

# 涪陵区块凉高山组页岩气储层特征及关键参数评价

王 燕,雷有为,付小平,陈 超,刘苗苗

(中国石化勘探分公司物探研究院,四川 成都 610041)

**摘要:**涪陵区块凉高山组作为页岩气勘探的新层系,存在着岩性复杂、非均质性强、实验分析数据较少、研究程度低的难点。在系统整理1 491项次的分析测试资料基础上,开展页岩气储层特征分析,应用陆相页岩气测井解释评价技术对储层参数开展定量计算。凉高山组页岩储层总有机碳含量较高,演化程度适中、厚度大、储集性能较好、整体含气性较好,表明其富有机质泥页岩具有良好的页岩油气地质条件。对页岩储层评价参数进行定量计算,其模型的解释精度均在80%以上。

**关键词:**页岩气;页岩储层;储层特征;定量评价;凉高山组;涪陵区块

**中图分类号:**TE122      **文献标志码:**A

## Characteristics and key parameter evaluation of shale gas reservoirs in Lianggaoshan Formation in Fuling Block

WANG Yan, LEI Youwei, FU Xiaoping, CHEN Chao, LIU Miaomiao

(Geophysical Research Institute, Sinopec Exploration Company, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** As a new strata series for shale gas exploration, the Lianggaoshan Formation in the Fuling Block has the difficulties of complex lithology, strong heterogeneity, less experimental analysis data, and low research level. Based on systematically sorting out the analysis and testing data of 1,491 items, the shale gas reservoir characteristic analysis is carried out, and the continental shale gas logging interpretation and evaluation technology are applied to quantitatively calculate the reservoir parameters. The Lianggaoshan Formation shale reservoir has high total organic carbon content, moderate evolution degree, large thickness, good storage performance, and good overall gas-bearing properties, indicating that its organic-rich mud shale has good shale oil and gas geological conditions. The shale reservoir evaluation parameters are quantitatively calculated, and the interpretation accuracy of the models is above 80%.

**Key words:** shale gas; shale reservoir; reservoir characteristics; quantitative evaluation; Lianggaoshan Formation; Fuling Block

涪陵区块位于重庆市梁平区、忠县和万州区境内,构造上隶属于川东高陡构造带,发育一系列北东—南西向延伸的隔挡式分布的大型复背斜和复向斜<sup>[1-4]</sup>。

侏罗系凉高山组发育两套优质页岩层、三套近源河道砂,具有自生自储、近源、源内富集成藏的有利背景,资源规模大,是页岩油气、致密砂岩油气立体勘探有利区。两套优质页岩层为凉高山组一段上亚段(凉一上)和凉高山组二段下亚段(凉二下)浅—半深湖富有机质泥页岩,生烃中心主要位于泰来地区,其岩性为灰黑色页岩、灰色石英砂岩及灰绿色、紫红色泥岩互层,厚度大、总有机碳含量较高、范围广,油气显示好,为页岩气勘

探的新层系。凉高山组在8口井14回次共计取心124.55 m,另外T601井在凉高山组三段开展了井壁钻井取心,取心14颗。涪陵地区凉高山组分析测试资料1 491项次,分析化验主要集中在有机地化、物性及薄片鉴定等方面。

