

文章编号:1673-5005(2018)05-0047-10

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2018.05.005

# 扬子地区下古生界页岩气储层低阻成因 分析及测井评价

孙建孟,熊 铸,罗 红,张洪盼,朱锦江

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580)

**摘要:**为解决扬子地区页岩气勘探开发中出现的储层异常低电阻现象,提高测井评价的准确性,研究页岩气储层低阻的形成原因及机制。首先对低阻页岩气储层的地质及测井响应特征分析,结合岩心资料,完善页岩气储层低电阻率的成因;然后通过对扬子地区页岩气储层测井资料的处理,分析储层低阻的成因机制。结果表明,造成页岩储层低阻主要包括 6 个因素:较高黏土含量,过成熟有机质,高黄铁矿含量,高地层水矿化度,发育差的储层物性及优良的地质条件。实际地层的低阻成因是由于多种因素共同作用的结果,而且不同地区、不同储层影响因素不同,需要分析相应地质、测井及岩心资料,利用邻井对比和上下层段对比的方法判断储层低阻的主要成因,有利于准确识别含气层段,提高测井解释评价的精确度。

**关键词:**页岩气;电阻率测井;低阻页岩;测井评价

**中图分类号:**TE 122.24 **文献标志码:**A

**引用格式:**孙建孟,熊铸,罗红,等. 扬子地区下古生界页岩气储层低阻成因分析及测井评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(5):47-56.

SUN Jianmeng, XIONG Zhu, LUO Hong, et al. Mechanism analysis and logging evaluation of low resistivity in lower Paleozoic shale gas reservoirs of Yangtze region[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(5):47-56.

## Mechanism analysis and logging evaluation of low resistivity in lower Paleozoic shale gas reservoirs of Yangtze region

SUN Jianmeng, XIONG Zhu, LUO Hong, ZHANG Hongpan, ZHU Jinjiang

(School of Geosciences in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

**Abstract:** To resolve the problem of abnormal low resistivity in shale gas reservoirs in the process of shale gas exploration and development in Yangtze region, and to improve the accuracy of logging evaluation, the formation mechanisms of low resistivity of shale gas reservoirs are studied. Firstly, through the analysis of geology and logging response characteristics of low resistivity shale gas reservoirs, in combination with core data, the causes of low resistivity are inferred. Then, using the actual shale gas reservoir logging data obtained in Yangtze region, the causes of the low resistivity are analyzed. The mechanisms of low resistivity include six factors: high clay content, over-mature organic matter, high pyrite content, high degree mineralization of water, poor development of reservoir properties and excellent geological conditions. These factors intervene with each other, and work together. In different regions and reservoirs, the main controlling factors are different. By comparing adjacent wells and differences in the upper and lower intervals, it helps to identify the main causes of the low resistivity and to improve the accuracy of logging interpretation evaluation.

**Keywords:** shale gas; resistivity logging; low resistivity shale; logging evaluation

收稿日期:2017-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41574122);国家科技重大专项(2017ZX05036-005-003)

作者简介:孙建孟(1964-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为测井解释评价及数字岩心。E-mail:sunjim@upc.edu.cn。

通信作者:熊铸(1993-),男,硕士,研究方向为测井理论、方法与技术。E-mail:xiong\_zhu1993@qq.com。

页岩气是指以吸附或者游离相态赋存于富有机质泥页岩及其砂岩和粉砂岩夹层中,以甲烷为主要成分的非常规天然气<sup>[1]</sup>。勘探开发实践表明,页岩气主要以吸附相态和游离相态两种形式存在于泥页岩孔隙、裂缝中,具有自生自储、连续成藏、低孔、低渗等特征,因此其勘探开发与常规天然气藏存在一定的差异。中国页岩气资源蕴藏丰富,广泛发育了海相、海陆过渡相和陆相3种类型的富有机质泥页岩,分布于四川、松辽、鄂尔多斯、吐哈等含油气盆地。目前,中国对南方大面积分布的古生界海相泥页岩和北方广泛分布的海陆过渡相泥页岩及陆相泥页岩进行了大量的研究和勘探工作<sup>[2]</sup>。常规油气藏进行测井资料评价时,主要是从岩性、物性、电性和含油气性4个方面,而对于页岩气藏来说,前人的研究主要围绕储层岩性、物性、含气性、地化特性、可压裂性、地层压力及测井属性的“七性”关系,从“七性”关系对页岩气藏进行测井解释评价<sup>[3-5]</sup>。但是,电阻率测井作为常规测井系列中必不可少的测井曲线,可以间接反映储层的含油气情况,因此也需要对页岩气储层的电阻率特征进行分析。通常在含油气储层,地层电阻率曲线显示为高值,然而在实际测井过程中出现了大量的低值现象,罗水亮、郭振华、闫磊等<sup>[6-8]</sup>对常规油气藏低阻成因机制及测井评价进行了研究。然而,页岩气储层低阻成因的研究比较薄弱,杨小兵等<sup>[9]</sup>总结了关于页岩气储层低电阻率的部分成因。笔者在其研究基础上,主要通过分析国内外低阻页岩气储层,全面分析页岩气储层低电阻率的主要影响因素及其导电机理,并结合扬子地区下古生界低阻页岩气储层的地质资料及测井资料,分析低阻页岩气储层的测井评价方法,以促进低阻页岩气储层的测井解释发展,提高页岩气含气量评价的精确度。

## 1 页岩气储层电阻率测井特征

电阻率测井是一类通过测量地层电阻率来研究井剖面地层性质及地层含油气性的测井方法,在常规测井序列中占有极为重要的位置,因此研究页岩气储层电阻率测井响应特征,有利于加深对页岩气储层性质的认识<sup>[10]</sup>。

中国学者将页岩定义为:具有薄页状或薄片层状的页理,主要是由黏土、细粒碎屑、有机质等经压力和温度形成的岩石<sup>[2]</sup>。页岩气藏通常由页岩及其砂岩和粉砂岩夹层组成,与常规砂岩储层相比,页岩储层含有较高的泥质含量和有机质,且具有低孔、低渗等特点。与普通页岩相比,含气页岩有机质富

集,含气量较高。结合上述分析页岩气储层电阻率测井曲线特点,由于泥质含量较高以及束缚水存在,导致页岩储层电阻率曲线处于低值,而页岩气储层含有有机质干酪根、含气体导致电阻率增大。

