基于三轴压缩模拟试验的页岩低阻成因机制

高天[1,2]，刘睿[2*]，徐璐[2]，陈增裕[2]，李佳明[2]，龙思宇[2]，廖强[2]，刘鹏[2]，李鹏艳[2]

1. 中国石油大学（北京）地球科学学院，北京 102249；
2. 西南石油大学地球科学与技术学院，成都 610500

第一作者，E-mail：gaotianx27@163.com

* 通信作者，E-mail：Liurui@outlook.com

2023-09-20 收稿；2023-12-05 修回；2023-12-12 接受

基金项目：国家自然科学基金项目“五峰–龙马溪组页岩孔隙结构的构造压实调整机制研究”（42072184）

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)02-0224-14　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230533

摘　要：川南地区五峰–龙马溪组页岩气储层在多个地区出现低电阻异常现象。统计显示，低阻页岩(<10 Ω·m)与构造断裂带在空间分布上存在叠合关系。为揭示页岩电阻率与构造断裂带之间的关联机制，基于薄片鉴定、X 射线衍射分析、激光拉曼光谱分析、全岩沥青反射率测定以及常规物性分析等手段，确定了页岩试样的岩石学特征和地球化学特征；基于三轴压缩物理模拟试验确定了变形过程中页岩试样电阻率的变化特征，明确了裂缝发育及盐水的侵入对页岩低阻现象的影响。结果表明：黏土矿物、黄铁矿和高热演化程度有机质相对均一的页岩试样，在饱和不同浓度盐水后，电阻率显著降低，且电阻率降低幅度(95.07%～98.70%)与盐水质量浓度之间存在正相关关系；饱和盐水的页岩试样受压破裂后电阻率进一步降低，范围介于 5.7～25.7 Ω·m 之间(平均值为 13.3 Ω·m)，且页岩试样饱和盐水后的电阻率与其破裂后的电阻率符合正相关线性关系。页岩内部裂缝系统的发育后导电流体的侵入，是页岩电阻率降低的主要控制因素。页岩受压破裂后电阻率的降低幅度受到入侵溶液浓度和裂缝发育程度的双重影响。研究成果解释并补充了构造断裂带对页岩电阻率的影响机制，丰富了低阻页岩成因机制理论，对低阻页岩层段的勘探开发具有重要意义。

关键词：低阻页岩；低阻成因；裂缝；地层水；四川盆地；五峰–龙马溪组；三轴压缩模拟试验

中国页岩气经过近 10 年的高速发展已实现商业化开发并成为中国未来最可靠的接替能源[1-2]。川渝地区建成的我国最大的页岩气生产基地，截止 2021 年底，累计探明地质储量已达 2.7 万亿 m^3。在四川盆地及其周缘地区的上奥陶统五峰组–下志留统龙马溪组已发现数个探明储量超千亿 m^3 的页岩气田，并建成了威远–长宁、涪陵和昭通 3 个国家级页岩气示范区，五峰组–龙马溪组成为中国海相页岩气勘探开发的主力层系和增储上产的重要领域[3-4]。近年来，在对四川盆地的页岩气勘探开发中，在多地区、多层位出现了页岩气储层低阻现象[5]。通常认为低测井电阻率是页岩干气层的特征之一，但随着页岩气勘探开发工作的持续推进，仍在部分井的低阻页岩层段获得了一定程度的工业产能，如川南地区 NX27 井龙马溪组龙一$_1^{1-3}$ 层段含气量为 2.27 m^3/t，产气量达 19×10^4 m^3/d[5]，以及 Y203 井龙马溪组层段的测试产量达 19.4 m^3/t [6]。低阻页岩层段含气的不确定性制约了对低阻页岩气的勘探开发。

低阻页岩现象的成因是多因素的。目前，大多数学者从微观角度出发对该机制开展了研究[7-11]。低阻页岩的影响因素主要包括有机质、矿物成分、孔隙流体和孔隙结构 4 个方面。随着热成熟度的提升，有机质中的无序碳物质会向有序化晶型的石墨转化，有机质的石墨化作用使得在页岩内部形成以石墨为

著录信息：高天，刘睿，徐璐，等. 基于三轴压缩模拟试验的页岩低阻成因机制 [J]. 地质科技通报，2025，44(2)：224-237.
GAO Tian, LIU Rui, XU Lu, et al. Genetic mechanism of low resistance in shale analyzed via triaxial compression tests[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 224-237.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

良好导电介质的导电通路，进而导致页岩电阻率随石墨化程度和规模的增加而降低。黄铁矿和黏土矿物是页岩中对低阻页岩现象形成有贡献的主要矿物成分，黄铁矿本身具有良好的导电性，连续分布或高体积分数(> 6%)的黄铁矿会引起页岩电阻率的快速下降[5, 12-13]，黏土矿物的亲水性和附加导电性分别以形成束缚水为介质的良好导电路径和扩散–吸附电动势的形式使页岩电阻率降低，高黏土矿物与低阻页岩现象的形成密切相关[13-16]。赋存在页岩储集空间中的流体，会因其成分、含量和空间分布状态的差异对页岩电阻率产生不同程度的影响[13, 17-18]，如在相同孔隙气压条件下富集甲烷的页岩电阻率要高于富集氦气的页岩，地层水普遍有相对较好的导电性能，但不同分布状态的地层水对应着不同导电性能的导电通路，对页岩电阻率有不同程度的影响。孔缝空间的类型、连通性以及发育程度均会影响页岩的电阻率[16, 19-20]，如在相同条件下分别发育粒间孔、晶间孔和有机孔的页岩电阻率依次降低，微裂缝的发育为高矿化度等低阻物质的进入提供了赋存空间，其形成的低阻导电路径也会导致页岩电阻率的降低。

笔者在前人的研究基础上，以川南地区五峰–龙马溪组页岩为研究对象，从低阻页岩的宏观空间分布特征出发，利用试验模拟和实验分析等方法，结合构造背景资料和钻测井资料，开展页岩低阻成因分析，以期揭示页岩电阻率与构造断裂带之间的关联机制，阐明裂缝的发育以及导电流体的运移进入对页岩低阻现象的影响，为低阻页岩层段的勘探开发提供参考。

1 地质背景

1.1 沉积构造背景

四川盆地经历了弱拉张–弱挤压–弱拉张–弱挤压 2 个完整的地质演化旋回，2 期地裂拉张运动(兴凯地裂运动和峨眉地裂运动)和 2 期挤压运动(加里东运动和印支运动)，深刻影响了川南地区五峰–龙马溪组的沉积地层[21-22]。

上奥陶统五峰组–下志留统龙马溪组在川南地区分布广泛。龙马溪组整合接触上覆的石牛栏组，在部分地区不整合接触上覆的梁山组，整合接触下伏的五峰组。根据岩性和电性特征可将龙马溪组划分为龙一段和龙二段，其中龙一段可细分为龙一$_1$ 亚段和龙一$_2$ 亚段，龙一$_1$ 亚段可进一步细分为龙一$_1^1$、龙一$_1^2$、龙一$_1^3$ 和龙一$_1^4$ 4 个小层[23-25]。从龙马溪组的沉积早期到沉积中晚期，川南地区海平面发生大幅度下降，沉积环境由缺氧的大面积深水陆棚环境逐渐转变为浅水陆棚环境[26-27]，龙马溪组下部在此沉积背景下具有较好的生烃物质基础(图 1)。

1.2 电阻率及地层水特征

川南地区五峰–龙马溪组页岩电阻率大多介于 10 ~ 110 Ω·m 之间，但也钻遇有电阻率小于 10 Ω·m 的页岩层段。结合前人认识，笔者将电阻率小于 10 Ω·m