本文在系统整理涪陵地区凉高山组分析测试资料的基础上,开展页岩气储层特征的定性评价,同时应用陆相页岩气测井解释评价技术对储层参数开展定量计算。

收稿日期:2020-04-27;改回日期:2020-10-16。

第一作者简介:王燕(1982—),女,高级工程师,从事测井技术科研生产工作。E-mail:daily09@qq.com。

## 1 储层特征

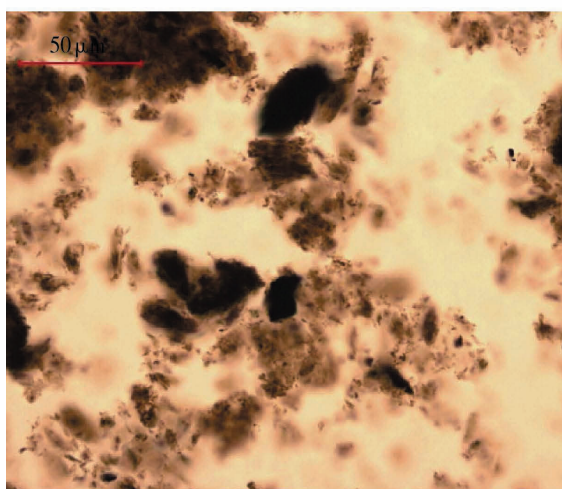
### 1.1 有机质丰度、类型及热演化程度

对7口井216个岩心或岩屑的有机碳含量实验分析数据统计可知,研究区凉高山组泥页岩总有机碳含量 $TOC$ 实测一般为0.5%~3.58%,平均1.16%,其中 $TOC$ 在2%以上的样品占总样品的7.73%; $TOC$ 在1%~2%的样品占总样品的48.97%; $TOC$ 在0.5%~1%的样品占总样品的43.3%。

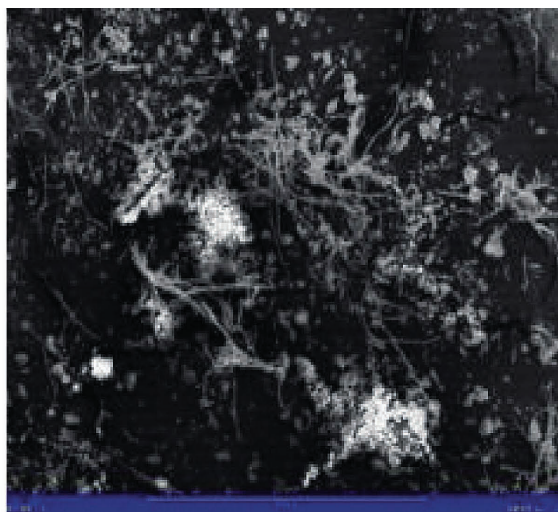
对1口井17个氯仿沥青“A”含量实验分析数据

统计可知,研究区凉高山组氯仿沥青“A”含量一般为0.000 8%~0.176 6%,平均为0.042 3%;对3口井147个岩石热解分析数据统计可知,研究区凉高山组( $S_1+S_2$ )含量一般为0.10~1.94 mg/g,平均为0.69 mg/g。综上可知,涪陵地区凉高山组有机质丰度较好。

由5口井26个有机质显微组分测定和7口井76个干酪根扫描显示可知,涪陵区块凉高山组泥页岩有机质以腐植无定形体、镜质组为主,见少量丝质体和孢粉体(图1)。



a.B井凉高山组,Ⅱ<sub>2</sub>型,有机质以腐植无定形体、镜质组为主



b.F井凉高山组,有机质以木质纤维和腐泥粒状体为主

图1 涪陵区块凉高山组泥页岩干酪根镜检及扫描照片

由4口井27个干酪根碳同位素检测结果表明, $\delta^{13}C_{PDB}$ 值主要分布于-22.5%~-27%之间,平均值为-24.53%。其中,Ⅰ型占总样品的3.13%,Ⅱ<sub>1</sub>型占总样品的23.44%,Ⅱ<sub>2</sub>型占总样品的64.05%,Ⅲ型占总样品的9.38%。综合分析研究区凉高山组泥页岩有机质类型主要为Ⅱ<sub>2</sub>型,Ⅱ<sub>1</sub>型、Ⅲ型次之,Ⅰ型最少,表明沉积演化过程中生源母质为多源混合Ⅱ<sub>2</sub>型。

由6口井43个镜质体反射率实验可知,涪陵区块凉高山组泥页岩 $R_o$ 一般为0.98%~1.5%,平均为1.21%,其中 $R_o$ 在0.5%~1.2%的样品占总样品的56.25%; $R_o$ 在1.2%~2.0%的样品占总样品的43.75%,处于成熟~高成熟阶段。

