

doi:10.3969/j.issn.2097.0013.2021.03.005

湖南省涟源凹陷泥盆纪余田桥组页岩储层测井评价

吕 嵘¹, 张保民¹, 李 芳², 田 巍¹

LÜ Rong¹, ZHANG Bao-min¹, LI Fang², TIAN Wei¹

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205; 2. 中石化江汉石油工程有限公司测录井公司, 湖北 潜江 433100)

(1. Wuhan Center of Geological Survey, CGS, Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Logging Company of Jianghan Petroleum Engineering Co., Ltd, Sinopec, Qianjiang 433100, Hubei, China)

摘要: 湘中地区涟源凹陷泥盆纪余田桥组(D_{3s})富有机质页岩发育,区内参数井-湘新页1井(XXY-1)已在该组钻遇良好页岩气。为研究该套储层特征,依托湘新页1井的岩心和测井资料,通过数控测井系统的综合测井曲线响应特征和数据处理结果对该套储层进行了评价。结果表明,湘新页1井泥盆纪余田桥组底部为优质页岩发育段,厚度达81.1 m,页岩TOC、物性均较好,具有较大资源潜力。

关键词: 页岩储层; 测井评价; 余田桥组; 涟源凹陷; 湖南省

中图分类号: P534.44; P631.8+15

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2021)03-0313-08

Lü R, Zhang B M, Li F and Tian W. Logging Evaluation of Shale Reservoir in Devonian Shetianqiao Formation in Lianyuan Sag, Hunan Province. *South China Geology*, 2021, 37(3):313-320

Abstract: The Devonian Shetianqiao Formation (D_{3s}) in Lianyuan sag, central Hunan Province is rich in organic shale, and has been encountered good shale gas in the parameter well XXY-1. The core and logging data of the XXY-1 well were used to study the shale reservoir characteristics of Devonian Shetianqiao Formation in Lianyuan sag, and the reservoir was evaluated through comprehensive logging curve response and data processing results of NC logging system. The results show that the bottom of the Devonian Shetianqiao Formation of XXY-1 well is a 81.1 m thick high-quality shale section with high TOC and good physical properties, and has great resource potential.

Key words: shale reservoir; logging evaluation; the Shetianqiao Formation; Lianyuan sag; Hunan Province

北美页岩气开发推动了全球非常规天然气资源的勘探开发^[1-5],其主要开发层系是泥盆系。近年来,中国页岩油气调查也取得长足进展,尤其是中国南方页岩气已在湖北宜昌、贵州正安等地区取得重大突破,成为我国重要的页岩气资源基地,而湖南湘中地区也是中国南方有望取得突破的潜在页岩气资源基地之一。

湘中涟源凹陷的油气勘查工作始于20世纪60年代,研究成果已证实涟源凹陷页岩气资源丰富,页岩广泛发育于泥盆系、石炭系、二叠系和下三叠统之中;但以往的研究内容多集中在地球化学方法、物性特征等方面^[6-8],对页岩储层测井评价方法的研究则相对薄弱。

收稿日期:2021-7-21;修回日期:2021-8-31

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“湘鄂地区页岩气战略选区调查(DD20190109)”

第一作者:吕嵘(1973—),男,高级工程师,主要从事南方页岩气战略选区调查。E-mail:lvrong2012@126.com

近期在涟源凹陷部署的湘新页1井,是由中国地质调查局武汉地质调查中心承担完成的湘中泥盆系的第一口页岩气参数井,在泥盆纪余田桥组(D_{3s})钻遇良好的页岩气,显示出该套储层具有较好的页岩气资源潜力。为了进一步查明湘中泥盆系页岩气资源,本文以湘新页1井测井资料为主,利用单井测井曲线响应特征和数据处理,对泥盆纪余田桥组页岩储层进行综合评价,为下一步该井压裂试气提供依据。

1 区域地质背景

湘中坳陷大地构造上位于华夏褶皱带北部,西邻江南雪峰隆起,北靠沅山隆起,南接桂中坳陷,东邻衡山隆起,是以下古生界变质岩系为基底发展起来的晚古生代-中生代准地台型沉积坳陷区,可进一步划分为涟源凹陷、龙山凸起、邵阳凹陷、关帝庙凸起和零陵凹陷等五个二级构造单元(图1)。涟源凹陷位于湘中坳陷北端,整体呈北西西向展布,面积约6770 km²,构造样式较复杂,可进一步划分为西北断褶带,中部褶皱带和东部褶皱带。

