

引用格式:何贵松.川东南地区海相页岩低电阻率特征与成因[J].油气地质与采收率,2023,30(4):66-76.

HE Guisong.Characteristics and origins of low resistivity of marine shales in Southeast Sichuan area[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2023,30(4):66-76.

## 川东南地区海相页岩低电阻率特征与成因

何贵松

(中国石化华东油气分公司 勘探开发研究院,江苏 南京 210019)

**摘要:**在海相页岩气勘探过程中发现页岩含气性与视电阻率具有相关性,且低电阻率页岩段普遍表现较差的含气性。为揭示海相页岩低电阻率成因,基于川东南地区及邻区重点井的钻井、测井、测试等资料,进行激光拉曼、烘干岩心电阻率测定、扫描电镜荷电效应观察、包裹体、有机地球化学等实验分析,从有机质炭化和保存条件2个方面对页岩储层低电阻率成因进行了探讨,并对影响范围进行了预测。结果表明:低电阻率页岩在电性、物性、含气性等方面具有3个典型特征。在优质页岩段电阻率突变或渐变,孔径小且以孔隙度较低,含气性差且多为干井。对于镜质组反射率( $R_o$ )超过3.5%的页岩,有机质强炭化是导致低-极低电阻率的主要因素。对于 $R_o$ 小于3.5%的页岩,保存条件变差是形成低-极低电阻率的主要因素,弱炭化对低电阻率也有重要影响。在弱炭化阶段,随着保存条件遭受破坏,页岩含水率和含水饱和度增高,在压实作用下,孔隙和裂隙坍塌闭合,基质颗粒呈镶嵌式接触,导电性增强,电阻率显著降低,且有机质丰度越高,电阻率越低。有机质强炭化的影响范围具有区域性,保存条件变差的影响范围相对较小。

**关键词:**页岩气;低电阻率;保存条件;有机质炭化;地层流体;川东南地区

文章编号:1009-9603(2023)04-0066-11

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202211018

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## Characteristics and origins of low resistivity of marine shales in Southeast Sichuan area

HE Guisong

(Research Institute of Exploration and Development, East China Branch of SINOPEC,  
Nanjing City, Jiangsu Province, 210019, China)

**Abstract:** In the process of marine shale gas exploration, it is found that the gas contents of shales are related to the apparent resistivity, and the shale section with low resistivity generally shows poor gas content. In order to reveal the origins of the low resistivity of marine shales, the laser Raman, resistivity measurement by dried cores, charging effect observation by scanning electron microscopy (SEM), inclusion analysis, and organic geochemistry experimental analysis were carried out based on the well drilling, logging, and testing data from key wells in Southeast Sichuan area and its adjacent areas. In terms of organic matter carbonization and preservation conditions, the origins of the low resistivity of the shale reservoir were discussed in this paper, and the influence ranges were predicted. The results show that shales with low resistivity have three typical characteristics in terms of electrical, physical and gas-bearing properties. In high-quality shale sections, the shales have the resistivity with sudden or gradational changes, small pore diameters, low porosity and poor gas-bearing properties, and most wells are dry. For shales with a vitrinite reflectance ( $R_o$ ) of over 3.5%, strong carbonization of organic matter is the main factor leading to low and extremely low resistivity. For shales with a  $R_o$  of less than 3.5%, the poor preservation condition is the main factor for the formation of low and extremely low resistivity, and weak carbonization has an important effect on the low resistivity. In the weak carbonization stage, the water content and water saturation of shales increase as the preservation conditions are damaged. Under the action of compaction, the pores and fractures col-

收稿日期:2022-11-20。

作者简介:何贵松(1988—),男,四川安岳人,副研究员,从事中国南方页岩气富集规律与勘探评价研究。E-mail:heguisong001@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061),中国石化科技部项目“南川—武隆地区常压页岩气富集高产机理与目标评价”(P21087-6)和“华东探区天然气富集规律与目标评价”(P20059-6),能源行业页岩气标准化技术委员会标准研究项目“页岩气勘探工作规范研究”(页研2022030050)和“页岩气井位部署方法标准研究”(页研2022040051)。

lapse and close, and the matrix particles contact in inlay mode. So the electrical conductivity is enhanced, and the resistivity decreases significantly. As the abundance of organic matter gets higher, the resistivity becomes lower. The influence ranges of strong carbonization of organic matter are regional, and those of poor preservation conditions are relatively small.

**Key words:** shale gas; low resistivity; preservation condition; organic matter carbonization; formation fluid; Southeast Sichuan area

近年来,随着四川盆地及周缘页岩气勘探开发步伐的加快<sup>[1-5]</sup>,在发现大型页岩气产区的同时,钻遇异常低电阻率页岩(优质页岩段电阻率低于 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ )的井也呈现增多趋势<sup>[6-10]</sup>。据不完全统计,下寒武统牛蹄塘组异常低电阻率井主要分布在川南—黔中—黔东南地区和黔东北—湘鄂西地区,上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组异常低电阻率井主要分布在川西南—川南、川东南—川东北地区,这类钻井普遍含气性较差,以干井为主,压裂试气产量低或者不产气,揭示出异常低电阻率页岩分布区为高风险勘探区<sup>[7-12]</sup>。因此,页岩电阻率异常低的成因成为行业研究的热点,低电阻率页岩的分布预测则成为规避勘探风险的重要依据。

国内学者对海相页岩低电阻率成因开展了大量有益探索<sup>[7-19]</sup>。王玉满等认为优质页岩段因有机质炭化普遍出现低-超低电阻率响应,高一过成熟海相页岩电阻率曲线中的“细脖子型”特征是反映其有机质出现炭化物性变差的直接有效证据<sup>[7-10]</sup>。王滢等认为长宁地区龙马溪组页岩储层低电阻率成因与断层形成的期次有关,断层附近的页岩储层含水饱和度增高引起电阻率的降低<sup>[14]</sup>。侯宇光等认为有机质丰度和成熟度是影响极低电阻率测井的主要因素,极低电阻率测井响应预示着页岩储层品质极可能遭受了巨大的损害<sup>[6]</sup>。高和群等认为微观孔隙结构是决定页岩电阻率的主要因素,超微裂缝越发育,电阻率越高<sup>[15]</sup>。可见,低电阻率成因复杂,行业内尚未形成共识,但低电阻率页岩已对页岩气勘探开发实践造成了困扰。

基于前人研究基础上,利用四川盆地东南部(以下简称川东南地区)及邻区重点井的钻井、测井、测试等资料,结合激光拉曼、岩心烘干电阻率测定、扫描电镜荷电效应观察、包裹体分析、有机地球化学等实验分析,重点从有机质炭化和保存条件2个方面,对页岩储层低电阻率成因进行了分析,并对影响范围进行预测,以期进一步明确低电阻率成因,为页岩气勘探开发提供参考。

## 1 低电阻率页岩特征

### 1.1 低电阻率页岩气井分布特征

研究区处于川、渝、黔三省交汇区域,构造上位

于四川盆地东南部、武陵褶皱带和黔西北宽缓褶皱带的北部(图1),经历加里东期以来多期构造运动改造,以燕山期雪峰造山运动对该区影响最为显著,奠定了现今东西分带构造格局,东部背斜宽缓、向斜紧闭,为典型的隔挡式构造带,西部向斜和背斜相间分布,为槽挡过渡带,总体上构造变形强烈,地层剥蚀严重,由东向西具有递进变形特征,页岩赋存状态逐步变好。

该区主要发育上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组和下寒武统牛蹄塘组2套海相页岩气勘探开发层系(图1),2套层系均在不同地区钻遇了异常低电阻率页岩。其中,五峰组—龙马溪组钻遇异常低电阻率页岩的井主要分布在川南美姑—长宁西、古蔺—赤水—江津以及川东南石柱—万县等地区,包括N218,N230,B1,RY1,HY1,YZ1,TY1,LY1,LY4等30余口井(图2),优质页岩段电阻率一般为 $2\sim 10\ \Omega\cdot\text{m}$ ,部分井电阻率极低(小于 $2\ \Omega\cdot\text{m}$ );牛蹄塘组钻遇异常低电阻率页岩的井主要分布在黔中—黔南—黔北、渝东—湘鄂西等地区,包括FS1,LY1,BY2,SY1,CS1,EY1等20余口井,优质页岩段电阻率一般小于 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ ,部分井电阻率小于 $1\ \Omega\cdot\text{m}$ (图2)。

