

doi: 10.12029/gc20190507

符伟,侯贺晟,张交东,刘财,冯暄,卢占武. 2019. 松科二井邻域沙河子组含油气地层结构特征——基于测井和地震数据的分析[J]. 中国地质, 46(5):1052-1060.

Fu Wei, Hou Hesheng, Zhang Jiaodong, Liu Cai, Feng Xuan, Lu Zhanwu. 2019. Structural characteristics of Shahezi Formation beneath the Well SK-2 and its periphery: An analysis of logging and seismic data[J]. Geology in China, 46(5): 1052-1060(in Chinese with English abstract).

松科二井邻域沙河子组含油气地层结构特征 ——基于测井和地震数据的分析

符伟¹,侯贺晟^{1,2},张交东³,刘财⁴,冯暄⁴,卢占武²

(1. 中国地质科学院,北京 100037;2. 中国地质科学院地质研究所自然资源部深地动力学重点实验室,北京 100037;3. 中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100083;4. 吉林大学地球探测科学与技术学院,吉林 长春 100026)

摘要:松辽盆地大陆深部科学钻探工程“松科二井”获得了最完整的沙河子组地层岩心,初步识别出深部页岩气测异常 43 层,累计厚度 102 m,显示出沙河子组地层具有良好的深部能源前景。为进一步分析松辽盆地沙河子组地层油气资源潜力,本文在前人研究的基础上,结合松科二井测井、岩心数据和地震数据,分析松科二井邻域沙河子组地层的层序特征和空间展布,同时以随钻录井记录到的气测异常为出发点,分析沙河子组地层的测井和地震响应。结果显示:松科二井邻域沙河子组地层具有厚度大、横向延续小的地层展布特点,根据测井、岩心及地震数据,将沙河子组地层分为 4 个三级层序:SQ1、SQ2、SQ3 和 SQ4,其中顶部 SQ4 层序具有较好的油气前景,其岩性以泥岩为主,并具有相对较高孔隙度、低波阻抗的测井曲线特征,在地震剖面上表现为连续强振幅,阻抗反演剖面上存在局部低波阻抗特征,揭示了该区沙河子组深层天然气资源的赋存条件。

关键词:松科二井;沙河子组;徐家围子断陷;油气调查工程;深地探测工程

中图分类号:P618.13;P631 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2019)05-1052-09

Structural characteristics of Shahezi Formation beneath the Well SK-2 and its periphery: An analysis of logging and seismic data

FU Wei¹, HOU Hesheng^{1,2}, ZHANG Jiaodong³, LIU Cai⁴, FENG Xuan⁴, LU Zhanwu²

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Center for Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China; 4. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China)

Abstract: During implementation of the Deep Continental Scientific Drilling Engineering Project Well SK-2 in Songliao Basin, the most integrated core data of Shahezi Formation was obtained. And 43 abnormal strata of deep shale gas were preliminarily

收稿日期:2019-03-15;改回日期:2019-06-03

基金项目:中国地质调查局项目(DD20160207, DD20189702, DD20190010)、国家自然科学基金项目(41474081, 41430213, 41590863, 41574093)、自然资源部深地动力学重点实验室自主研究课题(J1901-3)联合资助。

作者简介:符伟,男,1991年生,博士后,主要从事深地震反射数据处理与解释研究;E-mail:614658187@qq.com。

通讯作者:侯贺晟,男,1980年生,副研究员,主要从事深部探测与深部能源远景分析研究;E-mail:hesheng.hou@126.com。

identified, with a cumulative thickness of 102 meters, indicating that Shahezi Formation has good deep energy prospect. For further analysis of oil and gas resources potential of Shahezi Formation in Songliao basin, in this paper, on the basis of previous studies and in combination with well logging, core data of Well SK-2 and the newly acquired 2-d seismic data in the north-south direction crossing Well SK-2, the spatial distribution and sequence characteristics of Shahezi formation in the vicinity of Well SK-2 well were analyzed. At the same time, based on gas abnormal data acquired from logging during drilling, the authors studied logging and seismic responses of oil and gas perspective reservoirs in Shahezi Formation. It is shown that the Shahezi Formation adjacent to Well SK-2 has large thickness but small lateral extension, and hence the authors divided it into 4 stratigraphic sequences based on well logging as well as seismic and core data, i.e., SQ1, SQ2, SQ3 and SQ4. Among the 4 stratigraphic sequences, SQ4 has a better energy prospect. Its lithology is dominated by mudstone and has the characteristics of high porosity and low wave impedance on logging curves, with continuous strong amplitude on seismic section. Impedance inversion section shows the characteristics of large wave impedance alternated with many smaller wave impedances. Thus, the occurrence conditions of deep natural gas resources of Shahezi Formation in this area are revealed.

Key words: Well SK-2; Shahezi Formation; Xujiaweizi fault depression; oil and gas survey project; deep exploration engineering

About the first author: FU Wei, male, born in 1991, postdoctor, mainly engages in deep seismic reflection data processing and interpretation research; E-mail: 614658187@qq.com.

About the corresponding author: HOU Hesheng, male, born in 1980, associate researcher, mainly engages in the study of deep exploration and deep energy perspective analysis; E-mail: hesheng.hou@126.com.

Fund support: Supported by the China Geological Survey Program (No. DD20160207, DD20189702, DD20190010), National Natural Science Foundation of China (No. 41474081, 41430213, 41590863, 41574093) and Independent Research Subject of Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources (No. J1901-3).

