

doi: 10.12029/gc20190516

胡丁玉, 邹长春, 彭诚, 王稳石, 吕庆田, 侯贺晟, 朱永宜, 张金昌, 张恒春, 丁娱娇, 林峰, 崔立伟, 窦如胜, 徐常民, 卓坤, 杨金磊. 2019. 松科二井火石岭组地层岩石物理学特征研究[J]. 中国地质, 46(5): 1161–1173.

Hu Dingyu, Zou Changchun, Peng Cheng, Wang Wenshi, Lü Qingtian, Hou Hesheng, Zhu Yongyi, Zhang Jinchang, Zhang Hengchun, Ding Yujiao, Lin Feng, Cui Liwei, Dou Rusheng, Xu Changmin, Zhuo Kun, Yang Jinlei. 2019. Petrophysical characteristics of Huoshiling Formation from CCSD SK-2 in the Songliao Basin of Northeast China[J]. Geology in China, 46(5): 1161–1173(in Chinese with English abstract).

松科二井火石岭组地层岩石物理学特征研究

胡丁玉^{1,2}, 邹长春^{1,2}, 彭诚^{1,2}, 王稳石³, 吕庆田⁴, 侯贺晟⁴, 朱永宜³, 张金昌³,
张恒春³, 丁娱娇⁵, 林峰⁵, 崔立伟⁶, 窦如胜⁵, 徐常民⁵, 卓坤⁵, 杨金磊⁵

(1. 中国地质大学(北京)地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 3. 中国地质调查局勘探技术研究所, 河北 廊坊 065300; 4. 中国地质科学院, 北京 100037; 5. 中国石油集团测井有限公司天津分公司, 天津 300280; 6. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北 燕郊 065201)

摘要: 松辽盆地资源与环境深部钻探工程是针对白垩纪古气候与古环境研究、地球深部资源调查以及基础地质研究等一系列科学问题而实施的科学钻探。松科二井是松辽盆地科学钻探工程的主体钻孔, 设计的测井项目齐全, 采集了丰富、连续、原位的地球物理测井资料。本文主要利用该孔的测井资料研究深部火石岭组地层岩石物理学特征; 结合实验室岩心核磁共振测试结果, 分析不同岩性储层的孔隙结构特征。研究表明, 火石岭组地层主要发育安山岩、凝灰岩、复成分砾岩和凝灰质泥岩, 其中火成岩岩相以爆发相和喷溢相为主, 安山岩和复成分砾岩表现为高电阻率、低声波时差特征, 凝灰岩为低电阻率、高声波时差特征, 凝灰质泥岩电阻率最低; 储层整体上具有低孔低渗的特点, 但凝灰岩储层小孔和中孔发育, 物性相对较好, 是较为有利的储层。研究结果为进一步评价松辽盆地深部油气资源和地层结构提供了有力支持。

关键词: 松辽盆地; 松科二井; 岩石物理; 地球物理测井; 孔隙结构特征; 深地勘查工程

中图分类号: P313 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)05-1161-13

Petrophysical characteristics of Huoshiling Formation from CCSD SK-2 in the Songliao Basin of Northeast China

HU Dingyu^{1,2}, ZOU Changchun^{1,2}, PENG Cheng^{1,2}, WANG Wenshi³, LÜ Qingtian⁴, HOU Hesheng⁴,
ZHU Yongyi³, ZHANG Jinchang³, ZHANG Hengchun³, DING Yujiao⁵, LIN Feng⁵, CUI Liwei⁶,
DOU Rusheng⁵, XU Changmin⁵, ZHUO Kun⁵, YANG Jinlei⁵

(1. Key Laboratory of Geo-detection, China University of Geosciences (Beijing), Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Institute of

收稿日期: 2019-03-10; 改回日期: 2019-09-10

基金项目: 中国地质调查局地质调查专项(12120113017600)、国家自然科学基金委重大项目专题(41790455-1)和中国地质调查局公益性基础地质调查项目(DD20179362)联合资助。

作者简介: 胡丁玉, 女, 1995年生, 硕士生, 地球探测与信息技术专业; E-mail: 18781941435@163.com。

通讯作者: 邹长春, 男, 1969年生, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石物理、测井与井中物探、油气勘探和科学钻探等领域的教学和科研工作; E-mail: zoucc@cugb.edu.cn。

Exploration Techniques, China Geological Survey, Langfang 065300, Hebei, China; 4. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 5. Tianjin Branch, CNPC Logging, Tianjin 300280, China; 6. Cores and Samples Center of Natural Resources, China Geological Survey, Yanjiao 065201, Hebei, China)

Abstract: The Continental Scientific Drilling Project in the Songliao Basin was aimed at solving a series of scientific problems involved in Cretaceous paleoclimate and paleoenvironmental research, the development of deep exploration techniques, and the earth's deep resource survey. As the main borehole of the scientific drilling project of Songliao Basin, SK-2 has collected continuous and in-situ geophysical log data. In this paper, geophysical log data were used to reveal the range of petrophysical parameters of rocks in Huoshiling Formation. Combined with laboratory core NMR test analysis, the authors studied the pore structure characteristics of different igneous reservoirs. The results show that the Huoshiling Formation mainly consists of andesite, tuff, complex conglomerate and tuff mudstone. The igneous facies are dominated by the explosive facies and the effusion facies. The andesite and complex conglomerate are characterized by high resistivity and low acoustic wave time difference. The characteristics of the tuff are low resistivity and high acoustic time difference, and the tuff mudstone has the lowest resistivity. The reservoir has the characteristics of low porosity and low permeability, but the tuff reservoir has developed small and medium pores and has relatively good physical properties, and hence it is a favorable reservoir. The research results provide strong support for further evaluation of deep oil and gas resources and stratigraphic structure in the Songliao Basin.

Key words: Songliao Basin; SK-2; petrophysical characteristics; geophysical logging; pore structure characteristics; deep exploration engineering

About the first author: HU Dingyu, female, born in 1995, master candidate, majors in geodetection and information technology; E-mail: 18781941435@163.com.

About the corresponding author: ZOU Changchun, male, born in 1969, professor, supervisor of doctor candidates, mainly engages in teaching and study of petrophysics, logging and borehole geophysics, oil and gas exploration and scientific drilling; E-mail: zoucc@cugb.edu.cn.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 12120113017600), National Natural Science Foundation of China (No. 41790455-1) and China Geological Survey Public Welfare Basic Geological Survey Program (No. DD20179362).

1 引 言

松辽盆地科学钻探工程以调查松辽盆地深部能源、建立松辽盆地深部地层结构剖面、寻求白垩纪气候变化地质证据、研发深部探测技术为主要目标,是中国大陆获得 ICDP 资助的第三个国际大陆科学钻探工程(王成善等,2008;王璞珺等,2017;侯贺晟等,2018)。该工程计划通过“两井四孔”获取完整的白垩纪陆相沉积记录。作为工程的主体钻孔,松科二井是全球第一口钻穿白垩纪陆相地层的大陆科学钻井,已钻至盆地基底。松科二井于2014年4月13日正式开钻,历时4年多,采集到了全面且优质的测井资料,获得了地下7018.0 m的原位、连续、高分辨率的地球物理参数,可建立松辽盆地内深度范围最大、参数最全的测井岩石物理剖面;同时,该井完成钻井取心进尺4279.73 m,获得岩心总长4134.81 m,取心收获率96.61%,丰富的取心资料为开展岩石物理学特征研究提供了条件(Zhu et al., 2018)。

松科二井钻遇两套火成岩地层,一套位于营城组,另一套位于火石岭组。营城组火成岩是天然气勘探开发的重点层位,例如徐深气田营城组发育的火成岩储层分布范围广、物性好、产能高(门广田等,2014)。在岩石物理研究与测井分析方面,前人针对营城组火成岩开展了大量工作,取得了丰硕的研究成果(黄布宙等,2001;蔡先华等,2002;潘保芝等,2007),然而火石岭组尚未进行此方面的研究。因此,本文综合利用测井和地质录井等资料,开展松科二井东孔火石岭组火成岩地层岩石物理学研究,分析电阻率、密度、声波速度及声波阻抗等参数特征;同时通过实验室岩心核磁共振测试,对不同岩性储层的孔隙结构进行分析,为探寻地下深部资源提供支持。

2 地质背景

松辽盆地现今位于中国东北部,在晚白垩世位于欧亚大陆东部,是世界上发育时间最长的陆相盆

地,同时保存了完整的白垩系陆相沉积记录(Wang et al., 2013b)。松辽盆地的构造演化主要经历了晚侏罗世热隆张裂,早白垩世伸展断陷,中—早白垩世热沉降拗陷和晚白垩世构造反转四个阶段。三叠系到晚侏罗系时期为构造演化中的隆起阶段,受燕山运动的影响,发生了大规模的断块式升降运动;盆地西部的生长断裂活动强烈,东部的生长断裂活动较弱,断裂活动为该时期的主要特征,并且岩浆活动强烈,伴有火山喷发(胡望水等, 2005; Zhu et al., 2016)。根据盆地的性质和盖层的区域地质特征,松辽盆地可划分为6个一级构造单元,分别为中央拗陷、西部斜坡、西南隆起、东南隆起、东北隆起和北部倾没区(高有峰等, 2008)。

