

陶宏根,程日辉,赵小青等. 海拉尔盆地火山碎屑岩的测井响应与应用. 地球物理学报, 2011, 54(2): 534~544, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.033

Tao H G, Cheng R H, Zhao X Q, et al. Well logging response to the volcanoclastic rocks of Hailar basin and application. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2): 534~544, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.033

海拉尔盆地火山碎屑岩的测井响应与应用

陶宏根^{1,2},程日辉³,赵小青^{1,2},孙凤贤²,于振锋³

1 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

2 大庆钻探测井一公司, 大庆 163412

3 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

摘 要 海拉尔盆地中生界为熔岩-火山碎屑岩-沉积岩系列岩性组合,是测井解释层位.但是精细的岩心岩石类型描述与测井识别岩性的精度不匹配,岩心精细分层厚度往往小于测井分层的最小厚度 0.6 m.研究显示,安山岩、熔结凝灰岩、凝灰岩、沉凝灰岩、凝灰质砾岩、凝灰质砂岩和沉积岩等主要岩性具有各自的测井响应,即有特定的岩-电关系模式.交会图可以区分岩性,TH-AC 交会图至少可区分出砾岩;PE-RD 交会图可把凝灰质砾岩和凝灰质砂岩区分开;K-U 交会图可把凝灰质砾岩、粗砂岩和凝灰质粗砂岩区分开.根据岩心岩性特征及其测井响应建立的测井岩石分类可以满足测井解释的精度.按照测井岩石分类进行的岩心分层与测井分层吻合程度达 80% 以上.测井岩性分层是利用自然伽玛(GR)、补偿密度(DEN)、补偿中子(CNL)和微球形聚焦测井(MSFL)四条曲线进行的.本研究提出的 GDCM 法是综合测井岩性分层的一种方法,适合于海拉尔盆地以火山碎屑岩为主岩性的测井解释.

关键词 火山碎屑岩,测井响应,岩-电模式,海拉尔盆地

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.033

中图分类号 P631

收稿日期 2010-06-29,2011-01-29 收修定稿

Well logging response to the volcanoclastic rocks of Hailar basin and application

TAO Hong-Gen^{1,2}, CHENG Ri-Hui³, ZHAO Xiao-Qing^{1,2},
SUN Feng-Xian², YU Zhen-Feng³

1 College of Geop exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun, 130026, China

2 Daqing Drilling and Exploration Engineering Corporation No. 1 Well Logging Company; Daqing 163412, China

3 College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract The Mesozoic stratum of Hailar basin, a rock succession dominated by volcanic-sedimentary clastic rocks is focused for well logging interpretation in this paper. However, the detailed petrological classification and discription of the core rock do not match the recognizing accuracy of logging, and the thickness of detailed subdivision of the core rock is less than 0.6 m, the minimum layering thickness of logging. The study suggests that some types of rocks are with certain logging responses respectively, being models of rock-logging in Hailar basin, such as andesite, ignimbrite, tuff, sedimentary tuff, tuffaceous sandstone, tuffaceous conglomerate and sedimentary rocks. Some types of rocks can be separated from the others in the crossplots. The

基金项目 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2009CB219306)和国家自然科学基金项目(40972074)资助,大庆油田公司级项目“海拉尔盆地乌南地区测井解释方法研究”成果之一.本文获“东北亚生物演化与教育部重点实验室”、吉林大学“211”工程三期建设项目和 2009 年教育部基本科研业务经费“吉林大学创新团队发展计划”支持.

作者简介 陶宏根,男,1963 年生,教授级高级工程师,主要从事测井工程和管理工,现为在职博士生. E-mail:taohg@CNPC.com.cn

* **通讯作者** 程日辉,男,1963 年生,教授,博士生导师,主要从事沉积学和石油地质研究. E-mail:chengrh@jlu.edu.cn

crossplot of Th-AC may separate conglomerate from others at least, the crossplot of PE-RD may separate tuffaceous conglomerate and tuffaceous sandstone from others, and the crossplot of K-U may separate tuffaceous conglomerate, coarse sandstone and tuffaceous coarse sandstone each other. The logging rock classification can meet the requirement of logging interpretation, based on both the core rock and its logging response. The core rock layering has been done under the logging rock classification, and the coincidence between them is more than 80%. Four curves of logging including GR, DEN, CNL and MSFL are used in litho-logging layering. The method of GDCM, a way of integreted litho-logging layering, is effective in the logging interpretation of volcanic-sedimentary clastic rocks in Hailar basin.

Keywords Volcaniclastic rock, Response of logging, Models of rock-logging, Hailar basin

1 引言

火山碎屑岩指以火山碎屑为主的岩石,国际分类中通常将火山碎屑占岩石体积百分比定为大于 75%^[1],在我国岩石分类中其进一步划分为火山碎屑岩(火山碎屑>90%)和沉火山碎屑岩(火山碎屑 90%~50%,低于 50%为沉积岩类)^[2~4].火山碎屑主要为新生、同源和外来碎屑三大类^[5].火山碎屑沉积或火山碎屑岩是火山作用和沉积作用的共同产物,与正常沉积岩密切共生,分散在不同的沉积体系中^[6].因此存在从火山熔岩至正常沉积岩的过渡岩性.准确地识别与鉴定这些岩性是油气勘探开发的基础.

海拉尔盆地中生界布达特群、兴安岭群、铜钵庙组、南屯组和大磨拐河组为熔岩-火山碎屑岩-沉积岩的系列岩性组合^[7~10],是测井解释层位,见图 1.从岩石学角度,较为准确地区分和描述岩性是可行的,但对测井解释则存在相当的难度.这不仅是因为测井分辨率(测井分层最小厚度为 0.6 m),而且在于目前已成型的碎屑沉积岩^[11]和火山岩^[12,13]的测井响应或解释模式不完全适应火山碎屑岩和火山碎屑沉积岩.碎屑沉积岩的测井模式已经在解释岩石结构并区分正常的沉积岩性方面具有优势^[11,14],但对火山碎屑岩,由于特殊结构构造,如熔结结构、似流纹构造和火山玻璃含量及脱玻化,使得该测井解释模式不完全适应.侵入岩和火山岩(主要为熔岩)的测井解释模式在解释岩石成分和区分岩性方面取得成功^[12],但对火山碎屑岩,因混入陆源碎屑,以及凝灰质物质的类型和含量,使得该测井解释模式不完全适用.这些不适应性主要表现在:(1)不同岩性可能会有相同或近似的测井响应;(2)同样的岩性(井位或层位不同)会有不同的测井响应;(3)岩心分

层与测井分层不一致.不适应性影响到油、气、水层的准确识别.