综合各种因素可以得到,页岩气储层的电阻率测井曲线响应特征为:双侧向深、浅电阻率曲线基本重合,电阻率表现为中低值(较普通页岩为高值),局部由于含气量、砂质、灰质、有机质含量增加出现高值,负差异不明显或者呈现正差异<sup>[9]</sup>,优质页岩气储层的电阻率曲线呈现为中值(图1)。此外,尽管海相页岩与陆相页岩形成环境不同,在岩性、干酪根类型及有机质含量等方面存在差异,但在同一油气藏页岩类型相同,故不必对不同类型页岩气储层测井特征进行比较。

## 2 页岩气储层低阻成因机制

通过对页岩气储层电阻率测井响应特征的研究发现,电阻率曲线呈中等值时最为理想,但是在实际测井过程中遇到了众多低阻现象,如寒武系筇竹寺组部分井、志留系龙马溪组等页岩储层,均出现了较多的低电阻率特征,导致运用常规的饱和度计算模型如 Archie 公式、双水模型、W-S 模型等计算结果与实际结果存在较大的误差,这给该类页岩储层的测井评价带来了难题<sup>[11]</sup>,此外也给识别页岩储层的含气性带来了困扰。造成页岩气储层低阻的影响因素有很多,如黏土含量、过成熟有机质、黄铁矿含量、微裂缝发育、层理发育情况及钻井液低阻侵入等,在此对其低阻成因机制进行系统的分析,加深对页岩气储层低阻成因机制的认识,促进页岩气测井解释评价工作的开展。

### 2.1 黏土含量

页岩主要是由黏土、细粒碎屑、有机质等矿物组成,其中黏土体积分数一般为30%~50%,黏土矿物类型包括蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石等,其中蒙脱石和伊利石具有多微孔结构,比表面积较大且含量较高,对水和气的分布有着明显的影响。因此,由于页岩储层黏土含量的增加,尤其是伊利石和蒙脱石含量的增加,导致地层中黏土束缚水含量增高,导电能力增强,造成电阻率降低。同时,黏土矿物的存在将形成明显的离子双电层,引起阳离子交换作用,通过黏土和细小颗粒表面多余的负电荷形成双电层内层离子,而阳离子交换容量反映了双电层外层平衡离子浓度,由于离子浓度差的原因引起离子迁移,故形成扩散-吸附电动势,也称为黏土的附加



导电性<sup>[9]</sup>。因为页岩气储层中黏土含量极高,扩散-吸附电动势对储层电阻率测井影响变得极为重要,尤其是在有机质含量较低的泥页岩储层,黏土的附加导电性对电阻率测井曲线的影响起主控作用。但是在黄涛等<sup>[12]</sup>研究过程中发现,黏土含量过高,会导致脆性矿物含量减少,在压实作用下地层孔渗均会减小,从而使地层电阻率出现增大趋势。

以龙马溪组某页岩储层为例(图 2),黏土类型以伊利石和伊/蒙间层为主,页岩储层段有机质含量及含气量接近,电阻率曲线随着黏土含量的增加而呈现降低的趋势,在页岩储层的上段黏土含量偏低,电阻率均值为 50 Ω·m,而在中段和下段黏土含量增加,电阻率均值为 30 Ω·m,认为黏土含量是引起电阻率值降低的重要原因之一。