松科二井 (125°21'47.03" E, 46°14'26.89" N)位于松辽盆地东南断陷区徐家围子断陷带宋站鼻状构造带。徐家围子断陷带西侧紧靠中央古隆起,宋站、杏山和薄荷台3个凹陷中心也由宋站和丰乐两个低隆起相分隔,东侧与朝阳沟、尚家隆起带过渡,具有三凹两隆的断陷格局(殷进垠, 2002)。宋站鼻状构造是长期发育的由北东向南西方向倾没的鼻状构造,西部与汪家屯构造相邻(高有峰等, 2009)。根据区域地层特征、邻井钻探结果和已有的地质录井及测井资料,该孔钻遇的地层自下而上依次为:基底、火石岭组(J_3h)、沙河子组(K_1sh)、营城组(K_{1yc})、登娄库组(K_1d)、泉头组(K_2q)、青山口(K_2qn)、姚家组(K_2y)、嫩江组(K_2n)、四方台组和明水组(K_2s-m)(图

1)。关于火石岭组的地层年代归属问题,一些学者认为该地层横跨上侏罗统一白垩统,也有一些学者认为应当归于侏罗系或下白垩统(顾知微等, 1982; 孙革等, 2000; 黄清华等, 2011; 瞿雪姣等, 2014;)。本文将火石岭组归于侏罗系进行研究。

火石岭组沉积体系主要为冲积扇,处于断陷盆地形成初期,湖盆水体较浅,主要形成砂砾岩、砂岩及火成岩等储层。在断陷时期,沉积物其中一个重要特征是火山岩、火山碎屑岩发育(王璞珺, 2015)。结合地质录井和钻井取心资料,火石岭组地层发育的岩性主要为火成岩、少量沉积岩与浅变质沉积岩等。

3 岩性划分及测井、地震响应特征

研究区火石岭组时期断裂活动强烈,形成大量火山岩及火山碎屑岩,其上覆地层沙河子组主要发育暗色泥岩和砂砾岩,下伏基底主要由中深程度变质岩及花岗岩组成(吴福元等, 2000; 裴福萍等, 2008)。本文以前人给出的火石岭组分层标志为参考(朱德丰等, 2007),利用测井资料对松科二井东孔火石岭组顶底界进行划分,其顶界为5720.4 m、底界为6242.4 m,总厚度为522.0 m。

3.1 岩性划分依据

根据岩心观察与岩屑录井资料,松科二井东孔火石岭组地层发育火山岩、复成分砾岩和泥岩(图2)。其中,火山岩主要有灰绿、杂色安山岩,深灰

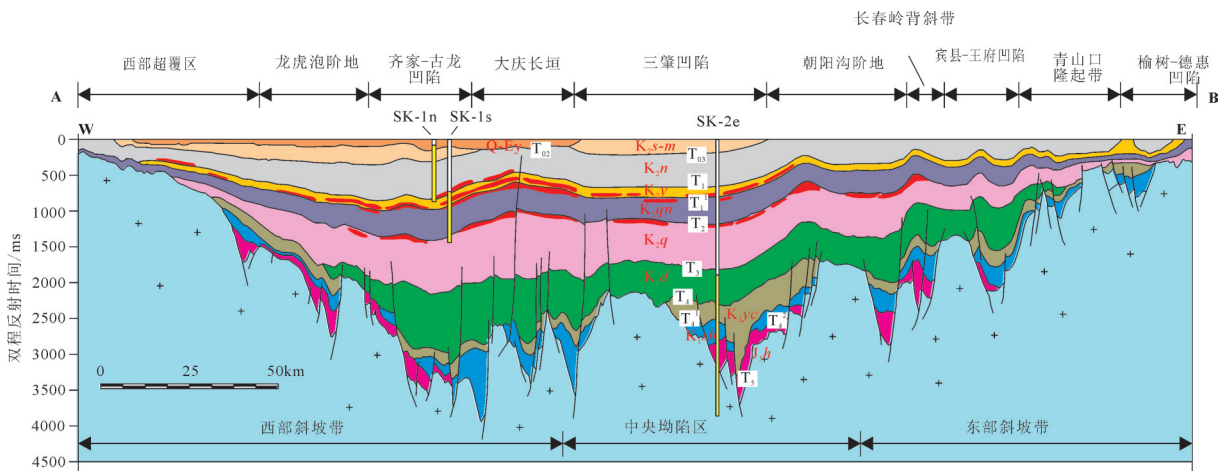


图1 “松辽盆地大陆深部科学钻探”井位及松辽盆地纵剖面图(据 Wang et al., 2013a)

松科二井中的黄色层段为取心层段,红色条带代表油层, T02-5 表示地震反射层位

Fig.1 Borehole distribution of deep continental scientific drilling engineering and structural cross section across the central part of the Songliao Basin based on regional seismic analyses (after Wang et al., 2013a)

The yellow bar in SK-2 borehole is coring interval. The red regions indicate oil reservoirs. T02-5 is seismic horizons

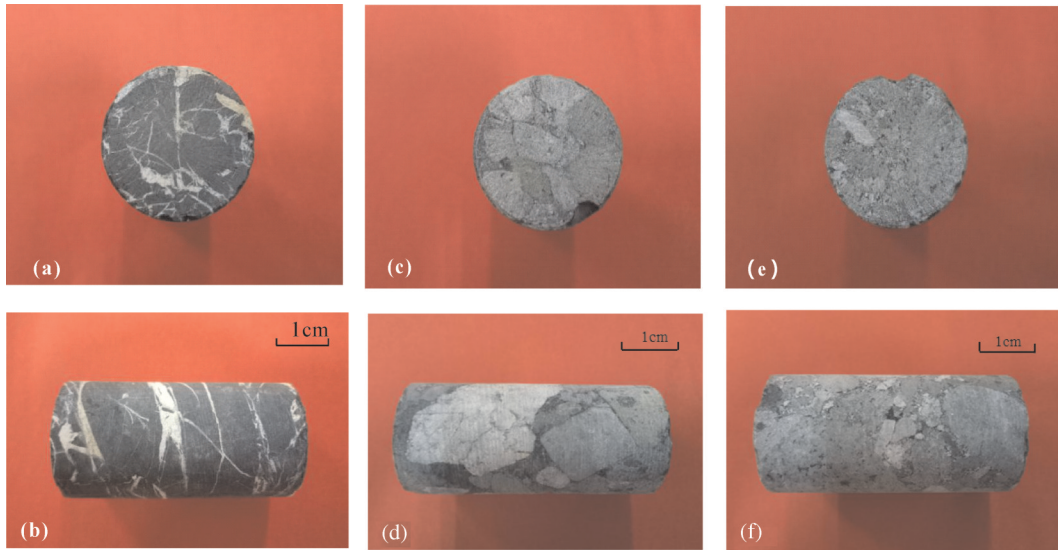


图2 火石岭组地层典型岩心照片

a—黑色凝灰质泥岩(顶面); b—黑色凝灰质泥岩(侧面); c—杂色火山角砾岩(顶面); d—杂色火山角砾岩(侧面);
e—杂色安山质角砾岩(顶面); f—杂色安山质角砾岩(侧面)

Fig.2 Typical core photographs in Huoshiling Formation

a—Black tuff mudstone (top); b—Black tuff mudstone (lateral); c—Variegated volcanic breccia (top);

d— Variegated volcanic breccia (lateral); e—Variegated andesite breccia (top); f—Variegated andesite breccia (lateral)

绿、杂色安山质火山角砾岩,深灰色安山玄武岩及深灰色凝灰岩;杂色复成分砾岩主要岩石成分为花岗岩、安山岩和板岩等;泥岩类主要为灰黑色凝灰质泥岩、灰黑色粉砂质泥岩和黑色泥岩互层。结合丰富的测井资料,可以作为火石岭组地层岩性划分的依据。

3.2 测井岩性识别与划分

由于井眼扩径会影响测井测量值,在统计不同岩性地层测井响应特征结果之前需要对井眼扩径层段的测井资料进行校正。其中自然伽马(GR)校正采用井眼校正图版,密度(DEN)校正采用重构技术公式:

$$\rho = C_1 \times \rho_1 + C_2 \times \rho_2 + V_{sh} \times \rho_{sh} + POR \times \rho_f \quad (1)$$