据不完全统计,异常低电阻率井含气性普遍较差,大多数井未测试,开展过水平井压裂的井测试日产气量一般为 $0\sim 1.1\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ ,获得工业气流的井电阻率最低为 $7.2\ \Omega\cdot\text{m}$ ,测试日产气量为 $8\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

### 1.2 电性特征

海相低电阻率页岩在电性上表现出2类典型特征。一类为深侧向电阻率在优质页岩段突变,曲线呈“细脖子型”特征<sup>[6-10]</sup>。以彭水地区CS1井为例,该井下寒武统水井沱组地层总厚度为210 m,根据岩性和电性特征,自下而上可划分为3段:水一段厚度为33 m,岩性为黑色页岩,总有机碳含量(TOC)相对较低,平均为1.68%,电性上为低自然伽马、低电阻率特征,自然伽马平均为96.9 API,电阻率平均为 $4.58\ \Omega\cdot\text{m}$ ;水二段为优质页岩段,厚度为59 m,岩性为黑色页岩,TOC较高,平均为4.6%,电性上为极高自然伽马、极低电阻率特征,电阻率突变为 $1\ \Omega\cdot\text{m}$ 以下,曲线呈“细脖子型”(图3),自然伽马平均为469.3 API,电阻率平均为 $0.3\ \Omega\cdot\text{m}$ ;水三段厚度为118 m,岩性为黑色含灰页岩,TOC较低,平均为1.24%,电性上为高自然伽马、低电阻率特征,自然伽

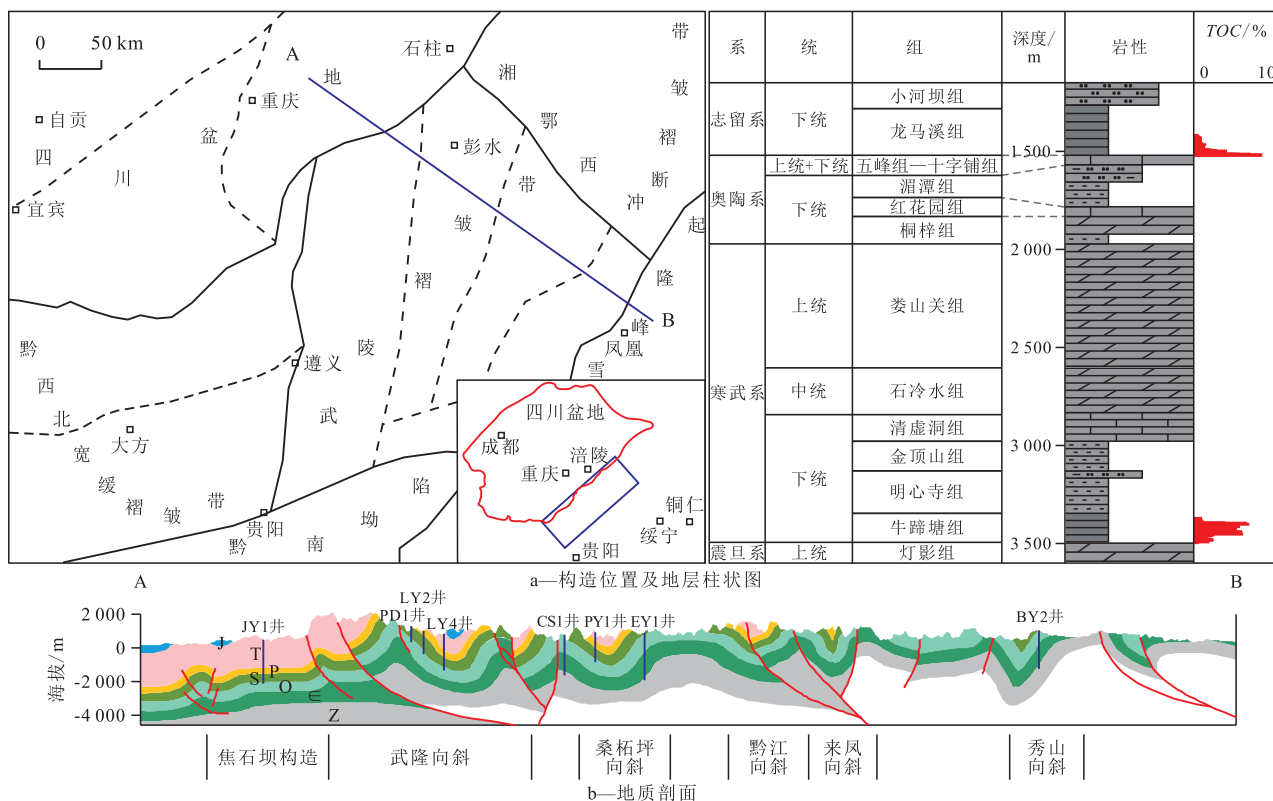


图1 川东南地区构造位置、地层柱状图及地质剖面  
Fig.1 Structure location, stratigraphic histogram and geological section of Southeast Sichuan area

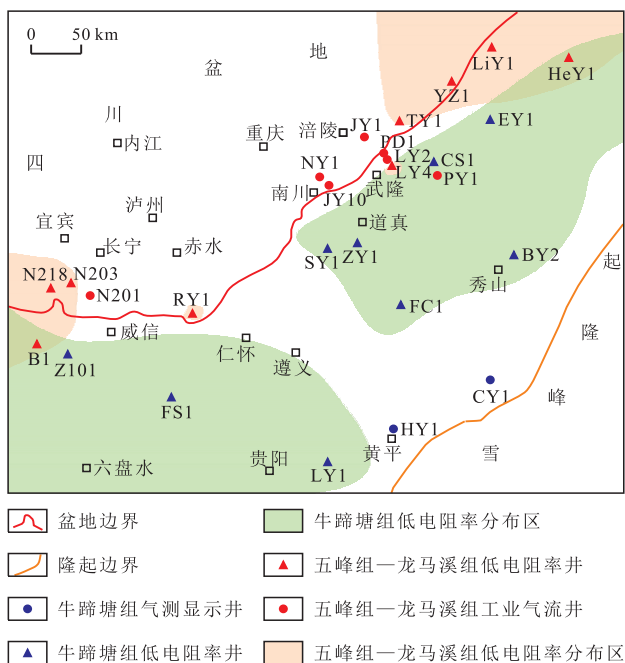


图2 川东南地区及邻区海相页岩低电阻率井分布

Fig.2 Distribution of wells with low resistivity of marine shales in Southeast Sichuan area and their adjacent areas

马平均为 117.1 API, 电阻率平均为 6.3 Ω·m。另一类为深侧向电阻率在优质页岩段渐变, 曲线呈“漏斗型”特征。以古蔺地区 RY1 井为例, 该井上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组一段(龙一段)厚度为 83.5 m, 上部⑥—⑨小层 TOC 较低, 平均为 1.17%, 电性

上为高自然伽马、高电阻率特征, 自然伽马平均为 157.7 API, 电阻率平均为 51.2 Ω·m; 下部①—⑤小层 TOC 较高, 平均为 3.6%, 电性上为高自然伽马、低电阻率特征, 由浅到深, 电阻率由正常电阻率渐变为低电阻率, 曲线呈“漏斗型”特征(图 3), 且 TOC 越高, 电阻率越低, 自然伽马平均为 193.3 API, 电阻率为 1.8 ~ 14.3 Ω·m, 平均为 5.8 Ω·m。

