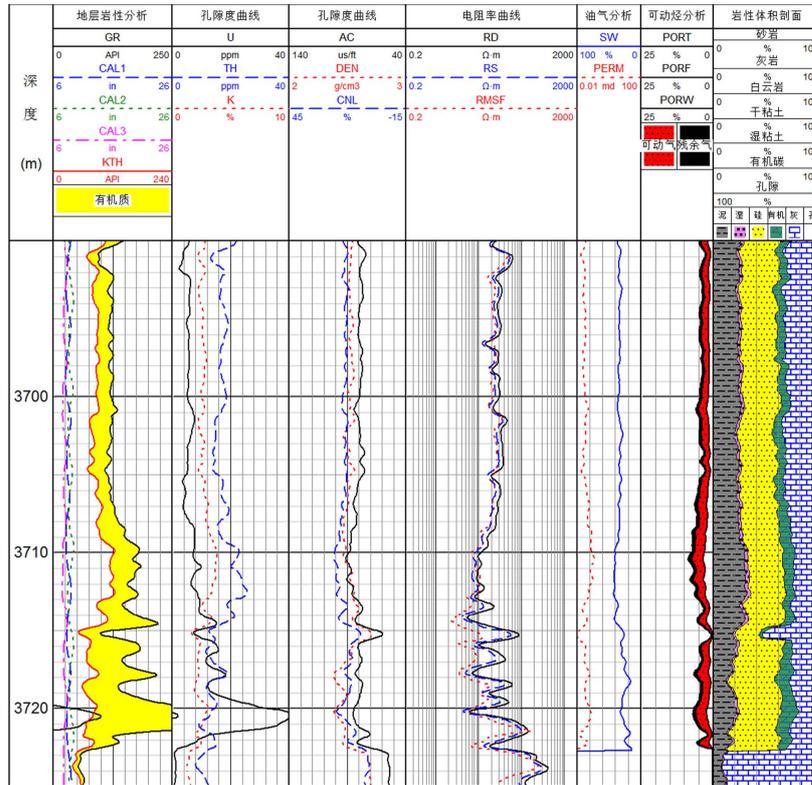


Figure 1. Logging curve and result chart of WY35-1HF well

图 1. WY35-1HF 井测井曲线及成果图

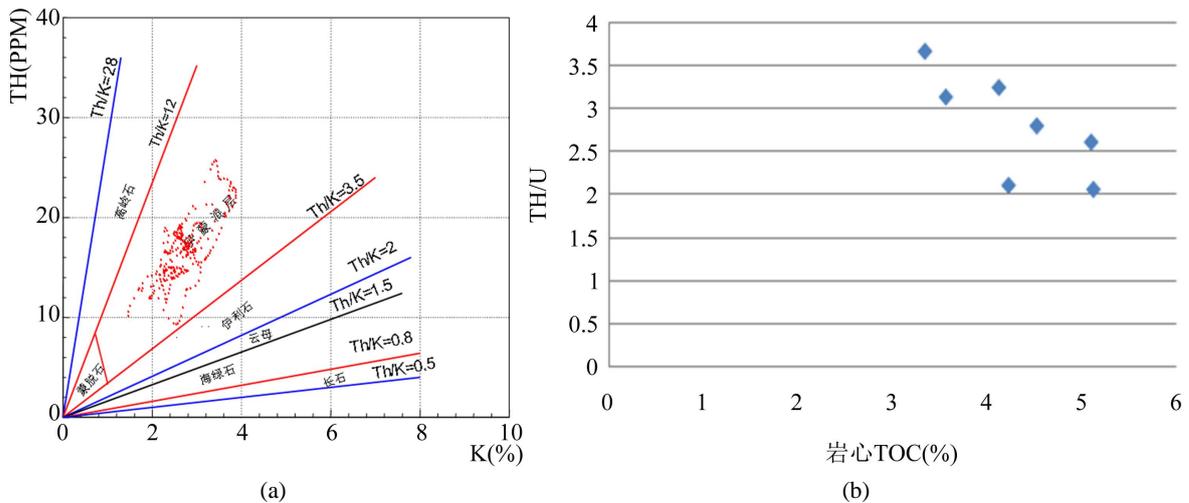


Figure 2. Th/K intersection diagram (a) & TH/U and core TOC intersection diagram (b) of WY35-1HF well