1 引言

近年来,对松辽盆地油气资源的勘探逐渐转向深部,改变了原来在3000 m以浅的拗陷层进行勘探开发的能源格局(李德生,1983),实现了松辽盆地深部断陷层火山岩气勘探的突破(冯志强等,2011),同时深层致密砂砾岩气也受到广泛关注(冯子辉等,2013;陆加敏和刘超,2016)。2018年5月26日完井的松辽盆地大陆深部科学钻探工程“松科二井”获得了最完整的断陷层岩心,同时在井中初步识别出深层沙河子组页岩气气测异常43层,累计厚度102 m,显示出松辽盆地断陷层具有良好的非常规天然气资源前景(侯贺晟等,2018)。除实施钻井取心之外,钻探工程还实施了包括地球物理测井(邹长春等,2016)、地表地球物理(重力、磁法、大地电磁、地震等)以及地表元素分析在内的多种深部探测方法,为研究深层油气资源的赋存空间特征提供了详细的资料。

前人针对松科二井所在的徐家围子地区断陷层的基础地质及油气富集情况做了多方面的研究,主要包括断陷层的构造特征(殷进垠等,2002)、区域构造环境(Wang et al., 2016)、沉积充填特征(吕

鹏估等,2014;陈俊安等,2014;蔡全升等,2017)、油气勘探前景(黄薇等,2013,2014;冯子辉等,2013;陆加敏等,2016;刘超等,2017),一致认为沙河子组地层具有良好的深部油气潜力,主要表现为其既是良好的生烃层,又具备致密成藏潜力。然而对于沙河子组地层层序的具体划分还存在争议,且不同层序内深层油气的地球物理响应特征仍需进一步研究。松科二井钻探工程在徐家围子北部注槽带(图1)成功获取了超过2300 m沙河子组地层岩心和测井资料,远远超过此前单口井对沙河子组地层的揭示,为研究松辽盆地沙河子组地层特征提供了最佳“标尺”。因此在综合前人研究成果的基础上,本文结合松科二井测井、岩心数据和新采集的过松科二井南北向二维地震数据,分析松科二井邻域深层沙河子组地层的空间展布和层序特征,同时以随钻录井观测到的气测异常为出发点,综合分析沙河子组不同层序储层物性属性,以此进一步揭示该区沙河子组深层天然气资源的赋存条件。

2 地质背景

松辽盆地处于古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋三大构造域叠合区域,在经历晚古生代基

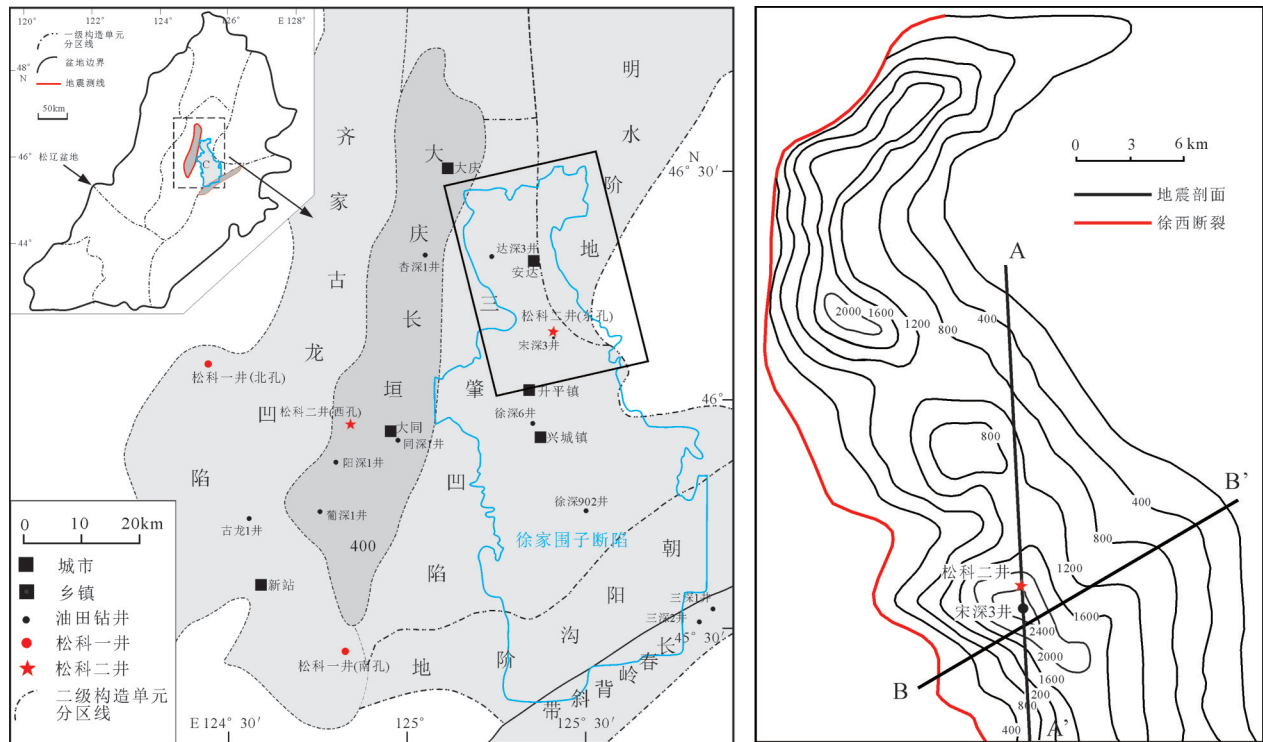


图1 松科二井井位位置(王璞珺等,2017)和松科二井邻区沙河子组地层深度分布图
(据蔡全升,2017修改)