湘中坳陷中上泥盆统泥页岩层系是在加里东

褶皱基底上发育起来的,有机质主要富集在海侵体系域上部棋梓桥组(D_{2-3q})和高水位体系域下部余田桥组。余田桥组沉积时期,继承了棋梓桥组晚期台盆与碳酸盐台地相间的沉积格局(图2),岩性由底部的泥页岩向上过渡为泥灰岩、泥岩为主,与下伏棋梓桥组呈渐变接触关系,向上泥质含量增多,具有较好的生烃潜力^[9-11]。

2 湘新页1井余田桥组地层划分

湘新页1参数井部署在涟源凹陷台盆相区,钻遇地层自上而下依次为:下石炭统测水组(C_{1c})、石磴子组(C_{1s})、天鹅坪组(C_{1t})、马栏边组(C_{1m}),上泥盆统孟公坳组(D_{3m})、欧家冲组(D_{3o})、锡矿山组(D_{3x})、余田桥组(D_{3s});中泥盆统棋梓桥组(D_{2-3q})、易家湾组(D_{2y})。其中,余田桥组厚度很大,累计达1461 m(1109~2570 m深度)。

结合岩性与测井响应特征,余田桥组可划分为上、中、下三段(图3):上部(1109-1508 m深度)以泥岩、灰质泥岩为主夹灰岩,伽马值整体呈现中-高值,为50-90 API,双侧向电阻率整体呈现为低-中值,为30-100 Ω·m;中部(1508-2103 m深度)以

