

• 解释评价 •

# 四川盆地志留系龙马溪组页岩气储集层 录井解释方法研究

罗鑫<sup>①</sup> 瞿子易<sup>②</sup> 罗明生<sup>③</sup> 曾力<sup>②</sup> 王柯<sup>②</sup> 舒赢<sup>②</sup>

(①四川长宁天然气开发有限责任公司;②中国石油川庆钻探工程公司地质开发研究院;③中国石油西南油气田分公司蜀南气矿)

罗鑫,瞿子易,罗明生,曾力,王柯,舒赢. 四川盆地志留系龙马溪组页岩气储集层录井解释方法研究. 2018,29(1): 78-83

**摘要** 四川盆地页岩气勘探层系主要是志留系龙马溪组,页岩气储集层评价参数的选取在解释评价中有十分重要的作用。随着 XRF 元素录井、伽马能谱录井等录井新技术在龙马溪组页岩气储集层中的广泛应用,结合研究区开发生产现状,利用随钻参数建立反映储集层特征的孔隙度、有机碳含量、含气量和脆性指数 4 个参数计算模型,并用于页岩气解释评价。川南地区龙马溪组页岩气储集层解释评价结果表明,应用随钻参数建立的储集层解释评价模型解释结果与实际基本吻合,能满足现场储集层解释评价需要,具有广泛的应用推广前景。

**关键词** 龙马溪组 页岩气储集层 XRF 元素录井 伽马能谱录井 随钻参数 解释评价

**中图分类号**:TE 132.1 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1672-9803.2018.01.017

## 0 引言

随着录井技术日新月异的更新,XRF 元素录井和伽马能谱录井在页岩气的勘探开发中得到普遍应用,利用特殊录井资料解释页岩气储集层显得十分重要,本文利用传统录井与特殊录井资料结合建立一套对页岩气储集层进行评价划分的有效方法。录井资料能够在钻井过程中及时反映随钻地层情况,利用录井资料解释储集层性质可以更好的对页岩气水平井进行地质导向,及时分析地质情况。本文利用录井参数对储集层随钻参数——孔隙度、有机碳含量、含气量和脆性矿物评价参数进行拟合,选择最佳特征响应参数建立储集层评价模型,并将该模型用于页岩气储集层的解释评价。

## 1 页岩气储集层特征概述

四川盆地目前的勘探层系主要是志留系龙马溪组,主要出露于盆地边缘的川东南、大巴山、米仓山、龙门山及康滇古陆东侧<sup>[1]</sup>。乐山、成都及川中龙女寺一带因受加里东运动影响抬升遭受剥蚀而大范围缺失志留系,形成乐山—龙女寺古隆起。五峰组一

龙马溪组一段为页岩气勘探的主要目的层段。页岩气藏是典型的自生自储型气藏,因此评价页岩气储集层除与常规储集层有相同的岩石学、物性等储集层基本特征外,还应考虑页岩气藏形成的含气性及能否被开采等要件<sup>[2-7]</sup>。页岩气储集层主要从以下几个参数进行初步的评价。

**有机碳含量**:它的高低直接影响页岩含气量的大小。有机碳含量越高,页岩气含量越高。北美地区研究认为,具有商业价值的页岩气藏有机碳含量一般大于 2%,最高达 10%。因此,有机碳含量是页岩气储集层评价中的一个重要参数<sup>[3,5,8]</sup>。

**热成熟度**:它反映有机质是否已经进入热成熟生气阶段,即生气窗。有机质进入生气窗后,生气量剧增,有利于形成商业性页岩气藏。

**含气量**:页岩气主要存在形式是游离气与吸附气,故应根据现场损失气量及页岩等温吸附实验,直接测定页岩的游离气量及吸附气量,以评价页岩气储集层的含气性。含气量越高,商业开发价值越大,含气量也是反映页岩气储集层的一个重要参数。

**储集层有效厚度**:页岩厚度指高自然伽马、富含有机质页岩的厚度,因为富含有机质页岩厚度越大,

罗鑫 工程师,硕士,1984 年生,2010 年毕业于成都理工大学油气田开发地质专业,现从事油气田开发工作。通信地址:610056 四川省成都市成华区建设北路一段 83 号。电话:(028)86010720。E-mail:luoxin1@petrochina.com.cn