Fig.1 Borehole location of SK-2 (after Wang et al., 2017) and distribution of Shahezi Formation thickness beneath the Well SK-2 and its periphery (modified from Cai et al., 2017)

底拼合和早中生代造山垮塌效应之后(章凤奇等, 2008; Hou et al., 2015; 张兴洲等, 2015; Liu et al., 2017; Zhou et al., 2017), 断陷期(150~105 Ma)的松辽盆地主要受北方蒙古—鄂霍茨克洋关闭和西太平洋俯冲(Wang et al., 2016)的影响, 区域张应力使得深部地幔上隆引发地壳张裂, 盆地基底断块相应地产生了北西—南东向的拆离和差异沉降(胡望水等, 2005), 形成一系列分割的断陷(裂谷)盆地群, 而后期沉积的坳陷层呈逐层上超状披盖在断陷群沉积序列或基底之上, 形成“上坳下断”的叠合盆地。

松科二井所在的徐家围子断陷位于松辽盆地北部, 东南断陷区西侧, 毗邻中央古隆起, 为近南北向展布的西陡东缓箕状断陷构造单元, 面积约4000 km², 其内部可进一步划分为多个凹陷、隆起和斜坡单元(陈均亮, 1999)。徐家围子断陷沉积了完整的断陷期地层, 自下而上包括: 上侏罗统火石岭组、下白垩统沙河子组、营城组, 其中火石岭组与营城子组以发育多期火山—沉积旋回为特征, 而沙河子组则主要为快速堆积的三角洲相或河流相碎屑岩沉

积, 烃源岩和煤层发育(王璞珺等, 2015)。断陷的发生、发展和消亡明显受到区域内多条深大断裂带的控制, 其中徐西断裂发育于火石岭组火山岩地台发育时期, 在沙河子沉积时期大规模伸展和裂陷, 为研究区主要控陷断裂(梁正中等, 2009)。

3 沙河子组地层层序特征

层序的划分对进行区域等时地层对比有着重要作用(蔡来星等, 2015), 前人对松辽盆地沙河子组地层层序的划分主要基于徐家围子断陷内多口钻遇沙河子组的石油钻井和区域内地震资料进行揭示, 限于石油钻井成本与深层钻探难度, 多数井并未完整钻穿整个沙河子组, 对于沉积厚度最大的洼槽带的研究还有不足。松科二井钻遇沙河子地层的深度范围为3337~5680 m, 获得超过2300 m的沙河子组岩心资料与海量测井数据, 为研究洼槽带内沙河子组地层层序提供了新视野(图2)。

