

闭塞湖盆页岩油储层测井岩性综合评价技术

刘俊东¹, 蒲秀刚², 常静春^{1*}, 郝丽萍¹, 徐明¹, 袁雪花², 李进¹

1 中国石油集团测井有限公司天津分公司, 天津 300280

2 中国石油股份有限公司大港油田分公司, 天津 300280

* 通信作者, changjc@cnpc.com.cn

收稿日期: 2020-08-28

摘要 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段属于封闭型陆相湖盆沉积, 横向分布广泛、纵向分布稳定, 烃源岩品质好, 页岩油资源丰富。孔二段页岩油储层岩性多样、薄互层特征明显, 且细粒沉积物发育, 矿物成分复杂, 利用常规测井资料开展岩性定性识别及矿物含量定量计算困难。本文综合分析地质、岩心资料, 确定了目标区块页岩油储层的主要岩石类型, 分别为长英质页岩、碳酸质页岩、混合质页岩和黏土岩。岩心分析和测井资料结合, 明确了不同岩石类型在电成像及常规测井资料上的响应特征。优选深电阻率、补偿密度及补偿声波测井曲线, 提出了“补偿声波密度差值—深电阻率比值交会图”的岩石类型定性识别方法, 有效提高了页岩油储层岩性识别准确率, 并实现了岩石类型分类连续自动判别。针对目标区块页岩岩性复杂、矿物成分多样, 常规的矿物含量计算方法与实际差异较大的难题, 根据研究区块X衍射全岩分析资料, 确定页岩油储层主要矿物为长英质(石英和长石)、碳酸盐岩(方解石和白云石)、黏土, 由此建立相应矿物体积模型, 利用补偿声波、补偿密度、补偿密度与补偿中子归一化差值、深电阻率、自然伽马、补偿中子等敏感曲线, 采用多元逐步回归的方法开展碳酸盐岩、黏土矿物含量计算, 通过三次多元回归使得碳酸盐岩和黏土矿物含量计算精度明显提升, 在此基础上形成了适合研究区块的页岩油储层矿物含量定量计算测井解释模型, 利用该解释模型计算的矿物含量与岩心分析结果一致性较高。所形成的方法有效解决了页岩油储层岩性评价难题, 提高了利用常规测井资料进行岩性评价的精度。

关键词 页岩油; 测井评价; 岩石类型; 岩性评价; 定性识别; 多元逐步回归; 矿物含量计算

Logging of a shale oil reservoir in a closed lake basin: A comprehensive lithology evaluation technique

LIU Jundong¹, PU Xiugang², CHANG Jingchun¹, HAO Liping¹, XU Ming¹, YUAN Xuehua², LI Jin¹

1 Tianjin Branch, China Petroleum Logging Co. LTD., Tianjin 300280, China

2 Dagang Oilfield Branch of PetroChina Company Limited, Tianjin 300280, China

Abstract The second member of the Kongdian formation (Ek₂) in the Cangdong Sag of the Bohai Bay Basin is a closed continental lacustrine basin deposit with extensive horizontal distribution and stable vertical distribution, good source rock quality,

引用格式: 刘俊东, 蒲秀刚, 常静春, 郝丽萍, 徐明, 袁雪花, 李进. 闭塞湖盆页岩油储层测井岩性综合评价技术. 石油科学通报, 2021, 01: 58-66

LIU Jundong, PU Xiugang, CHANG Jingchun, HAO Liping, XU Ming, YUAN Xuehua, LI Jin. Logging of a shale oil reservoir in a closed lake basin: A comprehensive lithology evaluation technique. Petroleum Science Bulletin, 2021, 01: 58-66. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.005

and rich shale oil resources. The Ek₂ shale oil reservoir has diverse lithology, which has obvious features of thin inter layering with fine grained sediments. It has developed very well, and has complex mineral compositions so it is difficult to use conventional logging data to carry out qualitative lithologic identification and mineral content calculation. In this paper, the main rock types of shale oil reservoirs in the target block are felsic shale, calcareous shale, mixed shale, and clay stone. These were determined by comprehensive analysis of geological and core data. By combining core analysis and logging data analysis, the response characteristics of different rock types on micro resistivity imaging logging and conventional logging data are defined. Optimizing the deep resistivity, compensation density and compensated sonic logging curves, and proposing a qualitative identification method for rock types of “ $\phi DT-\phi DEN$ & R_t/R_{sh} ” cross plot, effectively improved the accuracy of shale oil reservoir lithology identification, and realized continuous automatic discrimination of rock type classifications. In view of the complicated shale lithology and diverse mineral composition in the target block, as well as the large difference between the conventional mineral content calculation method and the actual situation, according to the X-ray diffraction analysis data of rock samples from the target block, it is determined that the main minerals of the shale oil reservoir are felsic minerals (quartz and feldspar), carbonate minerals (calcite and dolomite), and clay. From this, the corresponding mineral volume model is established, using compensated acoustic wave logging, compensation density, normalized difference between compensation density and compensated neutron logging, deep resistivity, natural gamma and other sensitive curves. The calculation of the content of carbonate rock and clay minerals is carried out using the method of multiple stepwise regression, and the calculation accuracy of the content of carbonate rock and clay minerals is significantly improved through three multiple regressions. On this basis, a logging interpretation model which is suitable for quantitative calculation of shale oil reservoir mineral content in research blocks is derived. The mineral content calculated by this interpretation model is highly consistent with the core analysis results. The developed method effectively solves the difficult problem of lithology evaluation of shale oil reservoirs and improves the accuracy of lithology evaluation using conventional logging data.