页岩气藏富集程度越高。页岩厚度和分布面积是保证有充足的储渗空间和有机质的重要条件。

**脆性矿物含量:**作为一个重要的储集层评价指标,体现储集层改造的难易程度。页岩气储集层的基质渗透率较低,需要裂缝才能形成工业产能;除本身的天然裂缝外,在开发过程中需对页岩气储集层进行加砂压裂改造,改善渗流通道,以满足商业开发需要。脆性矿物含量越高,储集层脆性越大,越易被压裂改造。

此外,通过页岩基质孔隙度、含气孔隙度、渗透率及含气饱和度测定以及裂缝组构和类型分析,也能评价页岩气储集层的储气能力大小。

页岩气储集层评价需对综合反映储集层特性的参数进行研究,建立适应评价区块的储集层评价模型,开展储集层评价工作。

## 2 随钻解释方法

### 2.1 页岩气评价参数模型建立

四川盆地地下古生界龙马溪组页岩气储集层的有机碳含量普遍大于2%,热成熟度大于2%,已经达到过成熟阶段。石英及方解石等脆性矿物含量均超过40%,黏土矿物含量低且不含蒙皂石,其渗透率和含水饱和度均满足下限标准,高自然伽马值黑色页岩厚度也在30 m以上<sup>[9]</sup>。

结合川南地区开发生产现状,优选出孔隙度、有机碳含量、含气量和脆性矿物4个反映储集层特征参数,利用录井参数对这4个评价参数进行拟合,选择最佳特征响应参数建立储集层评价模型,对储集层进行解释评价。

#### 2.1.1 孔隙度

在油气勘探开发过程中,孔隙度是描述储集层储集能力的一个重要参数,通常情况下钻时能够反映在岩石基质与骨架孔隙钻头钻遇地层的快慢<sup>[3-10]</sup>。因此在裂缝孔隙型储集层中,在钻压、转速、钻井液密度、粘度等参数稳定,地层呈正常压力变化的情况下,孔隙度发育层位的钻时必然比致密层位快(图1)。在含气储集层中,综合录井测得的全烃含量也能在一定程度上反映孔隙的发育情况(图2)。对川南地区12口井进行研究,拟合出该研究区通过钻时和全烃计算孔隙度的公式,能有效吻合研究区储集层孔隙度,计算公式为:

$$\phi = 3.6213 \frac{T_g}{t} - 0.0592 \ln(T_g)^2 + 3.5653$$

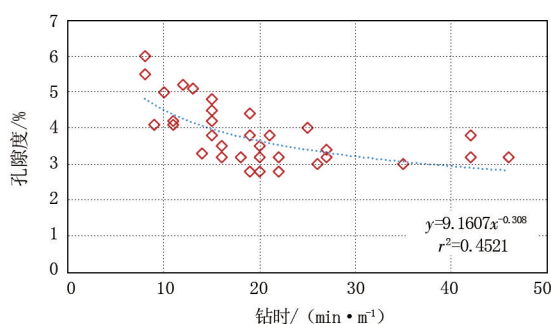


图1 钻时与孔隙度关系

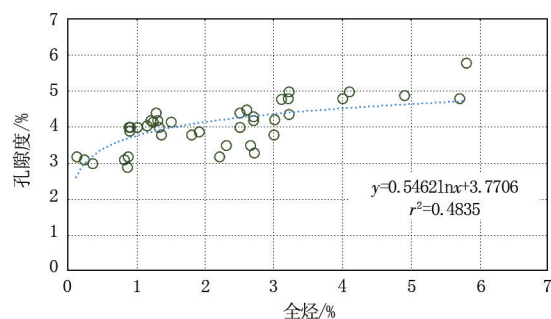


图2 全烃与孔隙度关系

式中: $\phi$ 为孔隙度,%; $t$ 为钻时,min/m; $T_g$ 为全烃含量,%。

#### 2.1.2 有机碳含量

页岩气藏是集生、储、盖为一体的独立成藏系统,必须具备一定的生烃能力、储集能力和封闭特征。龙马溪组黑色页岩发育于底部,主要形成于深水陆棚相带,属强还原环境笔石页岩沉积,富含有机质和黄铁矿,是较好的生油层。页岩的吸附能力与有机碳含量密切相关,有机碳含量越高,其吸附气量越多,反之亦然。由此可见,页岩中有机碳的含量从生气和储集两个方面控制着页岩气的含量。从该地区已钻井发现,自然伽马与铀在区域上分段呈现规律,根据大量的数据统计可知当自然伽马小于170 API时,铀分布在60 API以下,自然伽马与铀呈指数线性相关;当自然伽马大于170 API时,铀分布在60 API以上,自然伽马与铀呈对数线性相关。而铀与岩心实验的有机碳含量呈非常好的线性相关(图3),因此将自然伽马与铀的关系式代入铀和有机碳含量的关系式,可以得到通过随钻自然伽马计算有机碳含量的公式:

$$C_{to} = \begin{cases} 0.0323 \times 3.9998e^{0.0136GR} + 0.0654 & (GR \leq 170) \\ 0.0323(63.5 \ln GR - 743.93) + 0.0654 & (GR > 170) \end{cases}$$

式中: $C_{to}$ 为有机碳含量,%; $GR$ 为自然伽马,API。

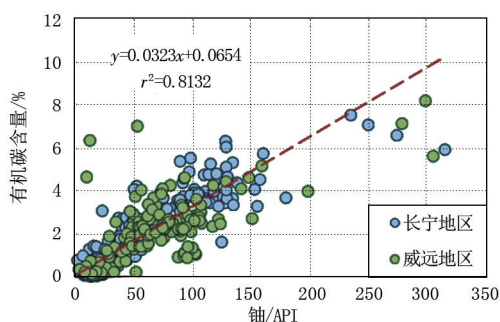


图3 铀与有机碳含量关系

### 2.1.3 含气量

通过岩心实验数据可以看出,有机碳含量在一定程度上反映了含气量,随着有机碳含量的增加含气量也增加(图4),当有机碳含量增加到一定值,含气量的增加幅度变小。从长宁地区和威远地区的有机碳含量变化趋势发现,当有机碳含量低于4%时,含气量随着有机碳含量快速增加,当有机碳含量大于4%时含气量缓慢增加。威远地区取心样本的有机碳含量基本在0~4%之间,该地区含气量随有机碳含量递增斜率更大。这个规律也很好反映出页岩气自生自储的特征。页岩气中游离气量取决于储气孔隙和裂隙空间的大小以及温度、压力、气体压缩率等因素。

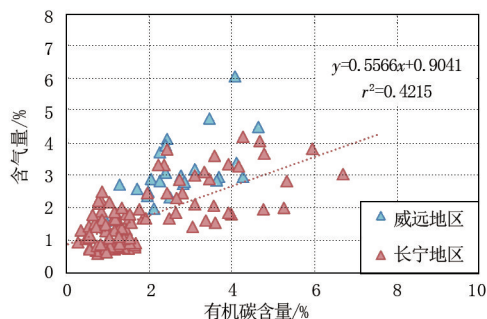


图4 有机碳含量与含气量关系

从图5可以发现该地区含气量和孔隙度变化趋势,用指数函数能够较好地拟合两者的关系。当威远地区孔隙度大于6%的时候,含气量随着孔隙度的增加逐渐减小,而当吸附状态保存在有机质颗粒表面的吸附气占主导作用的时候,含气量与孔隙度的大小并无特定正相关关系。这也是页岩气这种特别的性质决定的。

此外,气测录井采集的全烃值和常规录井获得的钻时记录也与含气量变化有一定的关系(图6、图7)。将这些能够反映含气量变化的参数通过多元回归得到含气量(GAS)的计算公式如下:

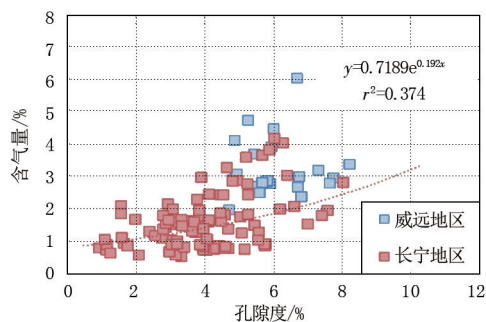


图5 孔隙度与含气量关系

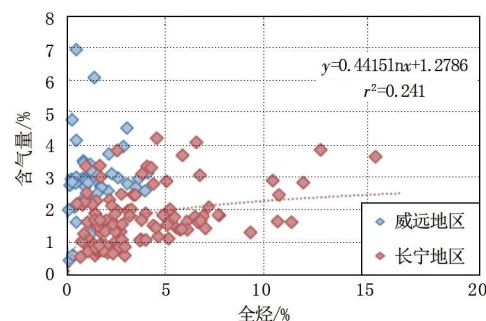


图6 全烃与含气量关系

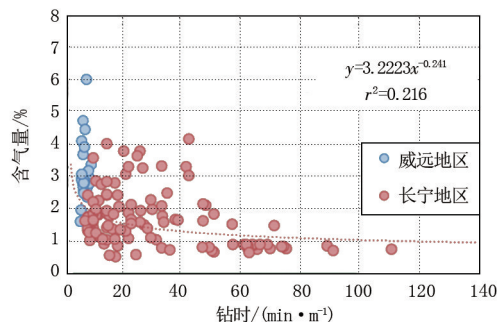


图7 钻时与含气量关系

$$GAS = 0.5C_{10} - 0.13e^{0.2}\phi + 0.05\ln T_g + 3.46t^{-0.24} - 0.71$$

有机碳含量回归系数为 $\beta_1$ ,孔隙度回归系数为 $\beta_2$ ,全烃回归系数为 $\beta_3$ ,钻时回归系数为 $\beta_4$ ,常数项的回归系数为 $\beta_0$ 。通过多元线性计算出回归系数,拟合出系数置信区间,式中各个参数回归系数的置信度为95%,置信区间见表1,通过显著性分析说明该式拟合可信度为95%。

表1 含气量方程的回归系数、系数置信区间

| 回归系数      | 回归系数估计值   | 回归系数置信区间             |
|-----------|-----------|----------------------|
| $\beta_0$ | -0.708280 | [-1.41892, 0.002364] |
| $\beta_1$ | 0.494727  | [0.395118, 0.594335] |
| $\beta_2$ | -0.127760 | [-0.29558, 0.040069] |
| $\beta_3$ | 0.046016  | [-0.19769, 0.289727] |
| $\beta_4$ | 3.455843  | [1.856109, 5.055576] |



### 2.1.4 脆性矿物

页岩气储集层由常见的黏土矿物混杂石英、长石、方解石、白云石、云母、黄铁矿等碎屑矿物和自生矿物组成,这些矿物的存在将影响到吸附气含量的大小及页岩气的开采。页岩气储集层属特低渗、致密储集层,具备一定储集能力,但其渗滤通道更多是经后期压裂改造形成的孔缝,所以页岩气储集层可改造性显得十分重要。通过 XRF 元素分析,可准确测定出地层元素含量,并用特征元素计算地层脆性指数,为页岩气储集层后期改造提供依据<sup>[11]</sup>。

不同矿物组分的元素构成不同,因此可以在元素录井的基础上,通过矿物的理想化学式结合多元回归算法对龙马溪组底部地层的矿物组成进行计算。龙马溪组矿物组分主要有 6 大类,在参与多元计算的元素种类大于等于 6 种时可求稳定解。选取元素录井测量结果中相对比重较大,能反映地层特征的 Mg、Al、Si、Ca、Fe、K 元素参与计算:

$[A]\{Mg, Al, Si, Ca, Fe, K\} = \{\text{黏土, 石英, 长石, 方解石, 黄铁矿, 白云石}\}$

式中: $[A]$ 为多元回归系数矩阵; $\{Mg, Al, Si, Ca, Fe, K\}$ 为 XRF 元素录井测量结果; $\{\text{黏土, 石英, 长石, 方解石, 黄铁矿, 白云石}\}$ 为对应深度岩心的实验室 XRD 矿物组分分析结果。