图 2. WY35-1HF 井 Th/K 交会图(a)和 TH/U 与岩心 TOC 交会图(b)

## 2.2. 孔隙度测井系列

常用的孔隙度测井方法主要有补偿声波、补偿中子、补偿密度(岩性密度)三种。它们的组合交会能够识别岩性、计算矿物含量和孔隙度参数、评价储层含气性等[9][10][11]。

(1) 补偿声波测井: 声波时差是声波通过单位长度地层所需的传播时间, 是声波速度的倒数。在页岩气地层评价中, 声波测井可以与补偿中子结合判断储层的含气性, 地层的孔隙度计算(图 3(a))、岩性判断和地震标定等。该项目较适用于各种复杂井眼状况及钻井液条件, 对于空气钻井条件不适用。

(2) 补偿密度测井: 测量岩石的体积密度, 反映地层岩性、孔隙度及有机质变化, 同时也是压裂改造的重要参考曲线; 补偿密度高低值通常指示储层中富有机质程度(图 3(b))。该项目对于井眼要求相对较高, 对于垮塌、缩径明显的地层, 采集的品质受影响, 同时还有一定的安全风险。

(3) 补偿中子测井: 测量地层中的含氢指数, 反映岩石的孔隙度大小, 与其它孔隙度测井组合可识别储层的含气性; 同时也能较好地用于页岩储层粘土含量的计算(图 3(c))。该项目适用于中高矿化度泥浆条件下, 对于矿化度较高的情况, 需要做一定的校正后使用。

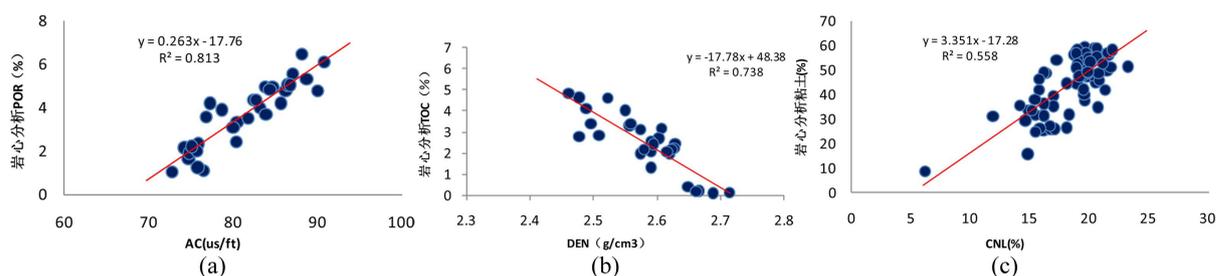


Figure 3. Application of porosity logging series in different parameter calculation