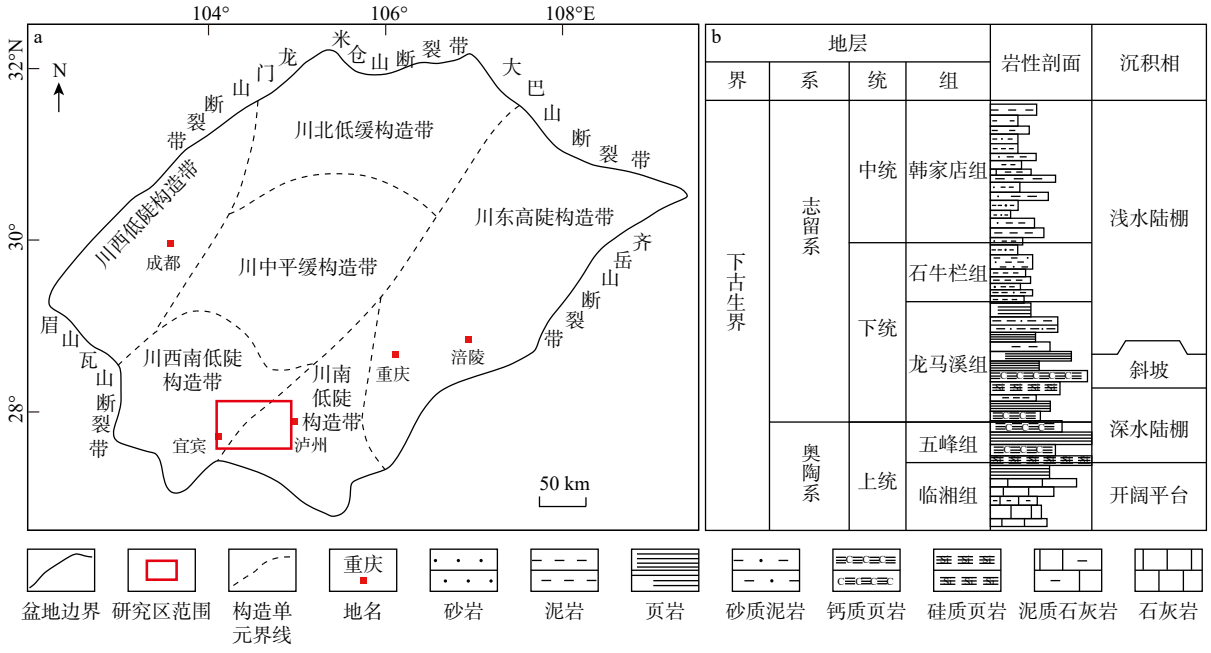


图 1　研究区构造位置图 (a) 及地层综合柱状图 (b) [28]

Fig. 1　Tectonic location (a) and stratigraphic column (b) of the study area

的页岩层段定义为低阻页岩[29-30]。区域统计结果显示，川南地区五峰–龙马溪组出现低阻现象的区域与多组断裂构造带的相交区域在空间分布上具有较好的耦合关系。五峰–龙马溪组主要存在五大低电阻区(<10 Ω·m)，分别是 W214 井周缘、JYT1 井–H201 井–H206 井周缘、NX202 井–N227 井一带以及 N233 井周缘，这五大区域的共同特征是在空间分布上属于不同走向断裂延伸方向相交的地区(图 2, 3)。单

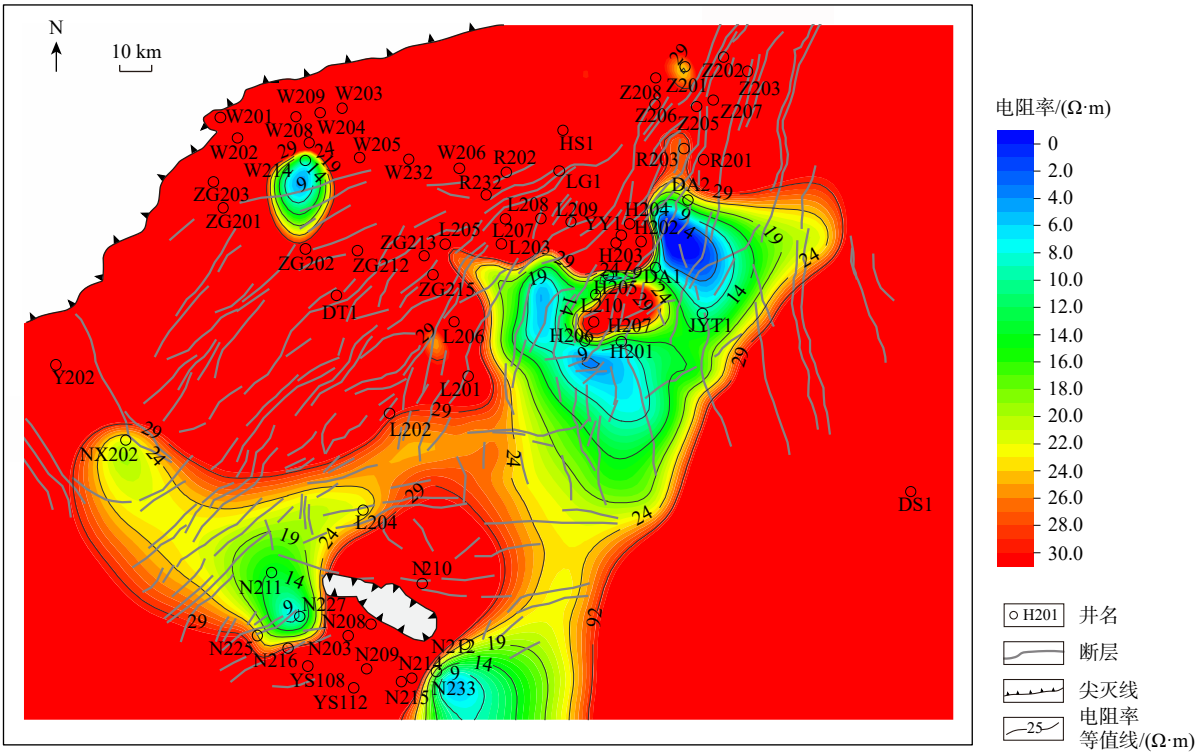


图 2　川南地区五峰组电阻率平面展布图

Fig. 2　Resistivity distribution of the Wufeng Formation in the southern Sichuan Basin