式中: ρ 为重构密度曲线,单位为 g/cm^3 ; C_1 、 C_2 分别为矿物1、矿物2含量体积; V_{sh} 为泥质含量体积; POR 为有效孔隙度; ρ_1 、 ρ_2 分别为矿物1、矿物2骨架密度,单位为 g/cm^3 ; ρ_{sh} 为泥岩骨架密度,单位为 g/cm^3 ; ρ_f 为流体密度,单位为 g/cm^3 。井眼校正后,泥岩处自然伽马明显上升,有利于储层识别和泥质含量的准确计算;同时在井眼扩径处,原始密度曲线数值较低,与校正后密度值差别较大,密度校正效果较明显,而在井段井眼正常处,校正后曲线与原始曲线差别不大(图3)。

通过常规测井曲线与钻孔取心资料的对比分析,结合录井岩屑描述资料,选择对各类岩性反应敏感的测井曲线如自然伽马、深侧向电阻率(R_d)、声波时差(AC)、密度及中子(CNL)进行岩性识别。录井显示火石岭组地层岩性复杂,只依靠常规测井曲线无法完全准确识别,故根据地质描述将主要矿物相似的岩性合并后分类,主要分为安山岩类(安山岩、安山质火山角砾岩、安山玄武岩)、凝灰岩类(沉凝灰岩、凝灰岩、角砾凝灰岩)、凝灰质泥岩类(凝灰质泥岩、粉砂质泥岩、泥岩)、以及复成分砾岩。不同岩性的测井值统计如图4所示。

根据统计分析结果,凝灰质泥岩的自然伽马平均值最高(137.60 API),深侧向电阻率较低(391.89 $\Omega \cdot \text{m}$);安山岩自然伽马平均值最低(62.36 API),深侧向电阻率最高(2449.91 $\Omega \cdot \text{m}$);凝灰岩自然伽马平均值(90.70 API)仅次于凝灰质泥岩,电阻率与凝灰质泥岩接近;复成分砾岩自然伽马值较低,深侧向电阻率值较高,测井响应特征与安山岩接近(表1)。自然伽马和深侧向电阻率能够有效区分沉积岩和火山岩,密度和声波时差对各岩性的区分度不高,难以从单一的岩石物理参数识别岩性。

目前划分岩性有多种方法,而交会图法是划分复杂岩性最直观、有效的方法,通过不同岩性在交

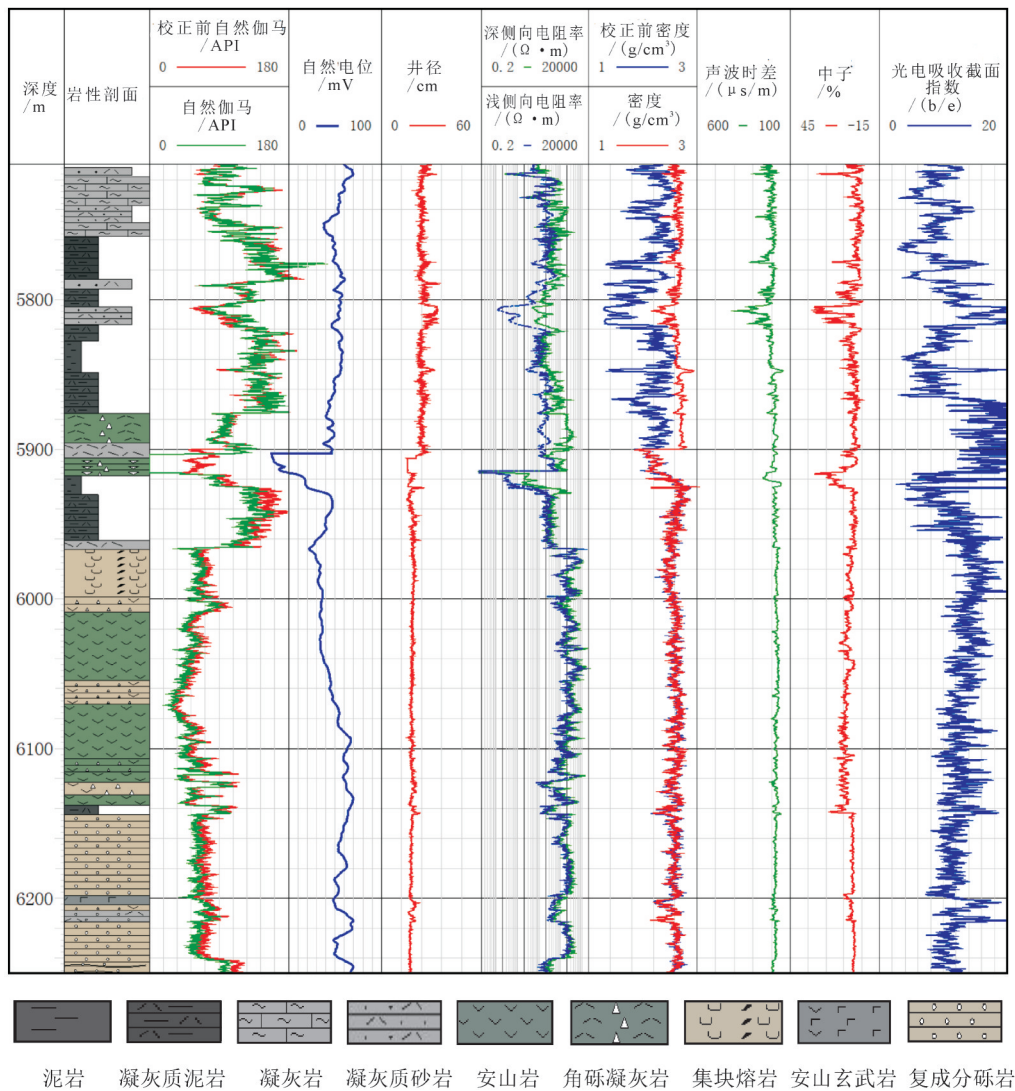


图3 松科二井火石岭组测井响应特征图
Fig.3 Logging response characteristics in the Huoshiling Formation

会图上分布的区域不同,可以看到不同岩性岩石物理参数范围的界限。交会图分析结果表明(图5),自然伽马能够有效区分出凝灰质泥岩,深侧向电阻率能够区分出安山岩;将自然伽马和密度、电阻率及光电吸收截面指数(PE)配合均能有效区分凝灰质泥岩、凝灰岩和安山岩,其中凝灰岩的自然伽马位于凝灰质泥岩和安山岩之间。自然伽马-光电吸收截面指数以及声波时差-中子能够将安山岩和复成分砾岩区分,复成分砾岩光电吸收截面指数值分布在9~12 b/e,中子值分布在1%~4%。综上所述,利用火石岭组测井资料划分出4类岩性,其中凝灰质泥岩类厚度为155.66 m,凝灰岩类厚度为70.34 m,安山岩

类厚度为204.42 m,复成分砾岩厚度为90.68 m,岩性划分结果与录井岩性具有较高符合率。

3.3 火石岭组地层测井响应特征

火石岭组地层厚度较薄且岩性复杂,整个地层的测井响应特征变化较剧烈。火石岭组上部地层主要发育凝灰岩、角砾凝灰岩和凝灰质泥岩等,自然伽马曲线值整体较高,自然电位曲线(SP)基线向负方向偏移,井径曲线(CAL)较大,电阻率值整体偏低且曲线形态以低幅齿形平直状为主,密度、中子、声波时差曲线整体保持稳定,光电吸收截面指数曲线变化幅度较明显。火石岭组下部地层主要发育安山岩、复成分砾岩和集块熔岩等,自然伽马