海拉尔盆地火山碎屑岩测井研究依然处于探索之中^[15~20].海拉尔盆地是个典型的试验区,相关的研究涉及到岩性识别^[15~17]、凝灰质含量计算^[18]、储层分类和含水饱和度计算等^[19,20].本文旨在研究建

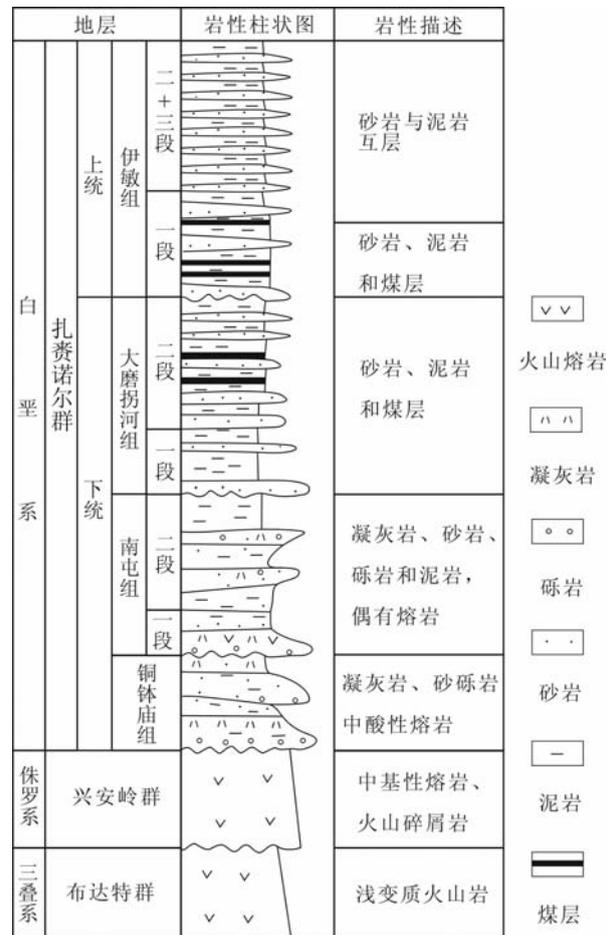


图 1 海拉尔盆地岩石地层柱状图(根据 49 口井岩心综合)

Fig. 1 The columnar section of lithostratigraphy in Hailar basin

(Based on the core data from 49 drilling wells)

立适合海拉尔盆地火山碎屑岩的测井响应模式和对应的测井岩性分类,这是相关测井解释研究的基础.

2 岩性特征

49 口井取心段岩性识别、薄片鉴定与统计确定了海拉尔盆地各组(群)(包括布达特群)总体的岩石类型丰度(表 1). 岩石类型有五类:火山熔岩、火山碎屑岩、沉积火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩和正常沉积岩. 火山碎屑沉积岩占比例最大,为 43.35%;其次是正常沉积岩,比例为 26.84%;火山碎屑岩为 17.68%;沉积火山碎屑岩为 10.02%;火山熔岩为 2.11%. 铜钵庙组和南屯组是测井解释主要层段. 铜钵庙组火山碎屑沉积岩丰度最高,其次是沉积岩和火山碎屑岩. 南二段以火山碎屑沉积岩为主,正常沉积岩次之. 南一段火山碎屑沉积岩丰度最高,其次是火山碎屑岩和沉积岩. 海拉尔盆地基本岩石类型和

特征如表 2 所示.

海拉尔盆地中生界具有特色岩性,主要表现在:砂岩是由 2~0.05 mm 范围内颗粒组成的具有碎屑结构的沉积岩石,包括凝灰质砂岩. 然而具备这样粒度和结构条件的还有凝灰岩和沉凝灰岩. 这就存在砂岩广义性问题. 在结构相似条件下,凝灰物质的成分类型和含量是区分广义性砂岩岩性的关键.

表 1 海拉尔盆地布达特群——大磨拐河组岩石构成
Table 1 Components of rocks from Budate group to Damoguaihe formation in Hailar basin

层位	火山熔岩 (%)	火山碎屑岩 (%)	沉积火山碎屑岩 (%)	火山碎屑沉积岩 (%)	沉积岩 (%)
大磨拐河组	0	21.35	14.02	50	14.63
南二段	0.86	5.75	4.6	48.85	39.94
南一段	1.57	21.33	9.2	43.05	24.85
铜钵庙组	2	16.67	7.33	46	28
兴安岭群	0	51.61	9.68	25.81	12.9
布达特群	17.57	28.38	36.49	12.16	5.41
总体	2.11	17.68	10.02	43.35	26.84

表 2 海拉尔盆地岩石分类表

Table 2 Petrological classification of Hailar basin

结构与成分分类	化学成分分类 (SiO ₂)	岩石基本类型	成岩作用	丰度 (%)	备注
火山熔岩类(熔岩基质中分布的火山碎屑 < 10%; 熔岩结构)	基性 45%~52% 中性 52%~63% 酸性 > 63%	玄武岩 安山岩 流纹岩	冷凝固结	2.11	作为端元岩石类型没细分
火山碎屑熔岩类(熔岩基质中分布的火山碎屑 > 10%; 熔结结构或碎屑熔岩结构)	基性 45%~52% 中性 52%~63% 酸性 > 63%	碎屑熔岩 角砾熔岩 凝灰熔岩	冷凝固结	0	尚没有识别出
火山碎屑岩类(火山碎屑 > 90%; 火山碎屑结构)	基性 45%~52% 中性 52%~63% 酸性 > 63%	火山角砾岩 熔结角砾岩 非熔结角砾岩 凝灰岩 熔结 粗粒凝灰岩 中粒凝灰岩 细粒凝灰岩 粉粒凝灰岩	冷凝固结 压实固结	17.68	在岩心中不能鉴别出集块岩,熔结类也区分粒级. 分级按照砾岩和砂岩标准. 凝灰岩混积严重, 分级代表优势级别
沉积火山碎屑岩类(火山碎屑: 90%~50%; 正常沉积碎屑: < 50%; 火山碎屑结构)	基性 45%~52% 中性 52%~63% 酸性 > 63% (参考应用)	沉凝灰岩 粗粒沉凝灰岩 中粒沉凝灰岩 细粒沉凝灰岩 粉粒沉凝灰岩	冷凝固结 压实固结	10.02	成分、磨圆和再旋回石英用于判断是否是正常沉积碎屑
火山碎屑沉积岩类(火山碎屑: < 50%; 正常沉积碎屑: > 50%; 碎屑结构)	不适合	凝灰质岩石 凝灰质复成分砾岩 凝灰质粗砂岩 凝灰质中砂岩 凝灰质细砂岩 凝灰质粉砂岩 凝灰质泥岩	冷凝固结 压实固结	43.35	杂基和颗粒中凝灰成分用于判断该岩石类型. 冷凝固结在砾岩中发育较多
正常沉积岩(火山碎屑: < 10%; 正常沉积碎屑: > 90%; 碎屑结构和泥状结构为主)	不适合	复成分砾岩 (> 2 mm) 粗砂岩 (2~0.5 mm) 中砂岩 (0.5~0.25 mm) 细砂岩 (0.25~0.05 mm) 粉砂岩 (0.05~0.005 mm) 泥岩 (< 0.005 mm)	压实固结	26.84	除泥岩外其他类型少见, 多为钙质代代的改造类型