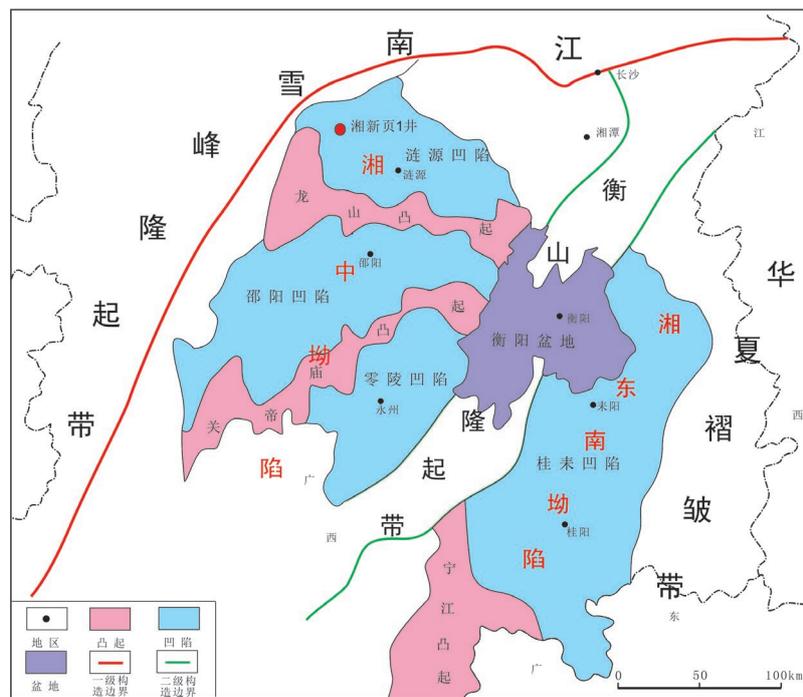


图1 湘中坳陷构造单元划分图

Fig. 1 Division of tectonic units in the Xiangzhong Depression

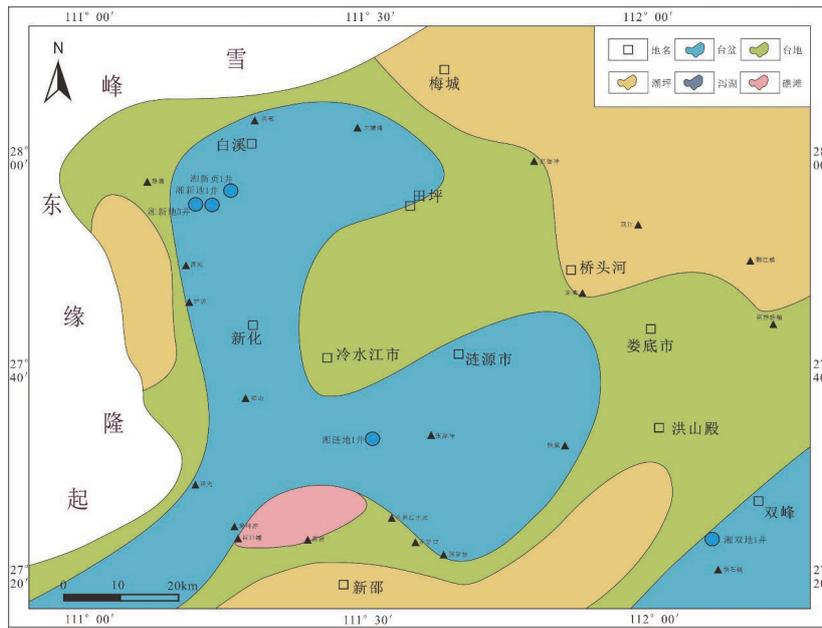


图 2 湘中坳陷泥盆纪余田桥组沉积相展布图

Fig. 2 Sedimentary facies distribution of Devonian Shetianqiao Formation in the Xiangzhong Depression

泥灰岩为主夹泥质灰岩互层,伽马值整体呈现低-中值,为 20-75 API,双侧向电阻率整体为低-中高值,为 30-800 $\Omega \cdot m$,其中 1520-1537 m 深度为该井余田桥组纯灰岩标志段(伽马值为 10API,双侧向电阻率为 5000 $\Omega \cdot m$ 左右);下部(2103-2570 m 深度)以泥岩、泥页岩、砂泥岩为主,伽马值整体呈现中-高值,为 50-100 API,双侧向电阻率曲线呈锯齿状,整体为中值,为 100 $\Omega \cdot m$ 左右;其中 2486-2567 m 深度有一套高伽马值的页岩,伽马值为 100-130 API,为该井余田桥组伽马最高值处,双侧向电阻率呈现明显低值,为 4-20 $\Omega \cdot m$,是该井余田桥组电阻率最低值处。

余田桥组底界的灰质页岩与下伏棋梓桥组顶部泥质灰岩接触界面处的电性特征变化特征明显,表现为双侧向电阻率值明显升高、伽马值明显下降,据此可限定余田桥组底界深度为 2570 m。

3 余田桥组页岩储层测井评价

3.1 页岩储层的识别

页岩作为一种烃源岩往往具有极低的孔隙度和基质渗透率,其生烃、排烃、运移、聚集和保存均在内部完成^[12-15]。天然气可以储藏在页岩岩石颗粒

之间的孔隙或裂缝中,也可以吸附在页岩的有机物表面上。

国内目前应用于页岩储层识别的方法主要包括自然伽玛、双侧向电阻率、自然电位、声波时差、密度和补偿中子等常规测井方法,但对于评价页岩储层的物性方面需要采用特殊测井技术,如自然能谱测井、元素俘获测井、核磁共振测井等^[16]。

国内外的大量资料表明:含气页岩的测井曲线具有明显的高自然伽玛、高电阻率、低地层体积密度和高声波时差、高中子孔隙度等特征^[17]。同时,结合自然能谱测井(U, Th, K),有助于准确、详细地划分岩性,其中页岩具有较高的 U、Th、K 含量。

借鉴国内外成功经验,本次研究对湘新页 1 井开展了组合测井、自然伽马能谱测井等工作,查明在余田桥组底部发育含有机质页岩段(2486.5-2567.6 m 深),厚度为 81.1 m,该段即为本文开展测井评价的页岩储层井段,其中 2541.1-2567.6 m 深度为优质页岩段,厚度为 26.5 m(图 4)。

3.2 页岩储层的评价参数及计算

页岩储层的评价参数包括黏土矿物含量、有机碳含量、孔隙度、渗透率、含气量等,本文主要运用自然伽马能谱测井、FMI 成像测井、核磁共振测井等方法,获取湘新页 1 井余田桥组页岩段储层参数。