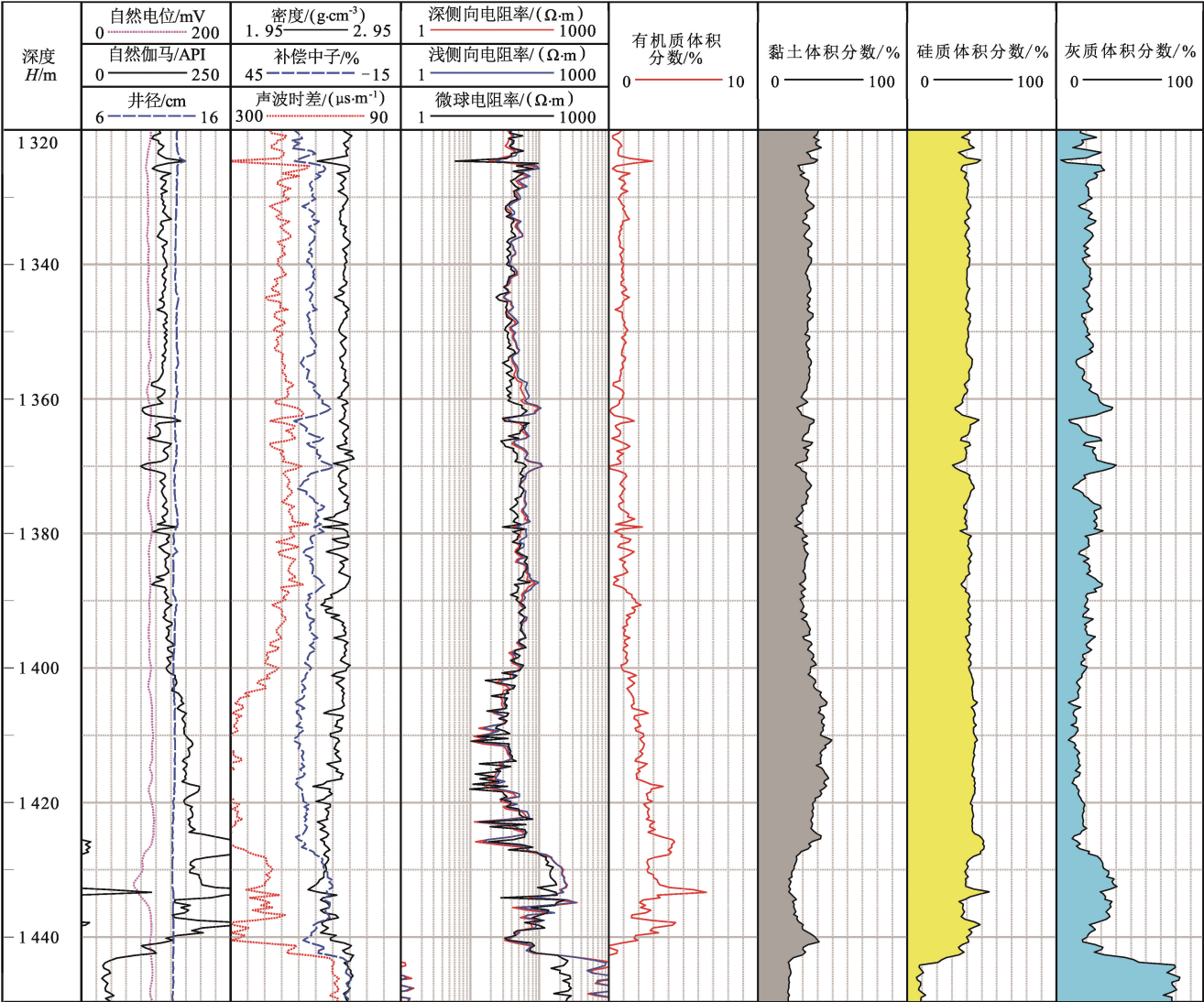


图 1 Y1 井页岩储层测井测井处理成果

Fig.1 Logging interpretation results of shale reservoir in well Y1

2.2 过成熟有机质

页岩气藏与常规天然气藏之间的区别在于自生自储特点,页岩气储层即为产气的烃源岩层,主要特征包括有机质丰度、类型及成熟度,而有机质成熟度是评价一个地区生烃量与油气资源前景的重要指标之一。根据美国页岩气主产区泥页岩成熟度研究发现,页岩气产层的有机质成熟度变化很大,可以分为过成熟页岩气、低成熟页岩气和过—低成熟度混合

页岩气 3 种类型<sup>[2]</sup>。

据 Kethireddy 等<sup>[13]</sup>研究发现,有机质的存在对页岩气储层的电阻率响应特征有着极为重要的影响,包括有机质成熟度、含量、导电能力、分布形式、孔隙度、含气饱和度及有机质与地层水之间的连通性等,并利用数值模拟的方式进行了定量分析。不同有机质成熟度的页岩储层,其孔隙结构特征存在明显差异,从而导致电阻率有着明显不同<sup>[14]</sup>。对于

有机质成熟度,随着热成熟度升高,有机质首先降解为干酪根,干酪根在随后的变化过程中产出甲烷气。随着温度的增加,干酪根不断发生变化,逐渐转变成低氢量的碳质残余物,并最终转化为石墨(即碳化),因此在高成熟度页岩储层电阻率值比相同条件下低成熟度页岩储层电阻率低 1 ~ 2 个数量

级<sup>[15]</sup>。同时 Passey 等<sup>[11]</sup>也对有机质成熟度对电阻率测井的影响展开了研究,认为过成熟页岩储层中,干酪根会通过裂解产生干气,并出现碳化现象。利用 XRD 观察发现,过成熟有机质页岩中会产生大量向石墨转化的中间产物,这种产物具有很好的导电性,因此会导致电阻率测井曲线呈现异常低值。

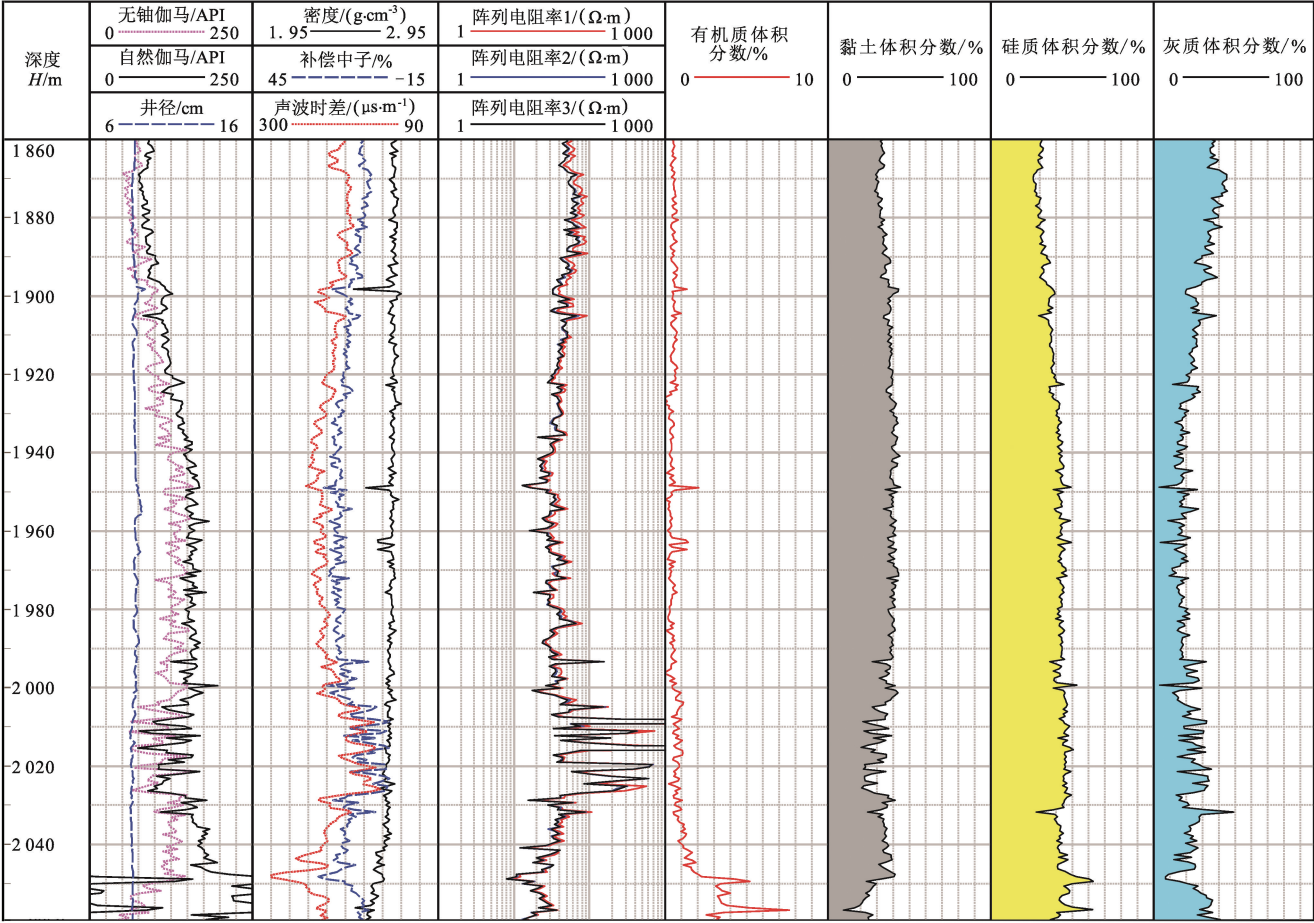


图 2 Y2 井页岩储层测井处理成果

Fig. 2 Logging interpretation results of shale reservoir in well Y2

根据国内外的页岩气储层测井资料与取心资料分析发现,过成熟有机质会明显影响储层电阻率测井曲线。如川南长宁地区筇竹寺组低部页岩,最大埋深达到 9 000 m,成熟度最高可达 4.9%,平均为 3.5%,电阻率测井响应特征表现出明显的超低阻现象。通过分析长宁地区某井测井资料,发现页岩电阻率与有机质含量呈现负相关关系,与常规有机质导电性相反,岩心取样为黑色页岩,从侧面证实了该井页岩储层中由于有机质成熟度过高已经发生有机质碳化现象。同时对筇竹寺组页岩低阻层段干岩样的电阻率实验结果分析证明,已出现有机质严重碳化现象,此外位于隆昌—泸州,长宁—镇雄—大方地区的部分井,富有机质页岩电阻率测井值均在 0.1