砾岩是由大于 2 mm 颗粒组成的具有碎屑结构的沉积岩石。因砾石成分复杂、填隙物为凝灰质或砂泥质,以及碳酸盐交代和胶结,使复成分砾岩具有多样岩性特征。凝灰质砾岩和普通砾岩是主要类型。

凝灰岩是由小于 2 mm 的火山碎屑为主组成的岩石,包括有沉凝灰岩。然而在同一凝灰岩层中,有时会出现两种类型凝灰质的情况,如流纹质和安山质的凝灰物质混积。另外的特性是其具有宽泛的粒度区间,对应砂岩、粉砂岩和泥岩的粒度级别,但分选性较差,多为混积并具有主粒级优势,如粗粒级凝灰岩或细粒级凝灰岩。

泥岩是由颗粒小于 0.005 mm 以粘土矿物为主物质组成的岩石。泥级凝灰岩和凝灰质泥岩使这类岩石变得复杂。凝灰物质蚀变和碳酸盐交代有时也使这类泥岩面目全非。

3 测井响应

与岩心资料相比,测井资料具有连续和原位测量特点。不同测井建立一种“笔录”,它们是岩石的“标志”,因为它们表达岩石存在的性质^[14]。鉴于海拉尔盆地中生界火山碎屑岩的特性,建立测井响应分析与岩-电模式,采用多测井对比分析、综合与参数提取的试验方法。

3.1 参数交会图

交会图法目前已被广泛用于火成岩的测井解释^[21~24]。为准确获得岩性测井响应,在多种测井综合对比分析的基础上,对巴 1 井和乌 27 井目的层的岩性(显微镜薄片鉴定),读取钍、铀、钾、电阻率、光电吸收面积指数、密度等测井数据,求取平均值,用两组参数编制交会图。实践显示钍-电阻率、光电吸收面积指数-密度、光电吸收面积指数-电阻率、钾-铀和钍-声波时差等 5 种交会图在识别岩性上有效。

钍-电阻率图(Th-RD) 巴 1 井岩性主要为砾岩、凝灰质砾岩、粗砂岩、凝灰质粗砂岩、泥岩和凝灰岩。Th-RD 交会图(图 2)显示,泥岩与凝灰岩界限明显,凝灰质砾岩与砾岩也有显著差异。凝灰质砾岩的 RD 值区间为 10~15 Ωm ,砾岩的 RD 值区间为 15~20 Ωm ;泥岩的 Th 值区间为 14~18.5 ppm,凝灰岩的 Th 值区间为 6~13.8 ppm。

光电吸收面积指数-密度图(PE-DEN) 凝灰质砾岩、凝灰质砂岩、粗砂岩有较明显的界限(图 3)。凝灰质砾岩 PE 值区间为 1.6~1.93 barn/e,凝灰质砂岩为 1.92~2.72 barn/e,粗砂岩为 2.1~2.3 barn/e。

凝灰质砂岩和粗砂岩 PE 值均比凝灰质砾岩大。凝灰质砂岩大部分样本点的 DEN 值区间为 2.43~2.6 g/cm^3 ,粗砂岩为 2.34~2.4 g/cm^3 ,交叉区域明显。

光电吸收面积指数-电阻率图(PE-RD) 巴 1 井凝灰质砾岩与凝灰质砂岩的样本点和图 3 的数据点相同(图 4)。虽然凝灰质砂岩与凝灰质砾岩在电阻率、密度和中子曲线上相近,但 PE 曲线上二者有明显差异,凝灰质砾岩 PE 值比凝灰质砂岩小。凝灰质砾岩 PE 值区间为 1.6~1.95 barn/e,凝灰质砂岩 PE 值区间为 1.95~2.72 barn/e。

钾-铀图(K-U) 巴 1 井某井段凝灰质砾岩与凝灰质粗砂岩 U 曲线差异明显(图 5),但在电阻率、中子和密度曲线上难区分。凝灰质砾岩 U 值最小,粗砂岩 U 值比凝灰质砾岩大,凝灰质含砾粗砂岩 U 值最大。凝灰质砂岩 U 值区间为 0.3~0.95 ppm,粗砂岩 U 值区间为 1.2~1.7 ppm,凝灰质含砾粗砂岩 U 值区间为 1.9~3.7 ppm。

钍-声波时差图(Th-AC) 砾岩的 AC 与其他岩性有明显区别(图 6),区间为 64~76 $\mu\text{s}/\text{m}$ 。泥岩与凝灰岩有相似分布区域。晶屑凝灰岩、粉砂质泥岩、泥岩、凝灰质砂岩和凝灰质含砾砂岩的 AC 均比砾岩大。

5 种单井交会图显示,每个图至少能区分一种岩性,如 Th-AC 交会图至少可区分出砾岩;有的图可区分两种岩性,如 PE-RD 交会图可把凝灰质砾岩和凝灰质砂岩区分开;有的图可区分三种岩性,如 K-U 交会图可把凝灰质砾岩、粗砂岩和凝灰质含砾粗砂岩区分开。因此综合运用 5 种交会图可以区别出主要岩性。

3.2 几种主要岩石类型的岩-电模式

研究与分析显示,利用测井识别岩性不能达到地质的标准。在地质岩性分类的基础上,通过归并使成分相近的岩性归类,以符合测井识别精度和分辨率的要求。本项研究中测井识别岩性是:安山岩、熔结凝灰岩、凝灰岩、沉凝灰岩、凝灰质砂岩和沉积岩。

安山岩 图 7 是德 4 井安山岩层测井曲线图,深度 1994.45~1998.81 m。第一道为层位,第二道为筒次,第三道为深度,第四道为岩性,第五道为岩性描述,第六道从上到下为井径 CAL、自然伽玛 GR 和自然电位 SP,第七道从上到下为微球形聚焦 MSFL、深侧向 LLS 和浅侧向 LLD,第八道从上到下为密度 DEN、光电吸收截面指数 PE、中子 NPHI 和 DT,第九道从上到下为铀 U、钍 Th 和钾 K。