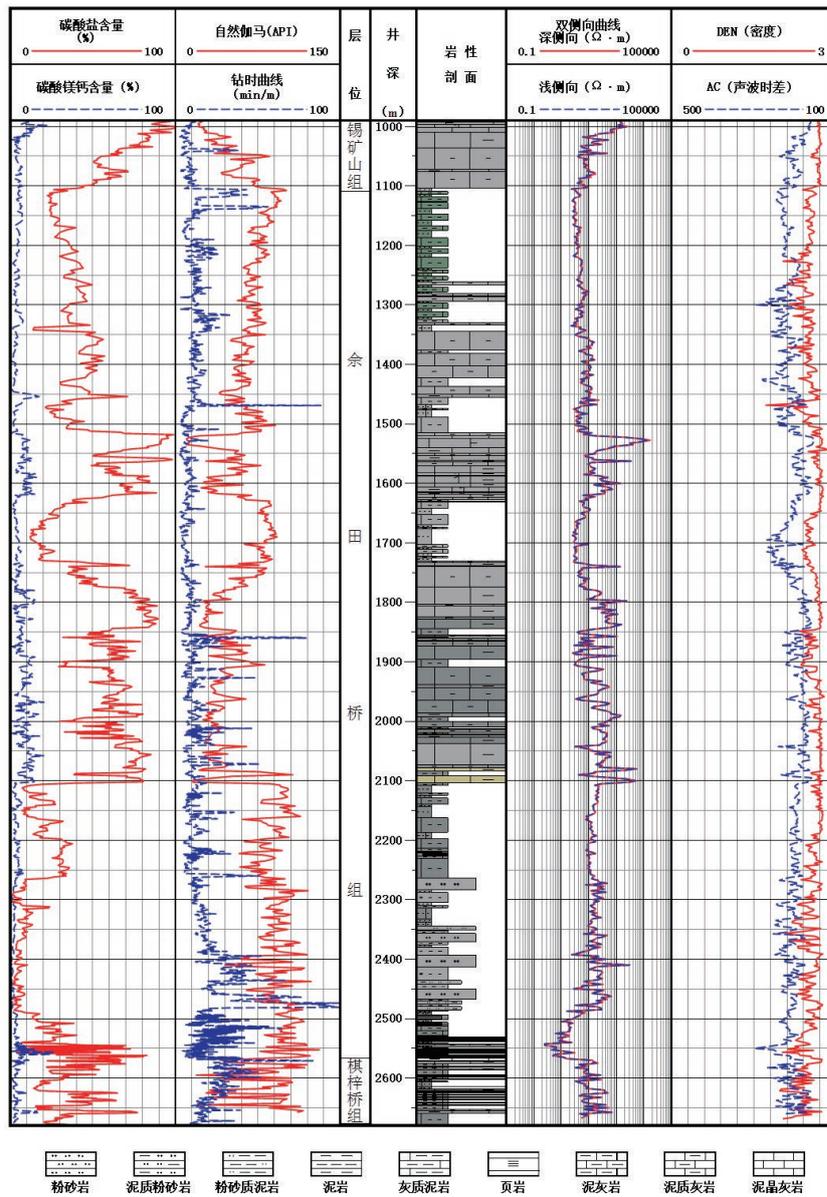


图3 湘新页1井余田桥组测井解释成果图(1109–2570 m深度)

Fig. 3 Log interpretation of the Shetianqiao Formation in the XXY1 well (1109–2570 m deep)

3.2.1 黏土矿物含量

在自然伽马能谱测井资料中,通常认为钾(K)含量、钍(Th)含量及其总和(KTh)与泥质含量的具有较好的线性关系,铀含量(U)与泥质含量关系较复杂,高铀有时会指示渗透性良好的储集层^[18]。因此,一般情况下,可以同时利用K、Th、K-Th曲线或根据地质情况选其中一条曲线,计算地层泥质含量。泥页岩储层解释计算的黏土含量是指地层中的伊蒙混层、伊利石、绿泥石以及高岭石等黏土矿物总含量,黏土含量的计算精度不但影响着储层的矿

物成分含量计算,还直接影响着储层孔隙度及储层脆性参数的计算精度^[19–20]。

一般来讲,在绝大多数黏土矿物中,钾和钍的含量高,而铀的含量相对较低,根据石强^[21]提出的黏土矿物含量定量确定原则,Th/K值可大致确定黏土类型,依据见表1。

基于湘新页1井自然伽马能谱测井Th、K数据做的余田桥组黏土矿物Th-K交会图和直方图(图5)可以看出:余田桥组Th/K值集中在3.5–12之间,黏土矿物成分以蒙脱石为主。