图 3. 孔隙度测井系列在不同参数计算中的应用

## 2.3. 电阻率测井系列

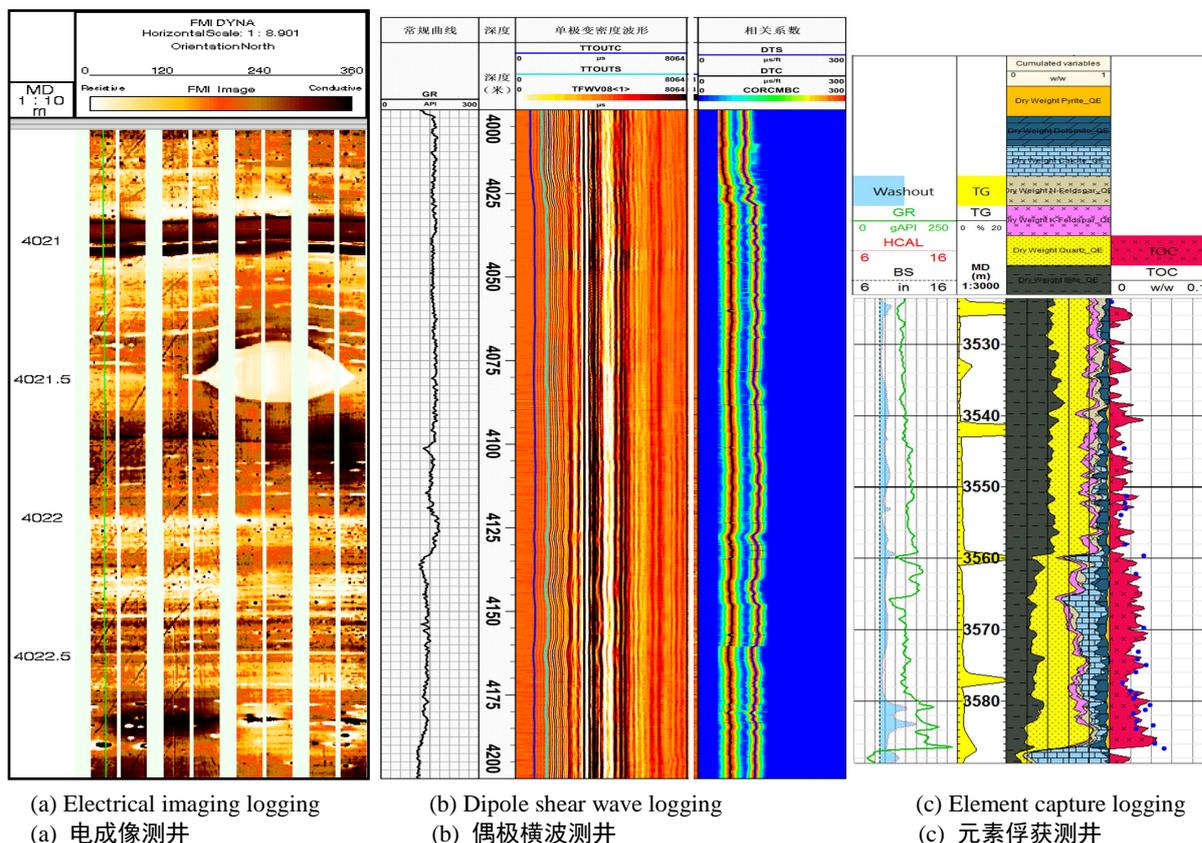
目前, 页岩气开发井均采用水平井完井方式, 且基本是沿最小主应力方向。页岩具有较强的层理结构, 极易发生层间剥落, 同时具有显著的各向异性, 易发生沿层里面的剪切滑移破坏, 造成定向段和水平段的井壁失稳, 在最小主应力方向更容易坍塌[12]。在水平井中使用油基泥浆可以对页岩起支撑作用, 解决页岩垮塌问题。

感应电阻率测井适用于淡水泥浆、油基泥浆或空气钻井条件下的中低电阻率地层, 可描述地层电阻率不同径向的变化情况, 能有效确定储层侵入及部分裂缝特征, 相应绝对值高低也能反映储层含气丰度。

## 2.4. 特殊测井系列

(1) 电成像测井: 在页岩气勘探中可划分岩相、判别岩性、识别裂缝、分析地应力方向、评价甜点层等, 为水平井轨迹设计、储层压裂改造、区域地质构造研究等方面提供依据和支撑[13]。本井成像成果图可以看出(图 4(a)), 储层段以粉砂质泥岩为主, 水平纹层发育, 见顺层分布的粉砂质团块, 4021.5 m 处还见同生结核, 该技术的应用对地层现象、构造特征等方面有较明确的认识。该项目适用于地质构造复杂, 需要对裂缝、地应力方向等方面进行精细描述的研究中, 对井眼要求相对较高。

(2) 偶极横波(远探测)测井: 能为页岩储层提供纵波、横波、斯通利波时差, 评价地层各向异性, 计算储层岩石力学参数、地应力、脆性指数和识别裂缝等[14]。本井偶极声波成果图可以看出(图 4(b)), 该技术提供的纵横波信息清晰, 能为下步弹性模量、应力参数的计算等方面提供基础保障。该项目适用于裸眼井及套管井, 对井眼条件要求不高。