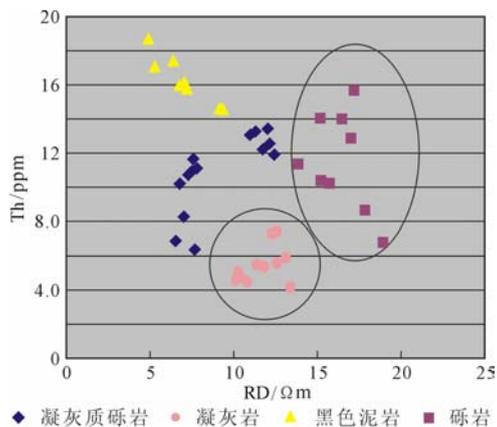


图 2 巴 1 井 Th-RD 交会图

Fig. 2 Th-RD crossplot of the Well Ba 1

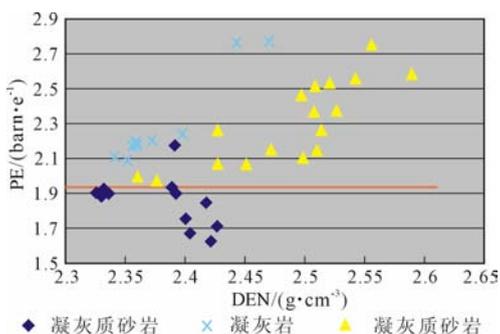


图 3 巴 1 井 PE-DEN 交会图

Fig. 3 PE-DEN crossplot of the Well Ba 1

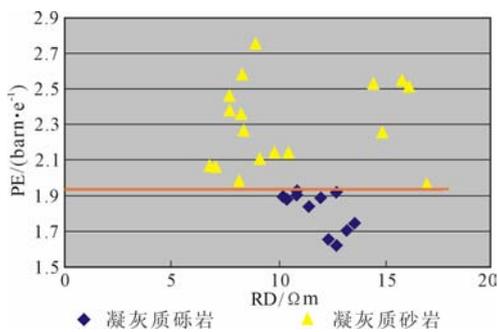


图 4 巴 1 井 PE-RD 交会图

Fig. 4 PE-RD crossplot of the Well Ba 1

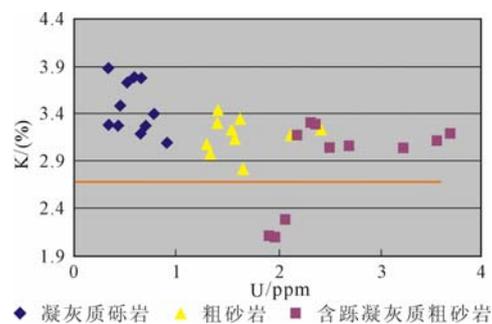


图 5 巴 1 井 K-U 交会图

Fig. 5 K-U crossplot of the Well Ba 1

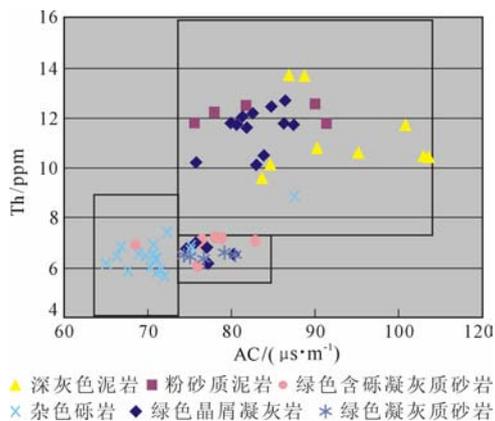


图 6 乌 27 井 Th-AC 交会图

Fig. 6 Th-AC crossplot of the Well Wu 27

井径曲线较稳定, 读数 14.0 in, 井况良好, 对测井曲线影响不大. 安山岩自然伽玛为 58.9 API; 光电吸收截面指数约为 2.3 barn/e; 中子读数约为 10.2%; 钍、铀、钾的读数分别为 2.65 ppm、1.7 ppm 和 2.07%. 自然伽玛、钍、铀、钾等各项测井曲线值均较低.

熔结凝灰岩 图 8 是贝 16 井熔结凝灰岩层测井曲线图, 深度 1351.44~1356.22 m. 井径曲线变化不大, 读数 9.5 in, 井径没有坍塌, 对测井曲线影响很小. 伽玛曲线值较高, 读数约为 129.8 API. 光电吸收截面指数约为 2.91 barn/e, 中子曲线值较高, 读数约为 31.4%. 钍、铀、钾读数分别为 8.17 ppm、2.78 ppm 和 2.56%. 整体显示为高自然伽玛, 钍、铀、钾中等, 高中子特征.

凝灰岩 图 9 是贝 16 井凝灰岩层测井曲线, 深度 1742.8~1745.995 m. 井径曲线较稳定, 读数 8.92 in, 井况良好, 对测井曲线影响不大. 自然伽玛读数为 115.5 API, 光电吸收截面指数为 2.39 barn/e, 中子读数约为 25.4%. 钍、铀、钾分别为 12.96 ppm、2.14 ppm 和 3.21%. 流纹质凝灰岩的自然伽玛值和钍值偏高. 图 2 中凝灰岩 Th 值的区间为 6~13.8 ppm, 贝 16 井凝灰岩层 Th 值落在凝灰岩 Th 值区间内.

沉凝灰岩 图 10 为沉凝灰岩层测井曲线图, 深度 2250.7~2258.55 m. 井径曲线为一直线, 读数为 11.71 in, 井眼条件较好, 测井曲线不受影响. 自然伽玛读数为 52.57 API, 光电吸收截面指数读数为 3.19 barn/e, 中子读数约为 18.13%. 钍、铀、钾读数分别为 4.09 ppm、1.16 ppm 和 1.85%. 自然伽玛值, 钍、铀、钾及中子值均中等.

凝灰质砾岩 图 11 是乌 27 井凝灰质砾岩层测井曲线图, 深度 1850.00~1264.05 m. 井径曲线是

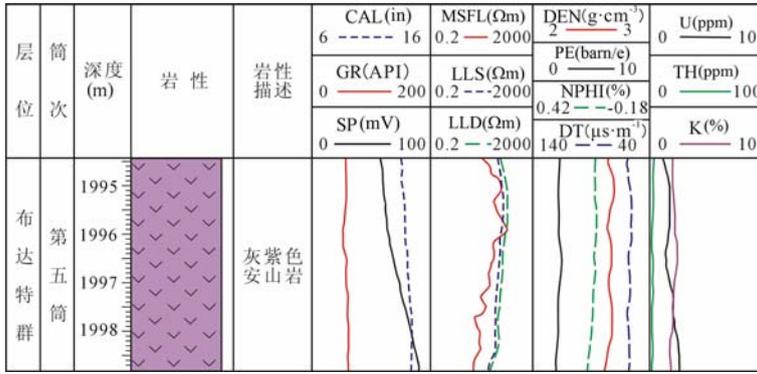


图 7 安山岩层综合测井曲线(德 4 井,1994.45~1998.81 m)

Fig. 7 The logging curves of andesite (Well De4, 1994.45~1998.81 m)

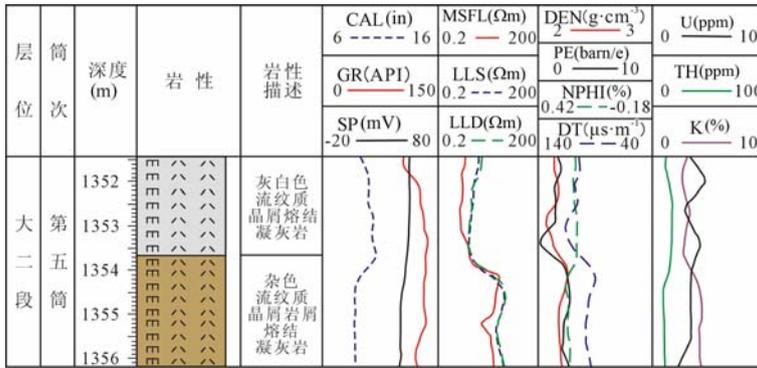


图 8 熔结凝灰岩层综合测井曲线(贝 16 井,1351.44~1356.22 m)