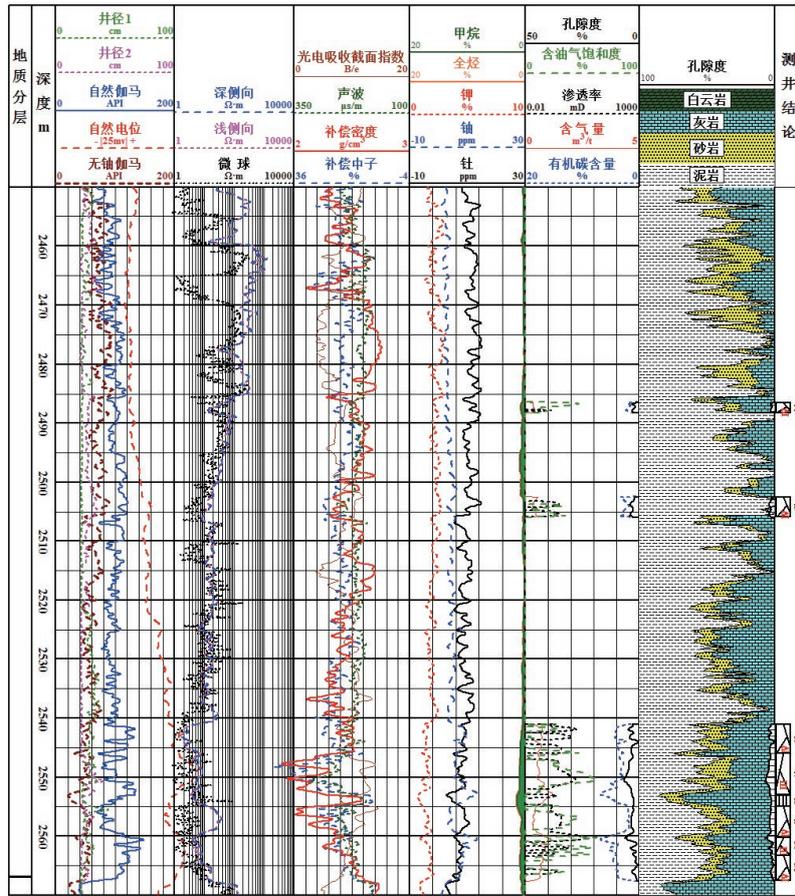


图 4 湘新页 1 井页岩段测井曲线图(2450–2570 m 深度)

Fig. 4 Logging curve of shale section of the XXY1 well(2450–2570 m deep)

表 1 各种黏土矿物的 Th/K 判断依据 (据文献 [21] 划分)

Table 1 Th / K judgment basis of various clay minerals

| 矿物类型 | 重钼矿 | 高岭石 | 蒙脱石 | 伊利石 | 云母 | 海绿石 | 长石 | 钾蒸发岩 |
|----------|-----|-------|--------|-------|-------|---------|---------|------|
| Th/K 值范围 | >28 | 12–28 | 3.5–12 | 2–3.5 | 1.5–2 | 0.8–1.5 | 0.5–0.8 | <0.5 |

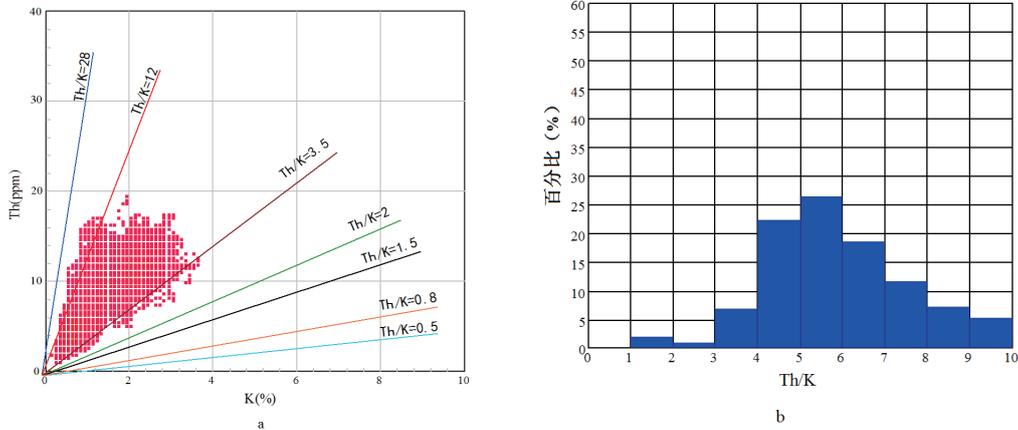


图 5 湘新页 1 井余田桥组 Th-K 交会图(a)和直方图(b)

