

doi: 10.11720/wtyht.2022.1123

崔瑞康, 孙建孟, 刘行军, 等. 低阻页岩电阻率主控因素研究[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 150–159. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1123>

Cui R K, Sun J M, Liu X J, et al. Major controlling factors of low-resistance shale gas reservoirs[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 150–159. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1123>

低阻页岩电阻率主控因素研究

崔瑞康¹, 孙建孟¹, 刘行军², 文晓峰²

(1. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中油集团测井公司 长庆分公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 龙马溪组页岩是现阶段国内勘探的主要层位之一。川南扬子地区下古生界的龙马溪组气层存在低电阻率特征, 仅从测井响应上很难与水层区别。为此, 在现有常规测井、钻井取心、生产动态等资料的基础上, 结合大量铸体薄片、QEMSCAN 和 X 全岩衍射等岩心分析实验, 对该地区低阻气层的成因机制进行了深入研究, 结果表明: 川南扬子地区下古生界的龙马溪组低阻气层的主控因素有 3 个: 黏土矿物的附加导电性、过成熟有机质完全石墨化和有机质纹层分布形式。实际应用结果表明: 研究区低阻气层的成因为发育的有机质纹层和有机质部分石墨化, 即页岩气储层表现为低阻往往都是多种因素相互叠加、相互影响造成的, 在分析时需要根据不同地区、不同层段分析相应地质、测井和岩心资料, 并且需要利用上下层段对比和邻井对比等方法判断储层低阻的主控因素。

关键词: 页岩气; 低阻岩层; 测井评价; 影响因素

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)01-0150-10

0 引言

随着多年来的勘探与开发, 国内外大多数勘探难度相对较低的构造性油气藏已经被发现并开发, 因此勘探对象逐渐转向以岩性圈闭为主的隐蔽油气藏, 其中低阻油气藏是其中很重要的一类。低阻油气藏在我国各油气田均广有分布, 如渤海湾、准噶尔、塔里木、松辽、四川和吐哈等盆地, 均发现了大量的低阻油气层, 对于油气增储上产意义重大^[1]。无论常规油气藏中的储层岩性、物性、电性和含油性“四性”关系, 还是非常规页岩气藏中的储层岩性、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, 电阻率测井的作用都十分重要^[2-4]。孙建孟等^[5]给出了低阻油气层的定义: 油气层电阻率相对于邻近水层而言, 电阻率值偏低并引起油水层解释困难的一类油气层; 一些研究人员将页岩储层低电阻率原因归结为高成熟有机质石墨化、黏土矿物附加导电、黄铁矿导电等原因^[6-12]; 还

有一些研究人员发现储层孔隙结构变差会导致束缚水饱和度增高, 进而形成低阻油气层^[13-14]。王友净等^[15]发现沉积、成岩、油藏特点的综合影响会形成低阻油层; 罗水亮等^[16]从地质及工程因素角度对低阻气层的形成机制进行了深入研究, 发现在地质成因方面是由于水动力条件较弱导致地层岩性粒度细、黏土矿物含量高以及束缚水饱和度高, 并且地层水矿化度高, 孔隙结构复杂等因素进一步降低了气层电阻率; 工程成因是由于钻井液侵入和地层浸泡时间影响了气层电阻率; 于红岩、郑华、林国松等^[17-19]研究发现构造作用、沉积环境、成岩机理、古物源、古气候等因素在宏观层面影响油气层电阻率; 地层水矿化度、束缚水饱和度、黏土矿物附加导电性以及泥质含量等因素在微观层面影响油气层电阻率; 罗兴平等^[20]研究发现在泥质、黏土矿物含量不高时, 特殊的黏土矿物组成能够产生较高的附加导电性和束缚水含量, 进而造成油气层呈现低阻特征。

本文在前人研究的基础上, 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制, 并结合

收稿日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-08-19

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05036-005-003); 国家自然科学基金项目(41874138)

第一作者: 崔瑞康(1996-), 博士研究生, 主要研究方向为测井解释与方法应用。Email: 1763389483@qq.com

龙马溪组低阻页岩气储层的地质资料及测井资料分析与评价低阻页岩气储层,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 黏土矿物导电能力分析

黏土、有机质、细粒碎屑等矿物是页岩的主要组成成分,其中黏土的体积分数可达 30%~50%。黏土矿物主要包括蒙脱石、伊利石、绿泥石、高岭石等(图 1)。黏土矿物的含量对页岩电阻率有一定的影响,主要表现在黏土矿物的附加导电性和黏土矿物导致束缚水饱和度增高引起的电阻率降低(图 2)。图 2 中的 A、B、C3 口井均位于四川南部地区。

黏土矿物中,高岭石单元晶层中一面为 O 层,另一面为 OH 层;O 层和 OH 层可以形成较强的氢键,与层之间结合非常紧密,层间距仅为 0.72 nm,水分子不容易进入晶层,故高岭石亲水性差,且性能比较稳定。蒙脱石单元晶层两面都是 O 层,无法形成氢键(层与层之间为分子间力),层与层之间结合不紧密,水分子容易进入,故蒙脱石具有亲水性,并且吸水膨胀。伊利石吸水能力位于蒙脱石和高岭石之间,亲水性仅次于蒙脱石。蒙脱石和伊利石具有多微孔结构,比表面积大,对页岩中水的分布具有明显影响。通过分析 QEMSCAN (quantitative evaluation of minerals by sacnning electron microscopy) 页岩薄片(图 3)可知,黏土矿物中以蒙脱石和伊利石为主,