Fig. 8 The well logging curves of ignimbrite (Well Bei 16, 1351.44~1356.22 m)

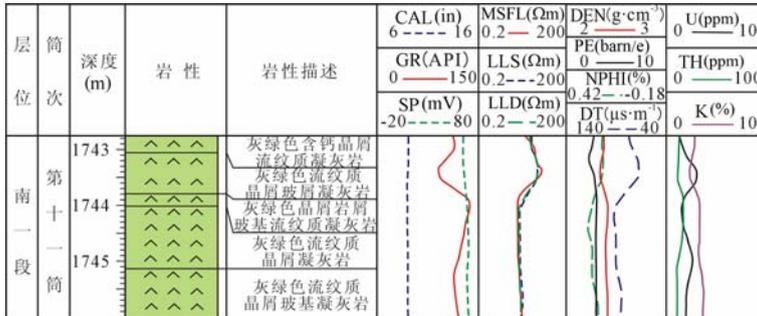


图 9 凝灰岩层综合测井曲线(贝 16 井,1742.8~1745.99 m)

Fig. 9 The well logging curves of tuff (Well Bei 16, 1742.8~1745.99 m)

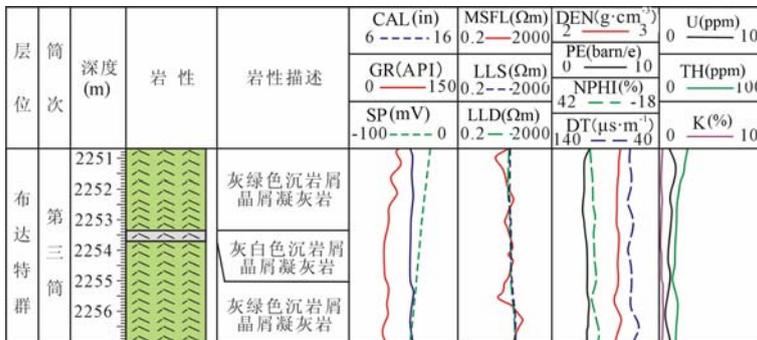


图 10 沉凝灰岩层综合测井曲线(贝 33 井 2250.70~2258.55 m)

Fig. 10 The well logging curves of sedimentary tuff (Well Bei 33, 2250.70~2258.55 m)

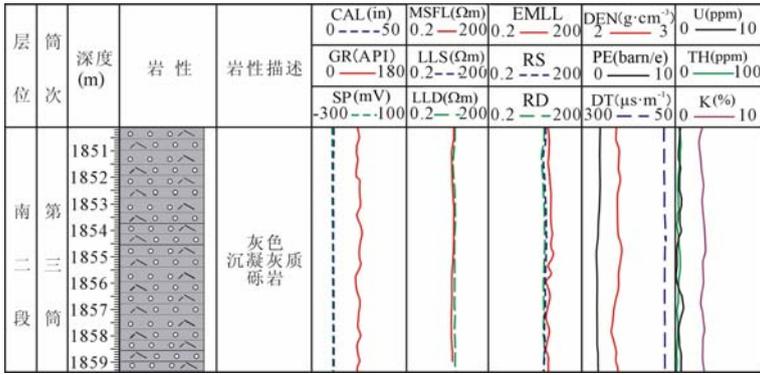


图 11 凝灰质砾岩层综合测井曲线(乌 27 井 1850.00~1859.35 m)

Fig. 11 The logging curves of tuffaceous conglomerate (Well Wu 27, 1850.00~1859.35 m)

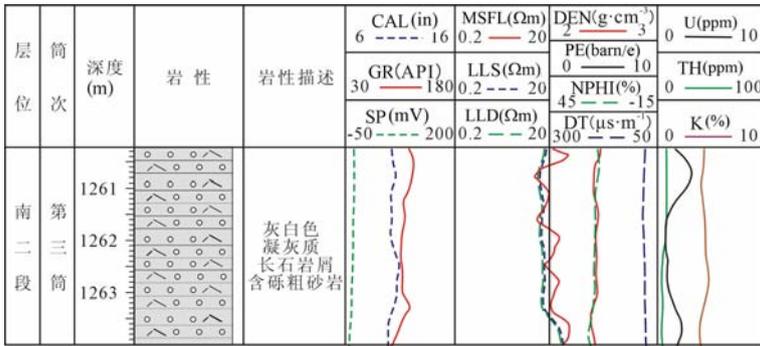


图 12 凝灰质含砾粗砂岩层综合测井曲线(乌 28 井 1260.23~1264.05 m)

Fig. 12 The logging curves of tuffaceous coarse sandstone (Well Wu 28, 1260.23~1264.05 m)

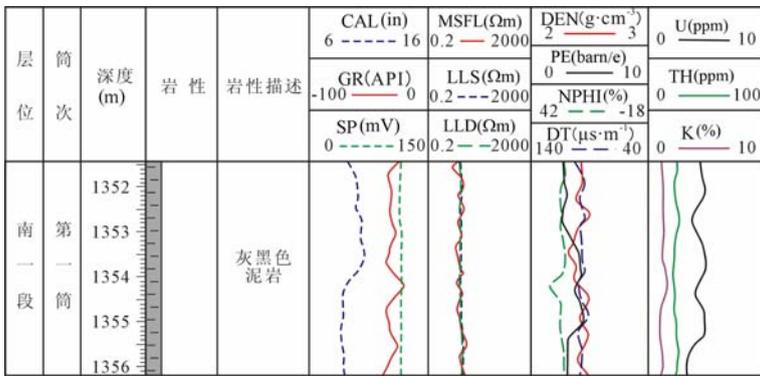


图 13 泥岩层综合测井曲线(贝 33 井 1837.00~1843.50 m)

Fig. 13 The logging curves of mudstone (Well Bei33, 1837.00~1843.50 m)

直线,读数 12.134 in,井况良好,对于测井曲线影响不大.自然伽玛读数为 89.223API,光电吸收截面指数约为 1.744 barn/e.钍、铀、钾的读数分别为 5.697 ppm、0.665 ppm 和 3.197%.自然伽玛值,钍、铀、钾等值均较低.图 3 凝灰质砾岩 PE 值区间为 1.6~1.93 barn/e,乌 27 井凝灰质砾岩层 PE 值落在凝灰质砾岩区.

凝灰质砂岩 图 12 是乌 28 井凝灰质含砾粗砂岩层测井曲线,深度 1260.23~1264.05 m.井径曲线较稳定,读数 10.48 in,井况良好,对测井曲线影响不大.自然伽玛读数为 113.6API,光电吸收截面

指数的读数为 1.96 barn/e,中子读数为 19.01%.钍、铀、钾数分别为 7ppm、1.98 ppm 和 4.58%.自然伽玛值,钍、铀、钾等值均中等.图 4 凝灰质含砾粗砂岩 U 值区间为 1.9~3.7 ppm,乌 28 井凝灰质含砾粗砂岩层 U 值是 1.98 ppm,落在凝灰质砂岩 U 值区间内.