### 1.3 物性特征

低电阻率页岩储层物性一般较差, 呈孔径小、岩石密度大、孔隙度较低的特征<sup>[7-12]</sup>。以 RY1 井为例, 该井优质页岩以 2 ~ 10 nm 的介孔、小于 2 nm 的微孔为主, 其中介孔占比为 41.6%, 微孔占比达 36.4%, 孔径大于 10 nm 的占比为 22.4%, 孔径远小于获得工业气流的 JY10 井<sup>[20]</sup>(表 1)。同时, RY1 井页岩真密度为 2.75 g/cm<sup>3</sup>, 块密度为 2.64 g/cm<sup>3</sup>, 比 JY10 井相同层位的分别高 0.04 和 0.06 g/cm<sup>3</sup>; 脉冲法孔隙度为 0.15% ~ 2.2%, 平均为 0.73%, 仅为 JY10 井的 22.2%。

### 1.4 含气性特征

低电阻率页岩储层含气性一般较差<sup>[6-18]</sup>, 表现出气测显示较差, 含气量低, 吸附能力弱, 产量低的特征。以 RY1 井为例, 该井在五峰组—龙一段气测显示较差, 全烃含量最高为 0.7%, C<sub>1</sub> 含量最高为 0.6%, 槽面无气泡; 岩心浸水实验取心段仅见 1 处针眼状气泡; 现场解吸气含量平均为 0.06 m<sup>3</sup>/t, 损失气含量

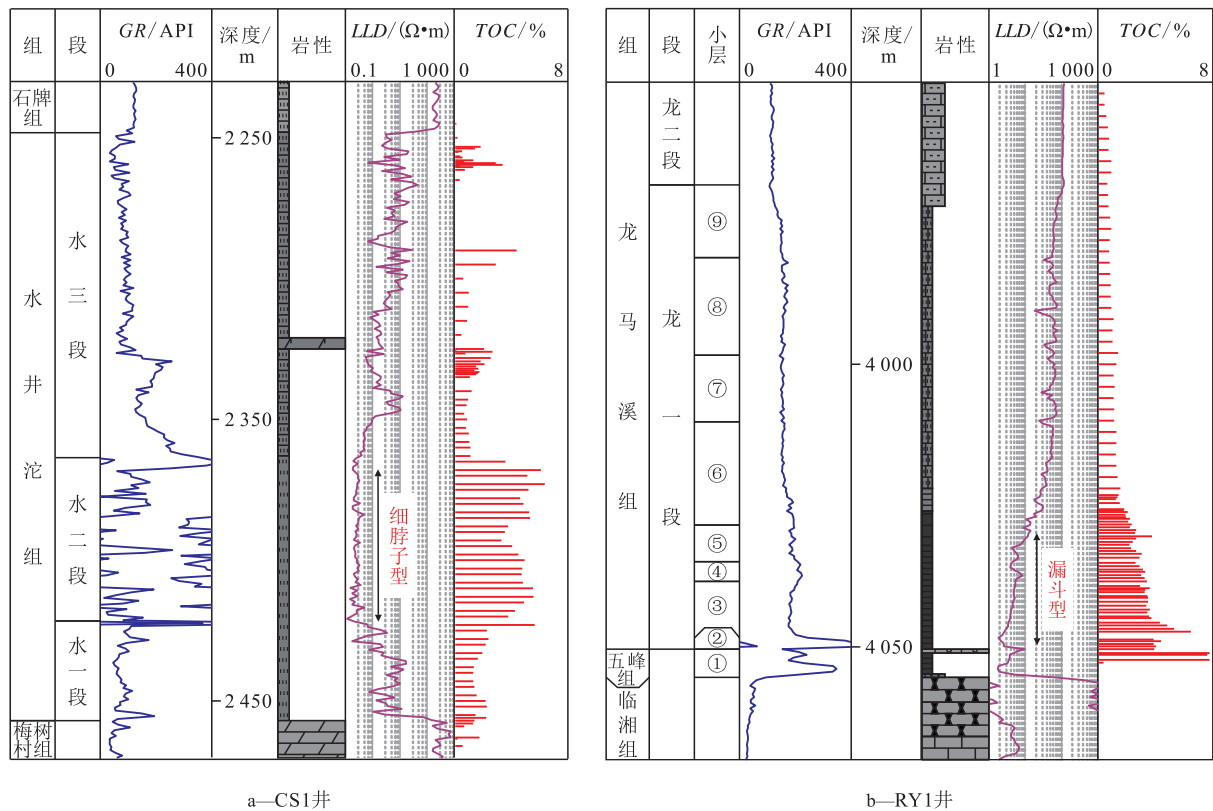


图3 川东南地区典型低电阻率井综合柱状图

Fig.3 Bar chart of typical wells with low resistivity in Southeast Sichuan area

表1 RY1井与JY10井页岩储层各孔径段孔容比  
Table1 Comparison of pore volume ratio of each aperture segment between Well RY1 and Well JY10

井号	各孔径段孔容比 / %				
	<2 nm	2 ~ 10 nm	10 ~ 50 nm	50 ~ 100 nm	>100 nm
RY1	36.4	41.6	19.9	2.0	0.1
JY10	22.1	45.4	30.3	1.9	0.3

平均为0.13 m<sup>3</sup>/t,残余气含量平均为0.32 m<sup>3</sup>/t,总含气量为0.35 ~ 0.79 m<sup>3</sup>/t,平均为0.51 m<sup>3</sup>/t;测井解释优质页岩段总含气量为0.3 ~ 1.4 m<sup>3</sup>/t,平均为0.7 m<sup>3</sup>/t,吸附气占比近100%。等温吸附实验结果表明,优质页岩段吸附气含量为1.96 ~ 2.79 m<sup>3</sup>/t,平均为2.38 m<sup>3</sup>/t。与JY10井相比,RY1井含气性差,含气量降低85.6%,吸附能力降低27.8%,综合评价为干井,未测试。

## 2 有机质炭化对页岩低电阻率的影响

中国学者针对页岩有机质炭化(即石墨化)开展了大量研究<sup>[6-12,16-18]</sup>,认为有机质发生石墨化是一个循序渐进的过程<sup>[6]</sup>,根据炭化程度,可以划分为未炭化、弱炭化(弱石墨化)和强炭化(石墨化)3个阶段。不同阶段的有机质导电性差异较大<sup>[6]</sup>。其中,未炭化阶段页岩中有机质的结构杂乱无序,导电性差;弱

炭化阶段为有机质网络形成阶段,具有一定的导电性;进入强炭化阶段,碳层的有序性和结晶度急剧增强,优质页岩显示出超低电阻响应,不含气或微气等显著特征<sup>[6]</sup>。

### 2.1 有机质强炭化

川东南地区及邻区寒武系牛蹄塘组页岩普遍经历较大的埋深和较长时期的热演化,有机质成熟度较高, $R_o$ 主要为2.5% ~ 4.5%,黔中隆起及周缘超过5.5%。研究区牛蹄塘组页岩气井电阻率与页岩 $R_o$ 具有明显的相关性,川中—川南—川东南地区、黔北—黔东南地区、宜昌地区 $R_o$ 为2.5% ~ 3.5%,优质页岩电阻率正常,为19 ~ 1 084  $\Omega \cdot m$ ;滇北—黔中—黔南地区、鄂西—渝东地区 $R_o$ 为3.5% ~ 5.5%,优质页岩电阻率异常低,为0.05 ~ 4.2  $\Omega \cdot m$ 。川东南地区及邻区牛蹄塘组优质页岩电阻率与页岩 $R_o$ 呈明显负相关(图4), $R_o$ 越高,页岩电阻率越低;当 $R_o$ 大于3.5%时,电阻率低于10  $\Omega \cdot m$ ;  $R_o$ 大于4.0%的页岩电阻率低于2  $\Omega \cdot m$ 。分析认为过高的成熟度将导致有机质碳层的有序性增强,结晶度增高,发生石墨化,导电性增强,形成极低电阻率;同时热成熟度达到3.5%是发生石墨化的关键,这与侯宇光等提出的有机质强炭化(石墨化)的热成熟度门限值为3.5%的观点一致<sup>[6-10]</sup>。