### 1.2 储集空间及储集性能

#### 1.2.1 孔隙类型

通过对2口井94个氩离子抛光扫描电镜的观察,在涪陵区块凉高山组页岩气储层中识别出有机质孔、黏土矿物孔、黄铁矿晶间孔、溶蚀孔等孔

隙和微裂缝(图2),其中以有机孔、黏土矿物孔和微裂缝为主。

#### ①有机质孔

在F4井、F5井凉高山组页岩 $R_o$ 低于1.3%情况下,仍然存在大量的有机质孔,并能较清晰地见到两种类型:一种是分散状的干酪根有机质孔,以脆性矿物之间粒间孔内的有机质颗粒为主要载体,呈分散状分布(图2a);一种是沥青孔,以微裂缝内充填的沥青为主要载体,呈蜂窝状分布(图2b)。

#### ②黏土矿物孔

黏土矿物孔是涪陵区块凉高山组泥页岩中常见孔隙之一,孔隙直径一般较大,多呈狭长的长条形,内部多相互沟通(图2c)。

#### ③微裂缝

涪陵区块凉高山组页岩气储层中也见大量微裂缝,它的存在既可作为早期油气的运移通道,为沥青孔提供一定的储集空间,同时又可沟通不同的储集空间,形成有效储集空间体(图2d)。

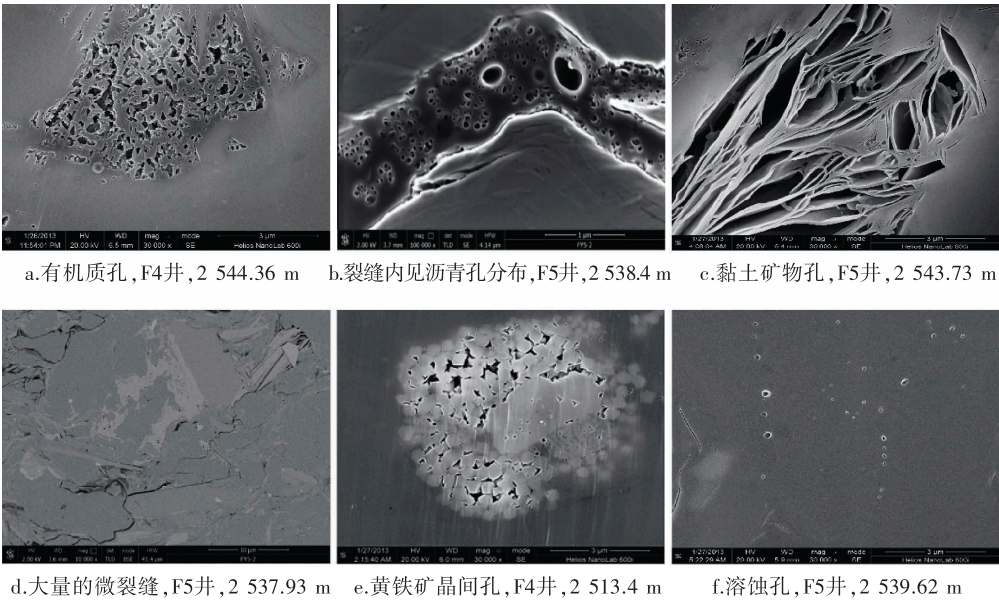


图2 涪陵区块凉高山组页岩储层微观孔隙照片

由2口井8个样品的微孔盖层实验可知,涪陵区块凉高山组页岩气储层孔隙直径5 nm以下的孔体积占比在0%~28%之间,平均值为6.97%;孔隙直径在5~10 nm之间的孔体积占比在1%~21.1%之间,平均值为6.00%;孔隙直径在10~100 nm之间的孔体积占比在25.8%~45.8%之间,平均值为37.60%;孔隙直径100 nm以上的孔体积占比在24%~58.6%之间,平均值为49.5%。