Fig. 5 Th–K cross plot (a) and histogram (b) of the ShetianqiaoFormation of XXY 1 well

从自然伽马能谱测井曲线(图6)来看,湘新页1井余田桥组底部页岩段(2486.5–2567.6 m深度)从上到下总自然伽马曲线幅度升高,KTh曲线下降趋势明显,而去铀伽马曲线与KTh曲线趋势一致,主要是因为U系元素在地层中含量升高,导致总

伽马射线幅度增强,而K、Th含量稍有降低。通过对比自然伽马能谱测井曲线图可以判断,同井段的黏土类矿物含量从上到下呈下降趋势,本段地层U曲线数值升高说明了余田桥组地层中黏土矿物颗粒直径较小,粒度较细,吸附了较多的高放射性U。

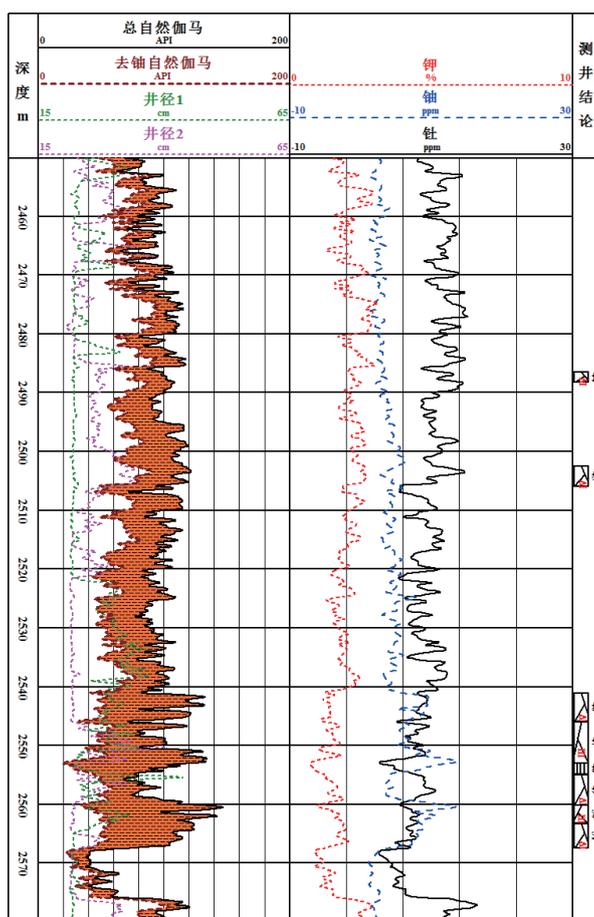


图6 湘新页1井余田桥组页岩段自然伽马能谱测井曲线图

Fig. 6 Natural gamma ray spectrum logging curve of the Shetianqiao Formation shale section of the XXY1 well

3.2.2 物性参数

核磁共振测井方法在页岩储层物性参数(包括粘土孔隙度、有效孔隙度、束缚水孔隙度和可动流体孔隙度、渗透率、孔喉半径等参数)计算、储层流体类型判别中具有独特的优势。核磁共振测量结果不受岩石骨架成分的影响,可以准确提供地层中孔隙度的大小,也可以提供与岩石的孔喉半径和孔隙结构有关的区间孔隙度^[22-24]。

利用核磁共振测井方法对湘新页1井2486.5–2567.6 m页岩段的44–50号有效小层的物性参数

进行了计算(45、47、48层因扩径数据失真剔除),核磁计算的总孔隙度为3.0%–4.5%,平均3.3%;有效孔隙度为1.0%–2.4%,平均1.6%;渗透率为0.01–0.04 md,平均0.02 md。44、46、49、50号层(45、47、48层因扩径排除)的孔隙以黏土束缚流体孔隙为主,毛管束缚流体孔隙度次之,储层物性较差。虽部分小层因扩径核磁计算的物性数据失真,但各小层的测井解释结论是综合多种方法和参数评价的结果,将44、45、46、48、50号层解释为Ⅲ类页岩气层,47、49号层解释为Ⅱ类页岩气层结论仍较可靠。