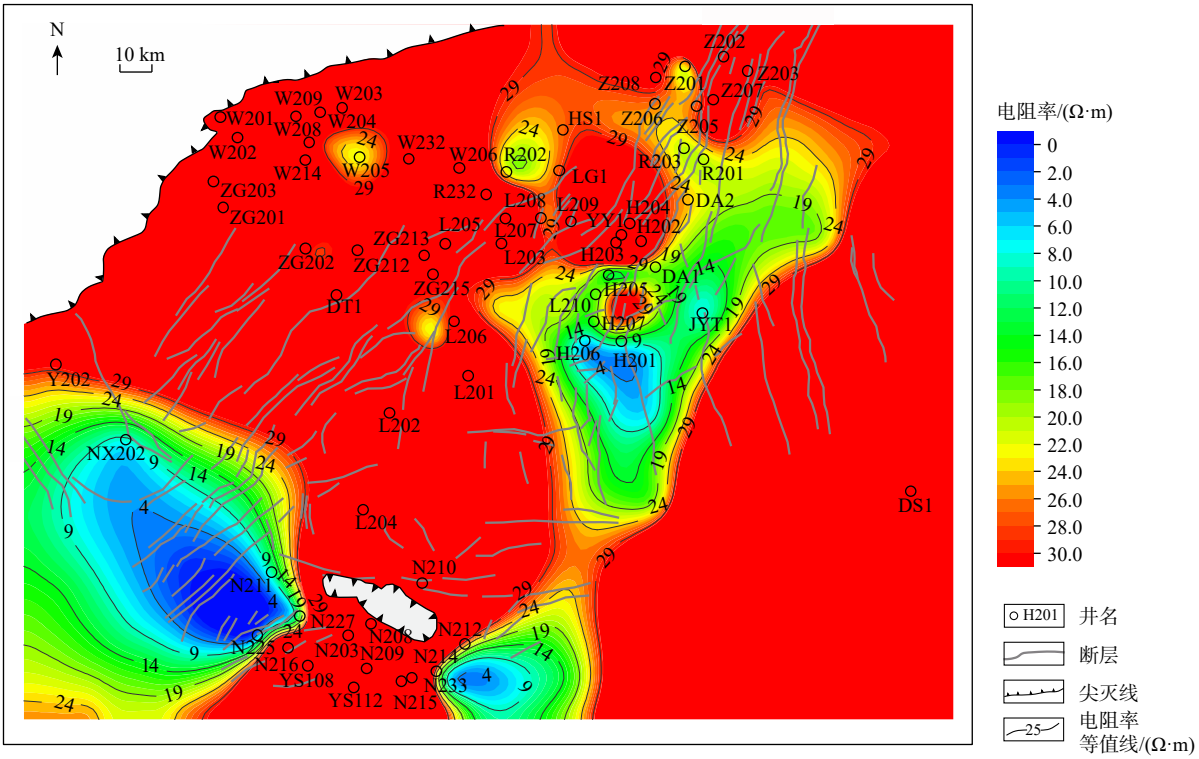


图 3　川南地区龙一$_1^1$ 小层电阻率平面展布图

Fig. 3　Resistivity distribution of the Long 1_1^1 layer in the southern Sichuan Basin

井上，低电阻页岩层段与裂缝发育位置也存在耦合关系(图 4)。JYT1 井钻遇的五峰–龙马溪组页岩层段电阻率整体约 10 Ω·m，观察岩心发现页岩层中裂缝发育且部分裂缝被白色方解石胶结填充。川南地区龙马溪组具有高矿化度地层水的特征，如长宁区块页岩层段的地层水矿化度范围介于 19 000 ~ 50 000 mg/L，平均矿化度超过 35 000 mg/L [31]。这表明该地区长期存在活跃的高矿化度地层水活动。大量的裂缝在地层中发育后，高矿化度地层水的充注成为低电阻率的潜在成因之一。

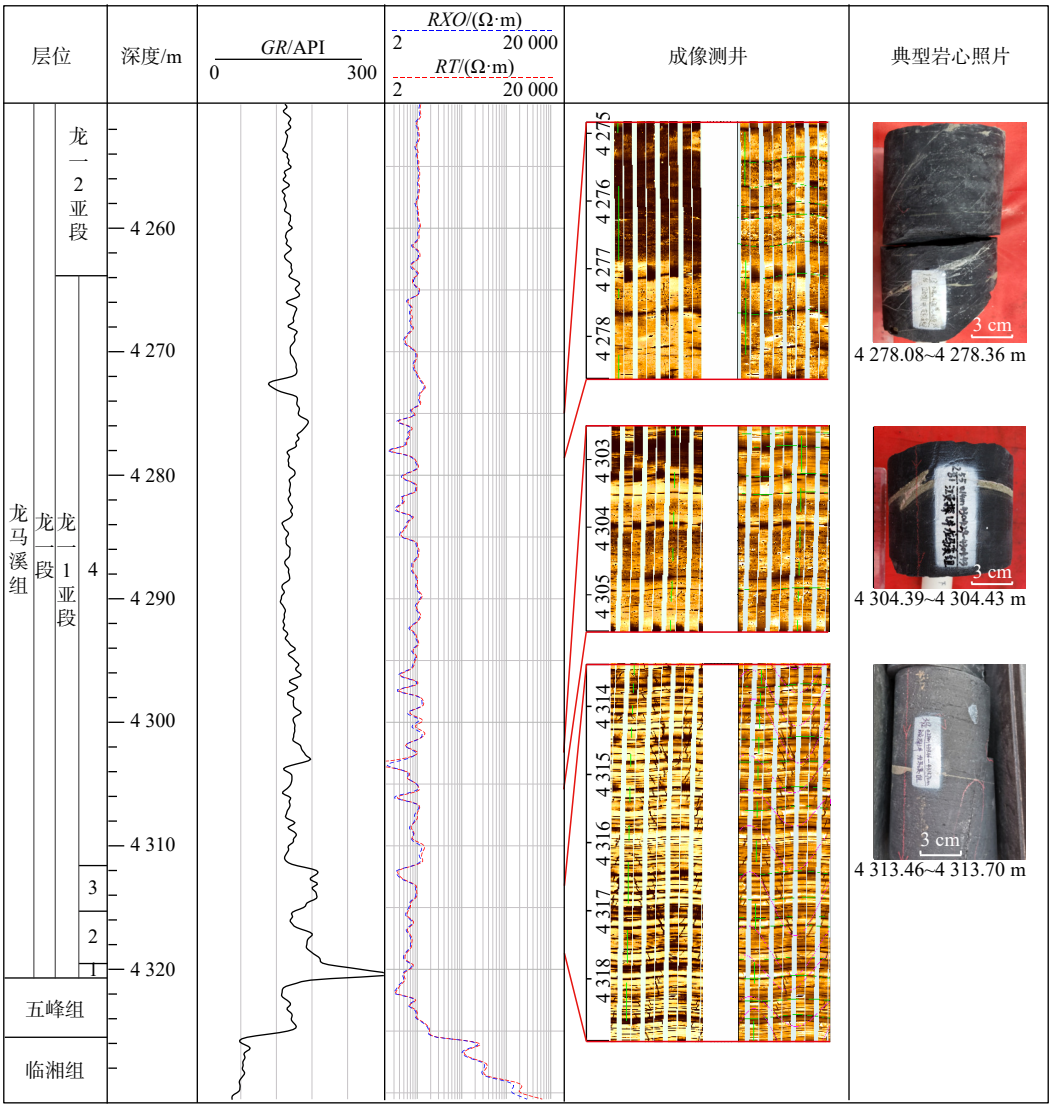


图 4　JYT1 井垂直段岩心、成像测井中裂缝特征

Fig. 4　Fracture characteristics in cores and imaging log of Well JYT1

2　样品与方法

试验样品取自四川盆地南部地区(宜宾市长宁县)下志留统龙马溪组页岩野外露头。分别沿层理方向和垂直层理方向制取直径为 25.4 mm、高度为 50 mm 的柱塞样品 10 个，将沿 2 个方向制取得到的页岩柱塞分别称为 SP 试样和 CZ 试样。所有试样编号后分为 5 组，每组试样中分别包含 2 个 SP 试样和 2 个 CZ 试样(表 1)。

利用铸体薄片镜下鉴定、X 射线衍射分析、总有机碳含量测定、等效镜质组反射率测定和激光拉曼分析等方法，分别确定页岩试样的岩石学特征和地球化学特征。上述试验在使用 Malvern Panalytical X'Pert^3 Powder 型 X 射线衍射仪、Leica DM4P 偏光显微镜、LECO CS230 型红外碳硫分析仪、ZEISS Axio Scope. A1 偏光显微镜以及 J&M MSP400 分光光度计等设备完成。