从图2的测井曲线和岩心数据可以看出, 沙河子组地层顶底界面清晰, 主要表现为明显的顶部伽

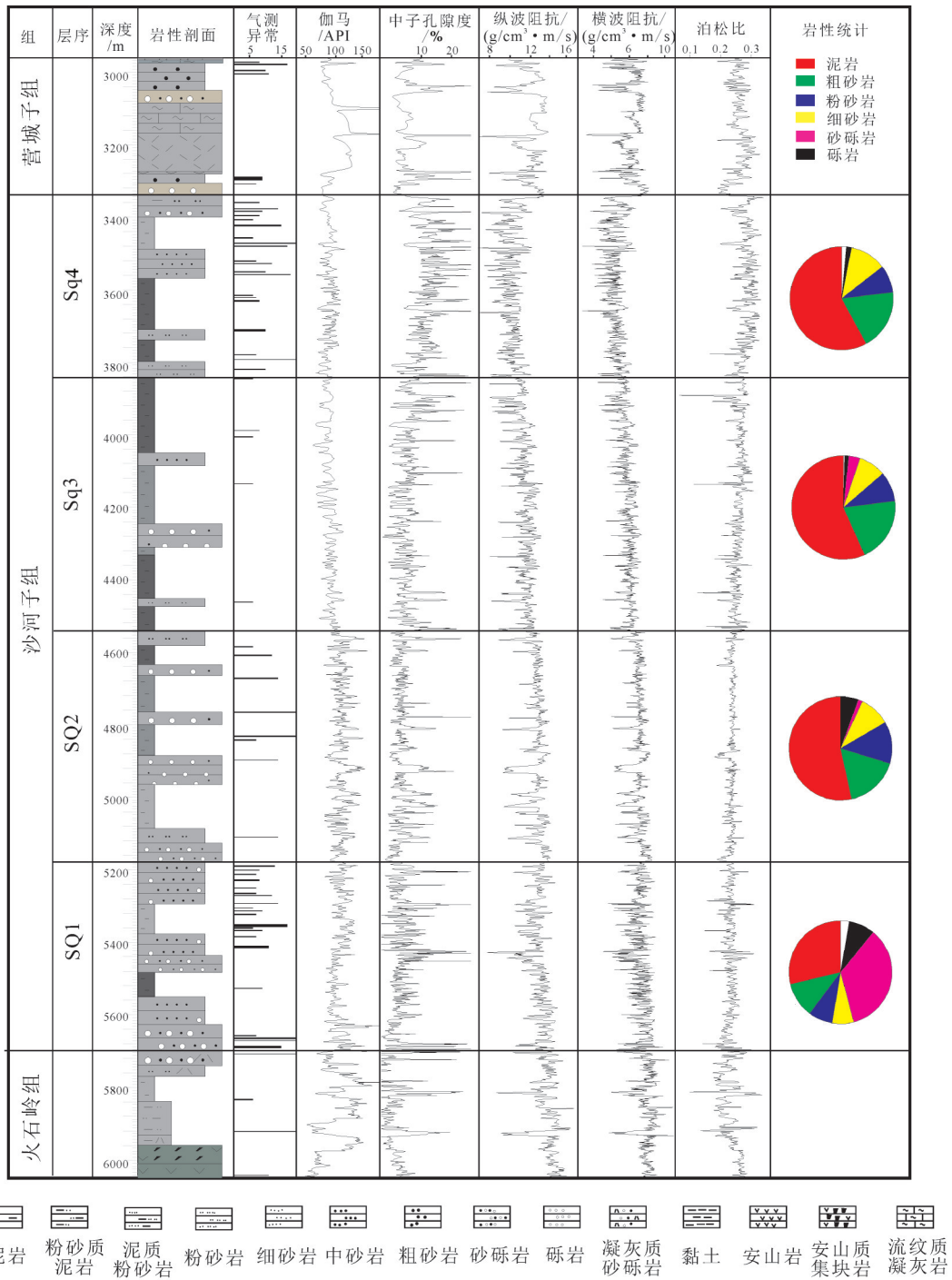


图2 松科二井岩心及测井资料揭示的沙河子组地层层序

Fig. 2 Stratigraphic sequence of Shahezi Formation revealed by core and logging data of Well SK-2

马值和纵、横波阻抗值突然变小,底部伽马曲线由锯齿形变为锯齿箱型,沙河子组地层岩性以砂泥岩和砂砾岩为主,与上下层的火山-沉积间层表现出明显差异,同时在地震剖面上顶底界面均表现为连续性较好的强反射同相轴(图3),前人根据沙河子

组顶底地震界面特征和岩性序列将其归为一个完整的二级层序(蔡来星等,2015;蔡全升等,2017)。结合测井、岩心及地震数据以及前人研究成果,本文将沙河子组地层进一步划分为4个三级层序(表1):

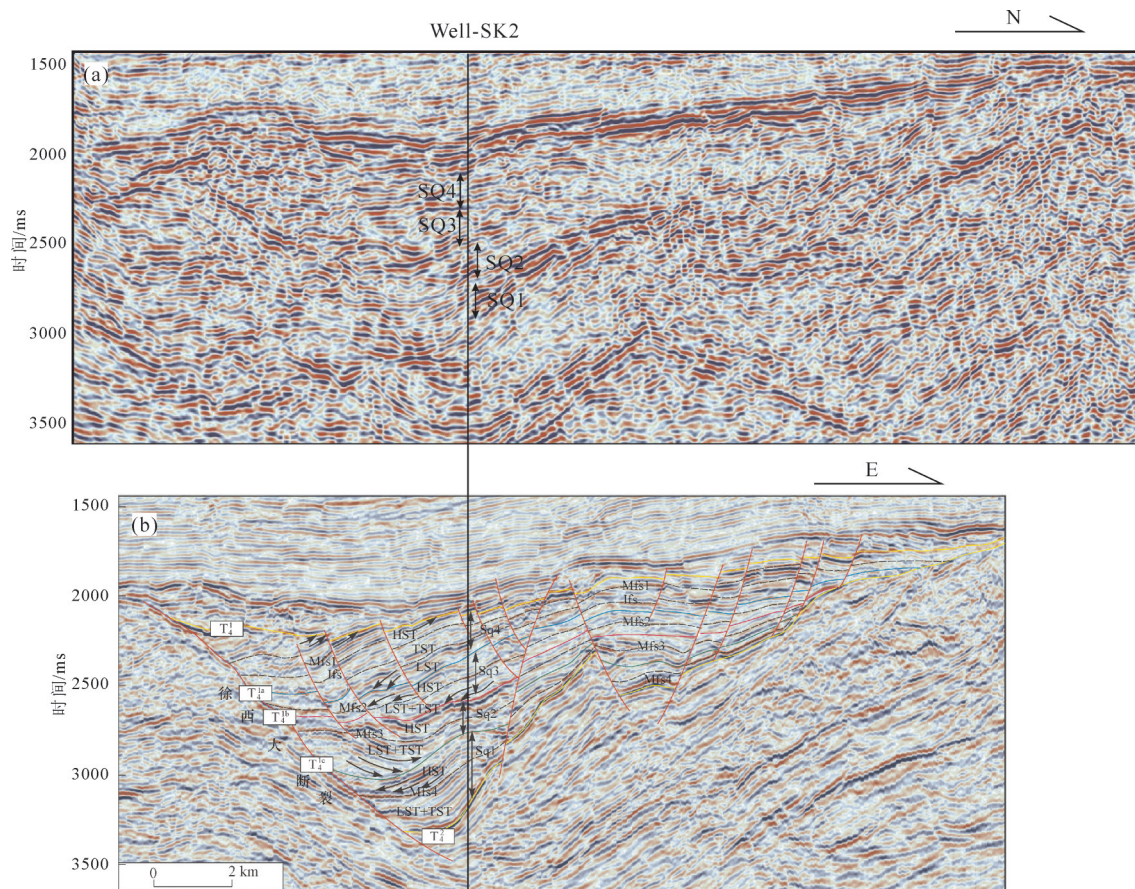


图3 过松科二井南北向剖面(a,位置见图1AA’;资料来源:中国地质调查局项目(DD20160207))和东西向截面(b,据蔡全升等,2017,位置见图1BB’)

Fig. 3 NS-trending profile of Well SK-2 (a, location shown in Fig. 1AA’; Data from China Geological Survey Program (No.DD20160207)) and EW-trending profile (b, after Cai et al., 2017, location shown in Fig. 1BB’)

SQ1层序(5180~5680 m):这一层序沉积时期,徐家围子地区进入强烈断陷阶段,主控徐西大断裂为近南北向展布,裂隙区分布较窄,边界坡度整体偏陡,沉积物搬运距离短,这一时期以扇三角洲沉积为主。通过钻井岩性统计,SQ1层序岩性以砂砾