Keywords shale oil; logging evaluation; rock types; lithology evaluation; qualitative identification; multiple stepwise regression; mineral content calculation

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.005

0 引言

沧东凹陷位于渤海湾盆地黄骅拗陷南部,是黄骅拗陷内的第二大富油凹陷。孔二段是沧东凹陷勘探开发的主要含油层组之一,沉积时期属于亚热带潮湿气候,淡水—半咸水封闭型拗陷湖盆,水生生物繁茂,强还原环境,有机质古生产力较高,环湖发育 10 个三角洲沉积朵叶体,优质烃源岩发育,演化程度高,具有 2 期生排烃特征,形成页岩油和常规油^[1]。沉积相自湖盆边部至湖盆中心具有规律性变化,发育 3 个沉积环带。外环带发育三角洲前缘砂岩;中环为三角洲前缘远端—前三角洲形成的粗粒与细粒间互带;内环为前三角洲远端—半深湖区的细粒相带,物源供给适中,是页岩油储层的主要发育场所^[2]。沧东凹陷孔二段沉积时期呈现相对稳定的拗陷型构造特征,构造活动弱,粗碎屑供给少,为大面积页岩油发育奠定基础^[3-4]。页岩主要分布在近湖盆中心区,面积为 600 km²,厚度可达 400~600 m,研究区孔二段细粒相区有机质丰度平均 3.26%,最大可达 12.92%,整体属于富烃源岩。镜质体反射率(R_o)分布在 0.66%~0.96%,平均值为 0.76%,处于低成熟至中等成熟阶段。

纵向上沧东凹陷孔二段划分为 4 个油组,其中页

岩主要发育在孔二段一油组、二油组和三油组,岩性具有纵向变化快、薄互层发育、非均质性强的特点。图 1 为沧东凹陷孔二段页岩油储层测井曲线图,图中 4119.5~4196.5 m 为页岩发育段,与常规砂泥岩储层相比,页岩具有“三高两低”的测井响应特征,即高自然伽马、相对高的电阻率、相对高的补偿密度、低补偿声波、低补偿中子数值。核磁共振测井资料反映页岩储层物性非均质性较强,有效孔隙度在 3%~10%。其中 4138.0~4156.0 m 核磁共振标准谱具有明显的长 T_2 谱特征,反映该段储层物性好,有效孔隙度数值为 7%~10%,可动流体体积大,为 2%~6% 左右;4170.0~4188.0 m 核磁共振标准谱无明显长 T_2 谱特征,该页岩段有效孔隙度为 3%~5%,可动流体体积较少,以束缚流体体积为主。地质及测井资料反映,孔二段既是储油层系又是供油层系,该区钻探的多口页岩井均获得工业油气流,显示了沧东凹陷孔二段页岩具有良好勘探开发前景。