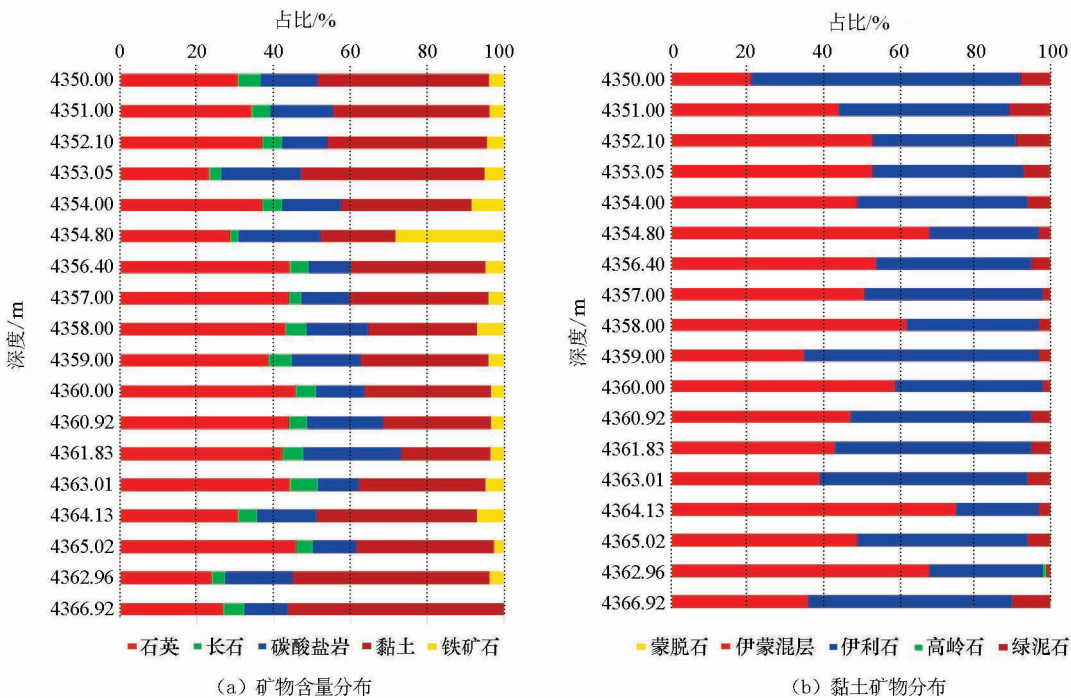


图 1 研究区矿物含量分布和黏土矿物分布
Fig.1 Mineral content distribution and clay mineral distribution map of the study area

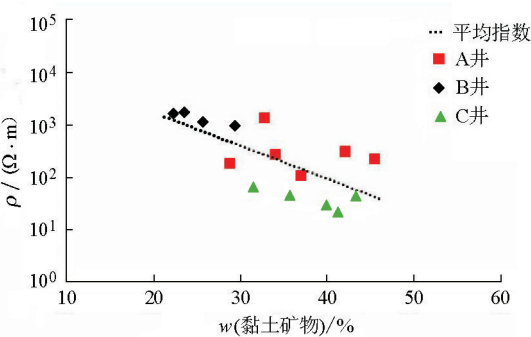


图 2 黏土矿物与电阻率关系
Fig.2 Clay minerals and resistivity diagram

所以,页岩中黏土矿物增加会导致页岩微孔增多,使束缚水饱和度增加,导电能力增强,电阻率下降。

黏土矿物表面是负电荷,因而当它在地层中时会吸附地层中的阳离子达到电中性,黏土矿物对阳离子的这种吸附作用使得地层中阳离子积聚在黏土矿物表面,造成浓度差。因为浓度差的存在,阳离子存在由高浓度向低浓度扩散的趋势,并且在扩散到一定厚度时和吸附力达到平衡;此时,黏土矿物表面和地层之间存在电势差,形成离子双电子层,并引起阳离子交换作用,形成扩散—吸附电动势。这就是黏土矿物的附加导电性,通常可以用阳离子交换容

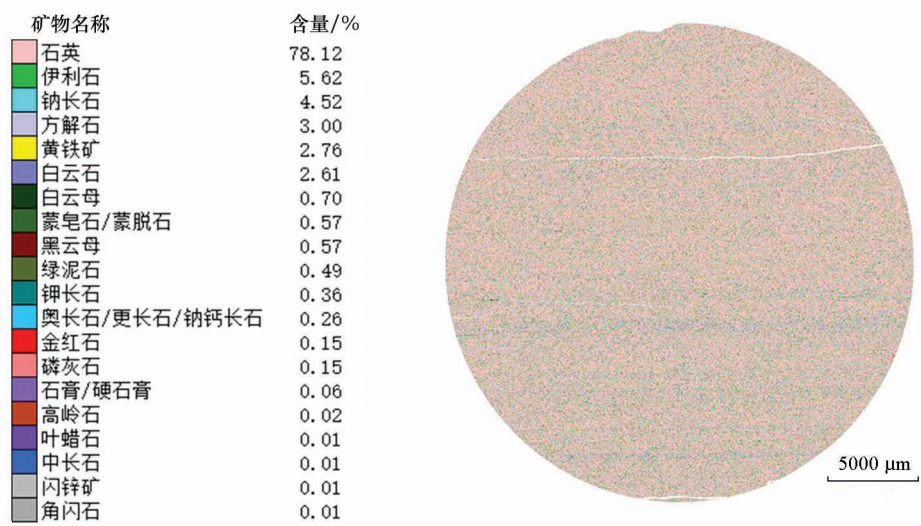


图 3 矿物质定量分析
Fig.3 Mineral quantitative analysis diagram

量(CEC)表示黏土矿物附加导电性的强弱。于庆洲^[1]研究发现,黏土矿物阳离子交换吸附的电荷中,晶格内的类质同象替代现象产生的电荷占有主要地位。因此,黏土矿物的阳离子交换容量主要由晶格内的类质同象替代决定。蒙脱石中广泛发育晶格内的类质同象替代,所以阳离子交换容量最大;高岭石不发育晶格内的类质同象替代,阳离子交换容量最小;伊利石在两者之间。通过研究发现,部分页岩气储层黏土矿物含量极高,此时黏土矿物的扩散—吸附电动势对储层电阻率的影响就至关重要,甚至在部分有机质含量较低的储层,黏土的附加导电性可以成为主导因素。但是,黄涛^[21]、赵文龙^[10]等研究发现,黏土矿物含量过高时会引起脆性矿物的减少,在地层的压实作用下渗透率和孔隙度减小,黏土矿物会充填储层的原生孔隙,从而破坏储层的导电网络,使得储层电阻率上升。