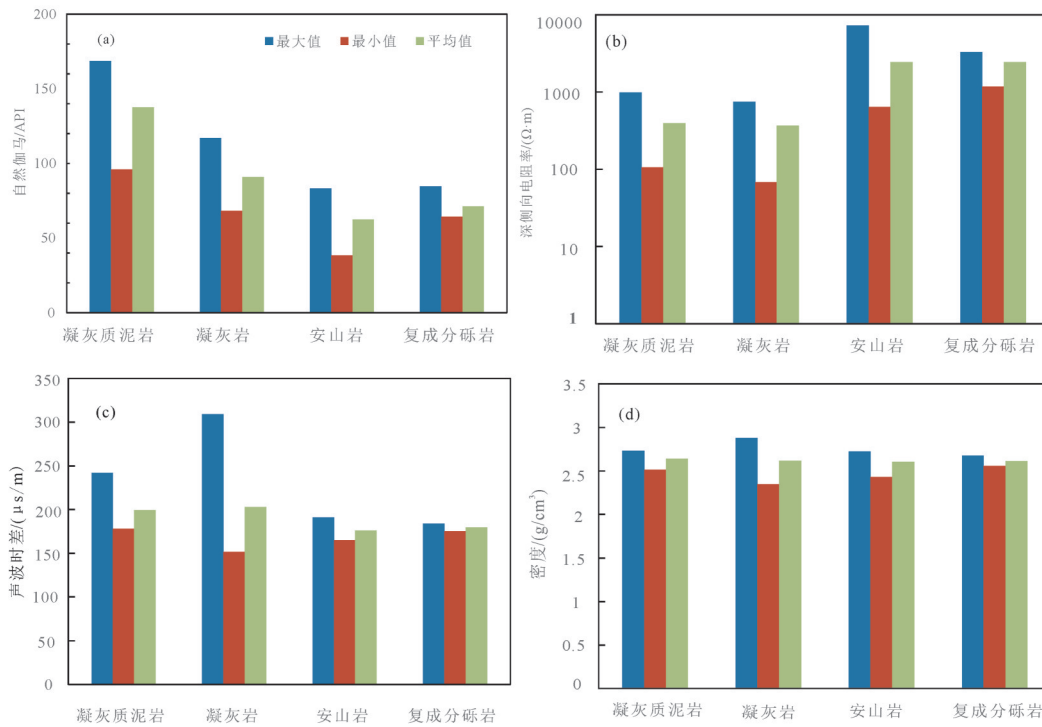


图4 不同岩性地层测井响应统计结果图

a—岩性与自然伽马的关系;b—岩性与电阻率的关系;c—岩性与声波时差的关系;d—岩性与密度的关系

Fig.4 Statistical results of log response in different lithologic formations

a—Relationship between lithology and GR; b—Relationship between lithology and Rd; c—Relationship between lithology and AC; d—Relationship between lithology and DEN

表1 测井岩石物理参数统计

Table 1 Statistics of petrophysics characteristics by log data

| 曲线 | 值类型 | 凝灰质泥岩 | 凝灰岩 | 安山岩 | 复成分砾岩 |
|-------------|-----|---------------|---------------|----------------|-----------------|
| GR/API | 范围 | 96.07~168.55 | 68.08~116.86 | 38.23~83.13 | 64.37~84.72 |
| | 平均值 | 137.60 | 90.70 | 62.36 | 71.07 |
| Rd/(Ω·m) | 范围 | 105.47~985.27 | 67.82~746.51 | 643.17~7265.21 | 1175.71~3177.35 |
| | 平均值 | 391.89 | 367.38 | 2449.91 | 2448.75 |
| AC/(μs/m) | 范围 | 178.05~242.02 | 151.33~308.85 | 165.11~190.75 | 175.47~183.82 |
| | 平均值 | 199.22 | 202.72 | 176.30 | 179.60 |
| DEN/(g/cm³) | 范围 | 2.51~2.73 | 2.34~2.88 | 2.43~2.72 | 2.56~2.68 |
| | 平均值 | 2.64 | 2.61 | 2.60 | 2.61 |
| CNL/% | 范围 | -2.38~9.22 | -1.36~24.77 | 0.65~9.89 | 1.86~4.10 |
| | 平均值 | 2.78 | 3.11 | 6.14 | 2.80 |

曲线值较低,自然电位曲线基线向正方向偏移,井径曲线值较小,电阻率较高且曲线形态以高幅齿形为主,密度、中子、声波时差以及光电吸收截面指数曲线保持稳定。根据火山岩岩相与测井曲线之间的对应关系,结合前人对松辽盆地火山岩的研究成果(郭振华等,2006),可知火石岭组上部火成岩以爆发相为主,主要发育凝灰岩,下部以为喷溢相为

主,主要发育安山岩(图3)。

3.4 火石岭组地层地震响应特征

火石岭组地层整体层厚较小,主要为火山-沉积间层,从声波速度测井曲线上可以观察到与沙子组底部存在明显的速度突变,因此火石岭组顶界面在 seismic 剖面上(图6)表现为清晰强反射,而其内部则表现为蚯蚓状弱反射,整体反射振幅弱且横向

连续性差,在靠近松科二井的区域可隐约追踪断层状反射,在远离该孔的陡坡带的反射则相对杂乱,根据前人总结(徐淑娟等,2016),可能对应不同的岩相。图6虚线框内为火石岭组地层地震响应特征,可以看出火石岭组底界面波组杂乱,难以追踪,相对上覆沙河子组地层而言,整体反射连续性相对较差,但稍优于下伏基底,这也是区分火石岭组与下伏基底地层的主要地震响应特征。同时,可以观察到,本段地层构造形态与上覆沙河子组地层相似,反映出从火石岭组到沙河子组地层具有一定的构造继承性。

4 岩石物理学特征分析

基于松科二井火石岭组地层丰富的测井与岩心资料,通过松科二井火石岭组地层与营城组地层岩石物理性质对比、与徐家围子断陷营城组岩石物理性质对比,同时对火石岭组储层物性特征及孔隙结构进行分析,综合研究松科二井火石岭组地层的岩石物理学特征。

4.1 岩石物理性质

松科二井火石岭组地层岩性复杂,特别是发育的火成岩非均质性较强,岩石物性参数变化范围较大。不同岩性地层的岩石物理性质受岩石的矿物成分、结构、致密程度、孔缝发育程度、孔隙类型以及孔隙流体性质等多种因素影响。火石岭组地层岩石电阻率变化范围非常大,下部安山岩和复成分砾岩致密、坚硬,电阻率均值高于2000.0 Ω·m,上部凝灰岩电阻率则比较低,均值小于400.0 Ω·m,凝灰质泥岩电阻率最低,在一定程度上电阻率能够反映岩性的变化。在火成岩地层中,声波时差以安山岩最低,范围在165.11~190.75 μs/m;凝灰岩略高,范围在151.33~308.85 μs/m,声波时差受岩石孔隙类型和孔隙流体性质的影响较大。岩石密度主要受岩石矿物成分、孔隙以及地层压力等影响,火石岭组地层各岩石密度值无较大差异。纵波速度及阻抗以安山岩和复成分砾岩为最高,凝灰岩最低。