~2.0 Ω·m,均显示有机质出现严重碳化现象。研究下寒武统牛蹄塘组页岩电阻率测井曲线,发现局部出现低异常,取心发现该层段页岩有机质已发生碳化现象<sup>[16-18]</sup>。

2.3 黄铁矿含量

根据沉积岩岩石物理研究及实践表明,沉积岩中的脆性矿物骨架颗粒和烃类一般不导电,但是其中沉积岩中存在的黄铁矿对地层导电性有着极为重要的贡献,尤其是在海相页岩中含量较高,此类导电矿物被认为是造成低阻油气层的重要原因之一<sup>[19]</sup>。黄铁矿的电阻率数量级为 10<sup>-6</sup> ~ 10<sup>-1</sup>,对不同频率的电场响应不同。在页岩储层中,黄铁矿的质量分数一般小于 10%,且主要呈现星点状零散分布,这种条件下对



双侧向电阻率测井影响不大,对感应测井影响比较大,因此由感应测井测得电阻率曲线呈尖刺状降低。

图3为Clavier<sup>[19]</sup>针对分散状黄铁矿在不同频率电阻率测井条件下影响能力的实验研究,发现黄铁矿含量增加,电测井校正系数( $R_c/R_a$ ,  $R_c$ 为测井校正值,  $R_a$ 为测井值)增大。但是当页岩储层中黄铁矿含量增加,且分布出现层状或者条带状分布时,对低频双侧向电阻率测井也会产生极大的影响。

## 2.4 地层水矿化度

关于地层水矿化度对电阻率测井的影响已经做了相当多的研究,对地层水在储层中的导电机理认识较为深刻。高矿化度地层水会在储层中形成以高含盐束缚水为介质的导电网络,是引起油气层电阻率降低的原因之一。页岩气储层具有黏土含量较高、孔隙结构复杂、低孔、低渗等特点,通常认为页岩气储层中可动水含量极低或者不考虑,主要是以束缚水为主,在高矿化度地层水作用下,容易造成电阻率极低。

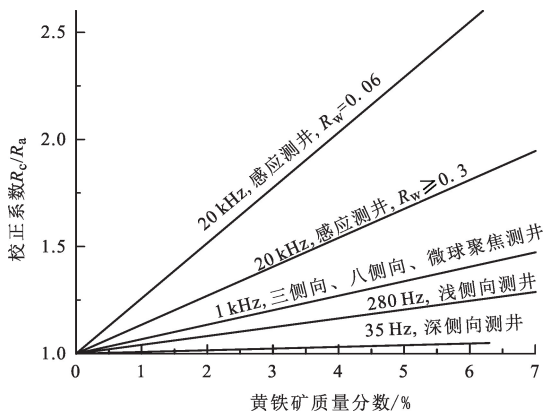


图3 地层中分散状黄铁矿含量对不同频率电测井的影响

Fig.3 Influence of dispersed pyrite content on different frequency electrical logging in stratum

据中国筇竹寺组某页岩气储层地质录井、测井资料分析发现,页岩储层低阻层段的黏土含量较低,不是造成超低电阻结果,测井解释处理结果显示在850~900 m段地层孔隙主要含水,结合在该段取心资料发现岩心见盐霜,认为页岩地层被高矿化度地层水所淹是地层超低电阻率的成因之一<sup>[9]</sup>。此外,根据实验室岩心分析结果,黄铁矿含量与电阻率降低幅度呈正相关关系,证明黄铁矿含量也是该层段低阻的成因之一;电阻率值与有机质含量呈负相关,地层为筇竹寺组页岩,平均成熟度  $R_o$  大于3.0%,处于过成熟阶段,有机质可能发生碳化,也是地层出现超低阻的原因。进一步证实,页岩气储层的低阻现象通常是由多种因素共同作用导致。

## 2.5 页岩物性及孔隙结构

孔隙空间是储集岩的重要组成部分之一。岩石中除颗粒、基质、胶结物、交代以及自生矿物之外的空间可统称为孔隙空间,相对较大的空间叫孔隙,连通孔隙的叫喉道,对岩石的储集性能有重要的影响。孔隙结构是指岩石中孔隙和喉道的几何形状、大小及其相互连通和配置关系,影响着储层的储渗特性。

页岩储集空间实际上是指页岩中的孔隙和裂隙空间,普遍具有低孔、低渗、吸附特性等特点,纳米级孔隙是页岩储层连通储集空间的主体<sup>[20]</sup>。页岩储层中纳米级孔隙以干酪根纳米孔、颗粒间纳米孔、矿物种间纳米孔、溶蚀纳米孔为主,喉道呈席状、弯曲片状,孔隙直径介于10~1000 nm,主体范围为30~100 nm。页岩储层物性条件差,导致束缚水饱和度的增加,有机质分散,有助于形成以束缚水为主要成分的导电网络,是造成低阻的原因之一。

根据四川盆地川南坳陷、下扬子盆地江南隆起及川东南地区的预探井、参数井探测发现,页岩气储层中均存在低阻气层,对此开展了一系列岩石物理实验研究。实验发现储层主要发育微孔,大孔不发育,而且电阻率与有效孔隙度、渗透率呈正相关关系(图4(a)、(b)),与小于2 nm的微孔数量、束缚流体含量呈负相关关系(图4(c)、(d))。充分证明了页岩储层物性差、微孔发育是导致低阻的原因。