1 岩性特征分析

1.1 岩性基本特征

岩心资料分析表明,沧东凹陷孔二段页岩矿物

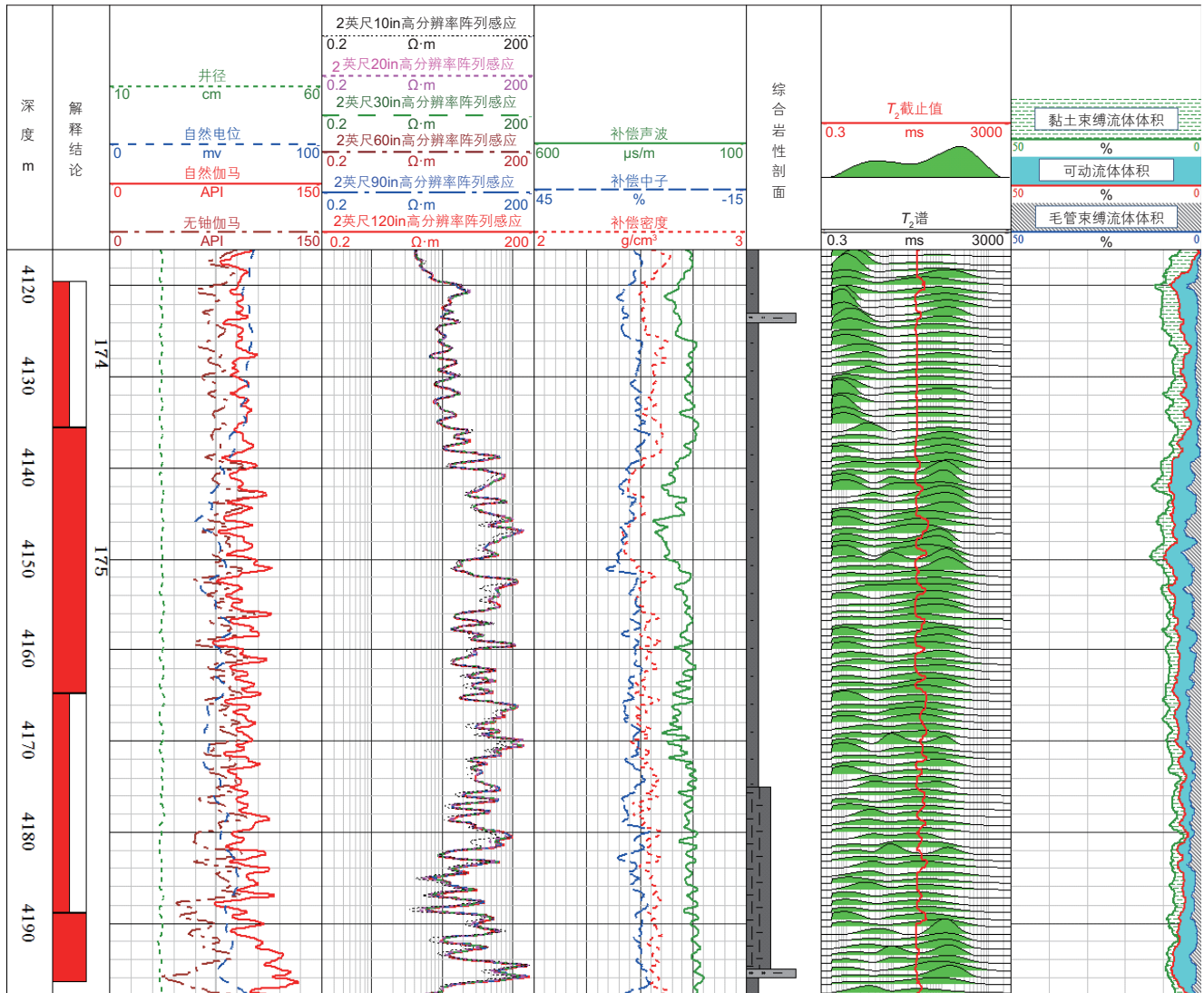


图1 孔二段页岩油储层测井曲线图

Fig. 1 Logging curve of shale oil reservoir in the Ek₂

成分多样(见图2),包括石英、长石、方解石、白云石、铁白云石、方沸石、黄铁矿、菱铁矿、黏土矿物等。其中石英含量平均为12.0%、长石含量平均为42.0%、方解石含量平均为13.0%、白云石含量平均为24.0%、黏土含量平均为6.0%,优势矿物不明显。黏土矿物中伊利石含量约占58.1%,伊/蒙混层含量约占38.4%,绿泥石含量约占3.4%,不含高岭石。厘米级岩心描述反映目的层段岩性薄互层特征明显,单层厚度在0.01~2.0 m之间。结合研究区块地质、岩心等多种信息,依据XRD矿物组分命名方法^[5-6],对孔二段页岩岩石类型进行划分,确定了4种岩石类型,分别为长英质页岩、碳酸质页岩、混合质页岩、黏土岩。铸体薄片资料显示长英质页岩具有块状特征,局部呈不明显纹层状,见分散状长英质颗粒,颗粒较小(见

图3a);碳酸质页岩具有纹层状、块状特征,主要矿物成分为泥晶白云岩,可见零星分布的石英颗粒和黄铁矿,偶见粗晶白云岩(见图3b);混合质页岩呈纹层状,可见砂质条纹与白云质纹层组成的互层,较大的石英颗粒分散状分布,黄铁矿发育,呈放射状或条带状分布(见图3c)。不同岩石类型储集空间存在差别,其中碳酸质页岩储集空间以晶间孔、构造缝、差异压实缝为主;长英质页岩储集空间以粒内微孔、粒间溶蚀孔、微裂缝为主;混合质页岩储集空间以晶间溶孔、粒内微孔及微裂缝为主^[7-9]。

1.2 主要岩石类型测井响应特征分析

岩心分析统计表明,研究区块碳酸质页岩占孔二页岩段的23.1%,长英质页岩占孔二页岩段的39.6%,

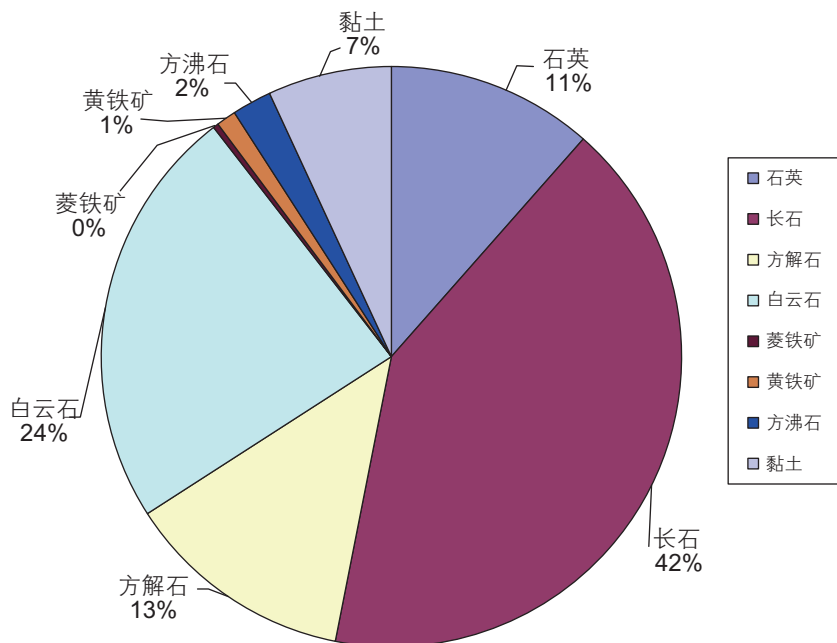


图 2 页岩矿物成分及含量统计图

Fig. 2 The shale mineral composition and content statistics

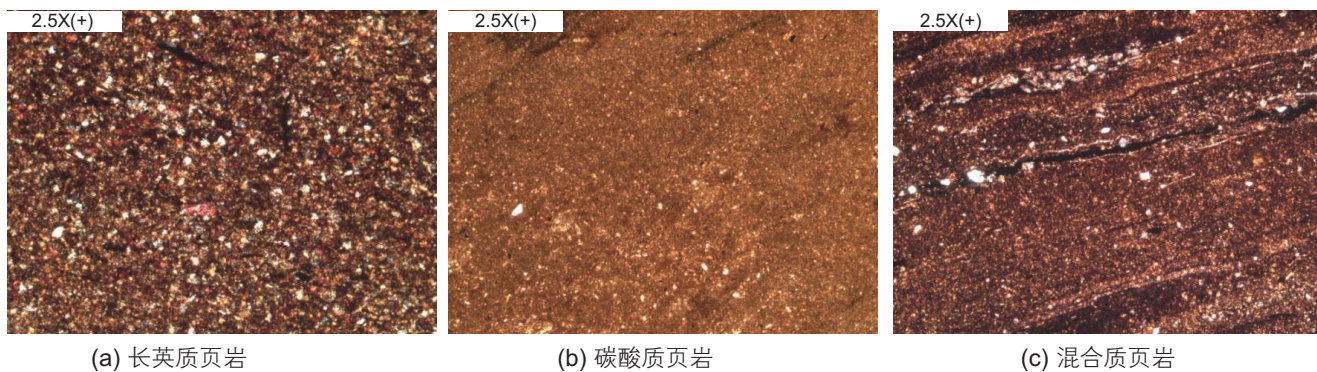


图 3 长英质页岩、碳酸质页岩、混合质页岩铸体薄片特征图

Fig. 3 Thin section characteristics of felsic shale, carbonate shale and mixed shale

混合质页岩占孔二页岩段的 37%，黏土岩占孔二页岩段的 0.3%，主要的岩石类型为长英质页岩、混合质页岩、碳酸质页岩。页岩既是生油岩，又是储油层，其油气生成、赋存方式极为复杂，测井信息是岩性、有机质、物性、含油性等的综合反映^[10]。电成像测井资料具有较高的纵向分辨率，在页岩油评价中发挥着重要作用^[11]，因此结合岩心分析资料，利用常规测井资料和电成像资料确定了主要岩石类型测井响应特征（具体见图 4）。