涪陵区块凉高山组页岩气储层孔隙直径主要分布在10~100 nm和100 nm以上这两个区间内,以介孔和大孔为主,微裂缝约占30%储集空间。该页岩气储层与五峰组~龙马溪组页岩气储层显著不同,相较于龙马溪组页岩气储层,凉高山组页岩气

储层大孔比例明显增多。

1.2.2 裂缝发育特征

泥页岩储层中发育的裂隙系统不仅有利于游离气的富集,同时还是页岩气渗流运移的主要通道,同时对页岩气的开发也起到关键性的作用<sup>[5-7]</sup>。因此,有必要对裂缝的特征进行系统描述。

通过对涪陵地区凉高山组8口井14回次共计124.55 m岩心进行观察可知,F1井发育低角度缝5条,高角度缝1条;F4井发育低角度缝2条,层理缝1条;F3-2井发育低角度缝3条,层理缝23条,高角度缝10条。凉高山组岩心观察显示,不同类型的岩石均发育裂缝,泥岩主要发育层理缝,见少量高角度裂缝(图3)。



图3 涪陵区块凉高山组泥页岩裂缝照片

1.2.3 物性特征

对4口井187个氦气法岩心柱塞样品的物性分析统计可知,涪陵地区凉高山组页岩气储层物性总体较好,孔隙度一般为0.15%~12.02%,平均2.58%。其中孔隙度在6%以上的样品占总样品的3.74%;孔隙度在4%~6%的样品占总样品的13.9%;孔隙度在2%~4%的样品占总样品的35.83%;孔隙度在2%以下的样品占总样品的46.52%。样品的渗透率介于 $(0.002\ 8\sim9.96)\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 之间,平均为 $0.12\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 。

1.3 矿物特征

涪陵区块凉高山组页岩通常含石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿、黏土等矿物,其中黏土矿物主要为伊蒙混层、伊利石、高岭石和绿泥石。

由4口井146个全岩X衍射分析结果可知,脆性矿物含量相对较高,介于30.7%~88.8%,平均为48.81%。脆性矿物组分以石英为主,石英含量为17.3%~53.0%,平均为33.56%;钾长石为0%~1.3%,平均为0.12%;斜长石为0%~25.0%,平均为9.43%;方解石为0%~50.8%,平均为3.31%;白云石为0%~5.7%,平均为0.33%;黄铁矿为0%~6.1%,平均为0.36%;菱铁矿为0%~7.2%,平均为0.70%。黏土含量总体相对低,为11.2%~69.3%,平均52.19%。

由5口井194个黏土矿物X衍射分析结果可知,涪陵地区黏土矿物中伊蒙混层含量较高,伊蒙混层含量为15%~69%,平均47.24%,混层比为20%~30%。其余黏土矿物中,伊利石含量为7%~66%,平均30.89%;高岭石含量为2%~68%,平均9.04%;绿泥石含量为0%~37%,平均12.83%。

1.4 含气性特征

涪陵区块8口井钻遇凉高山组均有油气显示,其中4口井获得良好油气显示,全烃在4.73%~17.32%之间,整体含气性好。

由3口井39个样品的现场含气量测试结果显示,涪陵区块凉高山组页岩气储层总含气量介于 $0.86\sim2.32\ \text{m}^3/\text{t}$ 之间,平均 $1.58\ \text{m}^3/\text{t}$ ,泥页段含气性相对较好。

2 储层参数定量评价

2.1 总有机碳含量计算模型

将F4井65个总有机碳(*TOC*)含量实验数据与测井响应值做相关性分析(表1),由表可知声波时差、中子与*TOC*实验数据相关性最好,分别为0.710 0

和0.709 4。在此基础上,可以应用数理统计方法建立二元线性方程评价页岩气储层*TOC*,计算模型如下:

$$TOC=a\times\Delta t+b\times\Phi_{\text{CNL}}+c\tag{1}$$

式中:*TOC*为有机碳含量,%; $\Delta t$ 为声波时差测井值, $\mu\text{s}/\text{ft}$ ;  $\Phi_{\text{CNL}}$ 为中子测井值,%;*a*,*b*,*c*为区域经验系数,*a*=0.034,*b*=0.034,*c*=-2.216。