各岩性地层电阻率、密度、声波时差、纵横波速度及阻抗之间的关系能够反映火石岭组地层岩石

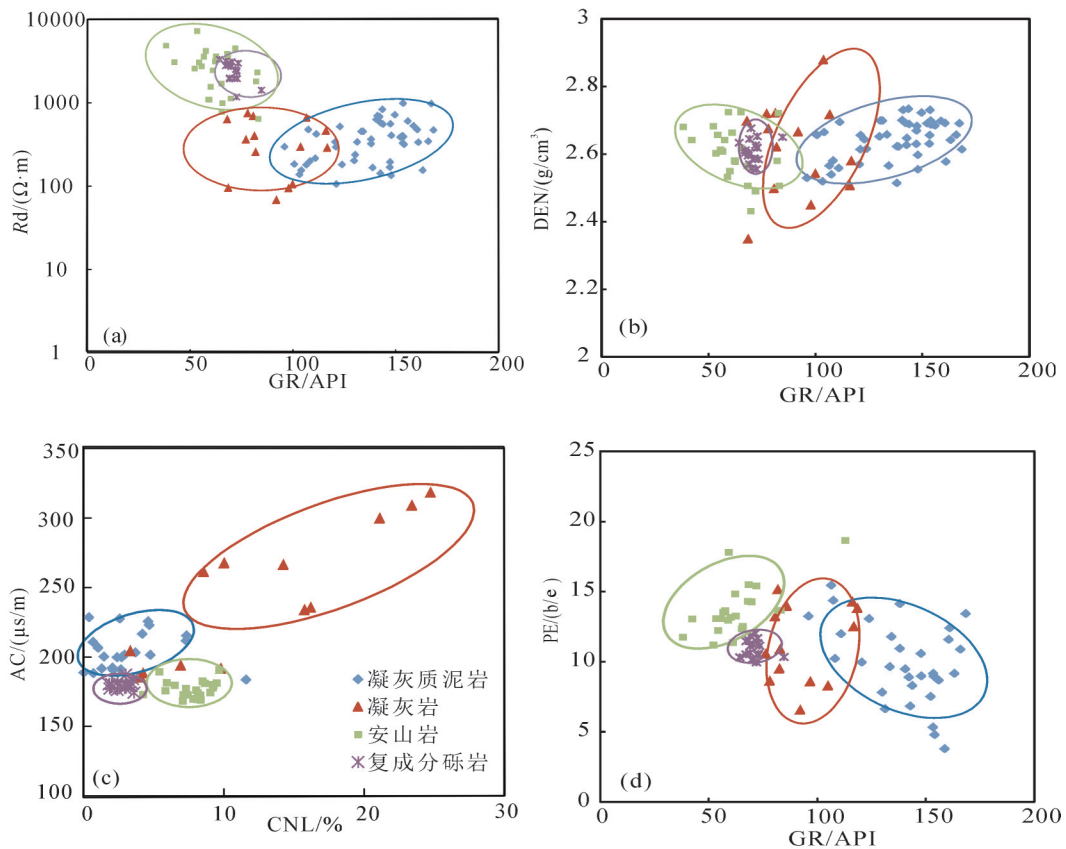


图5 火石岭组地层岩性识别交会图

Fig.5 Lithologic identification cross plot in the Huoshiling Formation

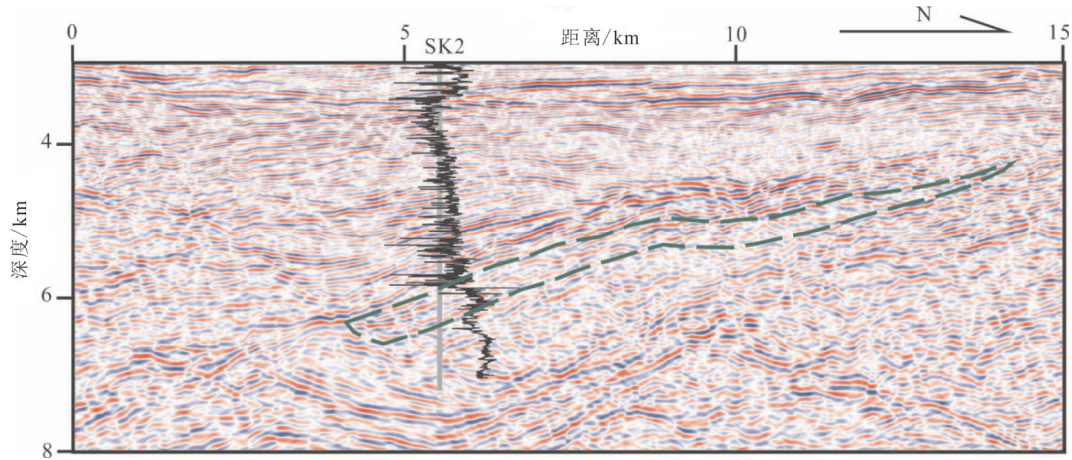


图6 松科二井沙河子组底部至基底地震响应

Fig.6 Seismic response characteristics through the bottom of Shahezi Formation to the basement in SK-2c

物理参数的变化规律。各类岩性电阻率和声波时差之间的相关性较差,凝灰质泥岩的波速、波阻抗与密度之间相关性优于火成岩,复成分砾岩纵横波速度及阻抗相关性最好(图7)。随着岩石埋藏深度的增加,受到的压实作用越强,速度也在不断增大,符合实际地层速度的变化规律。

本文将松科二井火石岭组与研究区营城组火成岩地层对比,来阐述不同层位火成岩岩石物理特征差异。松辽盆地徐家围子断陷营城组深度分布范围为2965.0~3089.0 m,主要发育安山岩、凝灰岩和流纹岩等,其中安山岩电阻率为248.01~1145.52 $\Omega \cdot m$,密度为2.60~2.71 g/cm^3 ,凝灰岩电阻率为5.62~65.50 $\Omega \cdot m$,密度为2.52~2.62 g/cm^3 (宫旭东,2002);松科二井营城组深度为2966.0~3342.0 m,主要发育凝灰岩、流纹岩和集块熔岩等,其中凝灰岩电阻率均值约为12.0 $\Omega \cdot m$,密度为2.47 g/cm^3 (张淑霞等,2018)。火石岭组火成岩地层以中基性火山喷发为主,自下而上碱质含量逐渐增加,通过营城组和火石岭组钻遇的火成岩岩石物理性质的对比分析,火石岭组发育的安山岩和凝灰岩电阻率远高于营城组,密度无明显区别,造成这种差异的原因可能是营城组和火石岭组是由多期火山喷发形成,不同期次火成岩接触关系复杂,从而影响火成岩的岩石物理特征。

为了勘探深部油气资源,前人利用地球物理手段对松辽盆地深部构造及地层结构开展了大量研究工作。利用近垂直反射地震法研究盆地深部地层结构,反演出盆地内地壳平均纵波速度;不同震

相反演得到的纵波速度有一定差异,根据震相到时资料,确定了盆地基底二维速度结构(杨宝俊等,2003;李英康等,2014)。徐家围子断陷电阻率反演结果显示,深度2.0~6.0 km的三叠系、侏罗系和下白垩统沉积地层电阻率明显增大,断陷构造比较明显(刘殿秘等,2007;刘财等,2011)。松辽盆地沉积岩密度低于中基性火成岩,高于酸性火成岩,利用剩余密度反演重力异常能够判断盆地基底的埋深和起伏情况(王玉华等,2008)。以往工作中由于缺少深井资料的约束,反演具有一定难度。松科二井是松辽盆地内最深的一口井,提供了准确的速度、密度以及电阻率等参数,这些岩石物理参数信息可以提高地球物理反演精度,为研究盆地深部构造与地层结构提供有力的支撑。

4.2 储层物性特征

4.2.1 储层划分

松科二井火石岭组埋藏深度大,地层温度高,同时由于板块运动造成强烈的火山岩浆活动,地层岩性十分复杂,纵向上非均质性强,岩石的孔隙度受到诸多因素的影响。采用密度和补偿中子曲线交计算地层的孔隙度可知,研究井段内地层孔隙度在7.0%以内;利用孔隙度、束缚水饱和度等参数,采用TIMUR公式计算渗透率可知,本段地层渗透率在0.1~1.0 mD(表2)。根据《石油天然气储量计算规范》(DZ/T0217—2005)储层孔隙度分类标准,结合前人关于松辽盆地火成岩的勘探开发经验(王璞珺,2015),对本段地层凝灰岩、安山岩等火成岩储层进行孔隙度和渗透率分级,划分为低孔(孔隙度

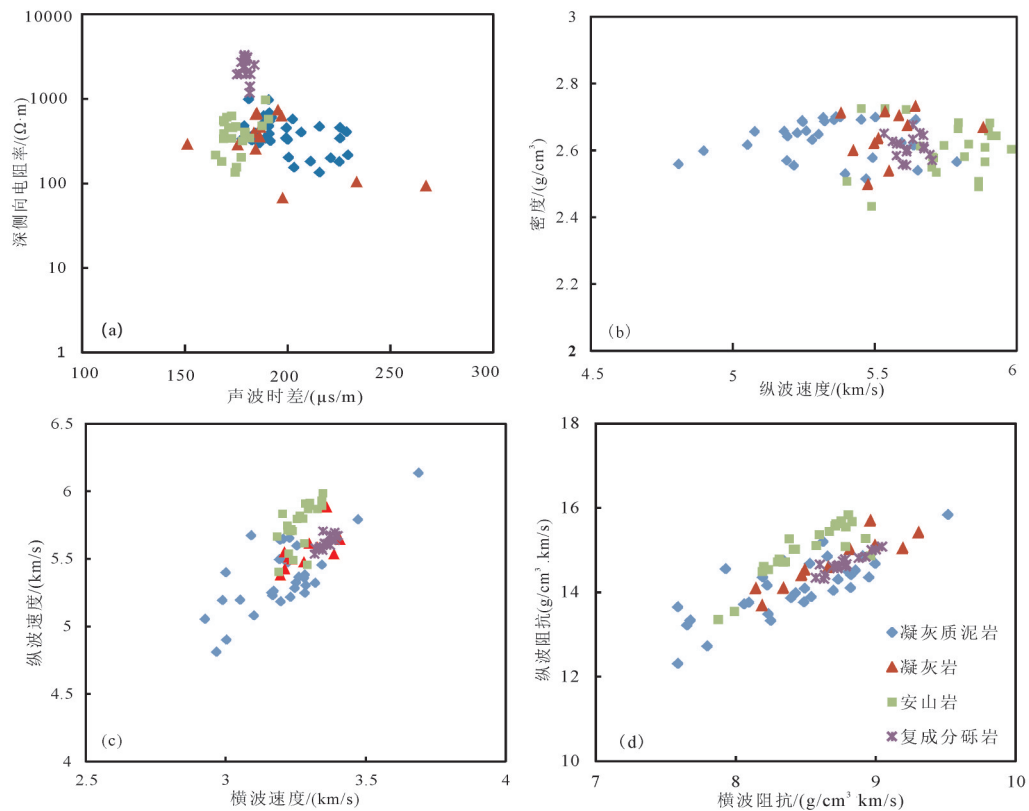


图7 火石岭组地层各岩石物性参数之间的关系

Fig.7 Relationship between physical parameters of rocks in the Huoshiling Formation