长英质页岩测井曲线形态特征为锯齿形或箱型。测井响应特征显示单层厚度在 0.5~2.0 m 之间；电成像静态图中显示为橙黄色—黄色—浅黄色相间条纹，自然伽马数值在 70~100.0 API 之间，深电阻率数值为 10~100 Ω·m，补偿密度数值在 2.30~2.55 g/cm³，补偿

声波数值为 250~350 μs/m，具有明显的高电阻中高孔隙特征。

碳酸质页岩测井曲线形态特征为锯齿形，测井响应特征显示单层厚度在 0.5~1.2 m 之间；电成像静态图中显示为浅棕色—橙黄色—黄色相间宽条纹，自然伽马数值为 65~105 API 之间，深电阻率数值为 10~330 Ω·m 之间，补偿密度数值为 2.4~2.58 g/cm³ 之间，补偿声波数值为 220~245 μs/m 之间，具有明显的高阻中低孔特征。

混合质页岩发育段测井曲线形态特征为高频的锯齿形，测井响应特征显示单层厚度较薄，在 0.3~0.8 m 之间；电成像静态图中显示为浅棕色—橙黄色—浅黄色相间细窄条纹，自然伽马数值为 70~95 API 之间，深电阻率数值为 10~110 Ω·m 之间，补偿密度数值为

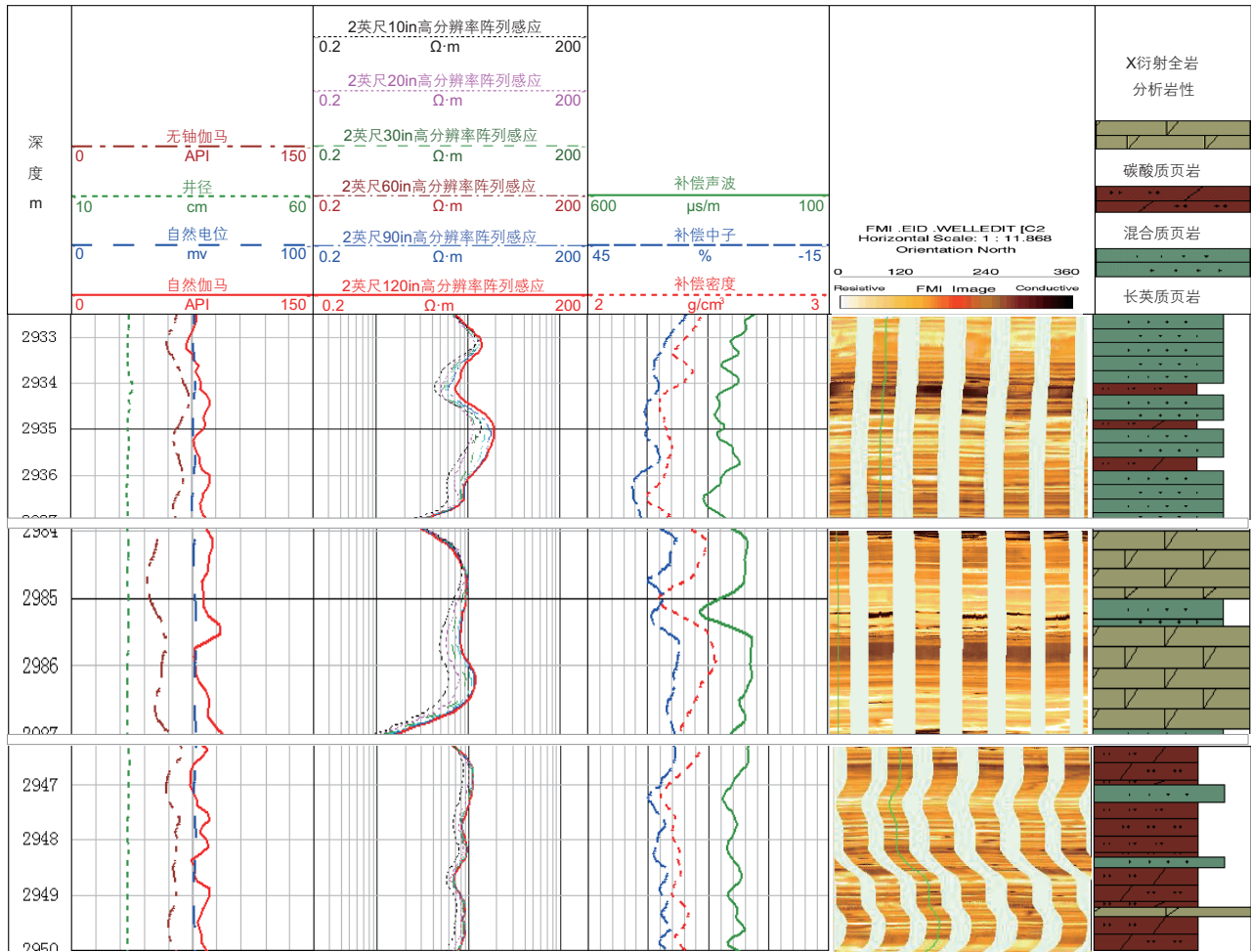


图4 主要岩石类型测井响应特征分析图

Fig. 4 Logging response characteristic analysis of major rock type

2.45~2.6 g/cm³ 之间, 补偿声波数值为 215~250 μs/m 之间, 具有中阻中低孔特征。

2 岩石类型定性识别

从前文可以看出, 研究区块主要岩石类型与补偿密度、补偿声波、深电阻率测井曲线具有一定的对应关系。其中碳酸盐岩具有高补偿密度、低补偿声波、高电阻的测井响应特征; 长英质页岩具有低补偿密度、高补偿声波及中高电阻率的测井响应特征; 混合质页岩具有补偿密度、补偿声波和电阻率数值中等的测井响应特征; 而黏土岩的深电阻率数值低, 一般小于 5.0 Ω·m, 因此可利用深电阻率、补偿密度和补偿声波三条敏感测井曲线开展岩石类型定性识别。实际应用中由于测井仪器不同等原因, 可能会造成不同井相同岩性测井响应特征存在差别, 使得识别精度降低。为有效消除不同仪器测量等误差, 选取目标区块标志层