表1 测井响应值与*TOC*实验数据的相关系数统计表

测井曲线值	相关系数 <i>R</i>
自然伽玛( <i>GR</i> )	0.430 0
无铀伽玛( <i>KTH</i> )	0.429 6
岩性密度( <i>DEN</i> )	-0.667 5
声波时差( $\Delta t$ )	0.710 0
中子( <i>CNL</i> )	0.709 4
深侧向电阻率( <i>RD</i> )	-0.673 2
浅侧向电阻率( <i>RS</i> )	-0.678 0
铀值( <i>U</i> )	-0.053 1
钍值( <i>TH</i> )	0.344 0
钾值( <i>K</i> )	0.427 1

应用上述计算模型开展研究区*TOC*解释评价,图4为测井解释*TOC*和岩心实验分析*TOC*的交会图,由图可知测井计算*TOC*值与岩心实验分析*TOC*值之间具有较好的相关性,相关系数为0.925 6,说明此*TOC*评价模型具有较高的解释精度。

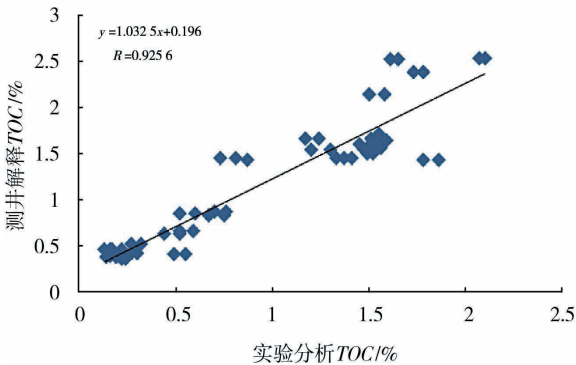


图4 岩心分析*TOC*含量与测井解释*TOC*含量交会

2.2 孔隙度计算模型

孔隙度是反映储层物性特征的一个重要参数<sup>[8-10]</sup>。常规测井确定地层孔隙度的方法主要为声波时差、补偿中子和体积密度测井。本次研究以F4井58个孔隙度实验分析数据为基础,建立声波时差、岩性密度、中子与孔隙度的三元线性方程,孔隙度计算模型如下:

$$\Phi=a+b\times\Delta t+c\times\rho+d\times\Phi_{\text{CNL}}\tag{1}$$

式中: $\Phi$ 为孔隙度,%; $\Delta t$ 为声波测井值, $\mu\text{s}/\text{ft}$ ;  
 $\rho$ 为密度测井值, $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $\Phi_{\text{CNL}}$ 为中子测井值,%;

$a, b, c, d$  为区域经验系数, $a=-66.258, b=0.133, c=22.328, d=0.016$ 。

图5为利用上述模型得到的测井解释孔隙度和岩心实验分析孔隙度的交会图,由图可知,测井计算孔隙度和岩心实验分析孔隙度之间具有较好的相关性,相关系数为0.893 4,说明此孔隙度评价模型具有较高的解释精度。

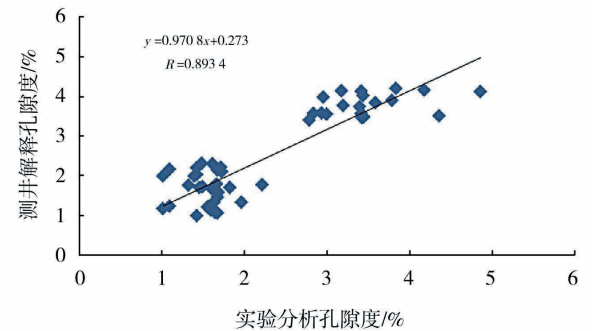


图5 岩心分析孔隙度值与测井解释孔隙度值交会

2.3 裂缝参数计算模型

涪陵地区凉高山组F4井进行了FMI成像测井,

该测井技术具有高密度采样、高分辨率和高井眼覆盖率特征,使得FMI成像测井不仅能够用于识别裂缝、划分裂缝类型、确定裂缝发育层段,还能够用于裂缝的定量分析,计算裂缝参数,其计算模型为:

$$W=c\times A\times R_m^b\times R_{so}^{1-b}$$
 (3)