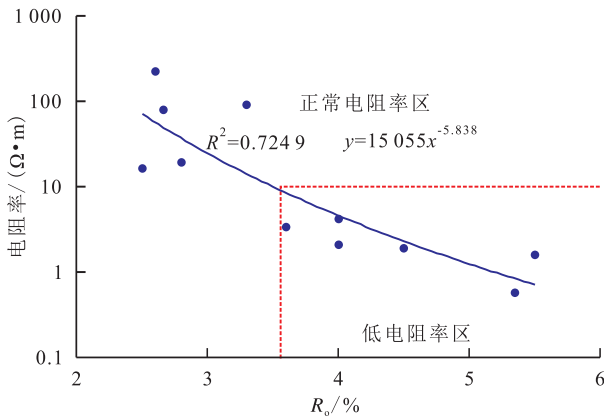


图4 川东南地区及邻区寒武系牛蹄塘组优质页岩段  $R_o$  与电阻率关系

Fig.4 Relationship between  $R_o$  and resistivity of high-quality shale section in Southeast Sichuan area and Cambrian Niutitang Formation in its adjacent areas

### 2.2 有机质弱炭化

古蔺地区RY1井五峰组—龙一段电阻率由上而下逐渐降低,与TOC变化特征呈明显负相关关系(图5),表明有机质是导致电阻率降低的原因之一。

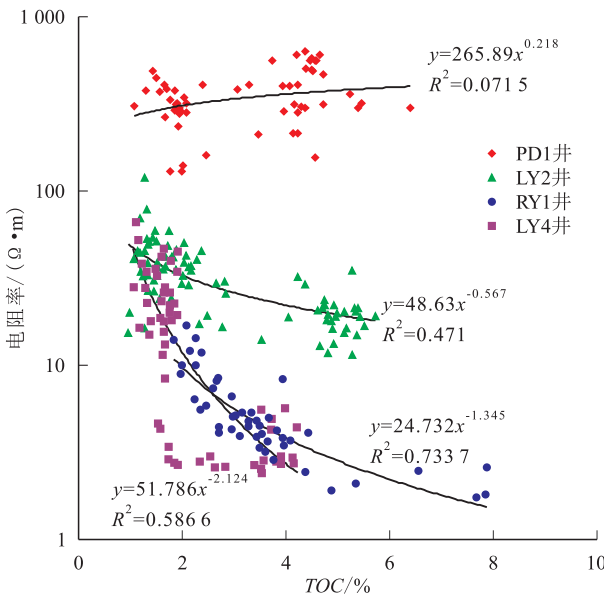


图5 川东南地区典型井五峰组—龙一段 TOC 与电阻率关系

Fig.5 Relationship between TOC and resistivity of typical wells in Wufeng Formation- Long 1 Member of Longmaxi Formation in Southeast Sichuan area

该井从优质页岩段选取了7块样品,分别在华东油气分公司实验中心(简称华东实验中心)和中国石化石油勘探开发研究院无锡实验中心(简称无锡实验中心)开展  $R_o$  测定,两家实验中心测得的  $R_o$  (等效镜质组反射率)结果差别不大(图6),华东实验中心实测  $R_o$  为2.33%~2.88%,平均为2.63%;无锡实验中心实测  $R_o$  为2.45%~2.66%,平均为2.56%。测定结果表明,RY1井五峰组—龙一段页岩处于过成熟早期阶段,未达到有机质强炭化的热成熟度门限值。

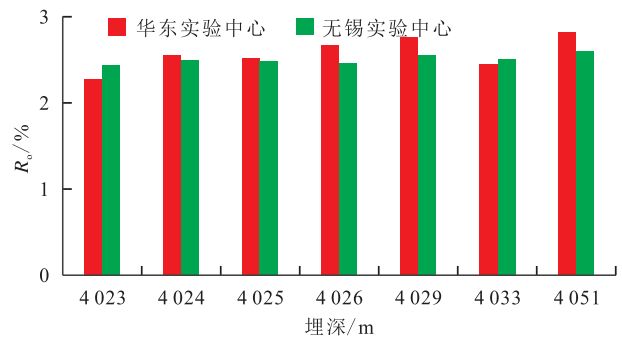


图6 不同实验室古蔺地区RY1井优质页岩  $R_o$  对比

Fig.6 Comparison of  $R_o$  of high-quality shales of Well RY1 in Gulin area from different laboratories

激光拉曼光谱是一种非弹性散射光谱,能够反映含碳物质向石墨转变过程中结构的变化<sup>[12]</sup>。RY1井优质页岩有机质拉曼光谱特征揭示D峰与G峰的峰间距为267.8  $\text{cm}^{-1}$ (图7a),峰高比为0.75,D峰半高宽为90.1  $\text{cm}^{-1}$ ,根据刘德汉公式<sup>[21]</sup>计算拉曼  $R_o$  为3.17%,说明固体沥青演化程度处于碳沥青阶段,有机碳发生了弱炭化,但石墨结构形成量有限。

武隆地区武隆向斜北翼由浅到深钻探了PD1, LY2, LY4等3口页岩气井,测井解释页岩电阻率随埋深增大呈减小趋势(图8,表2)。PD1井页岩埋深为979 m,五峰组—龙一段优质页岩电阻率较高,为118.9~877.6  $\Omega\cdot\text{m}$ ,平均为401.8  $\Omega\cdot\text{m}$ ,①—③小层电阻率平均为417.6  $\Omega\cdot\text{m}$ ;LY2井页岩埋深为2497 m,优质页岩电阻率为10.8~72.4  $\Omega\cdot\text{m}$ ,平均为23.3  $\Omega\cdot\text{m}$ ,①—③小层电阻率平均为20.1  $\Omega\cdot\text{m}$ ,是PD1井的4.8%。LY4井页岩埋深为4025 m,优质页岩电阻率为2.3~30.0  $\Omega\cdot\text{m}$ ,平均为5.6  $\Omega\cdot\text{m}$ ,①—③小层电阻率异常低,平均为3.4  $\Omega\cdot\text{m}$ ,是PD1井的0.8%。PD1井由于埋深较浅,含气量相对较低,平均为3.2  $\text{m}^3/\text{t}$ ,水平井压裂测试获日产气量为1.1 $\times 10^4$   $\text{m}^3/\text{d}$ ,累积产气量已超400 $\times 10^4$   $\text{m}^3$ ,实现了浅层页岩气勘探突破;LY2井优质页岩含气量平均为5.7  $\text{m}^3/\text{t}$ ,水平井压裂测试获日产气量为9.2 $\times 10^4$   $\text{m}^3/\text{d}$ ,累积产气量已超2000 $\times 10^4$   $\text{m}^3$ ,具备较好的常压页岩气开采潜力;LY4井优质页岩含气量平均为2.9  $\text{m}^3/\text{t}$ ,水平井压裂测试仅获日产气量为1 $\times 10^4$   $\text{m}^3/\text{d}$ ,试气试采效果较差。前期研究认为盆外残留向斜具有“向核更甜”的规律,表现为埋深越大、离剥蚀边界越远,含气量越高的特点<sup>[2-22-25]</sup>,LY4井靠近向斜核部却出现低电阻率,含气量降低,与前期认识不符,这也影响了该区勘探进程。为了揭示有机质炭化对该区电阻率的影响,开展  $R_o$  和激光拉曼实验,结果表明:PD1井  $R_o$  为2.76%;LY2井  $R_o$  为2.89%,其优质页岩D峰与G峰的峰高比为0.65(图7b),拉曼  $R_o$  为3.44%;LY4井  $R_o$  为2.95%,优质页岩D峰与G峰的峰高比为0.69