确定对应曲线最大、最小值, 利用离差标准化法对补偿声波、补偿密度进行线性转换, 计算得到补偿密度相对值、补偿声波相对值和补偿声波密度差值, 具体见式(1~3)。

$$V_{DEN} = (DEN_{max} - DEN) / (DEN_{max} - DEN_{min}) \quad (1)$$

$$V_{AC} = (AC_{max} - AC) / (AC_{max} - AC_{min}) \quad (2)$$

$$\text{补偿声波密度差值} = V_{AC} - V_{DEN} \quad (3)$$

式中, V_{DEN} 为补偿密度相对值, 无量纲; DEN 为补偿密度, 单位为 g/cm³; DEN_{max} 、 DEN_{min} 为目标区块标志层补偿密度最大值、补偿密度最小值, 单位为 g/cm³; V_{AC} 为补偿声波相对值, 无量纲; AC 为补偿声波, 单位为 μs/m; AC_{max} 、 AC_{min} 分别为目标区块标志层补偿声波最大值、补偿声波最小值, 单位为 μs/m。

确定区域泥岩段深电阻率数值, 计算得到深电阻率比值曲线:

$$V_{RT} = RT / RT_{sh} \quad (4)$$

式中, V_{RT} 为深电阻率比值, 无量纲; RT 为深电阻率,

单位为 $\Omega \cdot m$; RT_{sh} 为泥岩段深电阻率, 单位为 $\Omega \cdot m$ 。

图 5 为不同岩石类型补偿声波密度差值与深电阻

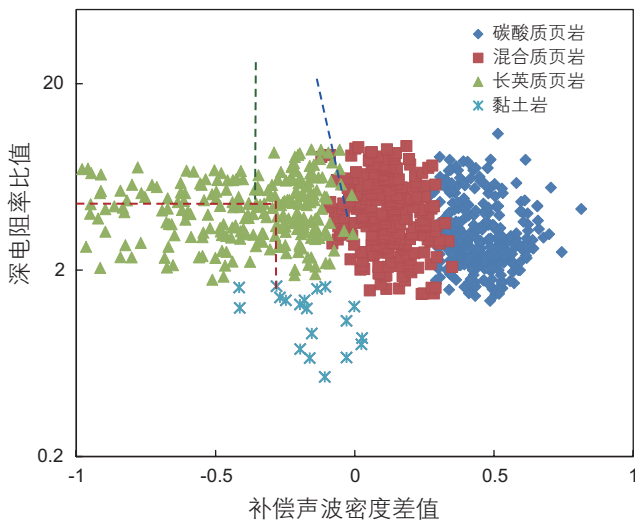


图 5 补偿声波密度差值与深电阻率比值关系图
Fig.5 Plot of compensated acoustic density difference and deep resistivity ratio

率比值关系图, 利用该图版可有效开展页岩岩石类型识别, 由此建立不同岩石类型测井分类标准, 并编制相应的解释软件, 实现了利用测井资料的岩性分类连续自动判别。通过岩心分类与测井分类结果对比, 岩性识别准确率达到 90.6%(见图 6), 能够很好的满足地质评价需求。

3 矿物含量定量计算

研究区块主要矿物成分为石英、长石、方解石、白云石、黏土, 由此确定页岩主要矿物成分为长英质(石英和长石)、碳酸盐岩(方解石和白云石)、黏土质三类。由于目标区块页岩岩性复杂、薄互层特征明显, 常规的矿物含量计算方法与实际差异较大。为解决这一难题, 依据岩心分析资料建立了矿物体积模型, 分别为长英质、碳酸盐岩、黏土矿物。确定不同矿物成分对应的敏感测井曲线, 利用多元逐步回归的方法进行碳酸盐岩含量和黏土含量计算, 长英质含量则根据