为观察受压变形过程中页岩试样电阻率的变化情况，开展了以下试验：①测定并记录 5 组试样的初始电阻率 R_i；②对试样进行干燥处理至连续称重

结果稳定不变，测定并记录干燥后电阻率 R_d、孔隙度和渗透率；③配置 5 组质量浓度分别为 0（去离子水），12 000，24 000，36 000，48 000 mg/L 的盐水溶液，利用流体饱和装置使 5 组干燥页岩试样分别真空饱和上述 5 组质量浓度的盐水溶液，对试样进行连续称重至称重结果稳定不变即认为页岩试样已饱和盐水溶液；④在有补给水条件下对页岩试样进行常规三轴加载物理模拟试验，先对试样加 5 MPa 稳定围压，随后变化轴压以 0.3 MPa/s 的恒定速度增加直至页岩试样发生宏观破裂。部分页岩试样受压至 200 MPa 左右时，因设备无法继续低速增压而改变加载速度至页岩试样发生宏观破裂。测定并记录页岩试样饱和盐水溶液后的电阻率 R_s 以及加载过程中页岩试样的电阻率、应变、施加应力等参数随时间变化数据。试验记录的页岩试样变形过程包括空隙压密、弹性变形、微裂隙稳定发展和非稳定破裂发展 4 个阶段。上述试验使用 XZ-2C 型旋片式真空泵和 Applent AT2817A 型 LCR 电桥等设备完成。

3　试验结果

3.1　页岩样品特征

X 射线衍射测试结果表明页岩试样主要由石英、长石、碳酸盐矿物、黏土矿物和黄铁矿五大类组成矿物（表 2）。其中，黏土矿物体积分数较低（6.6%～9.6%），主要由伊利石和少量的伊/蒙混层组成。试

表 1　页岩试样测试结果数据汇总

Table 1　Test results of shale samples

分组编号	溶液质量浓度/（mg·L^{-1}）	溶液电阻率*/（Ω·m）	试样编号	初始电阻率 R_i/（Ω·m）	干燥电阻率 R_d/（Ω·m）	饱和电阻率 R_s/（Ω·m）	破裂电阻率 R_c/（Ω·m）	破裂压力 P_c/MPa	孔隙度/%
Ⅰ	0	/	SP1	411.4	7 862.6	188.7	176.1	269.3	4.26
			SP3	600.9	4 918.0	196.4	182.6	283.4	4.62
			CZ5	435.2	3 844.8	189.7	182.9	261.1	4.87
			CZ9	424.5	4 424.2	212.5	199.6	269.3	4.90
Ⅱ	12 000	0.71	SP5	800.3	5 206.8	134.3	108.8	308.1	4.71
			SP7	470.4	4 491.3	107.6	94.9	275.4	4.99
			CZ1	808.6	3 785.2	111.4	85.7	246.3	4.95
			CZ3	266.4	3 410.4	116.7	99.7	262.1	4.94
Ⅲ	24 000	0.37	SP8	467.0	3 697.4	90.9	84.5	232.0	5.02
			SP9	456.4	3 780.8	80.1	74.4	245.1	5.25
			CZ7	477.6	3 982.9	81.8	64.9	272.8	5.09
			CZ10	791.7	4 788.1	103.3	93.6	262.6	5.56
Ⅳ	36 000	0.25	SP4	650.9	3 568.4	92.4	83.1	242.6	5.37
			SP10	913.4	5 608.9	98.0	89.4	301.4	5.45
			CZ6	576.6	3 824.9	93.5	80.2	280.6	5.70
			CZ8	663.4	4 368.8	86.1	64.8	245.1	5.73
Ⅴ	48 000	0.19	SP2	329.2	3 896.0	64.9	55.4	295.9	5.54
			SP6	474.6	4 932.9	64.3	54.4	276.1	5.71
			CZ2	492.8	3 267.2	74.9	65.7	255.1	5.95
			CZ4	595.7	3 764.8	79.1	60.0	271.3	5.74

*据斯伦贝谢公司《NaCl溶液的电阻率与其浓度和温度关系》图版拟合得到试验条件下NaCl溶液浓度与电阻率之间函数关系：$y = 4\,514.15x^{-0.93}$

表 2　页岩试样矿物组成及热演化程度

Table 2　Mineral composition and clay mineral composition of shale samples

试样编号	全岩矿物体积分数/%						黏土矿物占比/%		伊/蒙混层占比/%		沥青反射率 R_b/%	沥青等效镜质体反射率bR_{oeq}/%
	石英	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	黏土矿物	伊利石	伊/蒙混层	蒙皂石层	伊利石层		
SP2	55.7	1.3	20.5	12.7	0.9	8.9	97	3	5	95	3.83	2.92
SP4	52.8	0.8	22.7	15.9	1.2	6.6	97	3	5	95	/	/
CZ1	58.2	1.4	18.3	11.7	0.8	9.6	98	2	5	95	3.98	3.02
CZ4	53.8	0.7	18.4	16.7	1.2	9.2	99	1	5	95	4.06	3.08
CZ9	50.6	1.9	22.6	16.4	1.0	7.5	97	3	5	95	4.08	3.09

样的 w(TOC)整体较高，介于 2.29% ~ 2.45% 之间。由于川南地区龙马溪组页岩中缺失镜质体组，使用基于沥青反射率[32] 和基于激光拉曼法[33-34] 的等效镜质体反射率计算公式分别计算得到页岩试样的成熟度，结果表明页岩试样已进入过成熟阶段(表 3)。此外，SP6 试样的激光拉曼图谱(图 5)上有低幅度的 G′峰(石墨峰)出现。