小于3.0%)、中孔(孔隙度介于3.0%~7.0%)及低渗(渗透率小于0.1 mD)、中渗(渗透率介于0.1~1.0 mD)。

通过对各类储层的物性特征作统计分析知,凝灰岩的孔隙度和渗透率最大达到6.31%和0.72 mD,同时平均孔隙度和渗透率最大,分别为3.40%和0.32 mD;复成分砾岩的平均孔隙度略大于安山岩(表2)。本段共出现5处气测异常,分别为5834.0~5837.0 m、5873.0~5875.0 m、5923.0~5924.0 m、6044.0~6045.0 m及6103.0~6104.0 m,其中前三处井段出现的气测异常,对应的岩性分别为凝灰岩、角砾凝灰岩和凝灰岩,后两处对应的岩性为安山岩。常规双侧向电阻率测井资料显示凝灰岩储层深浅侧向电阻率曲线有较大的幅度差,表明凝灰岩储层有少量裂缝发育。结合表2各类储层的物性参数变化范围,凝灰岩储层物性特征相对较好。

根据测井岩性划分的结果,火石岭组泥岩类累计厚度达到155.66 m,其中凝灰质泥岩厚度为106.06 m,粉砂质泥岩厚度为3.24 m,暗色泥岩厚度

为46.36 m。松科二井位于徐家围子断陷洼槽带,结合以往对松辽盆地烃源岩生烃潜力的评价资料(王杰,2006),认为断陷深部洼槽带富含有机质的地层有机质丰度高,处于高成熟—过成熟的热演化阶段,为深部能源勘探提供了物质基础。

4.2.2 储层孔隙结构特征分析

为了研究火石岭组各储层孔隙结构特征,开展了核磁共振测试工作,在中国地质大学(北京)测井实验室采用苏州纽迈岩心核磁共振分析与成像系统完成。实验室核磁共振测试能够有效评价储层的孔隙结构,得到岩心的孔径分布和孔喉分布,同时 T_2 分布谱能够反映地层岩石的孔隙大小、数量及其分布规律。采用低场核磁实验用来测试岩心样品的横向弛豫时间 T_2 ,横向弛豫信号 $M(t)$ 的数学表达式如下:

$$M(t) = \sum_i A_i \exp\left(-\frac{t}{T_{2i}}\right) + A_0 \quad (2)$$

其中, A_i 表示样品中第 i 种成分的信号强度,总信号的大小是所有成分产生信号大小的总和, T_{2i} 表

表2 火石岭组地层各岩性储层物性参数平均值分布范围
Table 2 Distribution of physical parameters of various reservoirs in the Huoshiling Formation

| 物性参数 | 值类型 | 凝灰岩 | 安山岩 | 复成分砾岩 |
|--------|-----|------|------|-------|
| 孔隙度/% | 最大值 | 6.31 | 2.70 | 2.50 |
| | 最小值 | 1.68 | 0.14 | 0.79 |
| | 平均值 | 3.91 | 1.35 | 1.93 |
| 渗透率/mD | 最大值 | 0.72 | 0.10 | 0.10 |
| | 最小值 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| | 平均值 | 0.32 | 0.10 | 0.10 |

示样品中第*i*种成分的横向弛豫时间, A_0 为噪声的信号。核磁共振实验数据处理中采用回波反演确定观测的磁化矢量的 T_2 分布,利用矩阵的形式重写改写上述数学表达式(2):

$$Y = A \times P + A_0 \tag{3}$$

其中, $Y_{n \times 1} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ 表示检测到的横向弛豫信号, $A_{m \times 1} = (A_1, A_2, \dots, A_m)^T$ 表示样品中质子分布的密度函数, T_{2j} 是预先设定好的弛豫时间常数。在 T_2 反演中有:

$$P_{n \times m} = [P_{i,j}]_{n \times m} = \exp\left(-\frac{t_i}{T_{2j}}\right) \tag{4}$$

$t_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是第*i*个回波时间, $t_i = i \times T_E$, T_E 即回波时间。

松科二井火石岭组地层共取心 132 件,根据岩性分布特点,选取了 20 块不同岩样分别在饱水状态和烘干状态下进行核磁共振实验,其中包括凝灰岩 8 块,安山岩 9 块,复成分砾岩 3 块。一般来讲,就核磁共振 T_2 弛豫时间谱而言, T_2 时间小于 1 ms 的孔隙属于微孔,介于 1~10 ms 的孔隙属于小孔,10~100 ms 的孔隙属于中孔,100~1000 ms 的孔隙属于大孔,大于 1000 ms 的孔隙属于洞(高树生等,2016)。本段地层不同岩性的核磁共振 T_2 谱分布图显示(图 8),对火成岩储层而言,凝灰岩孔隙度累积值最大, T_2 弛豫时间主要分布在 0.1~5 ms,其次分布在 5~500 ms,表明凝灰岩储层以微孔和小孔为主,有少量中孔和大孔发育;安山岩 T_2 谱分布图具备双峰特征,且左峰孔隙度分量大于右峰,表明微孔和小孔占比较大,其次为中孔,孔隙分布不均。相比较而言,复成分砾岩孔隙度累积值最小,微孔和中孔较发育。各岩性储层孔径分布占比最大的都为 0.001~1 μm (图 9);结合本段地层各类岩性孔喉 r 分布平均值(表 3),孔喉分布占比最大的都为 0~0.1

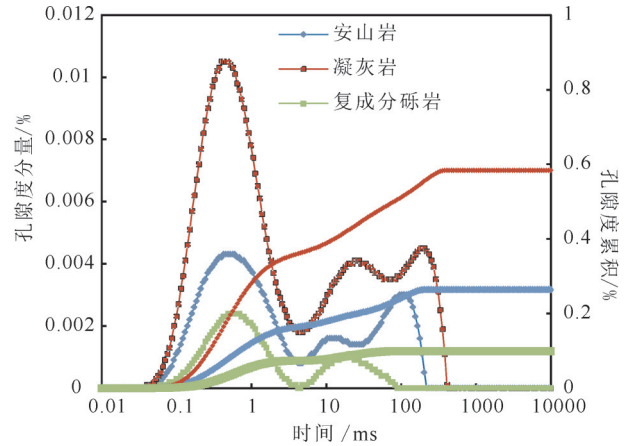


图8 饱水状态下各岩类的核磁共振 T_2 谱分布图
Fig.8 Nuclear magnetic resonance T_2 distribution of different lithologic types in saturated state

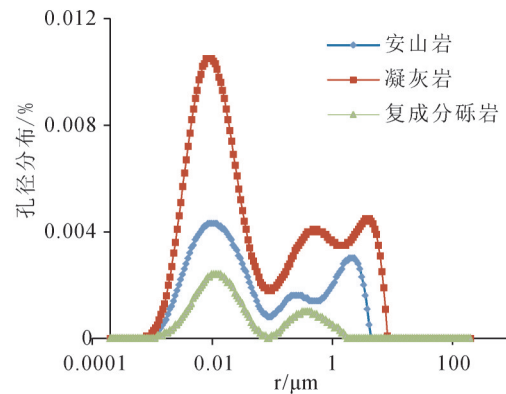


图9 典型岩心孔径分布图
Fig.9 Typical core pore size distribution of different lithologies

表3 火石岭组地层各类岩性孔喉分布平均值
Table 3 Average distribution of pore throat of different lithologic types in the Huoshiling Formation

| $r/\mu\text{m}$ | 凝灰岩/% | 安山岩/% | 复成分砾岩/% |
|-----------------|-------|-------|---------|
| 0.00~0.10 | 0.308 | 0.160 | 0.234 |
| 0.10~0.16 | 0.014 | 0.011 | 0.013 |
| 0.16~0.25 | 0.016 | 0.011 | 0.014 |
| 0.25~0.40 | 0.020 | 0.014 | 0.017 |
| 0.40~0.63 | 0.016 | 0.014 | 0.015 |
| 0.63~1.00 | 0.009 | 0.011 | 0.010 |
| 1.00~1.60 | 0.008 | 0.013 | 0.010 |
| 1.60~2.50 | 0.009 | 0.010 | 0.001 |
| 2.50~4.00 | 0.013 | 0.011 | 0.012 |
| 4.00~6.30 | 0.009 | 0.008 | 0.008 |
| 6.30~10.00 | 0.001 | 0.002 | 0.001 |

μm ,表明主要发育微小孔喉和小孔喉,含少量中孔喉,具备一定的渗流能力。

综合研究表明,火石岭组各储层整体具备低孔低渗的特点,凝灰岩孔隙度大于安山岩,主要发育微小孔喉和小孔喉,孔喉由小到大相对连续均匀分布,具备一定的渗流能力;火成岩储层多孔介质主要由数量较多的微小孔隙构成,其次为小孔和中孔,含有极少量的大孔,小孔和中孔是火成岩储层主要的储集空间。复成分砾岩孔隙度最小,主要发育微小孔和中孔,中孔占比小于火成岩储层。由此判断火石岭组各储层孔隙度较小,渗透率较低,但凝灰岩储层物性特征相对较好,小孔和中孔较发育,表明该套火成岩储层具备一定的油气资源勘探潜力。此外,松科二井动态温度测井资料表明井底7018.0 m温度达241.0 $^{\circ}\text{C}$,初步预测火石岭地层温度在205.0~220.0 $^{\circ}\text{C}$,且发育的火成岩储层致密、物性特征较差,符合干热岩储层特性,表明该孔火石岭组邻近区域的火成岩地层具有地热开发利用价值,相关研究工作正在开展之中。