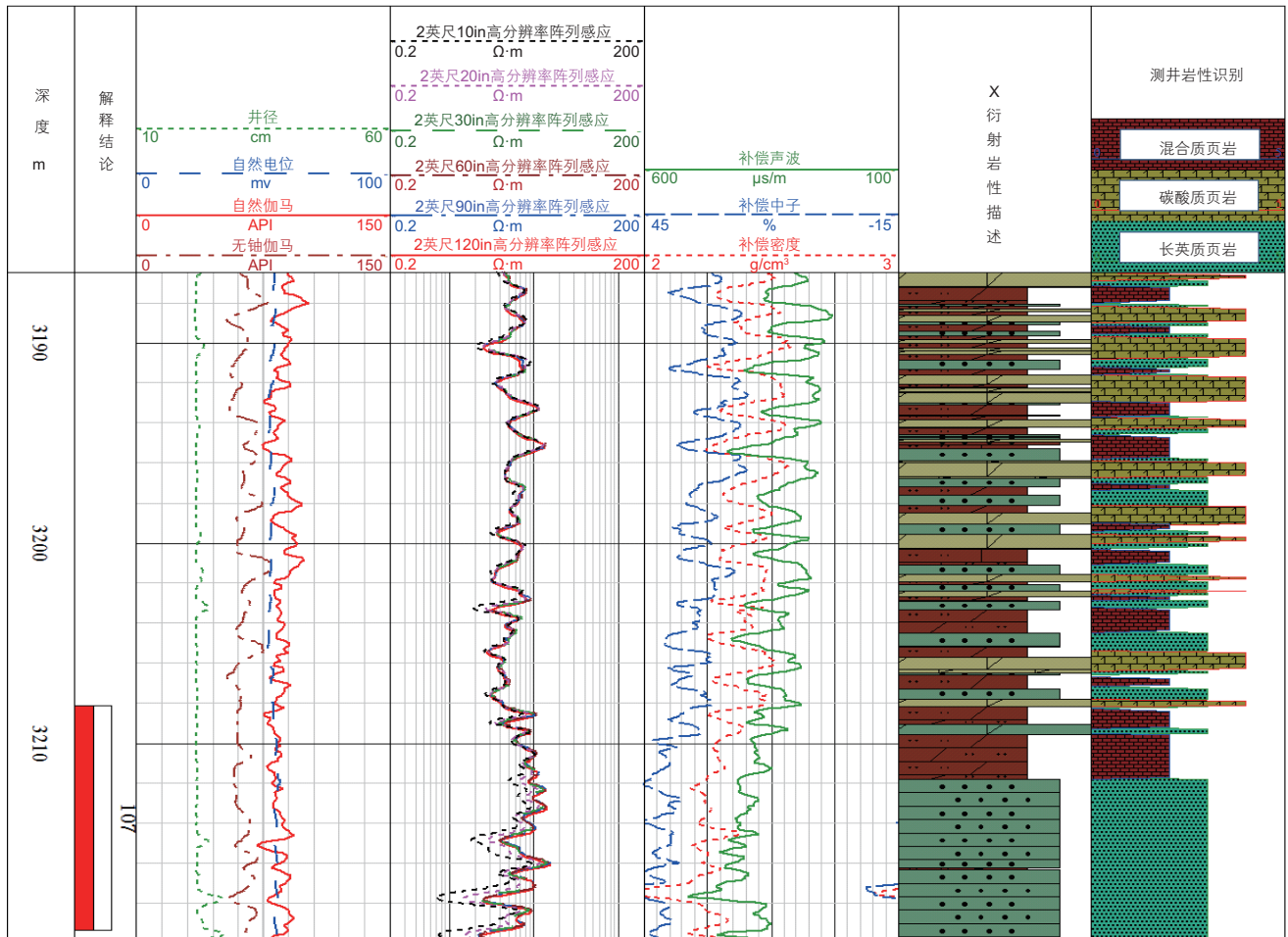


图 6 岩心与测井资料岩性定性识别分析成果图
Fig. 6 Lithology qualitative identification and analysis results of core and logging data

体积百分比原则计算得出。基于多元逐步回归的矿物含量计算方法基本原则是每一次的回归都是为了消除上一步计算结果的异常点,提高计算精度,逐步逼近岩石真实特征。本文以碳酸盐岩含量计算为例进行详细分析(具体思路见图7)。

首先利用岩心数据对测井资料进行刻度,剔除异常点。利用岩心分析得到的碳酸盐岩含量与各测井曲线进行敏感性分析,其中补偿声波、补偿密度、补偿中子、深电阻率曲线与碳酸盐岩含量具有较好的相关关系。根据确定的敏感测井曲线采用逐步回归的方法建立了碳酸盐岩含量解释模型。具体如下:

①补偿声波、补偿密度与岩心分析碳酸盐岩含量进行回归得到初步的碳酸盐岩含量解释模型见式(5):

$$Y_1 = -0.45AC + 11.2DEN + 111.5 \quad (5)$$

式中, Y_1 为计算碳酸盐岩含量,单位为%; AC 为补偿声波,单位为 $\mu\text{s}/\text{m}$; DEN 为补偿密度,单位为 g/cm^3 。

分析表明利用该模型计算的结果虽与补偿密度和补偿声波数值具有一定对应关系,但不能反映深电阻率、补偿密度与补偿中子差值与岩心分析结果之间的变化关系。

②为提高计算精度,将补偿密度和补偿中子曲线归一化,计算得到的补偿密度与补偿中子归一化差值作为一个输入项,并将上一步的结果 Y_1 做为另一个输

入项开展多元回归,得到对应的碳酸盐岩含量解释模型见式(6):

$$Y_2 = 0.64Y_1 - 0.76PDC + 12.7 \quad (6)$$

式中, Y_2 为计算碳酸盐岩含量,单位为%; PDC 为补偿密度与补偿中子归一化差值,单位为%,计算方法见式(7)。

$$PDC = (DEN - 2)100 - 100(45 - CN) \div 60t \quad (7)$$

式中, CN 为补偿中子,单位为%; DEN 为补偿密度,单位为 g/cm^3 。

与上一步计算结果相比,该解释模型计算结果的精度明显提高。但是在对应电性高、岩心分析碳酸盐岩含量高的储层段与计算结果之间相关性较差。

③引入深电阻率曲线作为一个输入项,将上一步计算结果 Y_2 做为另一输入项,开展回归得到最终的碳酸盐岩含量计算模型见式(8):

$$V_{\text{碳酸盐岩}} = 0.97Y_2 - 0.06RT + 3.3 \quad (8)$$

式中, RT 为深电阻率,单位为 $\Omega \cdot \text{m}$; $V_{\text{碳酸盐岩}}$ 为计算的碳酸盐岩矿物含量,单位为%。

图8为利用多元逐步回归法计算的碳酸盐岩含量与岩心分析结果对比图,二者很好的分布在对角线附近,相对误差在5%左右。说明利用该计算模型得到的碳酸盐岩含量与岩心分析结果匹配性较好。