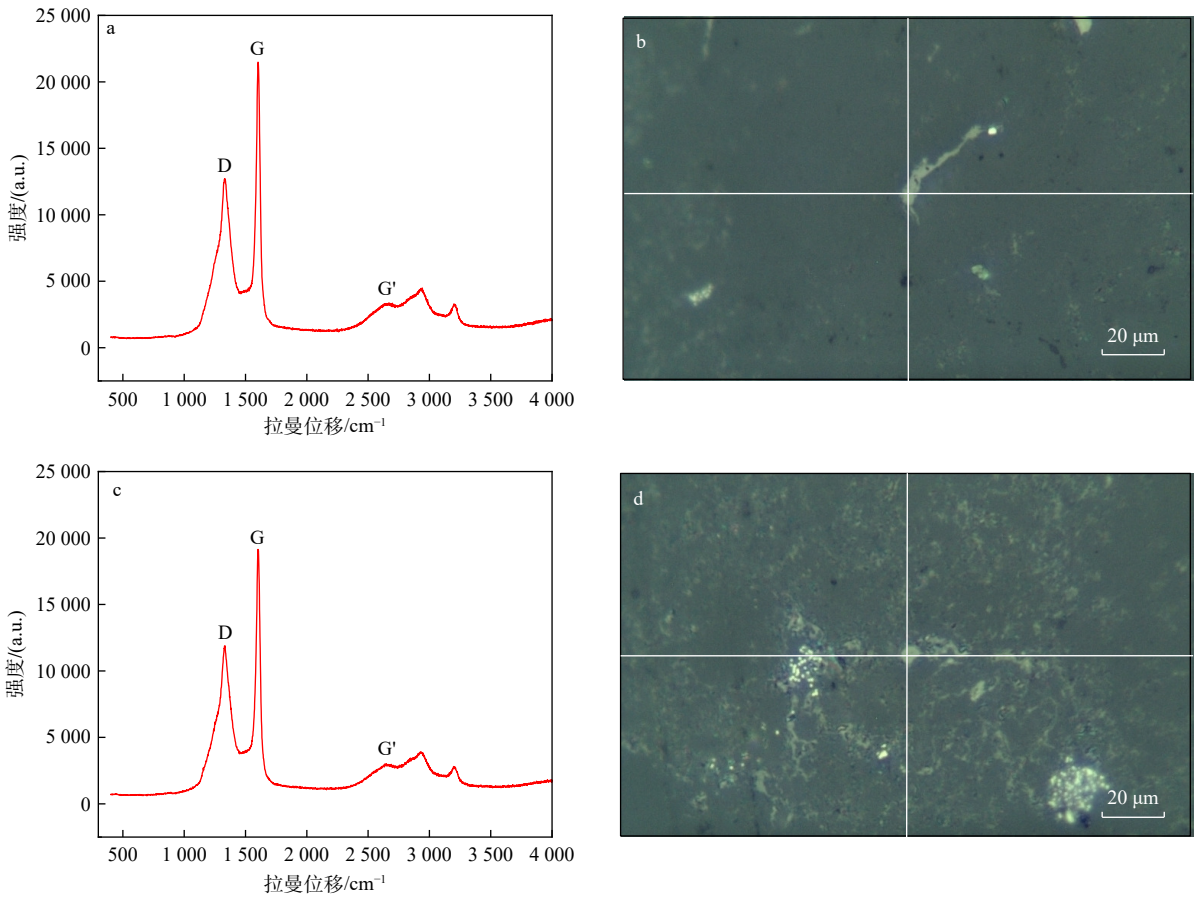
3.2 应变过程中的电阻率

观察试验结果曲线可以发现，其符合经典岩石应力−应变曲线。将非稳定破裂发展阶段结束时刻的轴压称为破裂压力 P_c，该时刻页岩试样的电阻率称为破裂电阻率 R_c。

表 3 SP6 试样激光拉曼光谱测试数据及等效镜质体反射率计算结果

Table 3 Laser Raman spectroscopy test results and equivalent vitrinite reflectance results of SP6 smaple

测点编号	D峰峰高	G峰峰高	峰间距/cm^{-1}	峰高比	激光拉曼反射率$Rmc R_o$/%	拉曼等效镜质体反射率rR_{oeq}/%
1	9415.60	18264.10	272.51	0.52	3.36	3.47
2	7856.00	14891.10	272.13	0.53	3.37	3.48
3	8082.24	15545.40	271.95	0.52	3.36	3.47
4	7271.43	13530.90	272.05	0.54	3.39	3.49
5	8829.71	16437.00	272.83	0.54	3.39	3.49
6	8250.88	15437.50	272.21	0.53	3.38	3.49
7	9002.58	16678.10	271.91	0.54	3.39	3.49
8	8522.53	16270.90	271.60	0.52	3.37	3.48
9	9150.72	17194.30	270.70	0.53	3.38	3.48
10	7612.25	14789.00	271.45	0.51	3.36	3.47



a, b. 测点 1 的测试结果及位置；c, d. 测点 5 的测试结果及位置；D. 位于拉曼位移 1 300 ~ 1 350 cm^{-1} 区间内的峰值，主要与沥青中碳质的无序结构和缺陷有关；G. 位于拉曼位移 1 580 ~ 1 600 cm^{-1} 区间内的峰值，与芳香族碳−碳双键(C=C)的伸缩振动有关；G'. 位于拉曼位移 2 600 ~ 2 700 cm^{-1} 区间内的峰值，为 G 峰的二阶倍频峰，可辅助判断沥青中碳质结构的有序性

图 5 SP6 试样部分测点激光拉曼图谱结果及测点位置

Fig. 5 Raman spectra characteristics and measurement point positions of the SP6 sample

不同页岩试样的试验结果曲线具有相似的变化趋势。空隙压密阶段页岩试样电阻率无明显变化，进入弹性变形阶段和微裂隙稳定发展阶段后页岩试样电阻率开始出现小幅度的降低，非稳定破裂发展阶段至试样完全破坏过程中页岩试样电阻率出现显著降低(图 6, 7)。其中，CZ2、SP2、SP4、SP8 和 SP9 试样的应力−应变曲线相对其他试样应变较小且结束时刻曲线斜率不为 0，似乎未进入破裂阶段。

4　讨　论

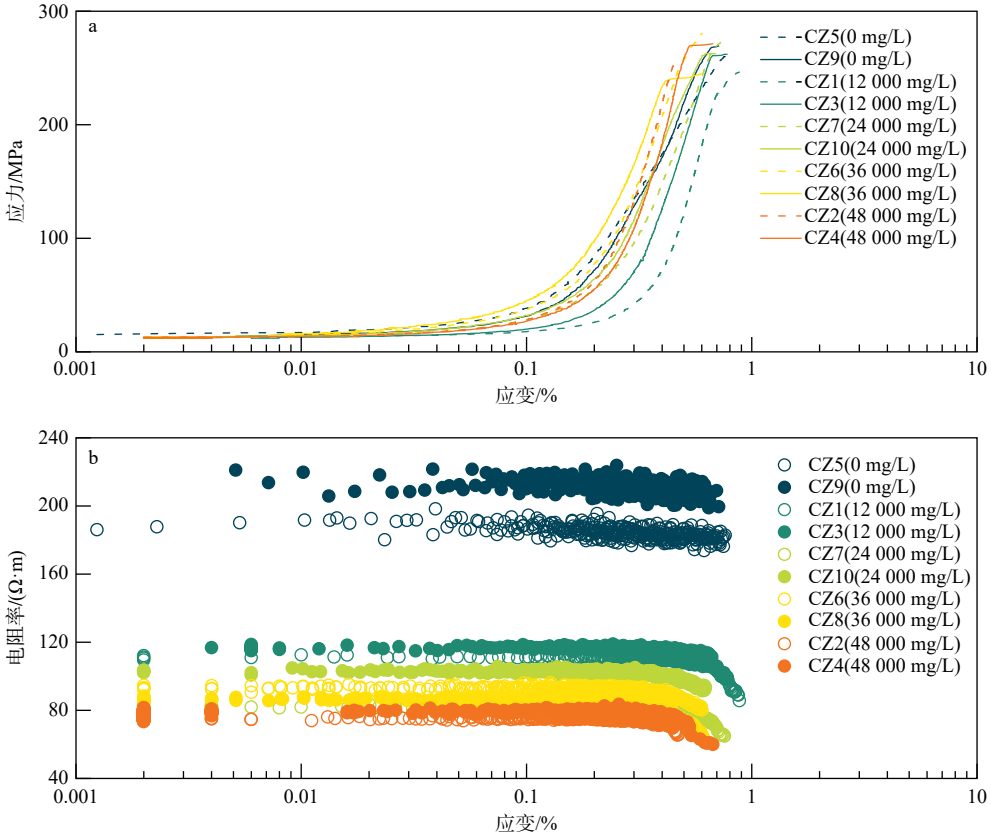
4.1　黏土矿物及黄铁矿对电阻率的影响

页岩试样中黏土矿物体积分数(6.6% ~ 9.6%)较前人研究中相关数据(12.2% ~ 61.0%)[5-6] 相对较低，取样位置在空间分布上的局限性以及黏土矿物在地层中分布的非均质性可能是这一问题出现的原因。结合前人数据(图 8)，10% 体积分数的黏土矿物对应的页岩层测井电阻率应约为 40 Ω·m，并不会形成低阻页岩(<10 Ω·m)。页岩试样中低黏土矿物含量以及与电阻率参数之间较差的相关性(图 9)共同表明在本研究中黏土矿物对页岩试样电阻率的影响十分有限。