2 有机质过成熟导电能力分析

自生自储是页岩气藏和常规气藏之间最显著的区别。页岩气层既是产气的烃源岩层也是储层,主要特征包括有机质成熟度、丰度和类型等,其中有机质成熟度是评价页岩气层的一个重要指标。根据美国页岩气主产区泥页岩成熟度研究成果,页岩气产层可以根据有机质成熟度的不同分为过成熟页岩气、过—低成熟度混合页岩气和低成熟页岩气 3 种^[22]。刘天琳等^[23]以镜质体反射率(R_0) 3.0%和 3.5%为界限,将富有机质海相页岩划分为未石墨化海相页岩($R_0 \leq 3.0\%$)、部分石墨化海相页岩(3.0%

$<R_0 \leq 3.5\%$)和石墨化海相页岩($R_0 > 3.5\%$)。Kethireddy 等^[24]研究发现,有机质成熟度、导电能力、含量、孔隙度、含气饱和度及有机质与地层水之间的连通性等都会对页岩气储层电阻率产生重要影响,并且运用数值模拟的方式对有机质的影响进行了定量分析。张建坤等^[25]研究发现,不同有机质成熟度会造成页岩气储层的孔隙结构不同,进而影响储层电阻率产生明显的差异。选择位于四川盆地南部地区的 A、B、C 井中下古生界龙马溪组气层,分别统计电阻率、 R_0 和孔径分布之间的关系。从图 4、图 5 给出的统计结果可以看出:电阻率与 R_0 负相关, R_0 与小于 2 nm 的孔径分布数量负相关。据李楚雄等^[26]、邵龙义等^[27]、霍培丽等^[28]的相关研究,当有机质过成熟时,样品中的微孔显著发育,即热演化程度升高导致微孔更发育,岩石中的介孔及大孔数量减少。在烃源岩的热演化过程中,随着温度和埋藏深度的不断增加,热成熟度升高,有机质会发生降解,

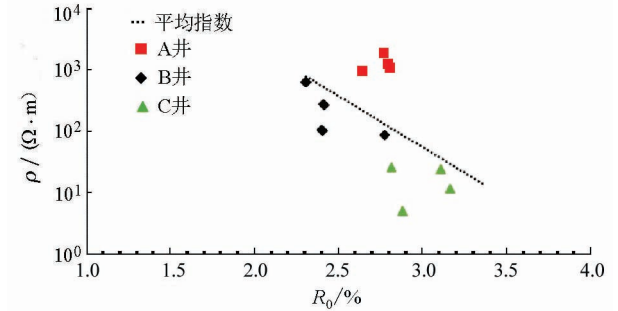


图 4 电阻率与 R_0 之间的统计关系
Fig.4 Statistical relationship between resistivity and R_0

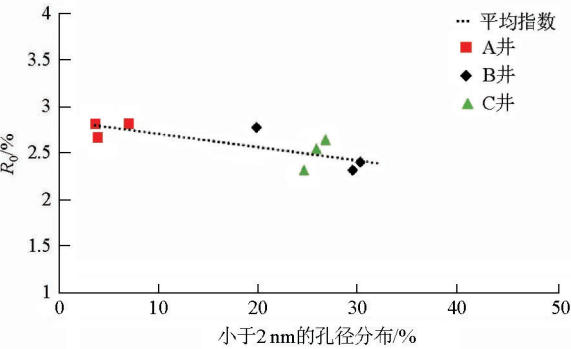


图 5 R_0 与孔径分布之间的统计关系

Fig.5 Statistical relationship between R_0 and aperture distribution

随后有机质会释放出碳氢化合物并逐渐转变成含氢量比较低的碳质残余物,这一过程就是有机质石墨化过程。石墨为良好导体,有机质为不良导体,因此高成熟度储层电阻率会比较低。Yang A 等^[29]通过热解实验和分析 TEM 图像发现,高 TOC 以及泥岩和有机质样品成熟度都可导致芳香度的增加和石墨状组分的存在,从而降低了样品的电阻率。

综上所述,随着有机质热演化程度增高,有机质逐渐石墨化、芳香度增加以及小于 2 nm 的微孔更发育,岩石中的介孔及大孔数量减少,导致储层电阻率降低。

3 含有机质纹层分布形式与导电能力分析

烃源岩中有足够数量的有机质,包括可溶有机质和不溶有机质两部分,足够数量的有机质是油气生成的物质基础,是决定烃源岩生烃能力的主要因素,也是油气能否聚集成藏的主要控制因素。其中可溶有机物可用于母岩中有机质的输入和沉积环境的研究,以确定母岩和油源对比,为研究石油成因及石油可能的运移途径提供丰富的信息。

岩心与测井电阻率统计分析(图 6)表明:有机质是否导电对岩心导电性影响最大,泥质和黄铁矿都具有一定的附加导电性;随着含量的变化,泥质对导电性的影响较大,黄铁矿由于分布较为分散,对岩心的电阻率没有显著影响。综合多种尺度的页岩导电因素影响规律研究,厘定了影响因素排序:导电有机质>低阻薄层>黏土矿物>孔隙水>黄铁矿。

3.1 含有机质纹层分布形式

层理是指岩层中物质的成分、颗粒大小、形状和颜色在垂直方向发生改变时产生的纹理,当层理足够小的时候为微层理又可以称为纹层。通常情况下,纹层的类型和厚度等信息可反映沉积环境的变