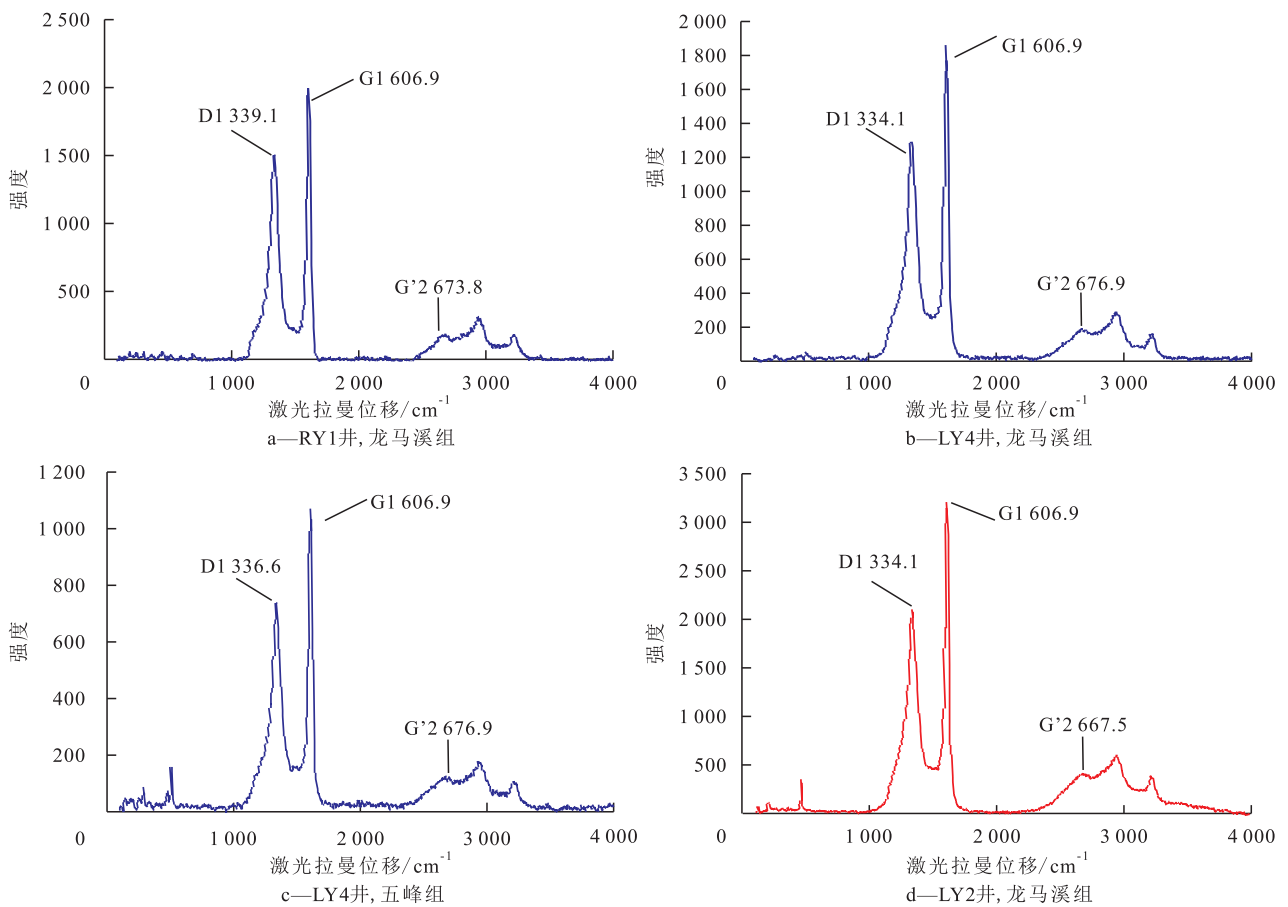


图7 川东南地区页岩有机质激光拉曼光谱

Fig.7 Laser Raman spectroscopy of shale organic matter in Southeast Sichuan area

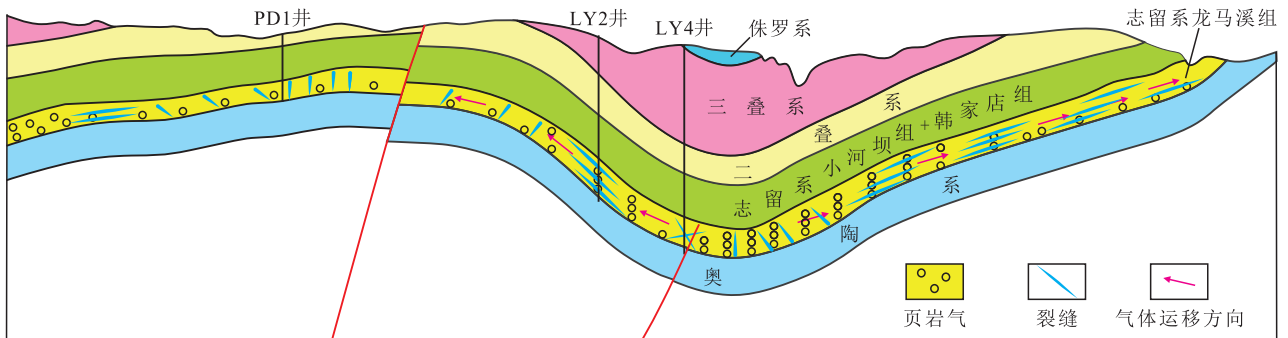


图8 武隆向斜页岩气成藏模式

Fig.8 Wulong syncline shale gas reservoir model

表2 PD1井,LY2井和LY4井的关键参数对比

Table1 Comparison of key parameters between Well PD1, Well LY2 and Well LY4

井号	埋深/m	平均电阻率/ ( $\Omega \cdot m$ )	$R_o$ /%	平均含气量/ ( $m^3 \cdot t^{-1}$ )
PD1	979	401.8	2.76	3.2
LY2	2 497	23.3	2.89	5.7
LY4	4 025	5.6	2.95	2.9

(图7c—7d),拉曼  $R_o$  为3.37%;结果显示3口井相距较近(15 km以内),经历的古埋深和古地温大致相当,均未达到有机质强炭化的热成熟度门限值, $R_o$ 随现今埋深增大呈增大趋势,但总体差异不大,D峰与

G峰的峰高比也随埋深增大而增大,有机碳逐步发生了弱炭化。PD1井优质页岩的电阻率与TOC相关性差,LY2井优质页岩的电阻率与TOC呈弱相关性,LY4井优质页岩的电阻率与TOC呈明显负相关性(图5),表明有机质弱炭化对电阻率造成了一定影响,这可能是导致武隆向斜优质页岩电阻率随埋深增加而减小的原因之一。

### 3 保存条件对页岩低电阻率的影响

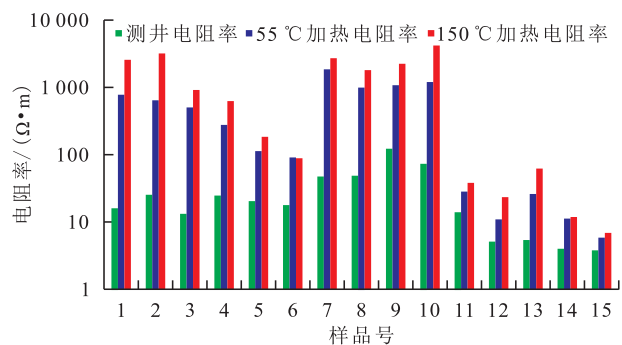
页岩电阻率主要由2个方面因素决定:一是岩

石骨架,二是孔隙结构及流体<sup>[6]</sup>。有机质炭化、石墨化可导致岩石骨架导电性增强,而保存条件则会影响页岩孔隙结构和地层流体,进而影响电阻率。

### 3.1 地层流体改变影响电阻率

#### 3.1.1 地层水与电阻率的关系

为了揭示地层水对页岩电阻率的影响,选取15件正常电阻率井(NY1和PY1)和低电阻率井(RY1)的优质页岩段岩心开展烘干电阻率实验,将每件岩心切割为2份,划分为2组,分别设定不同的实验条件,第1组在55℃下烘烤24h进行电阻率测定,第2组在150℃下烘烤24h进行电阻率测定。结果显示:NY1井第1组样品的电阻率平均为397Ω·m,是测井电阻率的22.3倍;第2组样品的电阻率平均为1247Ω·m,是测井电阻率的65.6倍(图9)。PY1井第1组样品的电阻率平均为1276Ω·m,是测井电阻率的21.2倍;第2组样品的电阻率平均为2702Ω·m,是测井电阻率的42.2倍。RY1井第1组样品的电阻率平均为17Ω·m,是测井电阻率的2.8倍;第2组样品的电阻率平均为30Ω·m,是测井电阻率的5.1倍。实验结果表明:RY1井的测井电阻率比NY1和PY1井的低1个数量级,加热烘烤后电阻率比NY1和PY1井的电阻率低1~2个数量级;同时3口井的岩心烘烤后的电阻率均有大幅提升,说明地层水的存在明显影响页岩电阻率,且随着实验温度升高,地层水减少,含水率和含水饱和度降低,导电性下降,电阻率增大。