黄铁矿的高电导率可能会导致页岩电阻率的降低[17]。页岩试样中黄铁矿体积分数介于 0.8% ~ 1.2%，整体含量较少，但整体仍处于前人研究报道范围之内[5, 35]。黄铁矿产状上呈零星散乱分布、未见明显的连续分布。前人研究表明，呈团块状、层状分布或体积分数大于 6% 的黄铁矿，体积分数与页岩电阻率之间有较好的线性关系，会造成电阻率小范围的快速降低[5, 12-13]，页岩试样中黄铁矿在产状和含量上均未达到该范围条件，故在本研究中黄铁矿对页岩试样电阻率的影响有限且均一。

4.2　有机质热演化程度对电阻率的影响

页岩有机质中导电物质的出现可能会导致页岩电阻率的降低[8, 36-37]。页岩中发生石墨化作用的有机质大量出现并且连续分布形成导电性能良好的导电通道后，页岩电阻率会出现一定程度的降低。使用偏光显微镜对铸体薄片进行镜下观察发现，有机质多呈丝缕状、不规则条带状和团块状均匀混杂于泥质中，少量有机质沿裂缝呈细小不规则条带分布，大多数有机质个体之间未能相互连接形成连续分布。目前多使用“有机质石墨化的门限值为 R_o=3.5%，以



图中数值为处理样品使用的盐水溶液的质量浓度，下同

图 6　CZ 试样应力−应变图 (a) 及电阻率−应变图 (b)

Fig. 6　Stress-strain (a) and resistivity-strain (b) diagrams of CZ samples

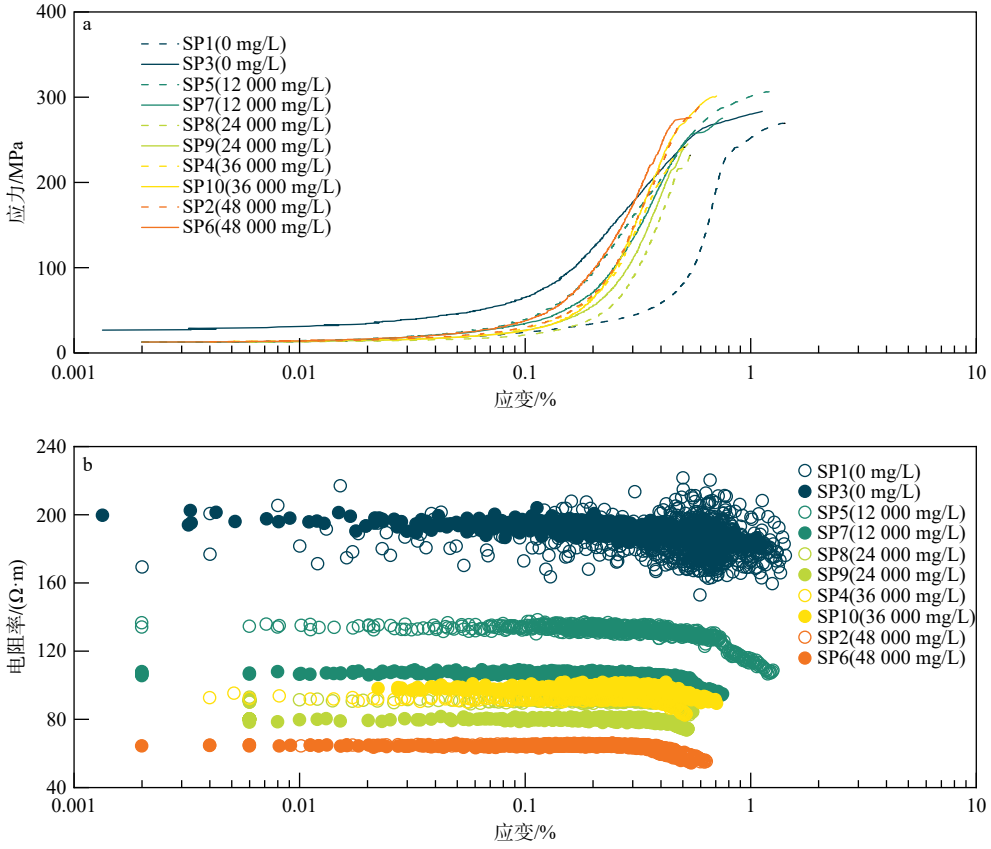


图 7　SP 试样应力−应变图 (a) 及电阻率−应变图 (b)

Fig. 7　Stress-strain (a) and resistivity-strain (b) diagrams of SP samples

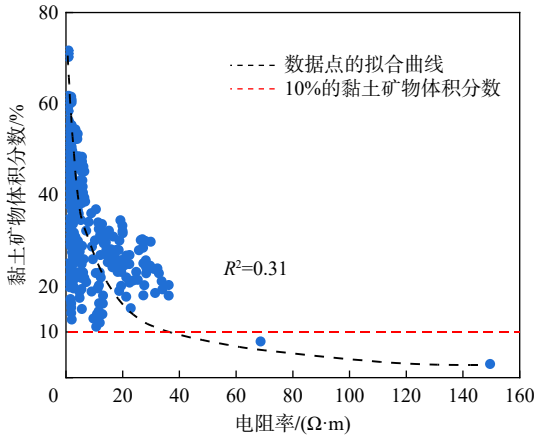
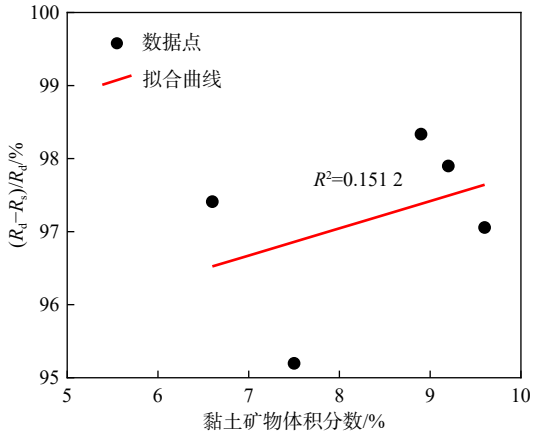


图 8　长宁地区五峰−龙马溪组页岩黏土矿物含量与电阻率间关系[6]

Fig. 8　Relationship between clay mineral content and resistivity of shale of Wufeng-Longmaxi Formations in the Changning area



R_d 为干燥页岩试样的电阻率; R_s 为页岩试样饱和对应浓度盐水溶液后的电阻率; 下同

图 9　电阻率参数与黏土矿物体积分数之间的关系

Fig. 9　Relationship between resistivity parameters and clay mineral content

及在激光拉曼图谱的 G′峰位置出现低幅度以上的石墨峰, 且 D 峰与 G 峰峰高比大于 0.63”作为有机质石墨化作用发生的判定依据[38]。研究区页岩试样的 R_o 值介于 3.47% ~ 3.49%, 激光拉曼测试分析的结果图谱上仅出现低幅度石墨峰且 D 峰与 G 峰的峰高比介于 0.51 ~ 0.54。将试验的实测数据与侯宇光等[36]建立的激光拉曼参数——成熟度−电阻率响应模式图进行对比分析发现, 页岩试样所对应的理论电阻率响应值仍处于高位(图 10), 且数据分布相对集中。因此, 在本研究中高热演化程度有机质对页岩试样电阻率的影响较为有限且相对均一。