依据矿物录井资料对脆性指数进行评价,评价公式如下:

$$BI = \frac{C_{qtz} + C_{carb}}{C_{qtz} + C_{carb} + C_{clay}}$$

式中:BI 为脆性指数,%; $C_{qtz}$ 为石英类矿物含量,包括石英、长石、黄铁矿等,%; $C_{carb}$ 为碳酸盐岩类矿物含量,包括方解石、白云石、菱铁矿等,%; $C_{clay}$ 为黏土类矿物含量,%。

多口井验证分析得出,录井计算(XRF)获得的几种主要矿物含量与实验分析(XRD)数据以及电测数据(ECS)变化趋势在大部分层段一致,部分位置存在差异,绝对值较接近,而脆性指数与实验分析数据和电测分析数据趋势大体一致(图 8)。这表明公式拟合值能有效反映储集层改造难易程度。

### 2.2 储集层综合解释

有机碳含量能够较好地反映地层沉积时期海水的氧化还原环境。有机碳含量越高,水体越深,水体环境还原性越强。页岩的脆性矿物主要包括石英、长石以及方解石等。X 射线衍射矿物分析(XRD)录井可以检测岩屑中的石英、长石以及方解石等矿

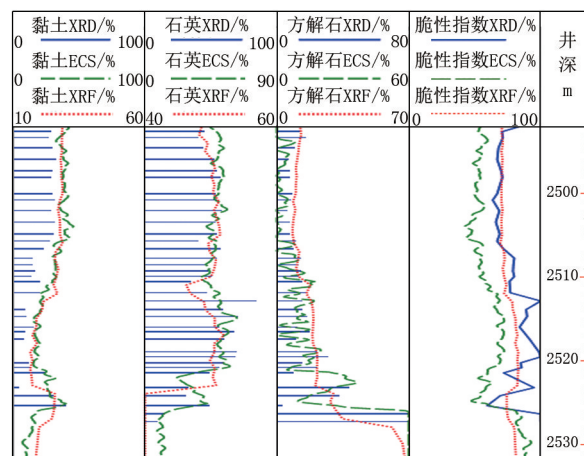


图 8 N 21 井矿物含量剖面示意

物,也可采用 X 射线荧光(XRF)录井数据,利用采集的岩屑元素数据计算脆性矿物含量。对储集层储集性起到关键贡献的因素为有机碳热演化过程中形成的有机质孔隙,因此孔隙度也是储集层评价的一个重要参数。含气量是指每吨岩石中所含天然气总量,包括游离气、吸附气、溶解气等<sup>[12-15]</sup>。应用录井采集数据计算的有机碳含量、孔隙度、含气量、脆性矿物含量,建立 I 类、II 类以及 III 类储集层的评价标准(表 2)。

表 2 四川盆地龙马溪组储集层分类标准

| 储集层类别 | 有机碳含量/% | 孔隙度/%   | 含气量/% | 脆性矿物含量/% |
|-------|---------|---------|-------|----------|
| I 类   | 4.0~6.0 | 6.0~9.0 | 6~8   | 40~50    |
| II 类  | 3.0~4.0 | 4.0~6.0 | 4~6   | 30~40    |
| III 类 | 1.5~3.0 | 3.5~4.0 | 3~4   | 30~40    |

该地区 I 类储集层的有机碳含量平均为 4%~6%,最高可达到 10%以上,孔隙度平均为 6%~9%,含气量平均为 6%~8%,最高可达到 20%,脆性矿物含量为 40%~50%。II 类储集层的有机碳含量平均为 3%~4%,最高可达到 6%,孔隙度平均为 4%~6%,含气量平均为 4%~6%,最高可达到 10%,脆性矿物含量为 30%~40%。III 类储集层的有机碳含量平均为 1.5%~3%,最高可达到 5%,孔隙度平均为 3.5%~4%,含气量平均为 3%~4%,最高可达到 8%,脆性矿物含量为 30%~40%。

## 3 实例分析

根据储集层解释方法,对研究区 W 10 井进行

储集层解释评价。W 10 井测井解释井段3546~5003 m为储集层,该井段测试产工业气流 $22.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。从图 9 可以看出,应用上面的储集层录井解释方法分析将井段3458~5003 m评为 I 类储集层 3 层(分别为井段3546~3980 m,4000~4310 m,4336~5003 m),总厚度1141 m,有机碳含量平均为 4.35%,脆性矿物含量平均为 43%,含气量平均为 7.2%,孔隙度平均为 7.7%(I 类储集层为最佳储集层);II 类储集层 2 层(井段3980~