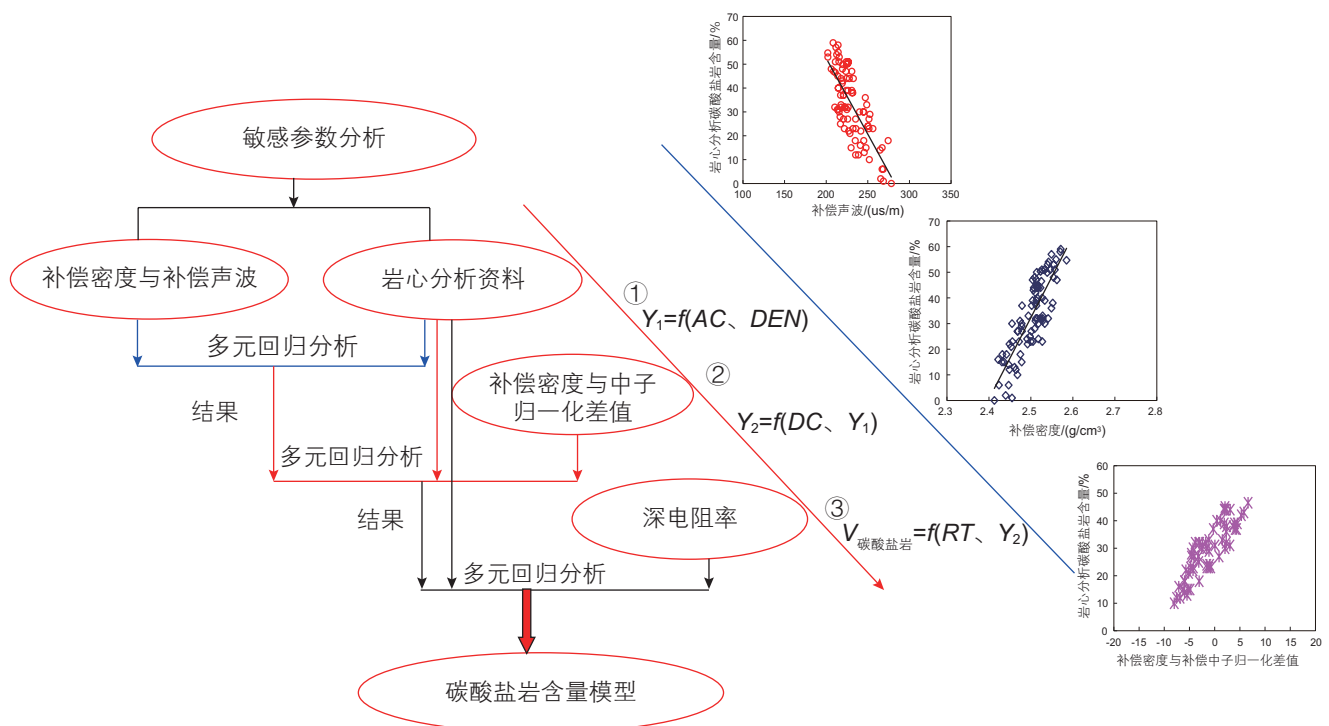


图7 基于多元逐步回归的碳酸盐岩含量计算评价思路

Fig. 7 The calculation and evaluation idea of carbonate rock content based on multiple stepwise regression

根据同样的思路,采用基于多元逐步回归的方法建立了黏土含量解释模型(具体见式9~10);长英质含量的计算模型见式(11)。

$$X_1 = 0.13GR + 0.21CN - 7.8 \quad (9)$$

$$V_{sh} = -0.35X_1 + 0.03AC + 1.1 \quad (10)$$

$$V_{长英质} = 100 - V_{碳酸盐岩} - V_{sh} \quad (11)$$

式中, V_{sh} 为计算黏土含量, 单位为%; $V_{碳酸盐岩}$ 为计算碳酸盐岩含量, 单位为%; $V_{长英质}$ 为计算石英长石含量, 单位为%; X_1 为计算黏土含量过程值, 单位为%; GR 为自然伽马, 单位为API; CN 为补偿中子, 单位为%; AC 为补偿声波, 单位为 $\mu s/m$ 。

图9为利用测井资料计算的长英质、碳酸盐岩、黏土含量与岩心分析结果对比图, 从图中可以看出利用测井资料计算的矿物含量与岩心分析结果具有很好的相关性, 说明利用该方法能够有效开展页岩油储层矿物含量定量计算。

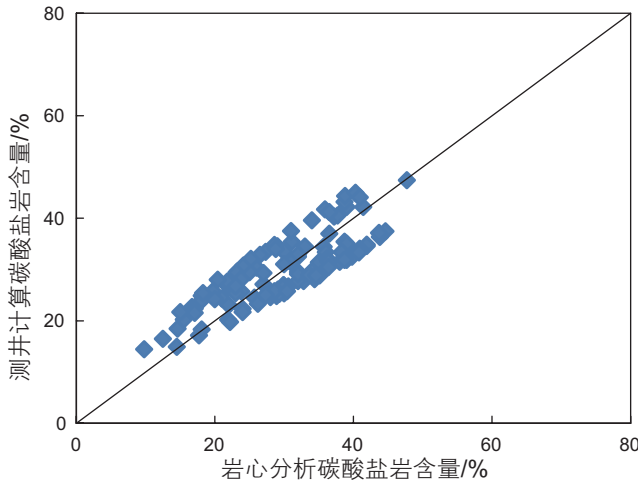


图8 岩心分析与计算碳酸盐岩含量对比图
Fig. 8 Comparison of core analysis and calculation of carbonate content