3.2.3 有机碳含量

有机碳(TOC)含量是反映页岩有机质丰度的指标,是页岩气聚集最重要的控制因素^[25]。测井自然伽玛能谱的铀含量与地层中的有机碳含量具有相关性。

对湘新页 1 井余田桥组 2486.5 – 2567.6 m 页岩段做了 U 含量与录井实测 TOC 含量交会图(图 7),结果表明该页岩段 U 含量与录井实测 TOC 含

量的相关性较好, $R^2=0.7924$ 。湘新页 1 井可以用测井 U 含量数据来建立余田桥组页岩 TOC 含量计算模型,建立的 TOC 含量计算模型公式为:

$$TOC=0.4538 \times U+0.3745 \quad (1)$$

湘新页 1 井 2486.5 – 2567.6 m 页岩段利用测井模型计算出的 TOC 含量平均为 1.81%,录井实测的 TOC 含量平均为 1.73%,二者绝对误差为 0.05%,基本吻合。

表 2 湘新页 1 井余田桥组页岩段核磁共振测井解释成果表

Table 2 Nuclear magnetic resonance logging interpretation results of shale section of XXY 1 well

| 层号 | 井段 (m) | 厚度 (m) | 粘土束缚流体孔隙度 (%) | 毛管束缚流体孔隙度 (%) | 可动流体孔隙度 (%) | 有效孔隙度 (%) | 总孔隙度 (%) | 渗透率 (md) | 解释结论 | 备注 |
|----|---------------|--------|---------------|---------------|-------------|-----------|----------|----------|--------|----|
| 44 | 2486.5-2488.3 | 1.8 | 1.1 | 1.3 | 0.6 | 1.9 | 3.0 | 0.03 | Ⅲ类页岩气层 | |
| 45 | 2502.5-2506.0 | 3.5 | 2.6 | 4.7 | 1.0 | 5.7 | 8.3 | 0.10 | Ⅲ类页岩气层 | 扩径 |
| 46 | 2541.1-2546.0 | 4.9 | 0.9 | 1.8 | 0.3 | 2.1 | 3.0 | 0.04 | Ⅲ类页岩气层 | |
| 47 | 2546.0-2553.0 | 7.0 | 1.9 | 9.7 | 1.0 | 10.7 | 12.6 | 0.10 | Ⅱ类页岩气层 | 扩径 |
| 48 | 2555.0-2560.1 | 5.1 | 1.1 | 5.0 | 0.6 | 5.6 | 6.7 | 0.10 | Ⅲ类页岩气层 | 扩径 |
| 49 | 2560.2-2563.3 | 3.1 | 2.1 | 1.7 | 0.7 | 2.4 | 4.5 | 0.03 | Ⅱ类页岩气层 | |
| 50 | 2563.3-2567.6 | 4.3 | 2.8 | 0.4 | 0.6 | 1.0 | 3.8 | 0.01 | Ⅲ类页岩气层 | |

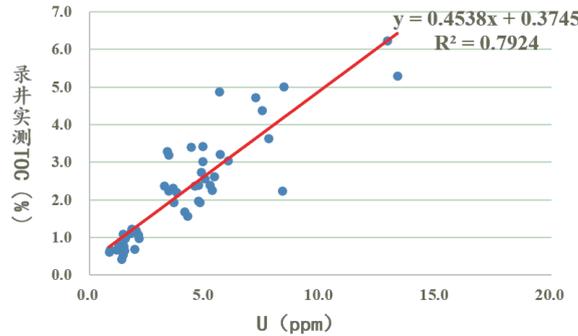


图 7 湘新页 1 井余田桥组页岩段测井计算 U 含量与录井实测 TOC 含量交会图

Fig. 7 Crossplot of logging calculated U content and logging measured TOC content in shale section of XXY1 well

4 结论

(1)湘新页 1 井余田桥组地层可划分为三段:上部 1109 – 1508 m 段以泥岩、灰质泥岩为主夹灰岩,伽马曲线中 – 高值,双侧向电阻率曲线低 – 中值;中部 1508 – 2103 m 段以泥灰岩为主夹泥质灰岩互层,伽马曲线低 – 中值,双侧向电阻率曲线低 – 中值;下部 2103 – 2570 m 段以泥岩、泥页岩、砂泥岩