1—6号样品为NY1井,7—10号样品为PY1井,11—15号样品为RY1井

图9 不同实验条件下样品的电阻率与测井电阻率对比

Fig.9 Comparison of resistivity and logging resistivity under different experimental conditions

#### 3.1.2 保存条件与地层流体、电阻率的关系

古蔺斜坡处于四川盆地南缘东西向构造与北东向构造的转折部位,为向北倾伏的扇形单斜构造,其南部志留系—寒武系出露地表<sup>[26-27]</sup>。RY1井位于古蔺斜坡深部位,处于南北向压扭走滑断层F2断层上盘,与断面的距离为1.6km,F2断层形成于喜马拉雅晚期,切割寒武系—侏罗系,为通天断层。RY1井方

解石脉包裹体均一温度为100~108℃,据此计算裂缝形成时间相对较晚,距今为10~8Ma,表明喜马拉雅晚期构造活动强烈,断裂活动持续至今。RY1井位于F2断层的上盘,目的层地震波反射相对杂乱,在喜马拉雅晚期以来压扭走滑作用下,断层封闭性差,导致页岩气沿断裂带向地表逸散;同时断层导致顶板石牛栏组灰岩裂缝发育,加剧垂向散失;最终造成RY1井五峰组—龙马溪组保存条件严重破坏,早期生成的气体逸散殆尽,束缚水大量残留在地层中,含水饱和度相对增大(95%),页岩电阻率降低。

武隆向斜处于盆外复杂构造带,为残留向斜,其五峰组—龙马溪组已大面积出露地表,LY4井位于向斜的低部位,井与五级断层的距离为10m,在断层附近裂缝发育,构造高部位成岩作用形成的地层水进入断层及附近的裂缝中,导致储层含水率升高,含水饱和度增大(51.2%),这可能是导致该井低电阻率的主要原因。

长宁地区天宫堂背斜、双龙—罗场向斜、建武向斜以西的井也存在低电阻率现象,是因为断层破坏储层含气性,地层水进入断层产生的裂缝中,导致断层下盘附近含水饱和度增大,页岩电阻率降低,同一水平井距断层越近,电阻率越低<sup>[14]</sup>。

由此可见,保存条件控制页岩的含气性和含水性,进而影响电阻率。保存条件越差,则页岩含气性越差<sup>[2,20,22,25,28-29]</sup>,含水率和含水饱和度越高,形成以高含盐束缚水为介质的导电网络,导电性增强,电阻率随之降低(图10),反之则亦反。低电阻率页岩具有较高的束缚水含量,含水饱和度大,整体含水率较高,导电性较强,同时含气性较差。

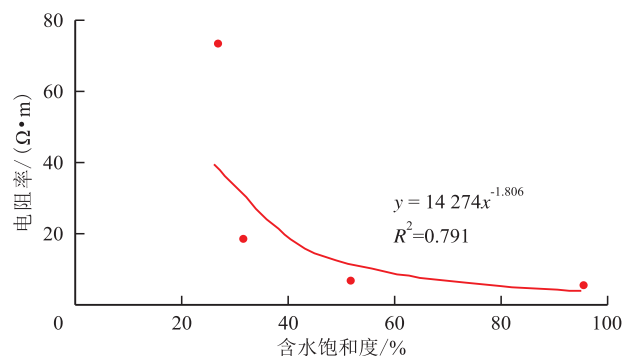


图10 川东南地区五峰组—龙一段优质页岩含水饱和度与电阻率关系

Fig.10 Relationship between water saturation and resistivity of high-quality shales in Wufeng Formation-Long 1 Member of Longmaxi Formation in Southeast Sichuan area

### 3.2 孔隙结构改变影响电阻率

#### 3.2.1 孔隙结构与电阻率的关系

低电阻率页岩与正常电阻率页岩相比,孔径小、孔隙度低,储层更致密。根据扫描电镜观察,样品在

不导电或导电不良时会发生荷电效应,因吸收电子而积聚电荷,使图像产生异常反差、畸变、像散等现象,表现为环带型亮斑<sup>[15]</sup>(图 11)。荷电效应产生的环带型亮斑一般位于颗粒与颗粒交接处,可反映不同的颗粒接触方式;亮斑发育说明颗粒间存在纳米级微裂隙,导电性较差,电阻率较高;亮斑不发育说明颗粒间为镶嵌式紧密接触,导电性较好,电阻率降低。NY1井优质页岩的样品在扫描电镜下具有明显的荷电效应(图 12a),环带型亮斑占比达2.34%,对应的电阻率为 $16\ \Omega\cdot\text{m}$ ,表现为正常电阻率。RY1井优质页岩荷电效应明显较少(图 12b),环带型亮斑占比仅为0.25%,对应的电阻率为 $2.9\ \Omega\cdot\text{m}$ ,环带型亮斑占比及电阻率均比NY1井低1个数量级。说明储层物性较差的页岩的颗粒间纳米级微裂隙在压实作用下发生闭合,颗粒与颗粒之间呈镶嵌式紧密接触,电子传导路径畅通,导致形成低电阻率,储层物性好的页岩则相反。

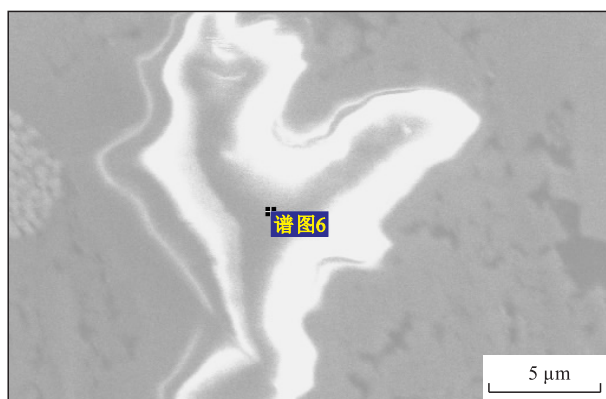
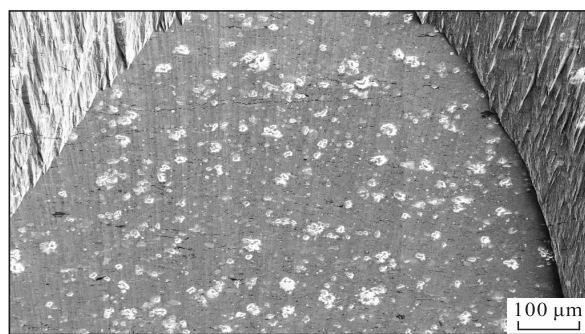


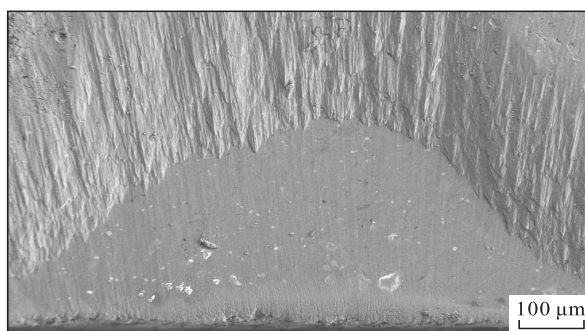
图 11 武隆向斜LY1井优质页岩荷电效应  
Fig.11 Charging effect of high-quality shale in Well LY1 in Wulong syncline