4000 m,4310~4336 m),总厚度 46 m,有机碳含量平均为 3.24%,脆性矿物含量平均为 35%,含气量平均为 4.5%,孔隙度平均为 4.7%(II 类储集层次之);III 类储集层 1 层(井段3458~3546 m),总厚度 88 m,有机碳含量平均为 1.84%,脆性矿物含量平均为 32%,含气量平均为 3.1%,孔隙度平均为 3.6%(III 类储集层较差)。均与测井解释吻合,表明该储集层解释方法结果与测井解释结果吻合度较高,具有较好的现场应用价值。

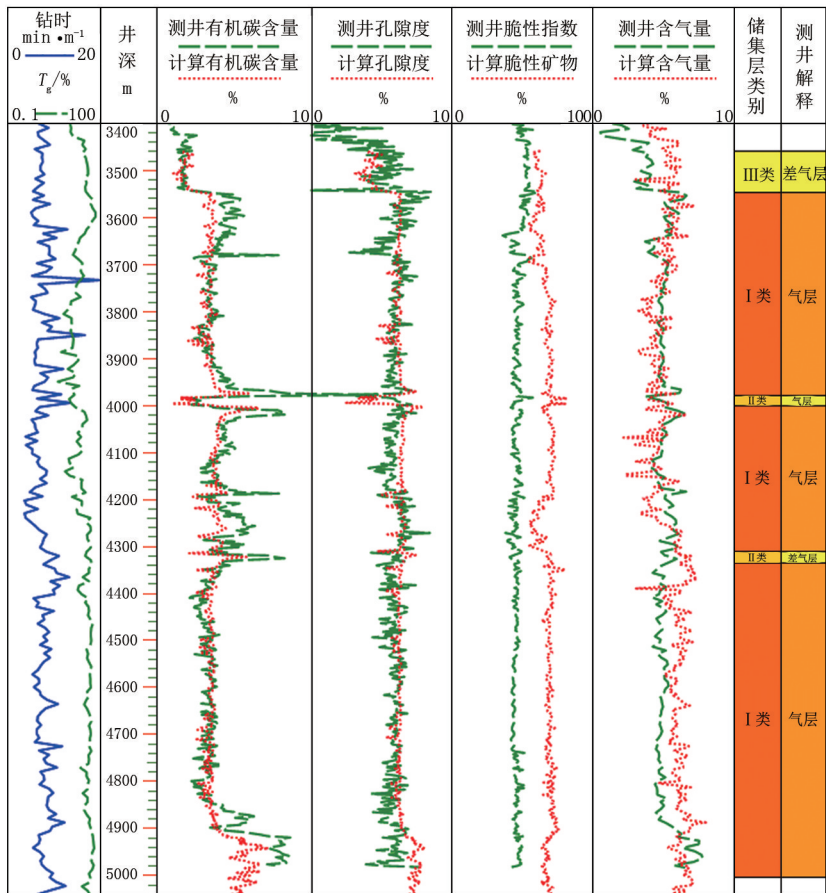


图 9 W 10 井储集层评价解释图

## 4 结 论

(1)通过随钻参数能有效计算出储集层评价参数,并建立储集层解释评价模型,即利用钻时和全烃含量建立计算孔隙度的模型,利用随钻参数拟合计算含气量的模型,伽马能谱录井能有效反映储集层有机碳含量。元素录井能有效反映储集层脆性,体现储集层压裂难易程度。

(2)通过建立模型对四川盆地川南地区进行储集层解释评价,得出 I、II、III 类储集层对应的储集

层评价参数范围: I 类储集层的有机碳含量平均为 4%~6%,孔隙度平均为 6%~9%,含气量平均为 6%~8%,脆性矿物含量为 40%~50%; II 类储集层的有机碳含量平均为 3%~4%,孔隙度平均为 4%~6%,含气量平均为 4%~6%,脆性矿物含量为 30%~40%; III 类储集层的有机碳含量平均为 1.5%~3%,孔隙度平均为 3.5%~4%,含气量平均为 3%~4%,脆性矿物含量为 30%~40%。