5 结 论

基于松科二井火石岭组常规测井资料,结合实验室核磁共振特性分析,对本段地层的岩石物理学特征进行了研究,得到以下结论:

(1)利用测井与地质录井资料划分出4类岩性,包括凝灰岩、安山岩、凝灰质泥岩和复成分砾岩;自然伽马和电阻率曲线对于识别凝灰质泥岩与安山岩较为有效,而声波时差和中子曲线对划分凝灰岩和复成分砾岩较为有效。

(2)该井段上部火成岩以爆发相为主,发育的凝灰岩具有低电阻率、高声波时差的特点,下部火成岩以喷溢相为主,发育的安山岩具有高电阻率、低声波时差的特点;凝灰质泥岩电阻率最低,复成分砾岩与安山岩岩石物理特征类似。测井获得的电阻率、速度、密度等参数,为研究松辽盆地深部构造与地层结构提供了有力支撑。

(3)储层物性和孔隙结构分析表明,凝灰岩是该井段相对有利的储层。该井段火成岩总体表现为低孔低渗的特点,但凝灰岩物性特征相对较好、小孔和中孔发育、孔隙度最大达6.31%,因此认为火石岭组火成岩地层仍具有一定的油气勘探潜力。

致谢:本文工作得到了松辽盆地资源与环境深部钻探工程首席科学家王成善院士、总地质师王璞珺教授以及副总指挥冉恒谦教授的大力支持;中国石油集团测井有限公司天津分公司测井队成员参加了测井数据采集工作,在此一并表示衷心的感谢。

References

- Cai Xianhua, Tan Shengzhang. 2002. Pattern of igneous rock distribution and hydrocarbon accumulation in Changling fault depression of the south part of Songliao Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 41(3):363-366(in Chinese with English abstract).
- Dai Yaquan, Luo Jinglan, Lin Tong, Yang Zhisheng, Zhang Jun, Liu Shuyun, Xia Huiping. 2007. Reservoir characteristics and petrogenesis of volcanic rocks in the Yingcheng Formation of the Shengping gas field, northern Songliao basin[J]. *Geology in China*, 34(3):528-535(in Chinese with English abstract).
- Gao Shusheng, Hu Zhiming, Liu Huaxun, Ye Liyou, An Weiguo. 2016. Microscopic pore characteristics of different lithological reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 37(2):248-256(in Chinese with English abstract).
- Gong Xudong. 2002. Identification of Deep Igneous Rock Reservoirs in Daqing and Quantitative Calculation of Reservoir Parameters[D]. Tongji University(in Chinese with English abstract).
- Gao Youfeng, Wang Chengshan, Wang Pujun, Wan Xiaoqiao, Ren Yanguang, Cheng Rihui. 2009. Well site selecting, core section characteristics and distribution of the special lithological layers in CCSD-SK-In borehole, Songliao Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(6):104-112(in Chinese with English abstract).
- Gu Zhiwei. 1982. On the Demarcation of the non-marine Jurassic and Cretaceous systems in China and the events in the Cretaceous Period[J]. *Journal of Stratigraphy*, 6(4):247-257(in Chinese).
- Guo Zhenhua, Wang Pujun, Yin Changhai, Huang Yulong. 2006. Relationship between lithofacies and logging facies of the volcanic reservoir rocks in Songliao Basin[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 36(2):207-214 (in Chinese with English abstract).
- Hou Hesheng, Wang Chengshan, Zhang Jiaodong, Ma Feng, Fu Wei, Wang Pujun, Huang Yongjian, Zou Changchun, Gao Youfeng, Gao Yuan, Zhang Laiming, Yang Jin, Guo Rui. 2018. Deep continental scientific drilling engineering in Songliao Basin: Resource discovery and progress in earth science research[J]. *Geology in China*, 45(4):641-657(in Chinese with English abstract).
- Hu Wangshui, Lü Binquan, Zhang Wenjun, Mao Zhiguo, Leng Jun, Guan Dayong. 2005. An approach to tectonic evolution and dynamics of the Songliao Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 40(1):16-31(in Chinese with English abstract).

- Huang Buzhou, Pan Baozhi. 2001. The log characteristics of deep igneous rocks and Lithology determination in the northern Songliao Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*,40(3): 42–47(in Chinese with English abstract).
- Huang Qinghua, Wu Huaichun, Wan Xiaoqiao, He Huaiyu, Deng Chenglong. 2011. New progress of intergrated chronostratigraphy of the cretaceous in Songliao Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 35(3):250–257(in Chinese with English abstract).
- Li Yingkang, Gao Rui, Yao Yutao, Mi Shengxin, Li Wenhui, Xiong Xiaosong, Gao Jianwei.2014.The crust velocity structure of Da Hinggan Ling orogenic belt and the basins on both sides[J]. *Progress in Geophysics*,29(1):73–83(in Chinese with English abstract).
- Liu Dianmi, Han Liguoguo, Weng Aihua, Liu Cai, Zhang Fengxu .2007. Partial geophysical features of the northwest boundary in Songliao basin[J]. *Progress in Geophysics*, 22(6):1722– 1727(in Chinese with English abstract).
- Men Guangtian, Lei Maosheng, ZhuYingkang, Liu Jiajun, Xie Hao, Li Xiaomei. 2014. Yingcheng Formation volcanic rocks and gas reservoir distribution in Xujiaweizi fault depression[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 33(5):82– 85(in Chinese with English abstract).
- Pan Baozhi, Li Zhoubo, Fu Yousheng, Wang Hongjian, Yang Xiaoling , Xu Shumei .2009. Application of logging data in lithology identification and reservoir evaluation of igneous rock in Songliao basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 48(1): 48–52 (in Chinese with English abstract) .
- Pei Fuping, Xu Wenliang, Yang Debin, Zhao Quanguo, Liu Xiaoming, Hu Zhaochu.2006. Zircon U–Pb geochronology in the basement metamorphic rocks of the Songliao Basin and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(24):2881– 2887 (in Chinese).
- Qu Xuejiao, Wang Pujun, Gao Youfeng, Wan Xiaoqiao. 2014. Chronostratigraphy of Huoshiling Formation in the Songliao basin, NE China: An overview[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(2):234–250 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengshan, Feng Zhiqiang, Wu Heyong, Wang Pujun, Kong Fanjun, Feng Zihui, Ren Yanguang, Yang Gansheng, Wang Xiaoqiao, Huang Yongjian. 2008. Preliminary achievement of the Chinese Cretaceous continental scientific drilling project–SK–I[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(1): 9– 20(in Chinese with English abstract).
- Wang Chengshan. 2013a. Environmental/climate change in the Cretaceous greenhouse world:Records from Terrestrial scientific drilling of Songliao Basin and adjacent areas of China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385:1–5.
- Wang Chengshan, Feng Zhiqiang, Zhang Laiming, HuangYongjian, Cao Ke, Wang Pujun, Zhao Bin. 2013b. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SKI borehole sites in Songliao Basin northeast China[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 385: 17–30.
- Wang Pujun, Chen Chongyang, Zhang Ying, Gao Youfeng ,Qu Xuejiao, Yi Jian. 2015. Characteristics of volcanic reservoirs and distribution rules of effective reservoirs in the Changling fault depression, Songliao Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 35(8):10– 18 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pujun, Mattern F, Didenko N A, Zhu Defeng, Singer B, Sun Xiaomeng. 2016a. Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: An inverted active continental margin basin[J]. *Earth–Science Reviews*, 159: 82–102.
- Wang Pujun, Liu Haibo, Ren Yanguang, Wang Xiaoqiao, Wang Shuxue, Zhai Xuejiao, Meng Qi’ an, Huang Yongjian, Huang Qinghua, Gao Youfeng. 2017. How to choose a right drilling site for the ICDP Cretaceous Continental Scientific Drilling in the Songliao Basin (SK2), Northeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(1):216–228(in Chinese with English abstract) .
- Wang Yuhua, Lei Maosheng, Lei Yuhong, Li Dechun, Meng Yuyu, Ji Liansheng. 2008. Application of high– precision gravity and magnetic data in exploration of volcanic rock gas reservoir in Gulong Fault Depression of Songliao Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 43(1):107–112(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Huimin . 2000. Zircon U–Pb age of basement rocks in the Songliao Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(6):656– 660(in Chinese).
- Xu Shujuan, Zhao Zehui, Jiang Xiaohua, Cheng Honggang, Cui Junfeng, Jia Li, Zhou Wenjie. 2016. Geophysical features and distribution prediction of Mesozoic volcanic rocks in Songliao Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 3(3):27– 34(in Chinese with English abstract).
- Yang Baojun, Li Qinxue, Tang Jianren, Liu Cai, Wang Jianmin, Wang Zhaohu.2003. The form and three–instantaneous information of the seismic reflection Moho in Songliao basin and geological interpretation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 46(3):398–402(in Chinese with English abstract).
- Yin Jinyin, Liu Hefu. 2002. Evolution and gasaccumulation of Xujiaweizi Depression in Songliao Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 23(2):26–29 (in Chinese).
- Zhang Fengqi, Chen Hanlin, Dong Chuanwan, Yu Xing, Xiao Jun, Pang Yanming, Cao Ruicheng, Zhu Defeng. 2008. Evidence for the existence of Precambrian basement under the northern Songliao basin[J]. *Geology in China*, 35(3): 421– 428(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuxia, Zou Changchun, Peng Cheng, Zhao Jinhuan, Li Ning, Zhang Xiaohuan. 2018. Abnormally high natural radioactivity zones in the main borehole of the Continental Scientific Drilling Project of Cretaceous Songliao Basin: Geophysical log responses and genesis analysis [J] . *Chinese Journal of Geophysics*, 61(11): 396–412(in Chinese with English abstract).
- Zhu Defeng, Ren Yanguang, Wu Heyong, Wu Genyao, Wan