岩为主,同时包含丰富的泥岩、粗砂岩和砾岩等,其中砂砾岩厚度占比约为35%,泥岩厚度占比约为29%。测井曲线上表现为高伽马值、高波阻抗(速度曲线乘以密度)、低泊松比特征,其数值均值与上覆地层相当,但明显存在多个极值点,在统计学上

表1 松科二井及邻区沙河子组层序特征总结

Table1 Summary of sequence characteristics of Shahezi formation beneath the Well SK-2 and its periphery

三级层序	伽马曲线	阻抗曲线	孔隙度曲线	泊松比曲线	岩性特征	气测异常	曲线方差
SQ4	低值 (均值93.00,标准差15.45)	低值 (均值10.2,标准差1.39)	高值 (均值15.18,标准差5.79)	高值	泥岩为主	明显	大
SQ3	低值 (均值93.25,标准差15.57)	中高值 (均值11.69,标准差1.13)	低值 (均值8.6,标准差4.38)	低值	泥岩为主	存在气测异常	小
SQ2	高值 (均值118.94,标准差20.17)	中高值 (均值12.96,标准差1.12)	低值 (均值7.1,标准差4.1)	低值	泥岩为主	不明显	小
SQ1	高值 (均值114.24,标准差21.67)	高值 (均值13.19,标准差1.37)	局部高值(均值6.67,标准差5.03)	低值	砂砾岩为主	明显	大

表现为较大的方差,而在地震剖面上这一层序表现为连续性较好的席状强反射同相轴(图3),多种特征反映了沉积时期动荡的环境,且在在这一层序地层中探测到多层位具有明显的气测异常,气测异常比值大于5的层位20层,累计厚度42m。

SQ2层序(4540~5180 m):这一层序与上覆地层存在明显的波阻抗间断面,因此在地震剖面上其顶界面表现为强反射同相轴,而内部反射较弱(图3)。其沉积时期湖盆范围进一步扩大,处于洼槽带的松科二井地区水深较大,因此沉积较为稳定,沉积以砂泥岩互层为主,泥岩厚度占比约为54%,单层厚度相对较大,在测井曲线上表现为稳定的形状,伽马值和阻抗值较高,孔隙度较低,同时这一层序内存在气测异常的层位较少,仅在少数孔隙度突然增大的层位出现,且波阻抗与孔隙度曲线存在明显的镜像对称关系,表明层内波阻抗的变化主要由孔隙或者裂隙引起。

SQ3层序(3840~4540 m):与上覆地层相比具有明显的低孔隙度的特征,且孔隙度、波阻抗、泊松比曲线抖动明显小于上覆地层,同时与下伏SQ2层序相比具有明显较低的波阻抗和伽马值,在地震剖面上同样表现为顶底强反射,内部弱反射的特征,岩性与下伏地层相比没有太大变化,岩性仍以砂泥岩为主,其中泥岩厚度占比为57%,层内孔隙度较大的层位存在个别气测异常点。

SQ4层序(3337~3840 m):SQ4地层沉积时期,徐家围子断陷进入强烈断陷期的末期,这一层序在测井曲线上与上覆营城子组地层和下伏SQ3层序地层具有明显的差异,在伽马曲线上为明显低伽马值突变,在中子孔隙度上具有明显高值,纵波阻抗和横波阻抗呈明显低值,泊松比具有明显高值,同时曲线变化剧烈,反映出层间物性变化大,同时层内以泥岩为主,厚度占比为58%,顶部存在一套砂砾岩覆盖其上,在气测录井中表现出多层气测异常,具有较好的油气前景,气测异常比值大于5的层位19层,累计厚度51 m。

4 松科二井邻域沙河子组地层分布特征

由图3所展示的过松科二井南北向二维地震剖面 and 搜集到的东西向截面(蔡全升等,2017),可以

看出,沙河子组地层顶界面为连续性较好的强反射同相轴,而沙河子组地层底界面为单侧连续型强反射同相轴,而其内部反射强弱多变,中部存在一组较强的反射同相轴。

综合东西向截面和南北向剖面可以观察到,沙河子组最厚的部分在地震剖面上显示为大约1.2 s,而松科二井记录到的沙河子组地层厚度为2343 m,平均速度为4.52 m/s,通过测井速度换算成地震波双程走时约为1.04 s,估计研究区范围内沙河子地层的最大厚度可超过2500 m。同时,从剖面可以看出,不管是东西方向还是南北方向,沙河子组地层的厚度都急剧变化,整体展布表现为南北方向略长的箕状构造(图4),松科二井所在的洼槽带在东西方向延续约20 km,在南北方向上延续约25 km,且在东西方向结构表现为明显西断东超的结构,东西向截面断层成像清晰,这表明洼槽带的沉积主要受西侧徐西断裂带的控制。综上所述,松科二井邻域沙河子组发育的特点主要表现为,深度大但横向变化剧烈且延续短,符合松辽盆地发育初期强烈断陷作用下小湖盆沉积的特点。