泥岩 图 13 是贝 33 井泥岩层测井曲线图,深度 1837~1843.5 m.井径曲线为一直线,读数 9.29 in,说明井况良好,测井曲线不受影响.自然伽玛读数为 104.04API;光电吸收截面指数读数为 3.48barn/e,中

表 3 海拉尔盆地测井岩石分类表

Table 3 The rock classification of well logging of Hailar basin

分类	岩石基本类型	分类原则说明	典型岩性测井特征
火山熔岩类	玄武岩 安山岩 英安岩 流纹岩	成分分类 熔岩基质中分布的火山碎屑 <50% 熔岩结构	安山岩 GR;54~73API;PE:2.0~2.4barn/e; NPHI;10.2~24.2%;U;1.74~2.51ppm; TH;2.65~6.92ppm;K;1.6~2.3%
火山碎屑岩类	火山角砾岩 粗粒级凝灰岩 中粒级凝灰岩 细粒级凝灰岩 粉粒级凝灰岩 泥级凝灰岩	结构分类 火山碎屑:>50% 火山角砾岩:碎屑>2 mm 凝灰岩:碎屑<2 mm 凝灰岩分级标准:碎屑岩标准	凝灰岩 GR;104~170API;PE:2.02~2.56barn/e; NPHI;15.6~29.8%;U;2.04~3.41ppm; TH;11.5~24.3ppm;K;2.5~3.8%
火山碎屑沉积岩类	凝灰质砾岩 凝灰质粗粒砂岩 凝灰质中粒砂岩 凝灰质细粒砂岩 凝灰质粉砂岩 凝灰质泥岩	成分-结构分类 火山碎屑:10%~50% 碎屑结构	凝灰质砂岩 GR;70~120API;PE;1.85~2.32barn/e; NPHI;12.1~21.3%;U;1.42~2.22ppm; Th;5~11ppm;K;2.58~4.85%
正常碎屑沉积岩	砾岩 粗粒砂岩 中粒砂岩 细粒砂岩 粉砂岩 泥岩	结构分类 火山碎屑:<10% 碎屑结构和泥状结构 粒度分级同表 2	泥岩 GR;100~160API;PE;3.1~3.68barn/e; NPHI;19.2~34.5%;U;3.45~6.50ppm; Th;10.5~21.4ppm;K;2.2~3.8%

子读数为 27.65%。钍、铀、钾读数分别为 12.12 ppm、4.45 ppm 和 2.27%。自然伽玛值,钍、铀、钾等各项测井曲线值均中等偏高。

上述几种岩性及岩-电模式具有代表性,但在实际工作中能识别的岩性和运用的岩-电模式多且复杂。根据海拉尔盆地岩性和测井响应特征,建立测井岩石分类表(表 3)。表 3 较表 2 有明显的合并和简化,是前段成果的总结,也是今后工作的指导,并及时修订。

4 测井响应在岩性分层中的应用

利用测井曲线进行岩性分层是测井解释的重要内容之一。通过综合研究与实践,针对火山碎屑岩为主的海拉尔盆地岩性分层与识别,形成了可行的测井岩性分层方法(GDCM 法)。该方法主要利用自然伽玛(GR)、补偿密度(DEN)、补偿中子(CNL)和微球形聚焦测井(MSFL)四条曲线,通过 GR、MSFL 曲线数值大小导致的形态变化以及 DEN 和 CNL 曲线交叉与分离,并综合四条曲线特征进行岩性分层。

地层中岩石矿物成分不同,泥质含量不同,放射性强度也不同。泥岩对放射性物质的吸附强,自然伽玛值较高。自然伽玛值低是砂岩或储层的表现。地层中自然伽玛曲线以波浪线形式出现,呈现峰值不同

的波峰和波谷,其半幅点作为岩层分界线。中子和密度两条曲线近置反向,相交和分离的特征反映岩层物性好坏^[25]。曲线靠近一交汇,表明岩性纯,泥质含量少,物性好;曲线分离则反映物性差。岩性界线是 1/3 幅点处。微球形聚焦测井是探测较浅的电阻率曲线,对不同岩性的变化反应敏感,泥质含量高的岩层微球值低。曲线会在岩性发生变化时以折线的波峰和波谷形态发生变化。微球曲线波峰和波谷的宽度较自然伽玛要窄,其对薄岩层的反映比自然伽玛更灵敏。岩性界线亦是 1/3 幅点处。密度测井的横向探测深度较浅,为 6 in,自然伽玛测井稍大,为 8 in,而中子测井能达到 12 in,因此自然伽玛做主要分层,密度和中子互补做辅助分层。电阻率测井中,地层电阻率越大探测深度越大,因此微球形聚焦可做到精细分层。

GDCM 法遵循如下程序:首先以自然伽玛曲线的变化确定大的岩性分层(图 14a),再利用中子和密度曲线的交汇与分离所体现出的岩石物性差别对岩层更进一步划分(图 14b),最后利用微球形聚焦测井曲线对岩层反应灵敏的特点,对已划分的岩层再次精细划分(图 14c)。把三组曲线所划分的岩性分层综合起来,便得到了利用测井曲线识别出的岩性分层(图 14d)。岩层划分之后需要利用已有的岩-电模式进行岩性校正。

运用此方法对海拉尔盆地多口井进行了测井岩

性分层,同时对相应的岩心段进行细致的岩心分层.对比显示,两者匹配较好,吻合度较高.乌 24 井在 2436.7~2446.4 m(9.7 m 长)进行测井岩性分层,并与岩心分层进行了对比(图 15).其中,测井分层与岩心分层有 8.6 m 相一致,吻合度达 88.66%;存在 1.1 m 误差,误差率为 11.34%.误差存在的原因是:(1)半幅点和 1/3 幅点的分界与实际界线有出入;(2)测井分层最小厚度一般为 0.6 m,即使最小分层达到 0.2 m,也与岩心厘米级分层的精度相差甚远;(3)岩性识别存在误差,尤其是凝灰岩和凝灰质砂岩方面,需要利用已有岩-电模式校正.