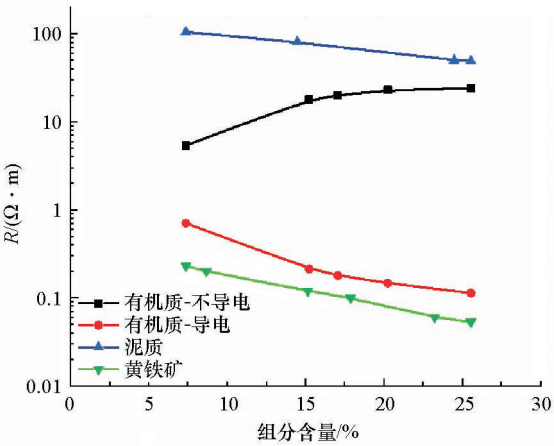


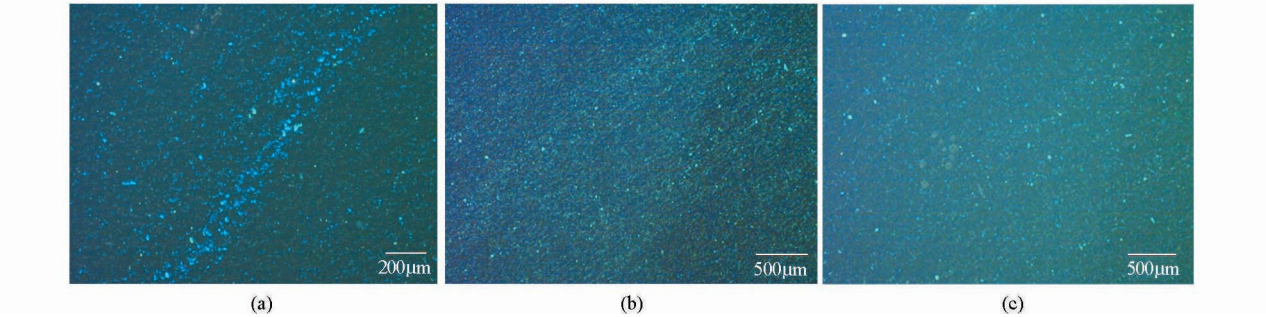
图 6 岩石各组分对电阻率的影响

Fig.6 Influence of various rock components on resistivity

化^[30],但是纹层中有机质和黏土成层分布对页岩电阻率也有影响,这对于探究微观源储特征及关系从而了解该地区低阻成因机理具有重要意义。

利用偏光显微镜、QEMSCAN 和荧光显微镜可研究纹层形态、厚度及分布特征,利用 X 射线衍射对纹层内部的矿物组成进行定量分析,利用扫描电镜可研究纹层内部的矿物充填情况^[31]。在荧光显微镜下,有机质纹层连续分布(图 7a)、断续分布(图 7b)或者零散分布(图 7c);有机质纹层较薄,厚度一般小于 0.02 mm。有机质纹层可以分为富有机质纹层和含有机质纹层^[32]。在偏光显微镜下,多个纹层相互堆叠形成界面不明显的富有机质层(图 8a);部分纹层有机质呈块状分布,多个纹层相互堆叠形成界面不明显的含有机质层(图 8b);富有机质纹层和含有机质纹层相互堆叠形成递变层(图 8c)。

利用 X 射线衍射分析对含有机质纹层的页岩薄片中的矿物组成进行定量分析(表 1),利用 QEMSCAN 技术对页岩薄片矿物集合体嵌布特征进行分析(图 9)。该岩样为龙马溪组灰黑色炭质泥岩,采样深度 3 084.09 m,测得电阻率为 $0.1 \Omega \cdot m$,高阻脆性矿物分布广泛,发育有黏土纹层、有机质纹层等。将表 1 的矿物组分含量和图 9 的页岩薄片进行对比分析,发现薄片含有大量伊利石和长石并含有部分黄铁矿,页岩发育有黏土纹层、有机质纹层等,纹层厚度 0.1~1 mm,不同纹层之间呈现互层发育。结合李婷婷等^[31]的研究成果可知:碳酸盐纹层以白云石为主,硅质纹层以长石为主,黏土纹层中黏土含量最高,并被有机质充填。从扫描电镜图片(图 10)可以看出黏土纹层发育层间孔,这些孔隙多为有机质充填,这为黏土纹层的导电提供了基础。经检测,该岩

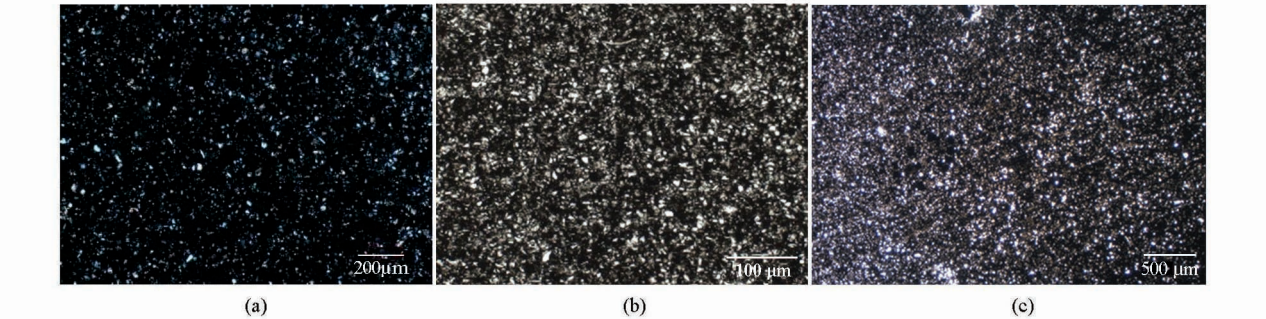


a—龙马溪组灰黑色含硅质泥岩,采样深度为 3 084.09 m,测得电阻率为 $0.1 \Omega \cdot \text{m}$,发亮的黏土矿物(沸石)含量较高,呈顺层节理,有机质纹层也较为明显;b—龙马溪组黑色页岩,采样深度为 3 931.72 m,测得电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$,由于有机质及黏土矿物分布较混乱,纹层断续分布;c—龙马溪组黑色页岩,采样深度为 4 039.3 m,测得电阻率为 $15.42 \Omega \cdot \text{m}$,有机质含量较低,纹层零散分布

a—a gray-black siliceous mudstone of the Longmaxi Formation with a sampling depth of 3 084.09 m, a resistivity of $0.1 \Omega \cdot \text{m}$, a high content of bright clay minerals (zeolite), bedding joints, and obvious organic lamination; b—black shale of Longmaxi Formation with a sampling depth of 3 931.72 m and a measured resistivity of $10 \Omega \cdot \text{m}$. Due to the disordered distribution of organic matter and clay minerals, the lamina is discontinuous; c—black shale of Longmaxi Formation with sampling depth of 4 039.3 m, measured resistivity of $15.42 \Omega \cdot \text{m}$, low organic matter content and scattered laminae