式中: $c, b$ 为仪器参数,取决于仪器的具体结构, $b$ 无量纲, $c$ 的单位是 $\mu\text{m}^{-1}$ ; $W$ 为裂缝张开度; $A$ 为由裂缝造成的电导异常面积, $\text{m}^2$ ; $R_{so}$ 为裂缝岩石骨架电阻率,由所测图像电阻率计算而得, $\Omega\cdot\text{m}$ ; $R_m$ 为裂缝中流体电阻率,即井底温度下的泥浆电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$ 。

目前FMI成像测井技术可以提供下述四类定量评级参数,即裂缝密度、裂缝长度、裂缝平均宽度和裂缝孔隙度,其物理意义分别为每米井段所见到的裂缝总条数、每平方米井壁所见到的裂缝长度之和、裂缝轨迹宽度的平均值和每米井段上裂缝在井壁上所占面积与FMI成像测井覆盖井壁的面积之比。研究区FY4井裂缝各参数统计特征如下表(表2)。

表2 F4井裂缝发育参数统计表

顶深/ m	底深/ m	厚度/ m	裂缝角度	裂缝条数/ 条	裂缝平均 宽度/ $\mu\text{m}$	裂缝密度/ (条 $\cdot\text{m}^{-1}$ )	裂缝孔隙度/ %	裂缝长度/ m
2 495	2 497	2	36°	1	44.4	0.79	0.007 4	1.77
2 635	2 636	1	23°	1	2.78	1.11	0.000 4	1.44
2 704	2 710	6	31°~59°	6	92.14	1.53	0.025 8	2.57
2 729	2 730	1	43°	1	97.18	1.00	0.016 1	1.85
2 830	2 833	3	56°	1	33.13	2.21	0.006 5	2.26

2.4 矿物含量计算模型

2.4.1 常规测井

涪陵区块凉高山组泥页岩矿物成分复杂,目前主要利用常规测井资料评价黏土矿物含量。通常认为自然伽玛 $GR$ 、钾含量 $K$ 、钍含量 $TH$ 及无铀伽玛 $KTH$ 与黏土含量的关系较好,本文选用F4井22个全岩X衍射分析结果与测井曲线值进行相关性分析(表3),可知黏土矿物含量同钾含量值相关性最好,相关系数为0.563 0,因此选用 $K$ 曲线计算黏土含量。

表3 测井曲线值与黏土实验数据的相关系数统计

测井曲线值	相关系数 $R$
自然伽玛( $GR$ )	0.466 4
无铀伽玛( $KTH$ )	0.414 3
钍值( $TH$ )	-0.039 2
钾值( $K$ )	0.563 0

黏土矿物计算模型如下,主要分两步实现:

①利用钾相对值( $DK$ )的变化计算出黏土含量指数 $CLAY$ :

$$CLAY=DK=\frac{K-K_{\min}}{K_{\max}-K_{\min}}$$
 (4)

式中:  $K$  为测井钾值, %;  $K_{\max}$  为泥岩层的钾值, %;  $K_{\min}$  为砂岩的钾值, %;  $DK$  为钾相对值, 无量纲。

②将黏土含量指数  $CLAY$  转化为黏土含量  $V_{CLAY}$ :

$$V_{CLAY} = \frac{2^{GCUR \times CLAY} - 1}{2^{GCUR} - 1} \quad (5)$$

式中:  $V_{CLAY}$  为黏土含量, %;  $GCUR$  为地层常数, 一般新地层取 3.7, 老地层取 2。

图6为利用以上模型测井解释黏土含量和岩心实验分析黏土含量的交会图, 由图可以看出, 岩心实验分析黏土含量与测井解释黏土含量之间具有较好的相关性, 相关系数为 0.884 1, 说明此黏土含量评价模型具有较高的解释精度。