## 2.6 地质原因

页岩气储层受沉积旋回和沉积环境的控制,表现为岩石细粒成份(粉砂)增多和(或)黏土矿物充填与富集,导致地层中微孔隙发育,微孔隙和渗流孔隙并存<sup>[2]</sup>。这类微孔隙发育的地层,束缚水含量明显增加,容易造成电阻率极低。

此外,在页岩沉积及成岩过程中储层呈现薄片状页理,中间夹杂细砂岩或者粉砂岩夹层。页理在力学特性中为薄弱界面,因此在页岩气的生气阶段容易被剥离,从而产生微裂缝,裂缝中填充黏土、地层水、黄铁矿等低阻物质,同时在钻井过程中容易产生钻井缝,造成钻井液侵入,也是造成页岩储层低阻的原因。

图5为某页岩的偏光和荧光显示结果。该岩样为灰黑色含硅质泥岩(页理发育),测得电阻率6.92  $\Omega \cdot m$ 。荧光照片显示发亮的黏土矿物(沸石)含量较高,呈顺层节理,有机质层理也较为明显,说明页理缝是储层低阻的成因之一。

对页岩气储层低电阻率成因的分析发现,页岩气储层低阻的成因一般是由多种因素共同作用,其中最为主要的有6个原因:较高黏土含量、过成熟有



机质、高黄铁矿含量及层状分布、较差的储层物性和地质成因。不同地区、不同页岩储层,这些影响因素对低电阻率的贡献各不相同,利用测井解释评价低阻页岩气储层时,需要根据具体问题分析,寻找地区低阻成因的主要因素。充分利用已有的地质、测井、试气及岩心资料,综合分析页岩气储层低阻层段的黏土含量、有机质成熟度、黄铁

矿含量及分布形式、地层水矿化度及储层的物性和孔隙结构等因素,正确判断造成储层低阻的主要原因,进而准确寻找含气层段。如杨小兵等<sup>[9]</sup>所示筇竹寺组页岩储层,该井低阻现象就是由于过成熟有机质、高黄铁矿含量以及高地层水矿化度共同作用导致,最后测井处理解释结果显示为页岩气储层,主要赋存吸附气。