4 结论

(1) 沧东凹陷孔二段页岩油储层主要岩石类型为长英质页岩、碳酸质页岩、混合质页岩。结合不同岩石

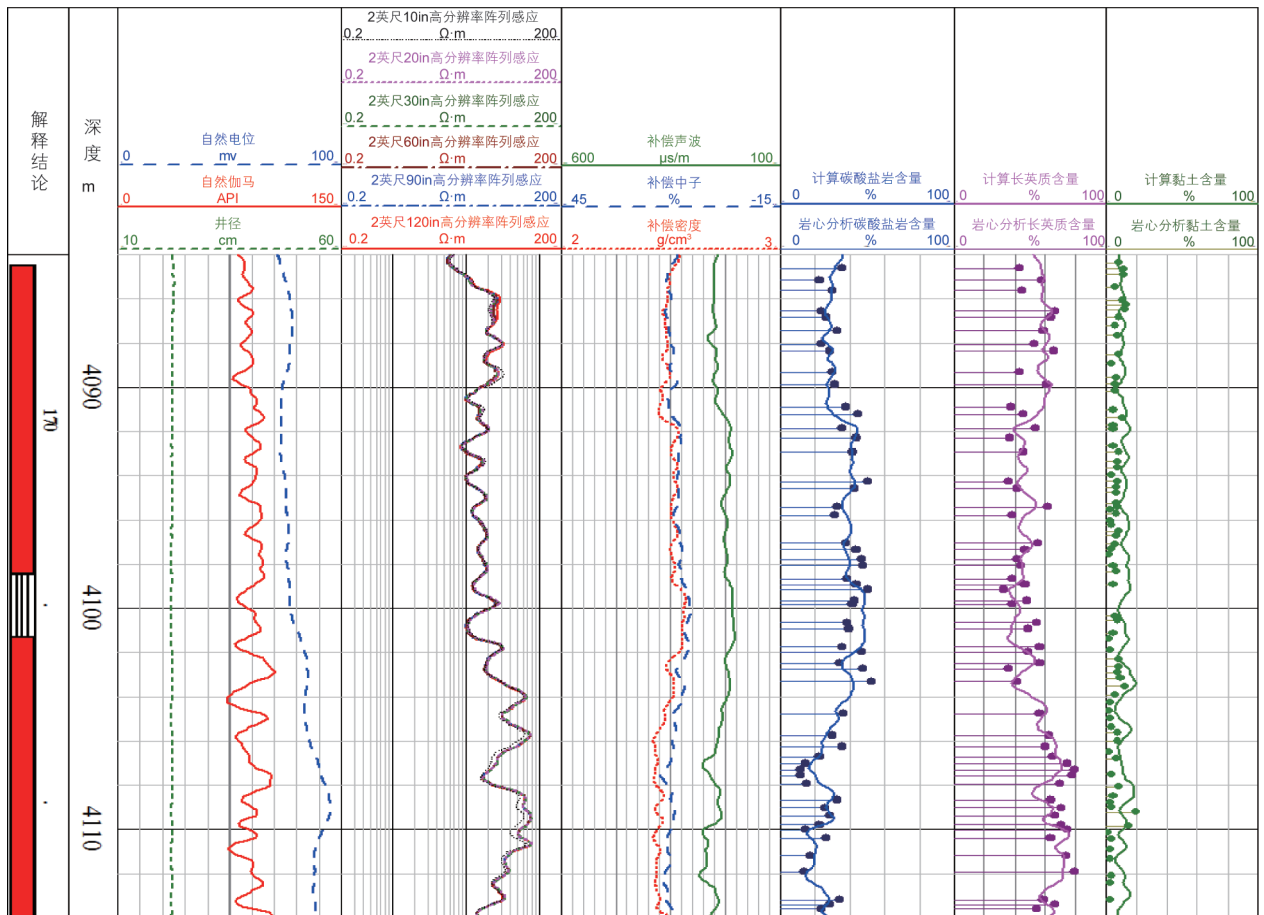


图9 岩心分析与测井计算矿物含量对比图
Fig. 9 Comparison of mineral content between core analysis and logging calculation

类型岩心及测井响应特征,建立了岩性定性识别及矿物含量定量计算方法,有效提高了利用常规测资料进行岩性评价的精度,对于闭塞湖盆页岩油储层岩性识别能力较强,能够满足地质研究对页岩油完钻井岩性识别的要求。

(2)应用建立的闭塞湖盆页岩油储层岩性综合评价技术对沧东凹陷孔二段页岩储层进行综合评价,解释结果与岩心分析结果一致性较高,为了解目标区块岩性变化特征及储层分布提供了重要的技术支撑。

参考文献

- [1] 徐祖新,张义杰,王居峰,等. 沧东凹陷孔二段常规油与致密油关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 325-333. [XU Z X, ZHANG Y J, WANG J F, et al. Relationship between conventional oil and tight oil in the second member of Kongdian formation, Cangdong Sag[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(2): 325-333.]
- [2] 周立宏,蒲秀刚,肖敦青,等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩油形成条件及富集主控因素[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(1): 1323-1332. [ZHOU L H, PU X G, XIAO D Q, et al. Geological conditions for shale oil formation and the main controlling factors for the 2nd member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(9): 1323-1332.]
- [3] 周立宏,蒲秀刚,韩文中,等. 沧东凹陷南皮斜坡孔二段沉积特征与油气勘探[J]. 成都理工大学学报, 2015, 42(5): 539-545. [ZHOU L H, PU X G, HAN W Z, et al. Sedimentary characteristics and hydrocarbon exploration of E_{K2} of Nanpi Slope area, Cangdong Sag, Huanghua Depression, North China[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2015, 42(5): 539-545.]
- [4] 蒲秀刚,周立宏,韩文中,等. 细粒相沉积地质特征与致密油勘探——以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 24-33. [PU X G, ZHOU L H, HAN W Z, et al. Geologic features of fine-grained facies sedimentation and tight oil exploration-A case from the second member of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(1): 24-33.]
- [5] 鄢继华,蒲秀刚,周立宏,等. 基于X射线衍射数据的细粒沉积岩岩石定名方法与应用[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(1): 48-54. [YAN J H, PU X G, ZHOU L H, et al. Naming method of fine-grained Naming method of fine-grained sedimentary rocks on basis of X-ray diffraction data[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(1): 48-54.]
- [6] 周立宏,蒲秀刚,邓远,等. 细粒沉积岩研究中几个值得关注的问题[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(1): 6-15. [ZHOU L H, PU X G, DENG Y, et al. Several issues in studies on fine-grained sedimentary rocks[J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(1): 6-15.]
- [7] 杨峰,宁正福,胡昌蓬,等. 页岩储层微观孔隙结构特征[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 301-311. [YANG F, NING Z F, HU C P, et al. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 301-311.]
- [8] 田华,张水昌,柳少波,等. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 419-427. [TIAN H, ZHANG S H, LIU S B, et al. Determination of organic-rich shale pore features by mercury injection and gas adsorption methods[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 419-427.]
- [9] 姜在兴,梁超,吴靖,等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039. [JIANG Z X, LIANG C, W J, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.]
- [10] 张晋言. 泥页岩岩相测井识别及评价方法[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(4): 96-103. [ZHANG J Y. Shale lithofacies logging identification and evaluation[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(4): 96-103.]
- [11] 莫修文,李舟波,潘保芝. 页岩气测井地层评价的方法与进展[J]. 地质通报, 2011, 30(2-3): 400-405. [MO X W, LI Z B, PAN B Z. Method and advance of shale gas formation evaluation by means of well logging[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2-3): 400-405.]

(责任编辑 廖广志 编辑 付娟娟)