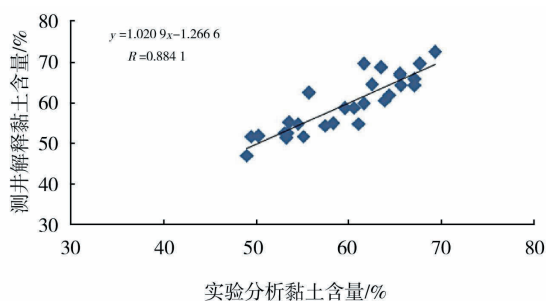


图6 岩心分析黏土含量与测井解释黏土含量交会

#### 2.4.2 ECS元素俘获测井

研究区F4井在目的层段测得有ECS元素俘获测井, 该测井方法能测得地层中七种元素含量, 即铝(Al)、硅(Si)、钙(Ca)、铁(Fe)、硫(S)、钛(Ti)和钆(Gd)。其中Si与石英关系密切, Ca与方解石、白云石密切相关, 利用S和Ca可以计算石膏的含量, Fe与黄铁矿和菱铁矿等有关系, 铝元素与黏土(高岭石、伊利石、蒙脱石、绿泥石、海绿石等)含量密切相关。

ECS通过对地层中元素的直接测量, 能够提供地层中元素含量, 对于特定的岩石(碎屑岩、碳酸盐等), 可以通过元素含量计算地层中不同矿物组分的含量, 进而利用组分对岩性进行划分识别。

以F4井凉高山组地层为例, ECS测井井段为 2 481~2 621 m, 根据ECS处理成果可知, 该段岩性主要为泥质砂岩、砂质泥岩, 黏土矿物质量百分含量介于40%~70%之间, 平均为50.5%; 硅质矿物质量百分含量介于30%~70%之间, 平均为48.1%; 局部有

钙质胶结, 钙质矿物质量百分含量平均为1.4%; 偶见黄铁矿, 其质量百分含量低于2%。

### 3 结论

(1)凉高山组页岩储层总有机碳含量较高, 演化程度适中、厚度大、储集性能较好、整体含气性较好, 表明其富有机质泥页岩地质条件好, 具有良好的页岩油气地质条件。

(2)应用陆相页岩气测井评价技术, 对涪陵区块凉高山组的总有机碳含量、孔隙度、矿物含量等储层评价参数进行定量计算, 通过精度分析, 其计算模型的解释精度均在80%以上。

#### 参考文献:

- [1] 郭正吾. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 70-200.
- [2] 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 等. 四川盆地复合盆山体系的结构构造和演化[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(3): 288-299.
- [3] 李军, 王世谦. 四川盆地平昌—阆中地区侏罗系油气成藏主控因素与勘探对策[J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 16-20.
- [4] 梁狄刚, 冉隆辉, 戴弹申, 等. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 8-17.
- [5] 罗承先, 周韦慧. 美国页岩油开发现状及其巨大影响[J]. 中外能源, 2013, 18(3): 33-40.
- [6] NORDENG S H. The bakken petroleum system: an example of a continuous petroleum accumulation[J]. DMR News, 2009, 36(1): 21-24.
- [7] 孙细宁, 陈奕奕, 王桂成, 等. 延长探区陆相页岩气产能影响因素分析[J]. 复杂油气藏, 2019, 12(4): 8-14.
- [8] 朱日房, 张林晔, 李钜源, 等. 渤海湾盆地东营凹陷泥页岩有机储集空间研究[J]. 石油实验地质, 2012, 34(4): 352-356.
- [9] 吴林钢, 李秀生, 郭小波, 等. 马朗凹陷芦草沟组页岩油储层成岩演化与溶蚀孔隙形成机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(3): 38-43.
- [10] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857-1864.

(编辑 杨芝文)