图 7 荧光显微镜下有机质纹层分布特征

Fig.7 Distribution characteristics of organic lamination under fluorescence microscope



a—龙马溪组灰黑色含硅质泥岩,采样深度 3 084.09 m,电阻率为 $0.1 \Omega \cdot \text{m}$,多个纹层相互堆叠,形成界面不明显的富有机质层;b—龙马溪组黑色页岩,采样深度 3 931.72 m,电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$,部分纹层有机质呈块状分布,多个纹层相互堆叠,形成界面不明显的含有机质层;c—龙马溪组黑色页岩,采样深度 4 039.3 m,电阻率为 $15.42 \Omega \cdot \text{m}$,富有机质纹层和含有机质纹层相互堆叠,形成递变层

a—a gray-black siliceous mudstone of the Longmaxi Formation with a sampling depth of 3 084.09 m and a measured resistivity of $0.1 \Omega \cdot \text{m}$. Multiple laminae stack each other to form an organic-rich layer with no obvious interface; b—black shale of Longmaxi Formation with a sampling depth of 3 931.72 m and a measured resistivity of $10 \Omega \cdot \text{m}$. Some laminar organic matter is distributed in blocks, and multiple laminates stack each other to form organic matter bearing layers with no obvious interface; c—black shale of Longmaxi Formation with a sampling depth of 4 039.3 m and a measured resistivity of $15.42 \Omega \cdot \text{m}$. The organic-rich laminae and organic-containing laminae stack each other to form graded layers

图 8 偏光显微镜下有机质纹层特征

Fig.8 Characteristics of organic lamination under polarizing microscope

表 1 页岩薄片矿物组成

Table 1 Mineral composition of shale thin sections

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
石英	48.72	蒙脱石	0.43
伊利石	13.80	金红石	0.37
钠长石	8.56	磷灰石	0.29
方解石	8.41	石膏/硬石膏	0.10
钾长石	3.68	中长石	0.02
黄铁矿	3.62	锆石	0.01
白云石	3.48	高岭石	0.01
绿泥石	3.19	闪锌矿	0.01
黑云母	2.66	角闪石	0.01
白云母	1.98	海绿石	0.01
奥长石	0.63	钠云母	0.01

心镜质体反射率 $R_0 = 2.78\%$,有机质成熟度较高,表明有机质已经部分石墨化。综上所述,薄片以硅质纹层和黏土纹层为主,并伴有有机质纹层,这些纹层构成了导电网络。经过岩样电阻率实验可得,岩样电阻率为 $0.1 \Omega \cdot \text{m}$,与其余岩心相比为低阻。

3.2 有机质导电能力

通过分割来自页岩的 SEM 图像,结合数值模拟来各自独立地对其游离扩散方式和有机质的层间空间展布进行研究。这些分割图像包括非导电颗粒,导电盐水和有机质。有机质的电阻率随着成熟度的变化有一个比较宽的波动变化范围,在 $10^7 \sim 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ (即从不导电到高导电)来定量研究有机质导

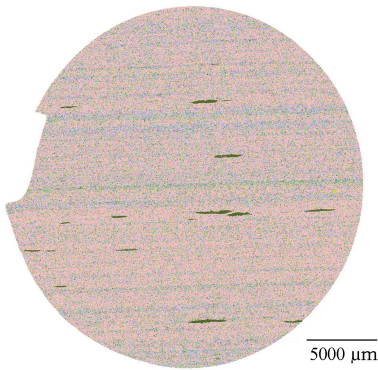


图 9 QEMSCAN 页岩薄片
Fig.9 QEMSCAN Shale Sections

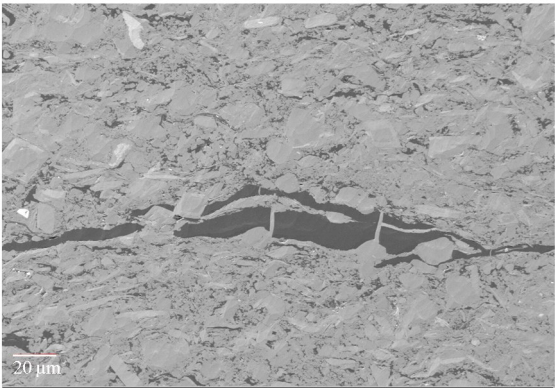


图 10 被有机质充填的黏土纹层
Fig.10 Clay laminae filled with organic matter

电性在岩石电阻系数方面的影响。

假设孔隙空间完全饱和盐水,且有机质孔隙度被认为是零^[24],图 11 显示了分散状和层状有机质电阻率的敏感性。这些结果表明,对于有机质电阻率较高(高于 $100\ \Omega\cdot\text{m}$)的地层,即低成熟度地层,岩石的电阻率不受有机质存在的影响。然而,随着有机质连通网络在岩石中的增加(即有机质由分散状转变为层状),这个上限将增加到 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右。与分散的有机质的电阻率相比,有机质分层的地层电阻率有更大的降幅。这种急剧减少的情况是由于有机质的分层分布使有机质连通网络得以连接得更好。

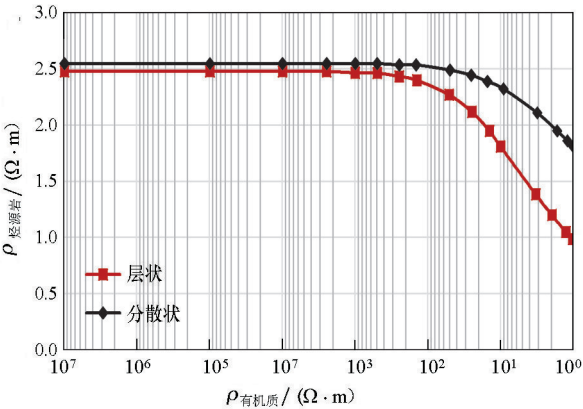


图 11 富含有机物的烃源岩电阻率和有机质电阻率的关系曲线
Fig.11 Relation between the resistivity of source rocks rich in organic matter and the resistivity of organic matter

通过以上研究发现,在有机质导电的前提下(即有机质已经出现石墨化现象),层状分布有机质比分散状有机质更容易导电,并且随着有机质导电性增强,这种现象越加明显。这种现象在地层中的