**Figure 4.** Application of special logging series in geological engineering evaluation  
**图 4.** 特殊测井系列在地质工程评价中的应用

(3) 岩性扫描测井：通过俘获谱和非弹谱能够测量的地层中的元素，包括硅、钙、铁、硫、铝、镁、钾、钠、碳等干重曲线，精确识别岩石的矿物成分和含量，还可直接测量页岩气层有机碳含量(图 4(c))，为页岩气评价提供新的技术手段[15]。该项目适用于复杂岩性分析，为复杂矿物成分的计算和岩性识别提供支撑，对于井眼要求不高。

### 3. 测井系列优化原则

测井系列优化一定要满足页岩气田开发的地质、工程需求，考虑区块地质条件、井筒环境，同时符合经济适用性，为页岩气的开发方案制定提供依据。结合实际勘探，川南威远 - 永川页岩气田测井系列选择应围绕以下需求执行：

(1) 能对页岩储层有效识别；(2) 能精确计算页岩气储层参数和地化参数；(3) 确定有效储层下限及测井评价标准；(4) 能开展页岩气井产能分级评价；(5) 能提供页岩气水平井分段压裂选层优化方案；(6) 是否高效优质完成测井施工等。

另外还应考虑兼顾推广新技术与逐步淘汰陈旧测井方法的原则。通过建立健全高效、实用的最优化测井系列，解决较少测井资料与较高地质工程需求之间的矛盾。

### 4. 测井系列优化方案

基于川南威远 - 永川页岩气测井评价需求，结合工区前期施工经验，参考国内外页岩气测井评价案例，针对不同勘探开发目的和地质工程需求，并考虑经济适用性，提出该地区页岩气测井系列优化方案。

#### 4.1. 探井测井系列

页岩气探井是以获取地质资料为目的, 预探本区页岩气的各种储层参数及进行潜力分析, 测井资料采集应全面详细, 全方位、多角度对储层开展精细评价(表 1)。

**Table 1.** Logging series of exploration wells  
**表 1.** 探井测井系列

测井系列	测井项目	评价内容	备注
必测项目	自然伽马、自然伽马能谱、井径、自然电位、补偿声波、补偿中子、补偿密度、双侧向/阵列感应、井斜、方位	岩性识别、粘土类型、多矿物含量、储层识别、孔隙度、渗透率、饱和度、R0、TOC、吸附气含量、游离气含量、总含气量	盐水泥浆及地层电阻率较高时应测双侧向; 油基泥浆测阵列感应
选测项目	岩性扫描测井	精确的粘土、碳酸盐岩、黄铁矿等含量、TOC 含量计算等	
	偶极横波(远探测)	纵波、横波、斯通利波时差, 各向异性, 岩石力学参数, 地应力分析, 脆性指数、远端裂缝	
	电成像测井	井旁构造、沉积相、裂缝评价和参数计算、地应力方位分析	

#### 4.2. 评价井测井系列

页岩气评价井目的是在已获取工业性油气的圈闭上, 探明油气藏类型、构造形态、油气层厚度及物性变化规律, 一般需要组合测井和部分特殊测井系列, 以达到深化评价的目的(表 2)。

**Table 2.** Logging series of evaluation well  
**表 2.** 评价井测井系列

测井系列	测井项目	评价内容	备注
必测项目	自然伽马、自然伽马能谱、偶极横波、补偿中子、补偿密度、双侧向/阵列感应、井斜、方位、井径	岩性识别、粘土类型、多矿物含量、储层识别、孔隙度、渗透率、饱和度、TOC、吸附气含量、游离气含量、总含气量	盐水泥浆及地层电阻率较高时应测双侧向; 油基泥浆测阵列感应
选测项目	偶极横波(远探测)	纵波、横波、斯通利波时差, 各向异性, 岩石力学参数, 地应力, 脆性指数、裂缝、断层分析	