(3)对 W 10 井进行实例分析结果表明,应用随钻参数建立的储集层解释评价模型解释结果与实际

结果基本吻合,能满足现场储集层解释评价需要,具有较好的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] 张金川,徐波,聂海宽,等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业,2008,28(6):136-140.
- [2] 戴长林,石文睿,程俊,等. 基于随钻录井资料确定页岩气储层参数[J]. 天然气工业,2012,32(12):17-21.
- [3] 刘树根,马文辛,Luba Jansa,等. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. 岩石学报,2011,27(8):2239-2252.
- [4] 张金川,聂海宽,徐波,等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业,2008,28(2):151-156.
- [5] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
- [6] 王玉满,董大忠,李建忠,等. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 石油学报,2012,33(4):551-561.
- [7] 陶小锋,潘仁芳. 长宁地区龙马溪组页岩气储层测井解释评价[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版,2016,18(2):22-26.
- [8] 李建忠,董大忠,陈更生,等. 中国页岩气资源前景与

战略地位[J]. 天然气工业,2009,29(5):11-16.

- [9] 庞江平,罗谋兵,熊驰原,等. 志留系页岩气录井解释技术[J]. 石油钻采工艺,2010,32(增刊):28-31.
- [10] 马明福,李薇,刘亚村. 苏丹 Melut 盆地北部油田储集层孔隙结构特征分析[J]. 石油勘探与开发,2005,32(6):121-124.
- [11] 杜尚明. 油气地质录井[M]. 成都:四川科学技术出版社,2006:186-196.
- [12] 孔令明,万茂霞,严玉霞,等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩储层成岩作用[J]. 天然气地球科学,2015,26(8):1547-1554.
- [13] 曹春辉,张铭杰,汤庆艳,等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩气气体地球化学特征及意义[J]. 天然气地球科学,2015,26(8):1604-1612.
- [14] 曾祥亮,刘树根,黄文明,等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩与美国 Fort Worth 盆地石炭系 Barnett 组页岩地质特征对比[J]. 地质通报,2011,30(增刊):372-384.
- [15] 陈文玲,周文,罗平,等. 四川盆地长芯1井下志留统龙马溪组页岩气储层特征研究[J]. 岩石学报,2013,29(3):1073-1086.

(返修收稿日期 2017-11-23 编辑 卜丽媛)

(上接第77页)

技术方法有限的情况下,该方法能快速准确地判断油质类型,对油气藏后期勘探开发具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] 彭文绪,辛仁臣,孙合风,等. 渤海海域莱州湾凹陷的形成和演化[J]. 石油学报,2009,30(5):654-660.
- [2] 牛成民. 渤海南部海域莱州湾凹陷构造演化与油气成藏[J]. 石油与天然气地质,2012,33(3):425-430.
- [3] 中国海洋石油总公司勘探专业标准化委员会. Q/HS 1026—2007 油气层、油气(藏)田及油气性质分类规范[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [4] 胡云,谭忠健,张建斌,等. 利用录井图版判别渤海油田原油性质的新方法[J]. 中国海上油气,2016,28(5):44-48.
- [5] 炳磊,倪朋勃,刘坤,等. 油质类型判断方法及其在渤

海 A 油田的应用[J]. 录井工程,2017,28(2):68-71, 77.

- [6] 张丛秀,夏育新. 利用地化录井数据综合评价储集层流体性质[J]. 录井工程,2008,19(2):45-49.
- [7] 向斌,陈永胜,唐新运,等. 岩石热解地化录井在吐鲁番坳陷储集层评价中的应用[J]. 录井工程,2011,22(4):48-50.
- [8] 毛平,姚红舵,余逸凡,等. 地化录井解释评价技术研究[J]. 断块油气田,2009,16(2):55-57.
- [9] 兰晶晶,熊亨,陈伟. 三维定量荧光录井技术在渤海湾盆地 A 油田的应用[J]. 录井工程,2016,27(2):15-19.

(返修收稿日期 2018-02-06 编辑 王丽娟)