具体表现就是有机质在地层中的分布形式。有机质纹层主要有 3 种分布形式:连续分布(图 7a)、断续分布(图 7b)和零散分布(图 7c)。连续分布的有机质纹层整个有机质都在地层中呈层状分布,部分纹层与黏土纹层平行状分布,或者充填在黏土纹层之中,此时纹层形成的导电网络最好,对地层电阻率的影响最大;断续分布的有机质纹层在地层中呈间断的层状分布,有机质网络的连通性较连续分布有机质纹层差,对地层电阻率的影响也较连续分布纹层弱;零散分布的有机质纹层在地层中呈分散状分布,有机质之间被不导电的骨架矿物间隔,无法形成导电网络,对地层电阻率的影响最小。

4 页岩气储层低阻成因实例分析

本文针对川南扬子地区下古生界的龙马溪组出现的低阻现象探讨分析。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。

图 12 是 A 井龙马溪组—五峰组的测井解释成果。经测井资料分析处理发现,在龙一段(3 020.2~3 062 m)和五峰组(3 062~3 102.74 m)出现异常低阻现象,平均电阻率仅为 $0.1\ \Omega\cdot\text{m}$ 。利用 X 衍射全岩分析技术对目的层段的 46 块岩心计算分析,结果如表 2 所示。常规测井曲线显示,龙马溪—五峰组 2 678~3 102.74 m 地层自上而下,岩性由泥岩、粉砂质泥岩等向含碳泥岩变化,地层电阻率数值呈下降趋势,自 $22\ \Omega\cdot\text{m}$ 最低降至 $0.1\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,与此相对应的是自然伽马数值升高,无铀伽马数值降低,地层中铀系元素含量增加;密度、中子曲线数值也呈现

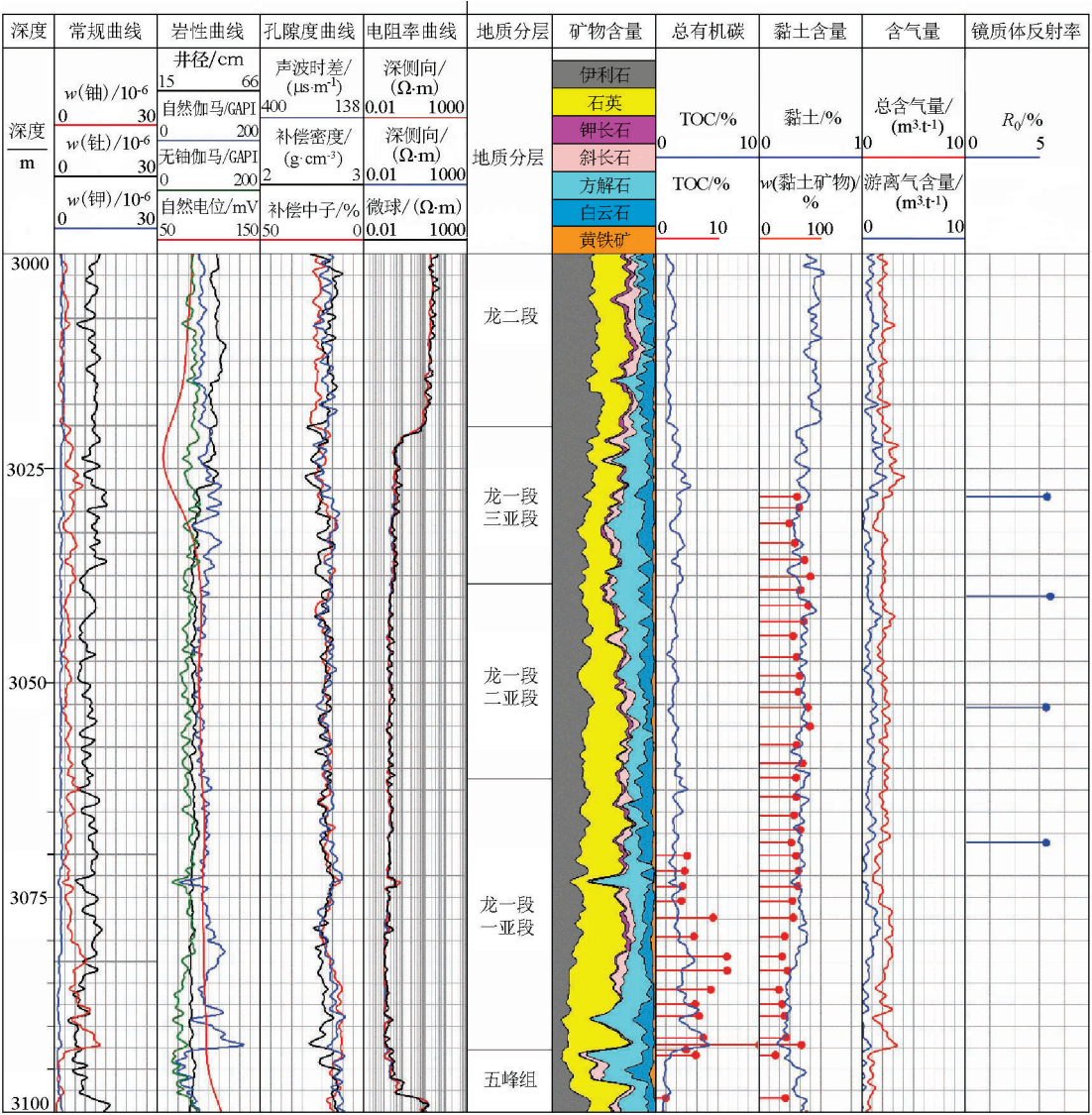


图 12 A 井测井解释成果
Fig.12 Logging interpretation results of Well A

表 2 岩心矿物分析结果
Table 2 Core mineral analysis

矿物类型	体积分数/%	平均值/%
硅质矿物	16.9~62.2	34.83
黏土矿物	12.7~69.5	33.75
碳酸盐矿物	0~70.4	27.15

数值降低趋势,反映地层有机碳含量、脆性矿物含量呈增加趋势。本段地层是本井页岩气储层的相对发育层段。

在 3 084.09 m 处所取岩心为灰黑色碳质泥岩,经 X 全岩衍射分析,大部分都为高阻的脆性矿物,黏土矿物含量较低,难以在电阻率曲线上表现出大段的低阻特征;导电性极强的黄铁矿在全岩中含量较少(体积分数低于 7%),且在全岩中零星分布,构不成导电网络,其所增加的导电性也可以忽略不计。