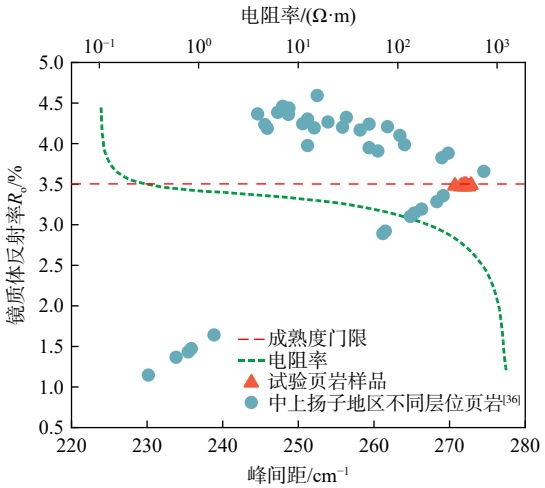


图 10　R_o 与激光拉曼测试参数、电阻率关系模式图[36]

Fig. 10　R_o and model diagram of laser Raman test parameters, resistivity[36]

4.3　裂缝及导电流体对电阻率的影响

干燥页岩试样饱和不同浓度盐水溶液后，电阻率发生大幅度的下降(图 11)，电阻率下降幅度介于 95.07% ~ 98.70% 之间。使用 0 mg/L 盐水溶液(去离子水)处理的页岩试样电阻率仍下降 95% 以上，这可能是由于部分骨架矿物发生化学溶解后释放的自由导电离子进入去离子水中改善了其导电性能，从而导致页岩试样电阻率的降低。盐水溶液的质量浓度与干燥页岩试样电阻率的下降比例之间存在正相关关系，这表明盐水溶液质量浓度对干燥页岩饱和导电流体后电阻率的下降具有一定的控制作用。导电流体的充注是导致干燥页岩电阻率大幅度降低的重要影响因素。

在有补给水条件下，外源流体及试样内自由水运移进入试样内部的裂缝系统使得“导电网络”进一步发育，导致饱和水溶液的页岩试样在受压破裂后电阻率发生进一步的下降。页岩试样发生宏观破裂后电阻率下降范围介于 5.7 ~ 25.5 Ω·m 之间，平均值为 13.3 Ω·m。

页岩试样的 R_c 与盐水溶液质量浓度之间存在显著的负相关关系(图 12b)。为降低盐水溶液质量浓度在裂缝发育过程中对试样电阻率的影响，将 SP、CZ 试样的 R_s、R_c 分别相对于盐水溶液的电阻率做“归一化处理”(即作差后与相应浓度盐水溶液电阻率的相除，盐水质量浓度(x)与溶液电阻率(y)的相关性为 $y = 4\,514.15x^{-0.93}$)。将平均函数曲线和实测数据对比可见，当页岩试样内部“导电网络”发育相对较差时，实测数据点会相对于平均函数曲线向下偏离。如图 13 所示，整体上实测数据点较好地分布于平均函数曲线附近，但试样 SP8 和 SP9 的数据点明显地向下偏离平均函数曲线，表明试样 SP8 和 SP9 变形后内部“导电网络”发育程度可能相对较差，可能并未发生宏观破裂(图 7a 显示 2 个试样应变相对较小，且应力−应变曲线结束时刻斜率明显不为 0)。因此，饱和导电流体页岩试样变形后内部裂缝系统的发育程度会影响其受压破裂前后电阻率的变化。

另外值得注意的是，在与盐水溶液电阻率做“归一化处理”后试样受压破裂前后电阻率的变化与盐水溶液质量浓度之间仍存在正相关关系(图 13)，这可能与盐水溶液与页岩间发生的流体−岩石化学作用有关。高离子强度环境中的 Na^+和 Cl^-会促进难溶化合物和碳酸盐矿物的溶解，这有利于金属元素的溶出[39-41]。部分骨架矿物与盐水溶液接触后发生溶解，金属离子的释出使得盐水溶液的实际离子浓度要高于初始配比浓度，促进了试样电阻率的降低。

对页岩试样的 R_s 和 R_c 数据进行相关性分析发现两者之间存在强正相关的线性关系(图 14)，即试

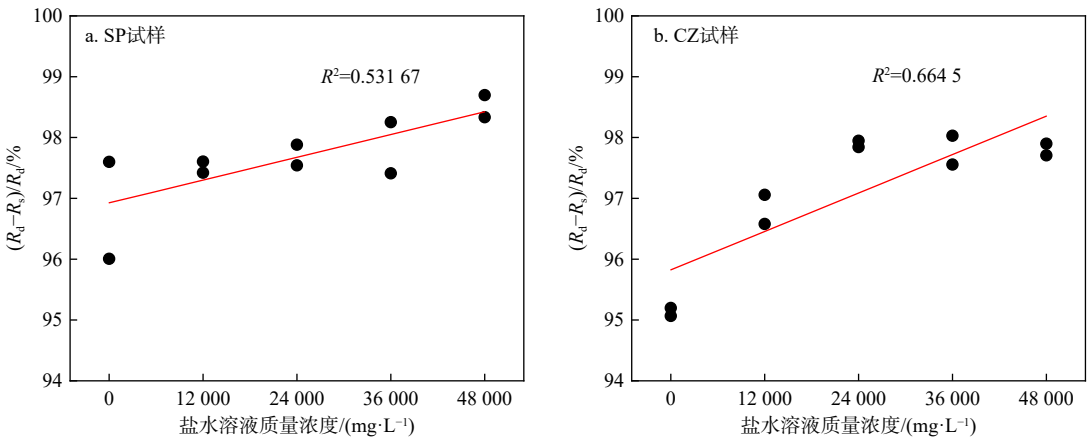
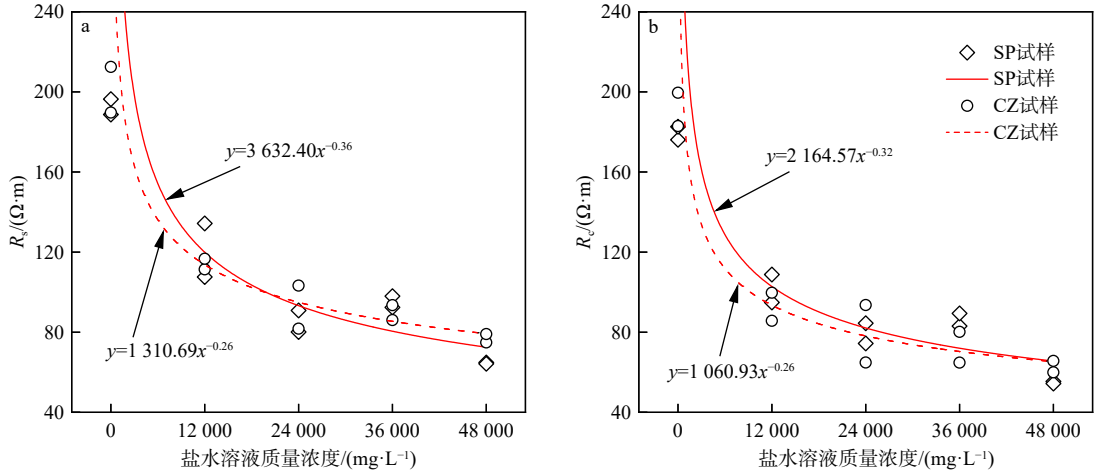


图 11　页岩试样饱和对应浓度盐水溶液后电阻率下降比例与盐水溶液质量浓度关系

Fig. 11　Relationship between the proportion of resistivity decreased and the brine salinity by brine



R_c. 饱和盐水溶液的页岩试样受压破裂后的电阻率, Ω·m; 下同

图 12　页岩试样电阻率参数与盐水溶液质量浓度的关系

Fig. 12　Relationship between the resistivity of shale samples and the brine salinity