### 3.2.2 保存条件与储层物性、电阻率的关系

页岩气保存条件越好,压力系数越高,作为主要储集空间的有机质孔隙越发育、孔径越大,储层物性越好<sup>[20,25,30-31]</sup>。利用氩离子抛光-扫描电镜对川东南地区不同压力系数4口井的孔隙发育特征进行观



a—NY1井,龙马溪组,4 399 m



b—RY1井,龙马溪组,4 032 m

图 12 NY1井与RY1井荷电效应对比

Fig.12 Comparison of charging effect between Well NY1 and Well RY1

察,结合孔隙及裂隙图像识别分析软件对有机孔的平均孔径、面孔率、形状因子等情况进行了定量化表征。结果表明,压力系数与有机孔的平均孔径、面孔率、形状因子呈明显正相关(图 13),压力系数越大,对应的平均孔径、面孔率、孔隙圆度越大。说明保存条件能明显控制储层物性,进而通过储层物性影响电阻率。保存条件好,则孔隙和裂隙受气体超压支撑,得到较好保存,压实作用影响较弱,储层物性较好,基质颗粒间发育大量纳米级微裂隙,导电性较差,电阻率较高。保存条件差,则页岩气逸散,有机孔、无机孔和微裂隙缺少气体支撑,受压实作用而逐渐缩小闭合,储层物性变差,受此影响,基质颗粒间呈镶嵌式紧密接触,导电性增强,电阻率降低,若有机质处于弱炭化阶段,在压实作用下,有机

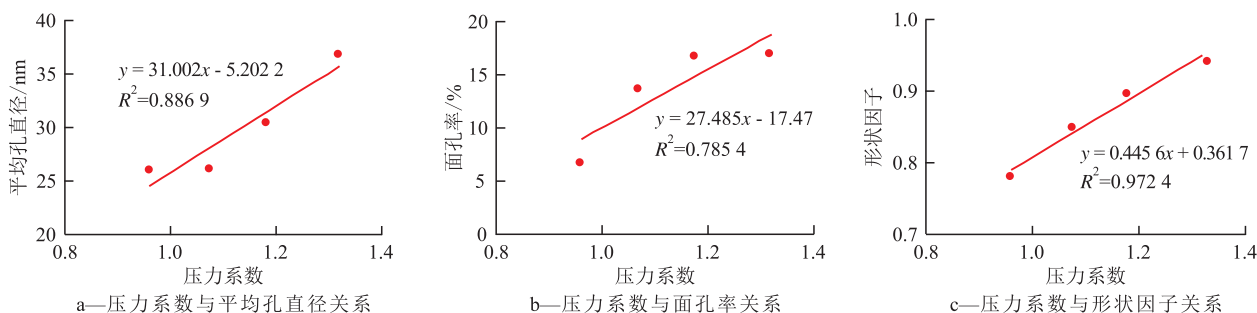


图 13 川东南地区压力系数与有机孔参数关系

Fig.13 Relationship between pressure coefficient and organic pore parameters in Southeast Sichuan area



质分布更紧密,单位体积内石墨化结构量相对增大,连通性变好,会导致电阻率进一步降低,且有机质丰度越高,电阻率越低。

#### 4 不同低电阻率成因影响范围预测

综上所述,有机质炭化和保存条件变差是导致海相页岩低电阻率的主要成因。对于 $R_0$ 超过3.5%的页岩,有机质强炭化(石墨化)是形成低-极低电阻率的主要因素。对于 $R_0$ 小于3.5%的页岩,保存条件变差是形成低-极低电阻率的主要因素,弱炭化对低电阻率也有重要影响。在弱炭化阶段,保存条件若遭受破坏,页岩气大量逸散,含水率和含水饱和度将增高,形成以高含盐束缚水为介质的导电网络,导电性增强;同时储层抗压能力大幅减弱,在上覆压实作用下,孔隙和裂隙坍塌闭合,基质颗粒镶嵌式接触,荷电效应减少,有机质被压缩得更紧实,单位体积内石墨化结构量相对增大,连通性变好,导电性进一步增强,最终形成低-极低电阻率。

根据上述低电阻率成因分析,对不同成因的影响范围进行了预测,初步认为:由有机质强炭化导致的低电阻率,其影响范围可能具有区域性(影响范围较大),深埋、高温、火山活动、热液活动等导致有机质强炭化-石墨化,生烃能力枯竭,吸附能力减弱,电阻率降低,物性和含气性变差,因此 $R_0$ 大于3.5%的区域页岩气勘探开发风险较大。由保存条件变差导致的低电阻率,其影响范围不具有区域性(影响范围较小),靠近泄压区,含气性差,电阻率低,不利于页岩气勘探开发;远离泄压区,含气性变好,电阻率将逐步恢复正常。因此,页岩气勘探开发需尽量避开 $R_0$ 大于3.5%的强炭化区域和保存条件遭受破坏的区域。

#### 5 结论

异常低电阻率页岩与正常电阻率页岩相比,在电性、物性、含气性等方面具有3个典型特征:①电性上表现出电阻率在优质页岩段突变或渐变的特征,曲线呈现“细脖子型”“漏斗型”,电阻率低于 $10 \Omega \cdot m$ 。②物性上表现出孔径小、岩石密度大、孔隙度较低的特征。③含气性上表现出气测显示较差,含气量低,吸附能力弱,多为干井的特征。

对于 $R_0$ 超过3.5%的页岩,有机质强炭化(石墨化)是形成低-极低电阻率的主要因素。深埋、高温、火山活动、热液活动等导致有机质成熟度跃过“临界点”之后,有机质发生强炭化-石墨化,生烃能力枯

竭,吸附能力减弱,物性和含气性变差,电阻率降低。对于 $R_0$ 小于3.5%的页岩,保存条件变差是形成低-极低电阻率的主要因素,弱炭化对低电阻率也有重要影响。在弱炭化阶段,保存条件若遭受破坏,页岩气大量逸散,含水率和含水饱和度将增高,形成以高含盐束缚水为介质的导电网络,导电性增强;同时储层抗压能力大幅减弱,在上覆压实作用下,孔隙和裂隙坍塌闭合,基质颗粒镶嵌式接触,荷电效应减少,有机质被压缩得更紧实,单位体积内石墨化结构量相对增大,连通性变好,导电性进一步增强,电阻率显著降低,且有机质丰度越高,电阻率越低。

由有机质强炭化导致的低电阻率,其影响范围可能较大,页岩气勘探开发需尽量避开 $R_0$ 大于3.5%的强炭化区域。由保存条件变差导致的低电阻率,其影响范围较小,靠近泄压区,含气性差、电阻率低,不利于页岩气勘探开发。

致谢:中国石化华东油气分公司勘探开发研究院高和群、丁安徐、李小越为本文研究提供了部分实验数据,黄小贞参与了部分图件清绘,在此谨表感谢!

#### 参考文献

- [1] 邹才能,赵群,丛连铸,等.中国页岩气开发进展、潜力及前景[J].天然气工业,2021,41(1):1-14.  
ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [2] 何希鹏.四川盆地东部页岩气甜点评价体系与富集高产影响因素[J].天然气工业,2021,41(1):59-71.  
HE Xipeng. Sweet spot evaluation system and enrichment and high yield influential factors of shale gas in Nanchuan area of eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 59-71.
- [3] 何贵松,何希鹏,高玉巧,等.重庆南川地区龙潭组页岩气地质特征与甜点优选[J].地质学报,2022,96(6):2131-2142.  
HE Guisong, HE Xipeng, GAO Yuqiao, et al. Geological characteristics and sweet spot optimization of Longtan shale gas in the Nanchuan area, Chongqing[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(6): 2131-2142.
- [4] 何畅,万玉金,耿晓燕,等.页岩气水平井高产主控因素定量评价及应用[J].特种油气藏,2021,28(5):113-119.  
HE Chang, WAN Yujin, GENG Xiaoyan, et al. Quantitative evaluation and application of main control factors for high production of horizontal shale gas wells [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(5): 113-119.
- [5] 唐军,彭超.涪陵页岩气藏水平井初始产能预测方法[J].大庆石油地质与开发,2020,39(6):160-167.  
TANG Jun, PENG Chao. Predicting method of the initial productivity for the horizontal well in Fuling shale gas reservoirs[J]. Pe-

- troleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39 (6): 160-167.
- [6] 侯宇光,张坤朋,何生,等.南方下古生界海相页岩极低电阻率成因及其地质意义[J].地质科技通报,2021,40(1):80-89.  
HOU Yuguang, ZHANG Kunpeng, HE Sheng, et al. Origin and geological significance of ultra-low resistivity in Lower Paleozoic marine shale, South China[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(1): 80-89.
- [7] 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.
- [8] 王玉满,李新景,陈波,等.海相页岩有机质碳化的热成熟度下限及勘探风险[J].石油勘探与开发,2018,45(3):385-395.  
WANG Yuman, LI Xinjing, CHEN Bo, et al. Lower limit of thermal maturity for the carbonization of organic matter in marine shale and its exploration risk[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 385-395.
- [9] 王玉满,李新景,王皓,等.中上扬子地区下志留统龙马溪组有机质碳化区预测[J].天然气地球科学,2020,31(2):151-162.  
WANG Yuman, LI Xinjing, WANG Hao, et al. Prediction of organic matter carbonization zones for Lower Silurian Longmaxi Formation in Middle-Upper Yangtze region[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 151-162.
- [10] 王玉满,魏国齐,沈均均,等.四川盆地及其周缘海相页岩有机质碳化区分布规律与主控因素浅析[J].天然气地球科学,2022,33(6):843-859.  
WANG Yuman, WEI Guoqi, SHEN Junjun, et al. Analysis on carbonization distribution and main controlling factors of organic matter in marine shale in Sichuan Basin and its periphery[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(6): 843-859.
- [11] 邹辰,李德华,杨庆,等.滇黔北地区龙马溪组有机质石墨化特征及成因[J].天然气工业,2021,41(S1):67-72.  
ZOU Chen, LI Dehua, YANG Qing, et al. Characteristics and genesis of organic matter graphitization in Longmaxi Formation, Northern Yunnan and Guizhou[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(S1): 67-72.
- [12] 蒋珊,王玉满,王书彦,等.四川盆地川中古隆起及周缘下寒武统筇竹寺组页岩有机质石墨化区预测[J].天然气工业,2018,38(10):19-27.  
JIANG Shan, WANG Yuman, WANG Shuyan, et al. Distribution prediction of graphitized organic matter areas in the Lower Cambrian Qiongzhusi shale in the central Sichuan paleo-uplift and its surrounding areas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 19-27.
- [13] 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 reservoirs[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2015, 42(6): 692-699.
- [14] 王滢,何嘉,寇一龙,等.长宁地区龙马溪组页岩储层低电阻率成因[J].油气地质与采收率,2022,29(3):53-61.  
WANG Ying, HE Jia, KOU Yilong, et al. Causes of low resistivity of Longmaxi Formation shale reservoirs in Changning area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(3): 53-61.
- [15] 高和群,丁安徐,蔡潇,等.中上扬子海相页岩电阻率异常成因分析[J].断块油气田,2016,23(5):578-582.  
GAO Hequn, DING Anxu, CAI Xiao, et al. Genetic analysis of abnormal resistivity of Middle-Upper Yangtze marine shales[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2016, 23(5): 578-582.
- [16] 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.
- [17] 赵文韬,荆铁亚,熊鑫,等.海相页岩有机质石墨化特征研究:以渝东南地区牛蹄塘组为例[J].地质科技情报,2018,37(2):183-191.  
ZHAO Wentao, JING Tiewa, XIONG Xin, et al. Graphitization characteristics of organic matters in marine-facies shales[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(2): 183-191.
- [18] 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.  
CUI Ruikang, SUN Jianmeng, LIU Xingjun, et al. Major controlling factors of low-resistance shale gas reservoirs[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 150-159.
- [19] 石文睿,张占松,黄梓桑,等.低阻页岩气储层含气饱和度计算方法——以涪陵地区焦石坝区块为例[J].断块油气田,2022,29(2):183-188.  
SHI Wenrui, ZHANG Zhansong, HUANG Zisang, et al. Study on calculation method of gas saturation in low-resistivity shale gas reservoir: a case study of Jiaoshiba block in Fuling area[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(2): 183-188.
- [20] 何贵松,何希鹏,高玉巧,等.渝东南盆缘转换带金佛斜坡常压页岩气富集模式[J].天然气工业,2020,40(6):50-60.  
HE Guisong, HE Xipeng, GAO Yuqiao, et al. Enrichment model of normal-pressure shale gas in the Jinfo slope of the basin-margin transition zone in Southeast Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(6): 50-60.
- [21] 刘德汉,肖贤明,田辉,等.固体有机质拉曼光谱参数计算样品热演化程度的方法与地质应用[J].科学通报,2013,58(13):1 228-1 241.  
LIU Dehan, XIAO Xianming, TIAN Hui, et al. Sample maturation calculated using Raman spectroscopic parameters for solid organics: methodology and geological applications[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1 228-1 241.

- [22] 何希鹏,何贵松,高玉巧,等.渝东南盆缘转换带常压页岩气地质特征及富集高产规律[J].天然气工业,2018,38(12):1-14.  
HE Xipeng, HE Guisong, GAO Yuqiao, et al. Geological characteristics and enrichment laws of normal-pressure shale gas in the basin-margin transition zone of SE Chongqing [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(12): 1-14.
- [23] 何希鹏,高玉巧,马军,等.重庆市武隆区黄莺乡五峰组—龙马溪组剖面沉积特征及地质意义[J].油气藏评价与开发,2022,12(1):95-106,118.  
HE Xipeng, GAO Yuqiao, MA Jun, et al. Sedimentary characteristics and geological significance of outcrop in Wufeng-Longmaxi Formation, Huangying Town, Wulong District, Chongqing [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 95-106, 118.
- [24] 何希鹏,高玉巧,何贵松,等.渝东南南川页岩气田地质特征及勘探开发关键技术[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):305-316.  
HE Xipeng, GAO Yuqiao, HE Guisong, et al. Geological characteristics and key technologies for exploration and development of Nanchuan Shale Gas Field in southeast Chongqing[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 305-316.
- [25] 李东海,姚红生,何希鹏,等.复杂构造区常压页岩气地质理论与资源潜力[M].北京:地质出版社,2022.  
LI Donghai, YAO Hongsheng, HE Xipeng, et al. Geological theory and resource potential of atmospheric shale gas in complex structure area[M]. Beijing: Geology Press, 2022.
- [26] 何贵松.川南古蔺地区仁页1井五峰组——龙马溪组生物地层及成藏特征[J].地层学杂志,2021,45(2):142-150.  
HE Guisong. Biostratigraphy and reservoir characteristics of the Wufeng-Longmaxi Formations shale in Well Renye-1 of Gulin area, southern Sichuan Province[J]. Journal of Stratigraphy, 2021, 45(2): 142-150.
- [27] 何贵松.川南地区古蔺斜坡龙马溪组页岩低含气性原因分析[J].工业,2015,2(4):155-157.  
HE Guisong. Analysis of low-gas reason in Longmaxi shale of Gulin slope in the southern Sichuan Basin[J]. Industry, 2015, 2(4): 155-157.
- [28] 许露露,温雅茹,张焱林,等.鄂西地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩含气性特征及保存条件[J].石油实验地质,2021,43(3):395-405.  
XU Lulu, WEN Yaru, ZHANG Yanlin, et al. Gas-bearing characteristics and preservation conditions of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale in western Hubei[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3): 395-405.
- [29] 何顺,秦启荣,范存辉,等.川东南丁山地区页岩气保存条件分析[J].油气地质与采收率,2019,26(2):24-31.  
HE Shun, QIN Qirong, FAN Cunhui, et al. Shale gas preservation conditions in Dingshan area, southeastern Sichuan[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(2): 24-31.
- [30] 王淑芳,张子亚,董大忠,等.四川盆地寒武统筇竹寺组页岩孔隙特征及物性变差机制探讨[J].天然气地球科学,2016,27(9):1619-1628.  
WANG Shufang, ZHANG Ziya, DONG Dazhong, et al. Microscopic pore structure and reasons making reservoir property weaker of Lower Cambrian Qiongzhusi shale, Sichuan Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1619-1628.
- [31] 吴伟,梁志凯,郑马嘉,等.页岩储层孔隙结构与分形特征演化规律[J].油气地质与采收率,2022,29(4):35-45.  
WU Wei, LIANG Zhikai, ZHENG Majia, et al. Pore structures in shale reservoirs and evolution laws of fractal characteristics[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(4): 35-45.

编辑 单体珍