地层中的地层水也是重要的导电介质,但是在各个深度上地层水矿化度变化不大,不可能使上下层段电阻率值出现显著差异;在岩石物理实验中发现干岩样也存在极低阻现象。通过分析发现,该层段岩心有有机质含量丰富,并且有机质成熟度较高 ($3.0\% < R_0 \leq 3.5\%$),为部分石墨化海相页岩;其荧光照片(图 7a)显示此处为连续分布有机质纹层,过成熟有机质和黏土层状分布,构成了导电网络。因此,推断此层段发育的有机质纹层和有机质部分石墨化造成了极低阻电阻率现象的出现。

5 结论

通过对龙马溪组低阻页岩气储层的地质资料及测井资料分析,并结合荧光照片等实验数据得出以

下成果:①黏土矿物对页岩储层电阻率的影响主要为黏土矿物的附加导电性和黏土矿物导致束缚水饱和度增高引起的电阻率降低;②随着有机质热演化程度增高,有机质逐渐石墨化、芳香度增加以及小于 2 nm 的微孔更发育,岩石中的介孔及大孔数量减少,导致储层电阻率降低;③通过制作薄片或粉末,在偏光显微镜、荧光显微镜、扫描电镜以及 X 衍射全岩分析下对岩心样品进行有机质分布实验研究,页岩发育有机质纹层和黏土纹层,并且黏土纹层常被有机质充填或者和有机质纹层平行分布;④通过提取有机质进行电阻率测量研究,结合储层的岩性特征、常规物性特征、孔隙的储集空间特征以及有机质分布形式,发现当有机质成层分布时会显著降低页岩的电阻率。

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,深入认识页岩储层低阻成因机理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,进而正确认识含气性。

参考文献 (References):

[1] 于庆洲.低阻油层的主要成因机理研究[D].北京:中国地质大学(北京),2005.
Yu Q Z. Mechanism study on the main causes of forming low resistivity pay [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2005.

[2] 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 J M. Coalbed methane and shale gas evaluation based on new seven related [J]. Well Logging Technology, 2013, 37(5): 457-465.

[3] 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 J Y, Sun J M. Log evaluation on shale hydrocarbon reservoir [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(2): 146-153.

[4] 张作清,郑炆,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 Z Q, Zheng Y, Sun J M. “Six parameter relationship” study of shale gas reservoir [J]. Well Testing, 2013, 22(1): 65-70.

[5] 孙建孟,陈钢花,杨玉征,等.低阻油气层评价方法[J].石油学报,1998(3):83-88.
Sun J M, Chen G H, Yang Y Z, et al. Low contrast resistivity reservoir evaluation method [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998(3): 83-88.

[6] 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 J M, Xiong Z, Luo H, 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.

[7] 谢小国,罗兵,尹亮先,等.低阻页岩气储层影响因素分析[J].四川地质学报,2017,37(3):433-437.
Xie X G, Luo B, Yin L X, et al. Influence Factors of Low Resistivity Shale Gas Reservoir [J]. Acta Geologica Sichuan, 2017, 37(3): 433-437.

[8] 杨小兵,杨争发,谢冰,等.页岩气储层测井解释评价技术[J].天然气工业,2012,32(9):33-36,128-129.
Yang X B, Yang Z F, Xie B, et al. Logging interpretation and evaluation technology of shale gas reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 33-36,128-129.

[9] 徐锦绣,吕洪志,刘欢,等.渤海 LD 油田低阻油层成因机理与评价方法[J].中国海上油气,2018,30(3):47-55.
Xu J X, Lyu H Z, Liu H, et al. Genesis mechanism and evaluation methods for low-resistivity oil layers in the Bohai LD oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(3): 47-55.

[10] 赵文龙.川南地区志留系龙马溪组页岩储层电性研究[D].成都:成都理工大学,2015.
Zhao W L. Reservoir of electricity of Silurian Longmaxi shale in South Sichuan area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.

[11] 王长江.延长地区陆相页岩气储层低阻成因机理研究[C]//西安石油大学、陕西省石油学会.2019 油气田勘探与开发国际会议论文集.2019:642-643.
Wang C J. Study on the formation mechanism of low resistivity of continental shale gas reservoir in Yanchang area [C]. Xi'an Shiyou University, Shaanxi Petroleum Society. 2019 International Conference on Oil and Gas Exploration and Development. 2019: 642-643.

[12] 杨凯.四川盆地海陆相页岩岩相特征及电学特征差异性研究[D].成都:成都理工大学,2018.
Yang K. Study on the difference of lithofacies and electrical characteristics of Marine and terrestrial shale in Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.

[13] 杨娇,陆嫫,刘伟新,等.珠江口盆地 W 油田低阻油层特殊成因机理[J].中国海上油气,2014,26(4):41-45.
Yang J, Liu Y, Liu W X, et al. Special origins of low-resistivity oil layers in W oilfield, Pearl River Mouth basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(4): 41-45.

[14] 王维斌,郭杜凯,陈旭峰,等.鄂尔多斯盆地吴起地区延长组长 6₁ 低阻油层成因分析及识别方法[J].油气地质与采收率,2017,24(2):38-45,89.
Wang W B, Guo D K, Chen X F, et al. Genesis analysis and identification methods of Chang 6₁ low resistivity oil pays in Yanchang Formation in Wuqi area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(2): 38-45,89.

[15] 王友净,宋新民,何鲁平,等.高尚堡深层低阻油层的地质成因[J].石油学报,2010,31(3):426-431.
Wang Y J, Song X M, He L P, et al. Geologic origin of low-resistivity layers in deep reservoir of Gaoshangpu Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 426-431.