5 讨论和结论

大庆探区火山岩和火山碎屑岩已成为当前油气

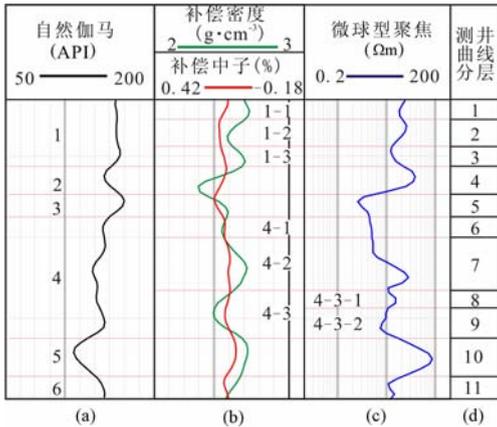


图 14 应用自然伽玛、补偿密度、补偿中子和微球形聚焦曲线进行岩性分层的方法

Fig. 14 The method of litho-layering of logging using GR, DEN, CNL and MSFL (GDCM)

勘探的主要目标之一,地质-地球物理综合研究得到广泛开展^[26~28].海拉尔盆地岩心岩性与对应测井的综合分析可以建立一些岩-电关系模式,并得到应用.本文由于建立了测井岩性分类,采用 GDCM 法进行测井岩性分层,同时综合岩-电关系模式分析,在岩性识别上较前期研究增加了适应性和准确性.然而,火山碎屑岩的特殊性(已前述)使建立的岩-电模式应用受到一定的限制.在凝灰质砂岩中凝灰质的类型与含量、成岩作用(尤其是玻璃质的脱玻化作用、凝灰物质的蚀变和碳酸盐的交代作用)^[6]、储集岩孔渗特性^[29,30]等是影响测井解释的主要地质因素.为此需要:(1)深化岩-电关系研究,建立综合模式,进一步提高测井岩性分层与岩石地层的符合度;(2)加强以孔渗结构分析为核心的储集岩分类和分级研究,建立综合模式,进一步提高以粗碎屑岩为主的储集岩测井研究精度,其在油气勘探开发中意义更大.

本文所提出的测井岩性分层方法采用了油气勘探开发中普遍运用的测井类型,因此对其他盆地或地区是有借鉴或参考意义的.但岩-电模式的应用需要依据具体的岩石特征和测井响应,同时要结合成像测井和核磁共振测井等新技术^[31~35].

通过海拉尔盆地火山碎屑岩及其测井响应的研究,取得的结论是:

(1)海拉尔盆地以火山碎屑岩为主的地层具有复杂特殊的岩性特征,地质的岩石类型划分不完全适应测井解释,建立测井岩石分类是需要的.

(2)几种主要岩性,安山岩、熔结凝灰岩、凝灰岩、沉凝灰岩、凝灰质砂岩和沉积岩具有各自的测井响应,可以建立岩-电关系模式.

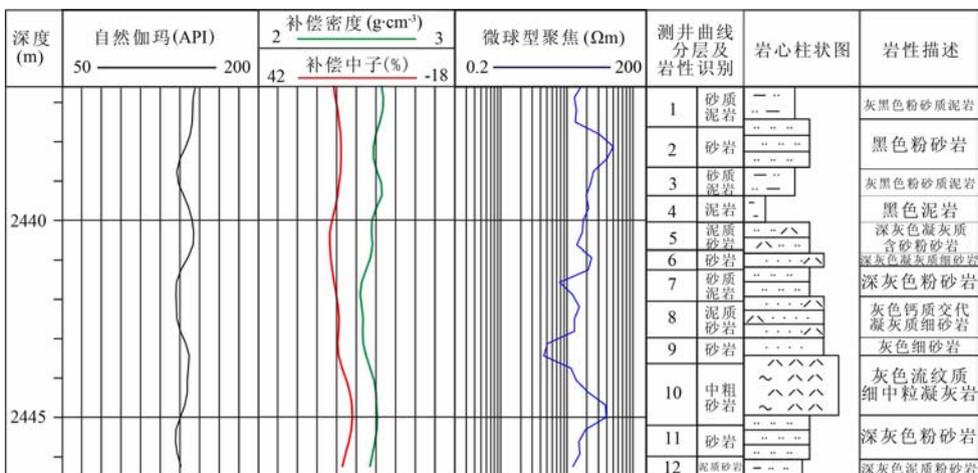


图 15 乌 24 井测井曲线岩性分层与岩心观察对比

Fig. 15 Comparison of the litho-layering of logging and the subdivision of core rocks of well Wu 24

(3)测井岩性分层法(GDCM法)是一种适合本地区火山碎屑岩岩性分层的有效方法。

参考文献(References)

- [1] Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. London: Blackwell, 1989
- [2] 王璞珺, 郑常青, 舒萍等. 松辽盆地深层火山岩岩性分类方案. 大庆石油地质与开发, 2007, **26**(4): 17~22
Wang P J, Zheng C Q, Shu P, et al. Classification of deep volcanic rocks in Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing* (in Chinese), 2007, **26**(4): 17~22
- [3] 王璞珺, 吴河勇, 庞颜明等. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, **36**(5): 805~812
Wang P J, Wu H Y, Pang Y M, et al. Volcanic facies of Songliao basin: Sequence, mode and the quantitative relationship with porosity & permeability of volcanic reservoir. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2006, **36**(5): 805~812
- [4] 孙善平, 刘永顺, 钟蓉等. 火山碎屑岩分类评述及火山沉积学研究展望. 岩石矿物学杂志, 2001, **20**(3): 313~317
Sun S P, Liu Y S, Zhong R, et al. Classification of pyroclastic rocks and trend of volcanic sedimentology: A review. *Acta Petrologica et Mineralogica* (in Chinese), 2001, **20**(3): 313~317
- [5] Einsele G. Sedimentary Basins: Evolution, Facies and Budget. Berlin, Springer, 2000. 64~74
- [6] 程日辉, 刘万洙, 王璞珺等. 松辽盆地东缘下白垩统营城组二段火山碎屑沉积的过程、相和结构. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, **37**(6): 1166~1175
Cheng R H, Liu W Z, Wang P J, et al. Processes, facies and architecture of the Early Cretaceous pyroclastic deposits of the second member, Yingcheng Formation, the eastern margin of the Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2007, **37**(6): 1166~1175
- [7] 程日辉, 沈艳杰, 颜景波等. 海拉尔盆地火山碎屑岩的成岩作用. 岩石学报, 2010, **26**(1): 0047~0054
Cheng R H, Shen Y J, Yan J B, et al. Diagenesis of volcanoclastic rocks in Hailaer basin. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010, **26**(1): 47~54
- [8] 吴河勇, 李子顺, 冯子辉等. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷构造特征与油气成藏过程分析. 石油学报, 2006, **27**(增刊): 1~6
Wu H R, Li Z S, Feng Z H, et al. Analysis on structural features and reservoir-forming process of Wuerxun and Beier sags in Hailaer Basin. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2006, **27**(Suppl.): 1~6
- [9] 刘立, 高玉巧, 曲希玉等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷无机 CO₂ 气储层的岩石学与碳氧同位素特征. 岩石学报, 2006, **22**(8): 2229~2236
Liu L, Gao Y Q, Qu X Y, et al. Petrology and carbon-oxygen isotope of inorganic CO₂ gas reservoir in Wuerxun depression, Hailaer basin. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2006, **22**(8): 2229~2236
- [10] 曹瑞成, 李军辉, 卢双舫等. 海拉尔盆地呼河湖凹陷白垩系层序地层特征及沉积演化. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, **40**(3): 535~541
Cao R C, Li J H, Lu S F, et al. Sequence stratigraphic character and sedimentary evolution in Cretaceous in Huhehu depression in Hailaer basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2010, **40**(3): 535~541
- [11] 李舟波. 地球物理测井数据处理与综合解释. 长春: 吉林大学出版社, 2003
Li Z B. Geophysical Logging Data Processing and Comprehensive Interpretation (in Chinese). Changchun: Jilin University Press, 2003
- [12] 潘保芝, 薛林福, 李舟波等. 裂缝性火成岩储层测井评价方法与应用. 北京: 石油工业出版社, 2003
Pan B Z, Xue L F, Li Z B, et al. Evaluation and Application of Logging to the Fractured Igneous Reservoirs (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2003
- [13] 陈小军, 罗顺张, 张凌. 火山熔岩特征及岩性识别方法. 油气地球物理, 2009, **7**(2): 18~21
Chen X J, Luo S S, Zhang L. The lithology identification method and characteristics of volcanic lava. *Petroleum Geophysics* (in Chinese), 2009, **7**(2): 18~21
- [14] Serra O. Diagraphies Differees Bases de I interpretation Tome- Interpretation des donnees diagraphiques. Elf-Aquitaine, 1985. 1~50
- [15] 陈军, 范晓敏, 莫修文. 火山碎屑岩岩性的测井识别方法. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, **37**(增刊): 99~101
Chen J, Fan X M, Mo X W. The Research of volcanoclastic rock lithologic identification based logging. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2007, **37**(Suppl.): 99~101
- [16] 张美玲, 邵阳, 高柏原等. 海拉尔盆地含火山岩地层主要岩性分布及测井响应分析. 中国石油勘探, 2009, **2**: 50~54
Zhang M L, Shao Y, Gao B Y, et al. Major lithological distribution and log response analysis of volcanic rock bearing strata in Hailaer Basin. *China Petroleum Exploration* (in Chinese), 2009, **2**: 50~54
- [17] 张涛, 莫修文. 基于交会图与模糊聚类算法的复杂岩性识别. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, **37**(增刊): 109~113
Zhang T, Mo X W. Complex lithologic identification based on cross plot and fuzzy clustering algorithm. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2007, **37**(Suppl.): 109~113
- [18] 欧霞, 赵志伟, 鲁红等. 火山碎屑沉积岩储层泥质与凝灰含量计算方法研究. 测井技术, 2009, **33**(4): 371~373
Ou X, Zhao Z W, Lu H, et al. Computation method for shale and tuff content in reservoir with pyroclastic sedimentary rock. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2009, **33**(4): 371~373