为主,伽马曲线中 – 高值,双侧向电阻率曲线中值。

(2)湘新页 1 井余田桥组页岩段自然伽马能谱测井 Th/K 值在 3.5–12 之间,粘土矿物成分以蒙脱石为主;核磁测井计算页岩孔隙度平均为 3.3%,渗透率平均为 0.02 md,测井模型计算 TOC 含量平均为 1.81%,录井实测 TOC 含量平均为 1.73%,二者绝对误差仅 0.05%。

(3)湘新页 1 井余田桥组页岩段井深 2486.5

- 2567.6 m, 厚度 81.1 m, 综合解释 II 类页岩气层 2 层, III 类页岩气层 5 层, 页岩储层测井评价结果为该井直井压裂试气提供了重要依据。

参考文献:

- [1] Jarvie D M, Hill R J, Rubile T E. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett shale of north central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [2] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A. Mississippian Barnett shale, Fort Worth basin, north-central Texas: gas shale play with multi-trillion cubic foot potential [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.
- [3] 赵靖舟, 方朝强, 张洁. 由北美页岩气勘探开发看我国页岩气选区评价 [J]. 西安石油大学学报, 2011, 26(2): 1-7.
- [4] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [5] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.
- [6] 白云山, 王强, 苗凤彬, 曾雄伟, 曾平, 路鹏. 湘中涟源凹陷中二叠统小江边组页岩气勘探前景分析 [J]. 华南地质与矿产, 2016, 32(2): 159-165.
- [7] 苗凤彬, 王强, 白云山, 谭慧. 湘中地区涟源凹陷石炭系测水组泥页岩储层特征 [J]. 华南地质与矿产, 2016, 32(2): 172-179.
- [8] 吕嵘, 陈孝红, 王传尚, 王建坡, 张保民. 涟源凹陷泥盆纪余田桥组沉积与地震相特征 [J]. 华南地质与矿产, 2020, 36(1): 1-8.
- [9] 马少妍, 徐猛, 甘丽丽. 湘中地区页岩气勘探潜力与地化特征评价 [J]. 油气地球物理, 2013, 11(2): 56-59.
- [10] 周进高, 邓红婴, 冯加良. 涟源拗陷构造演化与油气成藏研究 [J]. 地质科学, 2003, 38(1): 44-51.
- [11] 马若龙. 湘中、湘东南及湘东北地区泥页岩层系地质特征与页岩气勘探潜力 [D]. 成都理工大学博士学位论文, 2013: 135-146.
- [12] 赵迪斐, 郭英海, 陈蕾. 页岩储层脆性特征及其影响因素探讨 [J]. 非常规油气, 2016, 3(6): 6-11.
- [13] 林腊梅, 张金川, 唐玄. 南方地区古生界页岩储层含气性主控因素 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(2): 88-94.
- [14] 殷红, 潘泽雄. 湘中拗陷非常规及常规资源勘探潜力分析 [J]. 天然气技术与经济, 2012, 6(1): 37-43.
- [15] 徐国盛, 张震, 罗小平. 湘中和湘东南拗陷上古生界泥页岩含气性及其影响因素 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2013, 40(5): 577-587.
- [16] 谢小国, 杨筱. 页岩气储层特征及测井评价方法 [J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(6): 27-30.
- [17] 杨双定. 鄂尔多斯盆地致密砂岩气层测井评价新技术 [J]. 天然气工业, 2005, 25(9): 45-47.
- [18] 杜蕊, 朱艳丽, 谢克勇, 戴为民. 自然伽马能谱测井的应用 [J]. 中国科技博览, 2018, 14(1): 193-194.
- [19] 孙建孟. 基于新“七性”关系的煤层气、页岩气测井评价 [J]. 测井技术, 2013, 37(5): 457-465.
- [20] 李云省, 曾渊奇, 田建波. 致密砂岩气层识别方法研究 [J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(1): 25-30.
- [21] 石强. 利用自然伽马能谱测井定量计算粘土矿物成分方法初探 [J]. 测井技术, 1998, 22(5): 349-352.
- [22] 李俊, 杜禹, 蔡振东. 页岩气储层测井评价方法研究 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 141-146.
- [23] 靳松伟. 致密砂岩气层测井评价技术 [J]. 科技创新导报, 2007 (14): 95.
- [24] 孙小平, 石玉江, 姜英昆. 长庆低渗透砂岩气层测井评价方法 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 115-120.
- [25] 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.