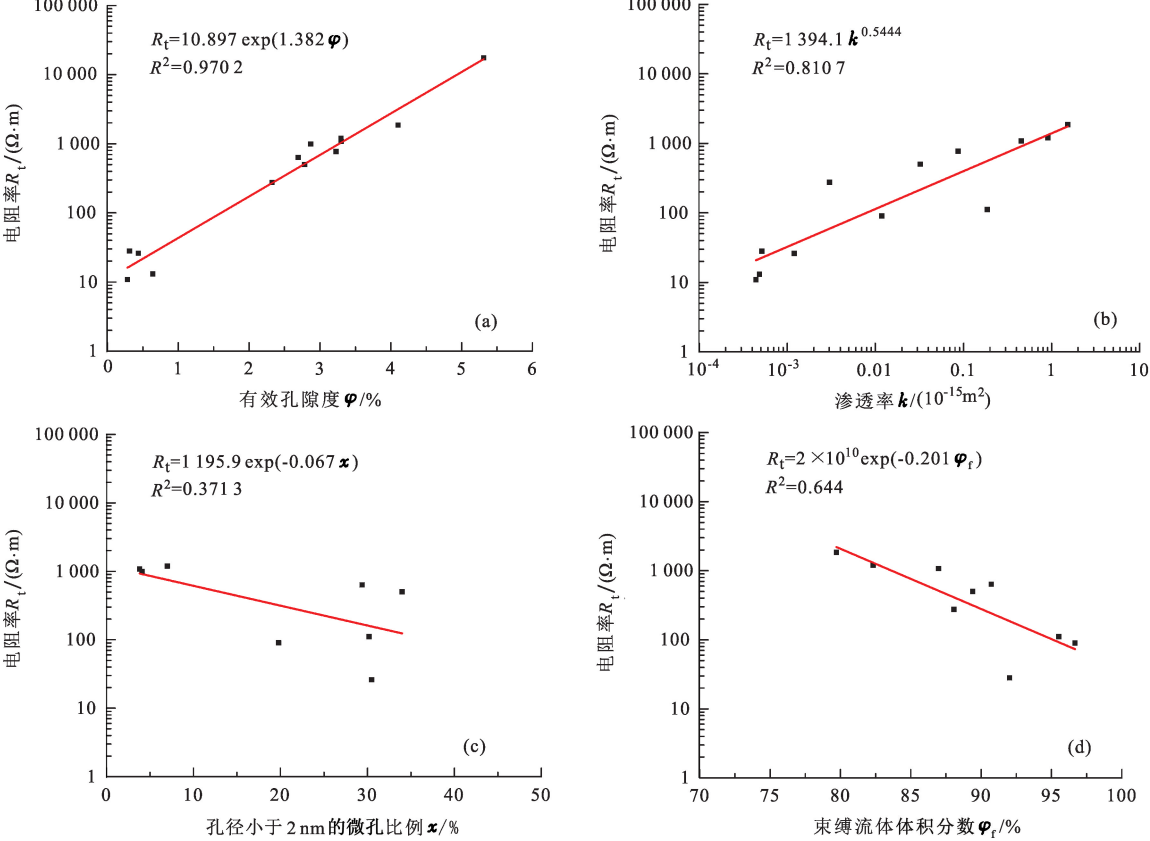


图 4 电阻率与物性参数关系

Fig. 4 Relationship of resistivity and physical properties

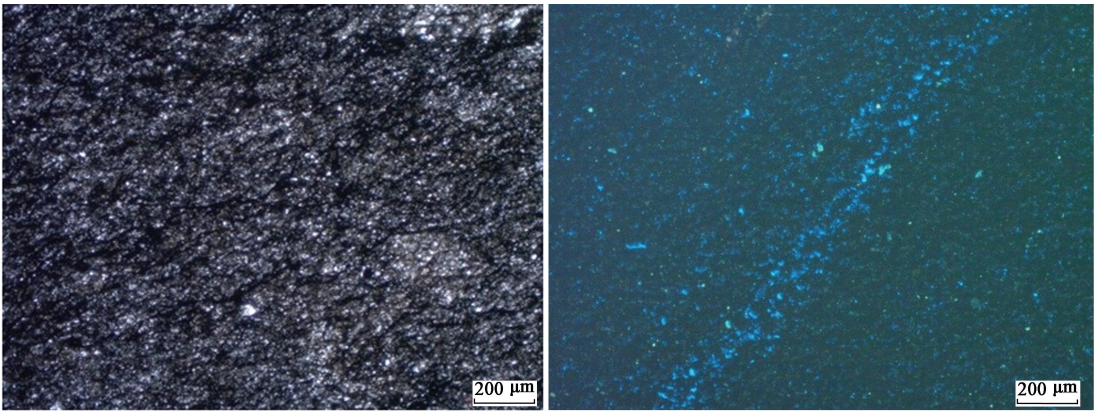


图 5 页岩普通偏光与荧光对比

Fig. 5 Comparison of common polarized light and fluorescence in shale

3 低阻页岩气储层测井评价实例

为了进一步研究页岩气储层的低阻现象,探索

测井方法在评价和研究页岩气储层低阻成因中的可行性,本文中针对川南扬子地区下古生界的龙马溪组和筇竹寺组出现低阻现象进行分析探讨。结合研

究区相应的地质、测井资料进行处理,利用测井及多井对比的方法分析低阻成因,认识并解释页岩储层的异常低阻现象,以避免因储层低阻现象造成测井解释评价的偏差。

3.1 龙马溪组低阻页岩

图 6 是 YS 井龙马溪组-五峰组的测井解释结果。经测井资料分析处理发现,该井在 2 276 ~ 2 295 m 层段出现异常低阻现象。利用元素俘获能谱

(ECS) 结合常规曲线计算分析,硅质体积分数为 31% ~ 59%,平均约 45.9%;黏土体积分数为 19% ~ 52%,平均约 31.1%;碳酸盐岩体积分数为 1% ~ 42%,平均约 20.6%;元素分析(ELAN)计算有效孔隙度为 1.5% ~ 6.0%,平均为 3.6%;总有机碳 TOC 为 1.3% ~ 3.9%,平均为 2.4%;成熟度  $R_o$  为 3.4% ~ 4.2%,平均为 3.8%。

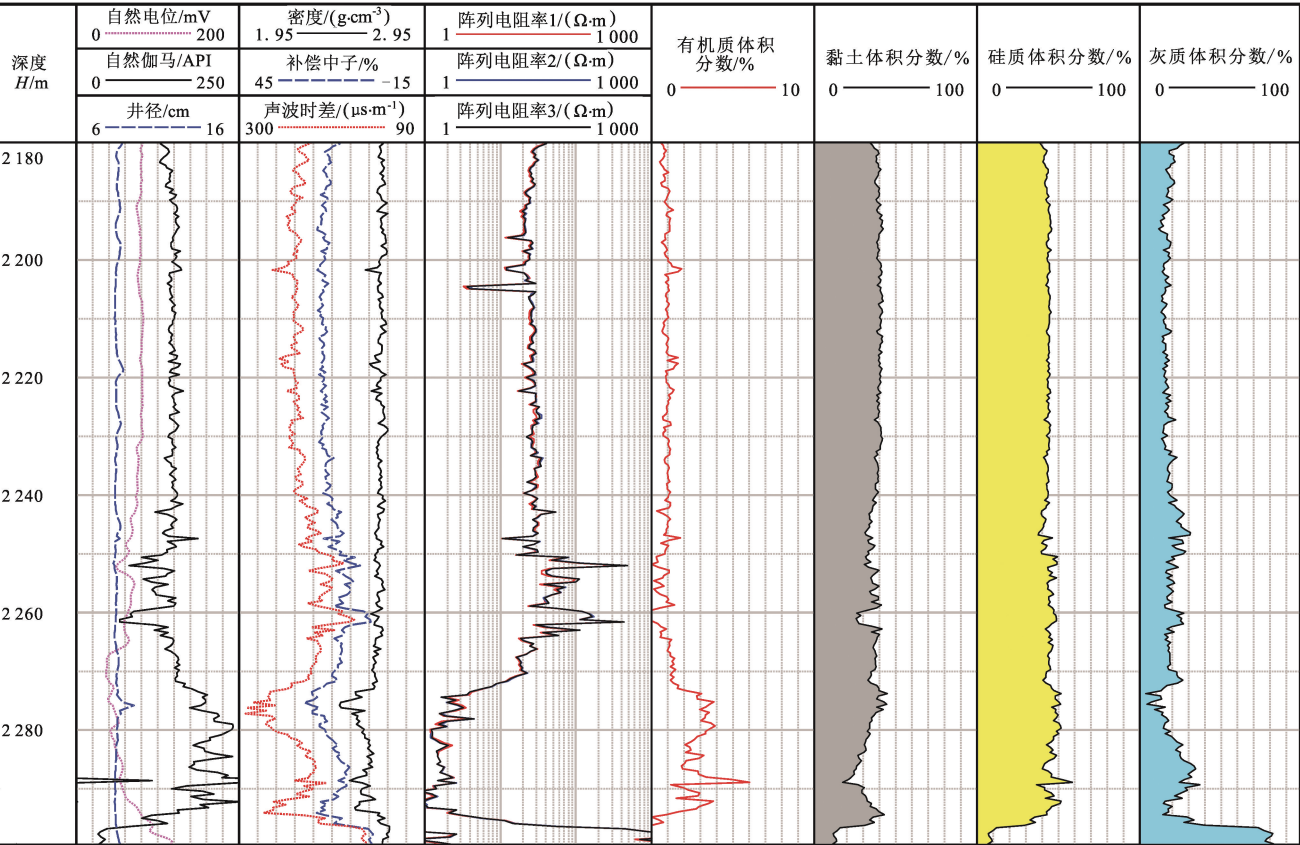


图 6 YS 井测井解释成果

Fig.6 Logging interpretation results of shale reservoir in well YS

利用多井对比发现,龙马溪组地层的厚度及岩性均很稳定,邻井高阻缝均很发育,Y 井高导缝和高阻率均不发育。与邻井中高阻储层相比,低阻储层的有机质含量、黏土含量并未有明显差异,同时通过建立与电阻率的关系发现,其与电阻率变化无定性关系。对测井资料中自然电位曲线的分析发现,在 2 265.0 ~ 2 270.0 m 处自然电位相较于上覆层段开始呈现负异常,反应地层水矿化度升高,此时电阻率值开始降低,说明地层水矿化度是造成电阻率值降低的原因之一。在页岩储层的 2 270.0 ~ 2 295.0 m 电阻率值进一步降低,而自然电位无明显变化,证明还有其他因素影响储层电阻率。最后通过取心发现该层段岩心为灰黑色笔石页岩,平均有机质成熟度