5 物性特征及地震响应特征

通过前文分析可以得出,沙河子组地层泥岩含量较高,为油气的生成提供了良好的烃源岩(侯贺晨等,2018)。松科二井邻区沙河子组气测异常点

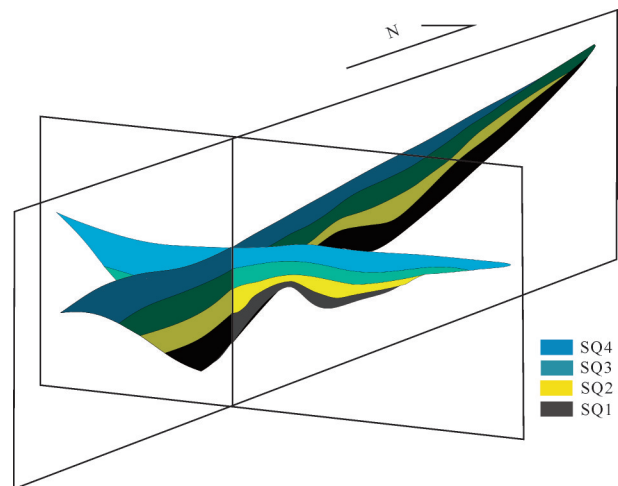


图4 松科二井及邻区沙河子地层空间展布模型
Fig. 4 Spatial distribution model of Shahezi Formation beneath the Well SK-2 and its periphery

所在层位主要表现为,孔隙度增大,阻抗值减小,整体层位在测井曲线齿化特征明显,如SQ4层序和SQ1层位顶部。沙河子组地层中子孔隙度曲线整体上与波阻抗曲线具有明显的负相关性,即孔隙度大的位置对应阻抗变小的层位,而高孔隙度层位为油气的聚集提供了可能。然而通过测井数据这只能提供特定点位沙河子组油气远景层的响应特征,其能否代表研究区范围内沙河子组油气远景层的整体特征还需要利用三维地震数据响应进行验证。因此,下文利用波阻抗反演研究松科二井邻区沙河子组地层的阻抗变化与油气响应的关系。

波阻抗反演采用稀疏脉冲反演算法,其原理是从地震道中根据稀疏原则抽取反射系数,与子波褶积生成合成地震记录道,并与原始地震道作残差修改反射系数,通过不断迭代得到最逼近原始地震道的反射系数序列。同时利用测井声波阻抗拟合的阻抗趋势线和在趋势两边定义的约束线作为约束,来控制阻抗的变化范围,减少反演的多解性,得到相对波阻抗,在补偿低频信息后得到绝对波阻抗。波阻抗反演的流程如下:(1)选取信噪比较高的地震纯波数据体提取地震子波;(2)制作合成地震记录进行井

震标定;(3)地质层位解释并以测井数据为约束建立低频模型;(4)利用稀疏脉冲反演算法进行波阻抗反演,并于低频模型合并求取纵波阻抗。

如图5所示,为利用测井约束的过松科二井东西向截面的波阻抗反演结果,波阻抗从浅入深保持递增趋势,符合泥岩随压实波阻抗增加的趋势,同时SQ1层序波阻抗纵向变化较大,表现出明显的高低交互特征,这可能与岩性的变化和油气的聚集相对应。而SQ2层序和SQ3层序则表现为较为稳定,对应层内孔隙或裂隙较不发育。同时可以观察到气测异常明显层位对于波阻抗局部低值部位,这与通过测井数据分析的结果相符,表明利用地震数据进行波阻抗反演是检测松科二井邻区沙河子深层油气远景层的有效手段。

综合松科二井及邻区地球物理测井、气测录井(图2)和地震波阻抗反演结果(图5)分析可知,研究区内潜在的含油气地层(气测异常层位)主要表现为以下几个特征:(1)含油气层位岩性主要为砂岩和泥岩为主,同时存在砂砾岩含油气地层;(2)含油气层位在测井曲线上表现为相对高孔隙度特征和低纵、横波速度特征;(3)含油气层位在地震波阻抗剖面上