- [19] 钟淑敏,刘传平,朱建华等.应用核磁共振测井进行海拉尔地区储层分类.测井技术,2008,**32**(2):191~195
Zhong S M, Liu C P, Zhu J H, et al. Reservoir classification using nuclear magnetic resonance logging in Hailaer Basin, Daqing Oilfield. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2008,**32**(2):191~195
- [20] 张晓峰,潘保芝,范晓敏等.海拉尔盆地南屯组凝灰质砂岩储层含水饱和度计算方法.测井技术,2009,**33**(4):345~349
Zhang X F, Pan B Z, Fan X M, et al. Computational method of saturation of the tuffaceous sandstones reservoir of Nantun group in Hailar Basin. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2009,**33**(4):345~349
- [21] Khatchikian A. Log evaluation of oil-bearing volcanic rock. Expanded Abstracts of 23rd Annual SPWLA Logging Meeting, 1982, AA
- [22] 潘保芝,李舟波,付有升等.测井资料在松辽盆地火成岩岩性识别和储层评价中的应用.石油物探,2009,**48**(1):48~56
Pan B Z, Li Z B, Fu Y S, et al. Application of logging data in lithology identification and reservoir evaluation of igneous rock in Songliao basin. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2009,**48**(1):48~56
- [23] 赵建,高福红.测井资料交会图在火山岩岩性识别中的应用.世界地质,2003,**22**(2):136~140
Zhao J, Gao F H. Application of crossplots based on well log data in identifying volcanic lithology. *World Geology* (in Chinese), 2003, **22**(2):136~140
- [24] 刘俊田,焦立新,张日供等.三塘湖盆地牛东区块石炭系火山岩储集层测井评价.天然气地球科学,2009,**20**(4):518~524
Liu J T, Jiao L X, Zhang R G, et al. Well logging evaluation of carboniferous volcanic reservoirs in Niudong block, Santanghu Basin. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 2009, **20**(4):518~524
- [25] 马正.油气测井地质学.武汉:中国地质大学出版社,1994:37~38
Ma Z, *Petroleum Logging Geology* (in Chinese). Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994. 37~38
- [26] 裴江云,刘洪,李幼铭等.共反射弧叠加方法在火山岩成像中的应用.地球物理学报,2004,**47**(1):106~111
Pei J Y, Liu H, Li Y M, et al. Application of seismic data common reflection arc stack method in imaging of igneous rocks. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004,**47**(1):106~111
- [27] 唐华凤,王璞瑛,姜传金等.松辽盆地白垩系营城组隐伏火山机构物理模型和地震识别.地球物理学进展,2007,**22**(2):530~536
Tang H F, Wang P J, Jiang C J, et al. Physical model and seismic recognition of concealed volcanic edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Cretaceous, NE China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(2):530~536
- [28] 王璞瑛,冯志强,刘万洙等.盆地火山岩:岩性·岩相·储层·气藏·勘探.北京:科学出版社,2008.99~102
Wang P J, Feng Z Q, Liu W Z, et al. Volcanic Rocks in Petroliferous Basins: Petrography, Facies, Reservoir, Pool, Exploration (in Chinese). Beijing: Science Press, 2008. 99~102
- [29] 张海龙,刘忠海,周灿灿等.低孔低渗储集层岩石物理分类方法的讨论.石油勘探与开发,2008,**35**(6):763~768
Zhang L H, Liu Z H, Zhou C C, et al. A method for petrophysical classification for low porosity and low permeability reservoirs. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2008, **35**(6):763~768
- [30] 张海龙,周灿灿,刘国强等.不同类型低孔低渗储集层的成因及物性差异和测井评价对策.石油勘探与开发,2007,**34**(6):702~710
Zhang H L, Zhou C C, Liu G Q, et al. Early origin and property differences of various types of low-porosity and low-permeability reservoirs and well logging evaluation strategies. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2007, **34**(6):702~710
- [31] 秦绪英,宋波涛.测井技术现状与展望.勘探地球物理进展,2002,**1**(25):26~34
Qin X Y, Song B T. Current Status and prospect of logging techniques. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 2002, **1**(25):26~34
- [32] 赵平,张美玲,刘甲辰等.2004~2005年国内外测井技术现状及发展趋势.测井技术,2006,**30**(5):385~389
Zhao P, Zhang M L, Liu J C, et al. Status and trends of logging techniques at home and abroad. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2006, **30**(5):385~389
- [33] Boqin Sun. Two-dimensional NMR logging and field test results. SPWLA 45th Annual Symposium, 2004, Paper KK
- [34] 张元中,肖立志.新世纪第一个五年测井技术的若干进展.地球物理学进展,2004,**19**(4):828~836
Zhang Y Z, Xiao L Z. Some progress of well logging techniques during the first five years of the new millennium. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004, **19**(4):828~836
- [35] Lofts J. A new micro-resistivity imaging device for use in oil based mud. SPWLA 43rd Annual Symposium, Paper II. Transactions. June 2002[CD-ROM]