#### 4.3. 开发井测井系列

**Table 3.** Development horizontal well logging series  
**表 3.** 开发水平井测井系列

测井系列	测井项目	评价内容	备注
必测项目	自然伽马能谱、补偿密度、补偿声波、双侧向/阵列感应、井斜、方位	岩性识别、多矿物含量、孔隙度、渗透率、饱和度、TOC、吸附气含量、游离气含量、总含气量、井眼轨迹	盐水泥浆及地层电阻率较高时应测双侧向; 油基泥浆测阵列感应
选测项目	自然伽马、补偿中子、偶极横波(远探测)	纵波、横波、斯通利波时差, 各向异性, 岩石力学参数, 地应力, 脆性指数、裂缝、断层分析	

页岩气开发井主要是准备产能建设, 获得试采资料, 并提高采收率; 此时对储层认识程度较高, 通常采用常规标准 + 补偿密度测井系列, 为进一步明确井周及远端裂缝发育情况, 可以选测偶极横波(远探测)测井项目(表 3)。

## 5. 结论与建议

### 5.1. 结论

(1) 阐述了不同测井系列在页岩气储层评价中的作用, 开展了测井系列优化的总体原则分析。

(2) 根据勘探开发目的和需求, 总结了川南威远 - 永川页岩气测井系列优化方案。探井测井推荐资料采集应全面详细, 评价井、开发井根据地质工程认识程度不同采用常规测井结合部分特殊测井系列的方式, 确定好必测和选测项目。

### 5.2. 建议

建议具有相似勘探开发背景的页岩油气勘探开发中, 对于测井系列的借鉴选择不是固定模式, 应紧随当前亟待解决的实际问题和测井技术发展现状不断调整和完善, 同时还要考虑测井时效、经济性方面的因素。

## 参考文献

- [1] 庞河清, 熊亮, 等. 川南深层页岩气富集高产主要地质因素分析——以威荣页岩气田为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(S1): 78-84.
- [2] 张天操, 王岩. 威远-荣县区块五峰组-龙马溪组页岩气成藏地质特征[J]. 内蒙古石油化工, 2017, 43(8): 108-110.
- [3] 郭旭升, 李宇平, 腾格尔, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组深水陆棚相页岩生储机理探讨[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 193-200.
- [4] 林永茂. 二次压裂提高川南深层页岩气缝网复杂性[J]. 新技术应用与实践, 2019(20): 191-194.
- [5] 张博, 李群德, 王武振. 河南油田陆相页岩油储层测井系列优化设计技术[J]. 石油勘探与开发, 2014(10): 83-84.
- [6] 冯爱国, 张建平, 夏鹏, 等. 涪陵工区测井系列优化选择探讨[J]. 江汉石油职工大学学报, 2014, 27(2): 26-27.
- [7] 朱振宝, 周绍辉, 牛浩. 自然伽马能谱在页岩油气评价中的应用[J]. 山东煤层科技, 2015(7): 183-187.
- [8] 钟文俊, 熊亮, 黎鸿, 等. 测井评价技术在威荣深层页岩气田中的应用[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(1): 38-45.
- [9] 陈木银, 何西攀, 金小慧. 水平井声波时差测井响应特征研究[J]. 国外测井技术, 2013(4): 38-41.
- [10] 朱特. 基于声波有限元法的页岩气储层压裂裂缝分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- [11] 吴涛, 刘向君, 袁雯, 等. 川东南地区龙马溪组页岩声波特性研究[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(2): 72-75.
- [12] 何涛, 李茂森, 杨兰平, 等. 油基钻井液在威远地区页岩气水平井中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(3): 1-5.
- [13] 黄振华, 程礼军, 刘俊峰, 等. 微电阻率成像测井在识别页岩岩相与裂缝中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(6): 121-123.
- [14] 石文睿, 张占松, 张智琳, 等. 偶极阵列声波测井在页岩气储层评价中的应用[J]. 江汉石油职工大学学报, 2013, 26(6): 54-57.
- [15] 夏宁, 冯明刚. 岩性扫描测井在焦石坝地区页岩气储层评价中的应用[J]. 西部探矿工程, 2015, 27(6): 76-79.