可达 3.8%,认为该层段有机质过成熟,发生了有机质碳化现象。此外,成像测井资料显示,低阻层段水平层理发育,见零星分布和顺层分布的黄铁矿,裂缝发育不明显。

综上,得出该井低阻成因主要是过成熟有机质与层状分布的黄铁矿。该井测井解释处理结果和室内岩心分析结果显示,在低阻层段 TOC 含量高,有机质成熟度处于生气窗内,页岩游离气与吸附气含量较高,主要页岩气层段发育于 2 176.2 ~ 2 296.0 m,其中 2 272.0 ~ 2 294.0 m 为最优势储层发育层位,因此测井综合解释低阻层段为页岩气层。

3.2 筇竹寺组低阻页岩

图 7 是筇竹寺组 B 井的测井解释结果,在页岩



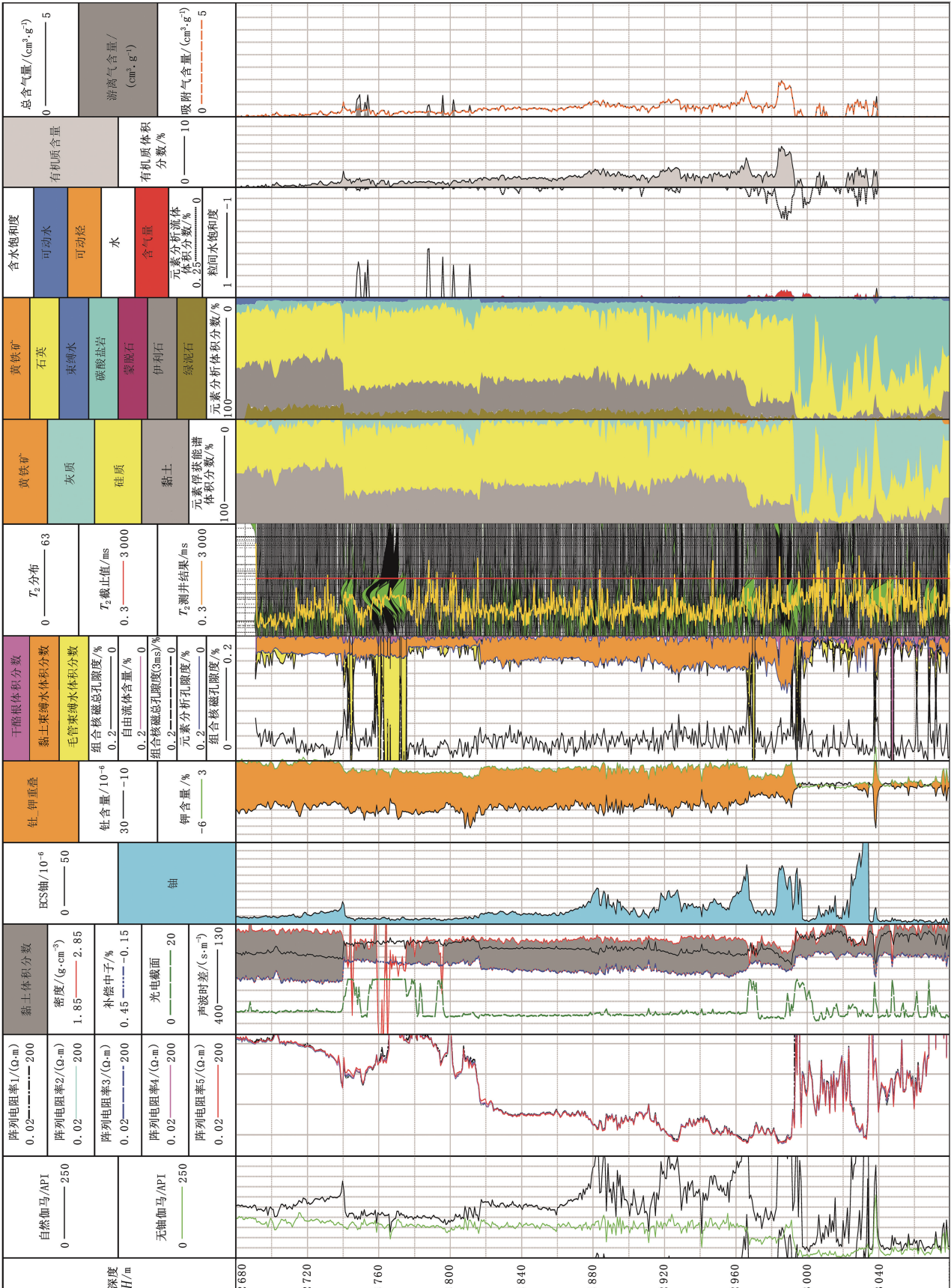


图7 B测井解释成果  
Fig.7 Logging interpretation result of the shale reservoir in well B



储层的2820~2990 m层段电阻率测井曲线显示为超低阻,电阻率平均为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 。利用ECS结合常规曲线计算分析,黏土体积分数约20.8%;硅质体积分数平均为73.1%;碳酸盐岩体积分数平均为5.0%;ELAN计算有效孔隙度为0.2%~6.6%,平均为4.5%;总有机碳TOC为1.5%~3.0%,平均为2.4%;有机质成熟度为2%~4%,成熟度较高。

由B井地质及岩心资料发现,低阻层段为浅海陆棚,底部为灰色白云岩、钙质粉砂岩及砂质白云岩互层,中下部主要为灰黑色泥岩,中上部为灰色泥质粉砂岩/粉砂质泥岩,顶部为深灰色泥岩,水平层理发育。

根据邻井对比结果显示,B井黏土含量较邻井偏低,有机碳含量更高,黄铁矿主体呈零散分布,由此发现上述因素均不是造成B井低阻现象的成因。考虑到有机质成熟度很高,有可能是干酪根发生碳化,通过取心岩样进行实验分析发现,部分岩心开始出现碳化现象,证明有机质高成熟度是造成该井低阻的主要成因。同时利用电成像测井发现低阻层段地层层理及高导缝发育,也是造成电阻率异常的原因。

经过测井解释分析,发现该井低阻层段有机质含量很高,且有机质成熟度偏高,仍处于生气窗范围之内,具备了良好的生烃潜力。页岩储层孔隙度较低,脆性矿物含量高,具备了较好的储集和开发条件,因此测井解释该井低阻层段为页岩气层。利用试气资料发现,页岩气层段发育于2816.5~3039.1 m,其中3号层深度为2981.5~2993.0 m,为最优势储层发育层位,以吸附气为主,总含气量为 $0.7 \text{ m}^3/\text{t}$ ;6号层深度为3021.6~3034 m,总有机碳TOC含量较高,约1.6%,孔隙度一般,平均约2.0%,以吸附气为主,含气量约 $0.4 \text{ m}^3/\text{t}$ ,与解释结果一致。