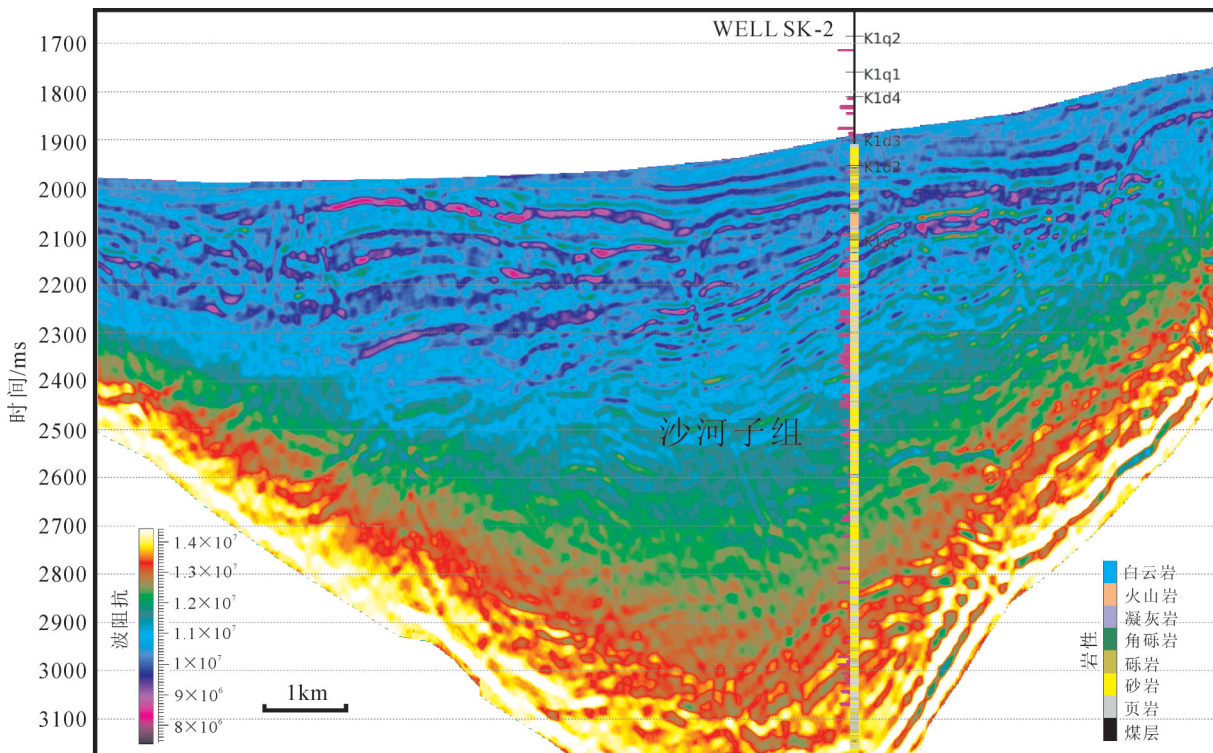


图5 东西向截面波阻抗反演结果(资料来源:中国地质调查局项目(DD20189702))

Fig. 5 Impedance inversion results of EW-trending profile(Data source:China Geological Survey Program(DD20189702))

表现为相对低波阻抗特征,且可观测到低波阻抗异常表现为具有一定横向延续性的窄带特征,表明沙河子地层含油气地层具有横向连续但单层厚度小的分布特点。在本文所划分的4个层序中,SQ4层序整体孔隙度较大并存在多个连续性较好的低波阻抗异常层位,具有相对较好的深层油气资源潜力。

6 结 论

本文结合松科二井岩心、测井资料以及过井地震剖面分析了松科二井邻域沙河子组地层井震响应特征,得出以下结论:

(1) 松科二井揭示了徐家围子断陷内的巨厚洼槽带地层纵向分布特征,断陷内沙河子组地层呈箕状分布,具有厚度大,横向延续性小的特点。

(2) 沙河子组地层可根据测井曲线及岩心资料分为四个不同的层序,其中SQ1和SQ4层序测井曲线上齿状特征明显,在地震剖面上表现为连续强反射同相轴,而SQ2和SQ3层序则表现为弱反射,但顶底界面反射清晰。

(3) 沙河子组油气远景层的地震响应主要表现为连续性较好的强振幅反射,整体低波阻抗较火山岩地层小,层内局部低值部位对应气测异常层位,通过分析认为松科二井邻域沙河子组顶部SQ4层序存在多处局部低值区,认为具有相对较好的非常规气资源潜力。

致谢: 本研究得到所属工程首席吕庆田研究员的大力支持,张金昌研究员及邹长春教授及时提供了松科二井测录井资料,在此表示衷心的感谢。

References

- Cai Laixing, Liu Shangfang, Gong Xinghui, Wang Haisheng, Wei Ran. 2015. Sequence stratigraphic framework and sedimentary characteristics for Shahezi Formation in south Xujiaweizi fault depression[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, (1):1-8(in Chinese with English abstract).
- Cai Quansheng, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, Deng Meng. 2017. Sedimentary filling evolution of small-scale lake basins during intensive faulting: An example from the Shahezi Formation of Songzhan region in Xujiaweizi fault depression, Songliao basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 38(2):259-269(in Chinese with English abstract).
- Chen Jun'an, Zhao Zehui, Jiang Li. 2014. The establishment of sequence stratigraphic framework and its models of the Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 14(10): 183-190(in Chinese with English abstract).
- Chen Junliang. 1999. Tectonic characteristics and episodic evolution of the northern fault depression in Songliao Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4): 14-18(in Chinese with English abstract).
- Feng Zhiqiang, Liu Jiaqi, Wang Pujun, Chen Shumin, Feng Zihui, Tong Ying. 2011. New oil and exploration field: Volcanic hydrocarbon reservoirs—Enlightenment from the discovery of large gas field in Songliao Basin[J]. *Chinese J. Geophys.*, 54(2): 269-279(in Chinese with English abstract).
- Feng Zihui, Yin Changhai, Lu Jiamin, Zhu Yingkang. 2013. Formation and accumulation of tight sandy conglomerate gas: A case from the Lower Cretaceous Yingcheng Formation of Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40(6):650-656(in Chinese with English abstract).
- Hu Wangshui, Lü Binqun, 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 Wei, Yang Buzeng, Sun Lidong, Li Guangwei, Wang Qiuju, Wang Xiaolian. 2014. Distributing laws and exploratory potentials of the fault depressions in north Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 33(5): 76-81(in Chinese with English abstract).
- Huang Wei, Wang Zhiguo, Dong Jinghai, Zhou Yue. 2013. Application of seismic data for forecasting hydrocarbon source rocks in Shahezi Formation of Xujiaweizi fault depression[J]. *Global Geology*, 32(3):571-578(in Chinese with English abstract).
- Li Desheng. 1983. The geological characteristics of hydrocarbon generation and distribution in the Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2(2):5-13(in Chinese with English abstract).
- Liang Zhengzhong, Cai Zhouong, Mo Zhifeng, Li Chang. 2009. Relationship between Xuxi discordogenic fault and volcanic reservoir formation, Xushen Area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 20(3): 372-377(in Chinese with English abstract).
- Liu Chengzhi, Wang Zijia. 2014. Reservoir characteristics of Shahezi Group Xujiaweizi fault depression[J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 27(1): 52-55(in Chinese with English abstract).
- Liu Chao. 2017. Source rocks and tight conglomerate gas resource potential evaluation in Shahezi Formation of Xujiaweizi depression, Songliao basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 28(3): 429-438(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongjiang, Li Weimin, Feng Zhiqiang, Wen Quanbo, Neubauer Franz, Liang Chenyue. 2017. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 43:123-148.
- Lu Jiamin, Liu Chao. 2016. Accumulation conditions and resource