- Chuanbiao, Wu Xiangmei. 2007. A preliminary study on the buried Permian and Jurassic in the Northern Songliao Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 42(4):690-708(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaomin, Zeng Hongliu, Li shunli, Dong Yanlei, Zhu Shifa, Zhao Dongna, Huang Wei. 2016. Sedimentary characteristics and seismic geomorphologic responses of a shallow water delta in the Qingshankou Formation from the Songliao Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 79: 131-148.
- Zhu Yongyi, Wang Wenshi, Wu Xiaoming, Cao Longlong, Ran Hengqian, Zhang Jinchang. 2018. Main technical innovations of Songke Well No.2 Drilling Project[J]. China Geology, 1(2): 187-201.
- Zou Changchun, Xiao Liang, Niu Yixiong, Hou Jie, Peng Cheng. 2016. General design of geophysical logging of the CCSD-SK-2 East Borehole in the Songliao Basin of Northeast China[J]. Earth Science Frontiers, 23(3): 279-287(in Chinese with English abstract).
- 蔡先华, 谭胜章. 2002. 松辽盆地南部长岭断陷火成岩分布及成藏规律[J]. 石油物探, 41(3): 363-366.
- 戴亚权, 罗静兰, 林潼, 杨知盛, 张军, 刘淑云, 夏惠萍. 2007. 松辽盆地北部升平气田营城组火山岩储层特征与成岩演化[J]. 中国地质, 34(3):528-535.
- 高树生, 胡志明, 刘华勋, 叶礼友, 安为国. 2016. 不同岩性储层的微观孔隙特征[J]. 石油学报, 37(2):248-256.
- 高有峰, 王成善, 王璞珺, 任延广, 王国栋, 刘万洙, 程日辉. 2009. 松科1井北孔选址、岩心剖面特征与特殊岩性层的分布[J]. 地学前缘, 16(6):104-112.
- 官旭东. 2002. 大庆深层火成岩储层的识别及其储层参数的定量计算[D]. 同济大学.
- 顾知微. 1982. 论我国非海相侏罗系与白垩系的分界和白垩纪中事件[J]. 地层学杂志, 6(4): 247-257.
- 郭振华, 王璞珺, 印长海, 黄玉龙. 2006. 松辽盆地北部火山岩岩相与测井相关关系研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(2): 207-214.
- 侯贺晟, 王成善, 张交东, 马峰, 符伟, 王璞珺, 黄永建, 邹长春, 高有峰, 高远, 张来明, 杨璠, 国瑞. 2018. 松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展[J]. 中国地质, 45(4):641-657.
- 胡望水, 吕炳全, 张文军, 毛治国, 冷军, 官大勇. 2005. 松辽盆地构造演化及成盆动力学探讨[J]. 地质科学, 40(1):16-31.
- 黄布宙, 潘保芝. 2001. 松辽盆地北部深层火成岩测井响应特征及岩性划分[J]. 石油物探, 40(3):42-47.
- 黄清华, 吴怀春, 万晓樵, 贺怀宇, 邓成龙. 2011. 松辽盆地白垩系综合年代地层学研究新进展[J]. 地层学杂志, 35(3):250-257.
- 李英康, 高锐, 姚聿涛, 米胜信, 李文辉, 熊小松, 高建伟. 2014. 大兴安岭造山带及两侧盆地的地壳速度结构[J]. 地球物理学进展, 29(1):73-83.
- 刘财, 杨宝俊, 王兆国, 王典, 冯晖, 鹿琪, 刘洋, 王世煜. 2011. 松辽盆地西边界带深部构造:地电学证据[J]. 地球物理学报, 54(2):401-406.
- 刘殿秘, 韩立国, 翁爱华, 刘财, 张凤旭. 2007. 松辽盆地西北边界部分地球物理特征[J]. 地球物理学进展, 22(6):1722-1727.
- 门广田, 雷茂盛, 朱映康, 刘家军, 谢豪, 李笑梅. 2014. 徐家围子断陷营城组火山岩及气藏分布[J]. 大庆石油地质与开发, 33(5):82-85.
- 潘保芝, 李舟波, 付有升, 王宏建, 杨晓玲, 许淑梅. 2009. 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[J]. 石油物探, 48(1):48-52.
- 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 赵全国, 柳小明, 胡兆初. 2006. 松辽盆地基底变质岩中锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 51(24):2881-2887.
- 瞿雪姣, 王璞珺, 高有峰, 万晓樵. 2014. 松辽盆地断陷期火山石岭组时代归属探讨[J]. 地学前缘, 21(2):234-250.
- 王成善, 冯志强, 吴河勇, 王璞珺, 孔凡军, 冯子辉, 任延广, 杨甘生, 万晓樵, 黄永建, 张世红. 2008. 中国白垩纪大陆科学钻探工程:松科一井科学钻探工程的实施与初步进展[J]. 地质学报, 82(1): 9-20.
- 王璞珺, 陈崇阳, 张英, 高有峰, 瞿雪姣, 衣健. 2015. 松辽盆地长岭断陷火山岩储层特征及有效储层分布规律[J]. 天然气工业, 35(8): 10-18.
- 王璞珺, 刘海波, 任延广, 万晓樵, 王树学, 瞿雪姣, 蒙启安, 黄永建, 黄清华, 高有峰. 2017. 松辽盆地白垩系大陆科学钻探“松科二井”选址[J]. 地学前缘, 24(1): 216-228.
- 王玉华, 雷茂盛, 雷裕红, 李德春, 孟玉宇, 冀连胜. 2008. 高精度重磁资料在松辽盆地古龙断陷火山岩气藏勘探中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 43(1):107-112.
- 吴福元, 李惠民. 2000. 松辽盆地基底岩石的锆石 U-Pb 年龄[J]. 科学通报, 45(6):656-660.
- 徐淑娟, 赵泽辉, 姜晓华, 程宏岗, 崔俊峰, 贾丽. 2016. 松辽盆地中生代火山岩地球物理特征及分布预测[J]. 非常规油气, 3(3):27-34.
- 杨宝俊, 李勤学, 唐建人, 刘财, 王建民, 王兆湖. 2003. 松辽盆地反射地震莫霍面的形态、三瞬处理结果及其地质解释[J]. 地球物理学报, 46(3):398-402.
- 殷进垠, 刘和甫. 2002. 松辽盆地徐家围子断陷构造演化[J]. 石油学报, 23(2):26-29.
- 章凤奇, 陈汉林, 董传万, 余星, 肖骏, 庞彦明, 曹瑞成, 朱德丰. 2008. 松辽盆地北部存在前寒武纪基底的证据[J]. 中国地质, 35(3):421-428.
- 张淑霞, 邹长春, 彭诚, 赵金环, 李宁, 张小环. 2018. 松科二井东孔营城组高放射性异常层测井响应特征及成因初探[J]. 地球物理学报, 61(11):396-412.
- 朱德丰, 任延广, 吴河勇, 吴根耀, 万传彪, 吴相梅. 2007. 松辽盆地北部隐伏二叠系和侏罗系的初步研究[J]. 地质科学, 42(4):690-708.
- 邹长春, 肖亮, 牛一雄, 侯颀, 彭诚. 2016. 松辽盆地科学钻探工程松科二井东孔测井设计[J]. 地学前缘, 23(3):279-287.