[16] 罗水亮,许群辉,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 S L, Xu H Q, Liu H, et al. Genetic mechanism and logging evaluation of low-resistivity gas reservoirs in the Tainan Gas Field, eastern Qaidam Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(7): 41–45.
- [17] 于红岩,李洪奇,郭兵,等.基于成因机理的低阻油层精细评价方法[J].*吉林大学学报:地球科学版*,2012,42(2):335–343.
- Yu H Y, Li H Q, Guo B, et al. Low-Resistivity oil layers fine evaluation approaches based on mechanism [J]. *Journal of Jilin University:Earth Science Edition*, 2012, 42(2): 335–343.
- [18] 郑华,李云鹏,徐锦绣,等.渤海海域低阻油层地质成因机理与识别——以辽东湾旅大 A 油田为例[J].*断块油气田*,2018,25(1):22–28.
- Zheng H, Li Y P, Xu J X, et al. Geological genetic mechanism and identification of low resistivity reservoir in Bohai sea area: a case study of LD—A Oilfield in Liaodong Bay [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2018, 25(1): 22–28.
- [19] 林国松,康凯,郭富欣,等.渤海海域蓬莱油田低阻油层成因模式研究[J].*特种油气藏*,2019,26(3):68–73.
- Lin G S, Kang K, Guo F X, et al. Low-resistivity reservoir genesis patterns of Penglai oilfield in Bohai Sea [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(3): 68–73.
- [20] 罗兴平,苏东旭,王振林,等.核磁共振测井在低阻油层评价中的应用——以准噶尔盆地阜东斜坡头屯河组为例[J].*新疆石油地质*,2017,38(4):470–476.
- Luo X P, Su D X, Wang Z L, et al. Application of NMR logging in low-resistivity reservoir evaluation: A case study of Toutunhe Formation on the Eastern Fukang Slope, Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2017, 38(4): 470–476.
- [21] 黄涛.页岩岩心复电阻率实验室测试与分析[D].成都:成都理工大学,2016.
- Huang T. Complex resistivity of shale core laboratory testing and analysis [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [22] 王香增.陆相页岩气[M].北京:石油工业出版社,2014.
- Wang X Z. Continental shale gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.
- [23] 刘天琳,姜振学,张昆,等.识别海相页岩石墨化程度的方法和装置[P].CN107064230A,2017-08-18.
- Liu T L, Jiang Z X, Zhang K, et al. Method and apparatus for identifying graphitization degree of Marine shale [P]. CN107064230A, 2017-08-18.
- [24] Kethireddy N, Heidari Z, Chen H. Quantifying the Effect of Kerogen on Electrical Resistivity Measurements in Organic-Rich Source Rocks [C]//SPWLA 54th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2013.
- [25] 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 J K, He S, Yan X L, 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.
- [26] 李楚雄,肖七林,陈奇,等.页岩纳米级孔隙在有机质熟化过程中的演化特征及影响因素[J].*石油实验地质*,2019,41(6):901–909.
- Li C X, Xiao Q L, Chen Q, et al. Evolution characteristics and controls of shale nanopores during thermal maturation of organic matter [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(6): 901–909.
- [27] 邵龙义,刘磊,文怀军,等.柴北缘盆地 YQ-1 井中侏罗统石门沟组泥页岩纳米孔隙特征及影响因素[J].*地学前缘*,2016,23(1):164–173.
- Shao L Y, Liu L, Wen H J, et al. Characteristics and influencing factors of nanopores in the Middle Jurassic Shimengou Shale in Well YQ-1 of the Northern Qaidam Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016,23(1): 164–173.
- [28] 霍培丽,张登峰,王倩倩,等.页岩吸附性能及作用规律[J].*化工进展*,2016,35(1):74–82.
- Huo P L, Zhang D F, Wang Q Q, et al. Perspective of adsorption performance of shale [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(1): 74–82.
- [29] Yang A, Firdaus G, Heidari Z. Electrical resistivity and chemical properties of kerogen isolated from organic-rich mudrocks [J]. *Geophysics*, 2016, 81(6): D643–D655.
- [30] 李凯,游海涛,刘兴起.中国湖泊沉积物纹层年代学研究进展[J].*湖泊科学*,2017,29(2):266–275.
- Li K, You H T, Liu X Q. Review on lake sediment varve chronology in China [J]. *Lake Science*, 2017, 29(2): 266–275.
- [31] 李婷婷,朱如凯,白斌,等.酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相细粒沉积岩纹层特征及研究意义[J].*中国石油勘探*,2015,20(1):38–47.
- Li T T, Zhu R K, Bai B, et al. Characteristics and Research Significance of Fine Lacustrine Sedimentary Rock Laminations of Xiaogou Formation in Qingxi Depression of Jiuquan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(1): 38–47.
- [32] 施振生,邱振,董大忠,等.四川盆地巫溪 2 井龙马溪组含气页岩细粒沉积纹层特征[J].*石油勘探与开发*,2018,45(2):339–348.
- Shi Z S, Qiu Z, Dong D Z, et al. Laminae characteristics of gas-bearing shale fine-grained sediment of the Silurian Longmaxi Formation of Well Wuxi 2 in Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 339–348.

Major controlling factors of low-resistance shale gas reservoirs

CUI Rui-Kang¹, SUN Jian-Meng¹, LIU Xing-Jun², WEN Xiao-Feng²

(1. China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Changqing Branch, China National Logging Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: The Longmaxi Formation is one of the major exploration horizons of shale in China at present. The gas-bearing sediments in the Lower Paleozoic Longmaxi Formation in the Yangtze area, South Sichuan are characterized by low resistivity. Therefore, it is difficult to distinguish the gas-bearing sediments from aquifers only using logging response. Given this, this study investigated the genetic mechanisms of low-resistivity gas-bearing sediments in the study area in depth using existing data of conventional logging, core drilling, and production-related dynamic conditions, as well as a large number of core analyses and experiments, including casting thin sections, QEMSCAN, and X whole-rock diffraction. According to the study results, three major controlling factors in the low-resistivity gas-bearing sediments of the Lower Paleozoic Longmaxi Formation in the Yangtze region, South Sichuan include the additional conductivity of clay minerals, the complete graphitization of over-mature organic matter, and the distribution pattern of organic matter laminae. The practical application results indicate that the low-resistivity gas-bearing sediments in the study area were formed due to the organic matter laminae developing and the partial graphitization of organic matter. That is, the low resistivity of the shale gas reservoirs tends to be caused by the mutual superimposition and effects of multiple factors. Therefore, it is necessary to analyze the geological, logging, and core data according to various zones and horizons and employ the correlation between upper and lower horizons and between adjacent wells to determine the major controlling factors of the low resistivity of the shale gas reservoirs.

Key words: shale gas; low-resistivity formation; logging evaluation; influencing factors

(本文编辑:沈效群)