- potential of tight glutenite gas in fault depression basins: A case study on Lower Cretaceous Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 21(2): 53–60(in Chinese with English abstract).
- Lyu Pengji, Liu Chengzhi, Yankang, Zhang Jiwei. 2014. Study on the seismic facies of the Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression in Songliao Basin[J]. *Geology and Resources*, 23(4): 330–334(in Chinese with English abstract).
- Wang Pujun, Mattern F, Didenko N A, Zhu Defeng Singer B Sun Xiaomeng. 2016. Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: An inverted active continental margin basin[J]. *Earth-Science Reviews*, 159: 82–102.
- Wang Pujun, Zhao Ranlei, Meng Qi'an, Qu Xuejiao, Zhu Defeng, Gao Youfeng. 2015. The Cretaceous Songliao Basin: Dynamic background from volcanic rift to interior sag basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(3):99–117(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).
- Hou Hengsheng, Wang Haiyan, Gao Rui, Li Qiusheng, Li Hongqiang, Xiong Xiaosong, Li Wenhui, Tong Ying. 2015. Fine crustal structure and deformation beneath the Great Xing'an Ranges CAOB: Revealed by deep seismic reflection profile[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113:491–500.
- Yin Jinyin, Liu Hefu, Chi Jianghai. 2002. Evolution and gas accumulation of Xujiaweizi Depression in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 23(2): 26–29(in Chinese with English abstract).
- 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 Xingzhou, Zhou Jianbo, Chi Xiaoguo, Wang Chengwen, Hu Daqian. 2008. Late Paleozoic tectonic– sedimentation and petroleum resources in Northeastern China[J]. *Journal of Jilin University*, 38(5): 719–725(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianbo, Wilde Simon, Zhao Guochun, Han Jie. 2018. Nature and assembly of microcontinental blocks within the Paleo– Asian Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 76–93.
- 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).
- 成藏主控因素探讨及有利探区预测[J]. *石油天然气学报*, (1):1–8.
- 蔡全升, 胡明毅, 胡忠贵, 邓猛. 2017. 强烈断陷期小型湖盆沉积充填演化特征——以松辽盆地徐家围子断陷宋站地区沙河子组为例[J]. *石油与天然气地质*, 38(2):259–269.
- 陈俊安, 赵泽辉, 江黎. 2014. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组层序地层格架建立与模式研究[J]. *科学技术与工程*, 14(10):183–190.
- 陈均亮, 蔡希源, 林春华, 王洪艳, 雷茂盛. 1999. 松辽盆地北部断陷盆地构造特征与幕式演化[J]. *石油学报*, 20(4): 14–18.
- 冯志强, 刘嘉麒, 王璞珺, 陈树民, 冯子辉, 童英. 2011. 油气勘探新领域:火山岩油气藏——松辽盆地大型火山岩气田发现的启示[J]. *地球物理学报*, 54(2): 269–279.
- 冯子辉, 印长海, 陆加敏, 朱映康. 2013. 致密砂砾岩气形成主控因素与富集规律——以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统营城组为例[J]. *石油勘探与开发*, 40(6): 650–656.
- 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.
- 黄薇, 杨步增, 孙立东, 李广伟, 王秋菊, 王晓莲. 2014. 松辽盆地北部深层断陷分布规律及勘探潜力[J]. *大庆石油地质与开发*, 33(5): 76–81.
- 黄薇, 王志国, 董景海, 周玥. 2013. 地震资料在徐家围子断陷沙河子组潜在烃源岩预测中的应用[J]. *世界地质*, 32(3):571–578.
- 李德生. 1983. 松辽盆地的油气形成和分布特征[J]. *大庆石油地质与开发*, 2(2): 5–13.
- 梁正中, 蔡周荣, 万志峰, 李昌. 2009. 徐深地区徐西深大断裂特征与火山岩天然气成藏条件[J]. *天然气地球科学*, 20(3): 372–377.
- 柳成志, 王子佳. 2014. 徐家围子断陷沙河子组储层特征研究[J]. *石油化工高等学校学报*, 27(1): 52–55.
- 刘超. 2017. 松辽盆地徐家围子地区沙河子组气源岩与致密砂砾岩气资源潜力评价[J]. *天然气地球科学*, 28(3): 429–438.
- 陆加敏, 刘超. 2016. 断陷盆地致密砂砾岩气成藏条件和资源潜力——以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统沙河子组为例[J]. *中国石油勘探*, 21(2): 53–60.
- 吕鹏倩, 柳成志, 颜康, 张继伟. 2014. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组地震相研究[J]. *地质与资源*, 23(4): 330–334.
- 王璞珺, 赵然磊, 蒙启安, 瞿雪姣, 朱德丰, 高有峰. 2015. 白垩纪松辽盆地:从火山裂谷到陆内拗陷的动力学环境[J]. *地学前缘*, 22(3): 99–117.
- 殷进垠, 刘和甫, 迟海江. 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.
- 张兴洲, 郭治, 曾振, 付秋林, 蒲建彬. 2015. 东北地区中—新生代盆地群形成演化的动力学背景[J]. *地学前缘*, 22(3): 88–98.
- 邹长春, 肖亮, 牛一雄, 侯颖, 彭诚. 2016. 松辽盆地科学钻探工程松科2井东孔测井设计[J]. *地学前缘*, 23(3): 279–287.

附中文参考文献

蔡来星, 卢双舫, 赵开宇. 2015. 徐家围子断陷南部沙河子组致密气