## 4 结 论

(1)正常情况下,页岩气储层电阻率测井曲线响应特征为:双侧向深、浅电阻率曲线基本重合,电阻率表现为中低值(较普通页岩为高值),局部由于有机质含量及含气量增加导致出现高值,而优质储层的电阻率曲线呈现为中等值。

(2)造成页岩储层低电阻率的影响因素主要有6个,包括较高黏土含量、高有机质成熟度、高黄铁矿含量、高地层水矿化度、低储层物性及优良的地质条件。通常低阻现象都是由多种因素相互作用,共同影响地层电阻率,不同地区、不同储层造成低阻的

主要影响因素各不相同,需要根据不同资料进行分析。

(3)分析储层的低阻成因,除了根据地质、测井及岩心资料之外,还应该综合利用邻井对比、上下层段对比等方法,进一步分析低阻层段电阻率值与黏土含量、黄铁矿含量等的相关性,寻找造成低阻现象的主要原因。

(4)随着页岩气勘探开发的持续发展,越来越多的低阻页岩储层被发现,因此深入认识页岩储层低阻成因机制有助于加深对储层低阻现象的认识,提高测井解释结果的准确性。

## 参考文献:

- [1] 邹才能. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社, 2011.
- [2] 王香增. 陆相页岩气[M]. 北京:石油工业出版社, 2014.
- [3] 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.  
SUN Jianmeng. Coal bed methane and shale gas evaluation based on new seven related logging goals[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(5): 457-465.
- [4] 张晋言, 孙建孟. 利用测井资料评价泥页岩油气“五性”指标[J]. 测井技术, 2012, 36(2): 146-153.  
ZHANG Jinyan, SUN Jianmeng. Log evaluation on shale hydrocarbon reservoir[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(2): 146-153.
- [5] 张作清, 郑场, 孙建孟. 页岩气评价“六性关系”研究[J]. 油气井测试, 2013, 22(1): 65-70.  
ZHANG Zuoqing, ZHENG Yang, SUN Jianmeng. "Six parameter relationship" study of shale gas reservoir[J]. Well Testing, 2013, 22(1): 65-70.
- [6] 罗水亮, 许辉群, 刘洪, 等. 柴达木盆地台南气田低阻气藏成因机理及测井评价[J]. 天然气工业, 2014, 34(7): 41-45.  
LUO Shuijiang, XU Huiqun, LIU Hong, et al. Genetic mechanism and logging evaluation of low-resistivity gas reservoir in the Tainan Gas Field, eastern Qaidam Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(7): 41-45.
- [7] 郭振华, 赵彦超. 大牛地气田致密砂岩气藏低阻气层成因分析[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 16-17, 272-275.  
GUO Zhenhua, ZHAO Yanchao. Genetic analysis on low resistivity gas zones of tight sandstone reservoir in Daniudi Gas Field[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(3): 16-17, 272-275.
- [8] 闫磊, 谭守强, 潘保芝, 等. 低阻油层成因机理及测井

- 评价方法;以港北南翼区块馆陶组为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(6): 1456-1462.
- YAN Lei, TAN Shouqiang, PAN Baozhi, et al. Genetic mechanism and logging evaluation method for low resistivity reservoir: taking Guantao Formation of Gangbei Area for instance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(6): 1456-1462.
- [9] 杨小兵, 张树东, 张志刚, 等. 低阻页岩气储层的测井解释评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(6): 692-699.
- YANG Xiaobing, ZHANG Shudong, ZHANG Zhigang, et al. Logging interpretation and evaluation of low resistivity shale gas reservoir[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(6): 692-699.
- [10] 洪有密. 测井原理与综合解释[M]. 东营: 石油大学出版社, 1993.
- [11] PASSEY Q R, MORETTI F J, KULLA J B, et al. Practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(12): 1777-1794.
- [12] 黄涛. 页岩岩芯复电阻率实验室测试分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- HUANG Tao. Complex resistivity of shale core laboratory testing and analysis[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [13] KETHIREDDY N, CHEN H, HEIDARI Z. Quantifying the effect of kerogen on resistivity measurements in organic-rich mud rocks[J]. Petrophysics, 2014, 55(2): 136-146.
- [14] 张建坤, 何生, 颜新林, 等. 页岩纳米级孔隙结构特征及热成熟演化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 11-24.
- ZHANG Jiankun, HE Sheng, YAN Xinlin, et al. Structural characteristics and thermal evolution of nanoporosity in shales[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(1): 11-24.
- [15] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会. 北美地区页岩气勘探开发新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [16] 王道富, 王玉满, 董大忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩储集空间定量表征[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 1-10.
- WANG Daofu, WANG Yuman, DONG Dazhong, et al. Quantitative characterization of reservoir space in the Lower Cambrian Qiongzhusi Shale, Southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(7): 1-10.
- [17] 王玉满, 董大忠, 程相志, 等. 海相页岩有机质碳化的电性证据及其地质意义: 以四川盆地南部地区下寒武统筇竹寺组页岩为例[J]. 天然气工业, 2014, 34(8): 1-7.
- WANG Yuman, DONG Dazhong, CHENG Xiangzhi, et al. Electric property evidences of the carbonification of organic matters in marine shales and its geologic significance: a case of the Lower Cambrian Qiongzhusi Shale in southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(8): 1-7.
- [18] 王濡岳, 冷济高, 丁文龙, 等. 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组优质页岩储层测井识别: 以贵州岑巩页岩气区块为例[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(12): 2395-2407.
- WANG Ruyue, LENG Jigao, DING Wenlong, et al. Logging identification of the Lower Cambrian Niutitang shale gas reservoir in Upper Yangtze region: a case study of the Cengong block, Guizhou Province[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(12): 2395-2407.
- [19] 中国石油勘探与生产公司. 低阻油气藏测井识别评价方法与技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [20] 罗瑞, 查明, 何皓, 等. 南堡凹陷古近系泥页岩孔隙结构特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(2): 23-33.
- LUO Rui, ZHA Ming, HE Hao, et al. Characteristics of pore structures in Paleogene shales in Nanpu Sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(2): 23-33.

(编辑 修荣荣)