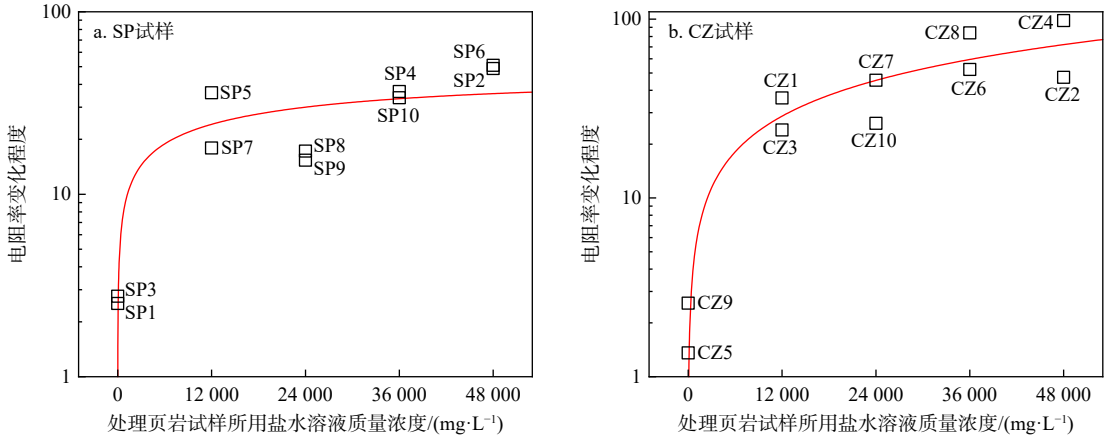


图 13　去除盐水溶液质量浓度影响后裂缝对页岩试样受压破裂后电阻率变化的影响

Fig. 13　Influence of fracture on the resistivity change of shale samples after the brine salinity removed

样受压破裂前后电阻率的变化值趋向于一常数值。SP 试样和 CZ 试样 R_s 与 R_c 差值的平均值分别为 11.40, 15.19 Ω·m, 这一过程引起的电阻率变化差值对低阻现象的形成是可观的, 在一定程度上能够使得“正常”电阻率(≥10 Ω·m)的岩体进入低阻(<10 Ω·m)范畴。不同取样方向制得的试样间电阻率变化存在差异可能与其变形过程中破坏模式的不同有关。随加载方向与层理方向间夹角角度的增加,

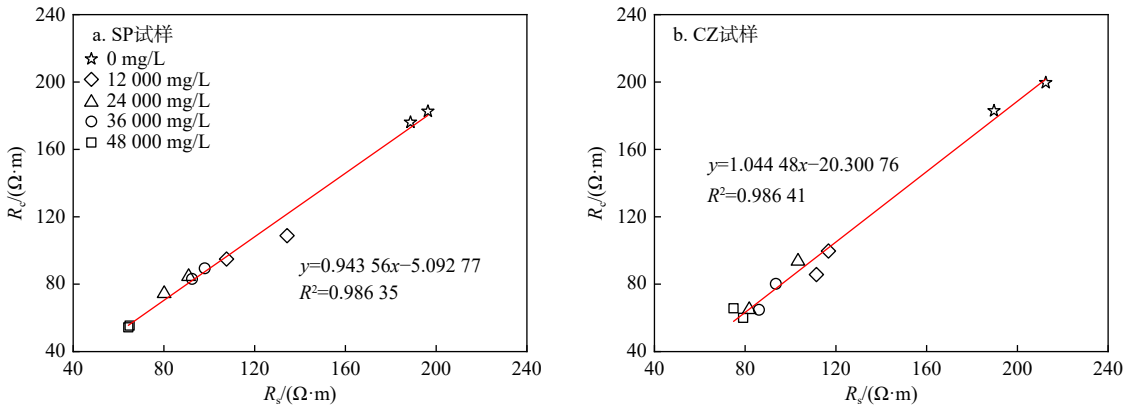


图 14　页岩试样受压破裂前后电阻率关系

Fig. 14　Relationship between resistivity of shale samples before and after cracked

试样的破坏模式出现张拉破坏向剪切破坏以及劈裂–剪切混合破坏的转变，裂缝网络的复杂度也随之增加[42-46]，这为“导电网络”导电性能的优化提供了物质基础。因此，受压方向与层理方向间角度的不同会对页岩试样破裂前后电阻率的变化造成影响。

5 结论

（1）川南地区五峰–龙马溪组低阻页岩层段与多组断裂带交汇位置在宏观空间分布上具有较好的耦合关系。

（2）页岩内部裂缝系统的发育和导电溶液运移进入的叠合作用是页岩电阻率下降的主要控制因素之一，是形成低阻现象的重要诱因。饱和导电溶液的页岩受压变形过程中内部裂缝系统的发育以及导电溶液的运移进入会形成良好的“导电网络”并造成电阻率的下降，此过程电阻率的变化受到裂缝系统发育程度和导电溶液浓度的影响。

（3）页岩饱和导电溶液后的电阻率与其受压破裂后的电阻率之间存在强正相关的线性关系，页岩受压破裂前后电阻率的变化趋于一常数值。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 赵文智，贾爱林，位云生，等. 中国页岩气勘探开发进展及发展展望 [J]. 中国石油勘探，2020，25(1)：31-44.
ZHAO W Z, JIA A L, WEI Y S, et al. Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 31-44. (in Chinese with English abstract)

[2] 李鹭光，王红岩，刘合，等. 天然气助力未来世界发展：第 27 届世界天然气大会(WGC)综述 [J]. 天然气工业，2018，38(9)：1-9.
LI L G, WANG H Y, LIU H, et al. Natural gas fueling the world's future: A brief summary from the 27th World Gas Conference (WGC)[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 1-9. (in Chinese with English abstract)

[3] 熊亮，赵勇，魏力民，等. 威荣海相页岩气田页岩气富集机理及勘探开发关键技术 [J]. 石油学报，2023，44(8)：1365-1381.
XIONG L, ZHAO Y, WEI L M, et al. Enrichment mechanisms and key exploration and development technologies of shale gas in Weirong marine shale gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1365-1381. (in Chinese with English abstract)

[4] 邹才能，潘松圻，荆振华，等. 页岩油气革命及影响 [J]. 石油学报，2020，41(1)：1-12.
ZOU C N, PAN S Q, JING Z H, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12. (in Chinese with English abstract)

[5] 黄莉莎，闫建平，胡兴中，等. 川南五峰组–龙马溪组低阻页岩特征分析及启示 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，2024，46(2)：26-40.
HUANG L S, YAN J P, HU X Z, et al. Characteristics analysis and its enlightenment of shale of low resistivity in Wufeng-Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2024, 46(2): 26-40. (in Chinese with English abstract)

[6] MA X H, WANG H Y, ZHOU T Q, et al. Geological controlling factors of low resistivity shale and their implications on reservoir quality: A case study in the southern Sichuan Basin, China[J]. Energies, 2022, 15(16): 5801.

[7] 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(增刊 1)：67-72.
ZOU C, LI D H, YANG Q, 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. (in Chinese with English abstract)

[8] 王伟庆，王学军，李政，等. 低演化陆相页岩孔缝特征及对页岩油赋存的意义：以济阳坳陷外围青南洼陷沙河街组为例 [J]. 地质科技通报，2024，43(3)：94-107.
WANG W Q, WANG X J, LI Z, et al. Pore and fracture characteristics of low-maturity continental shale and its significance for shale oil occurrence: A case study of Shahejie Formation in Qingnan Sag, Jiyang Depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 94-107.(in Chinese with English abstract)

[9] KETHIREDDY N, CHEN H Y, HEIDARI Z. Quantifying the effect of kerogen on resistivity measurements in organic-rich mudrocks[J]. Petrophysics, 2014, 55(2): 136-146.

[10] YANG A Q, FIRDAUS G, HEIDARI Z. Electrical resistivity and chemical properties of kerogen isolated from organic-rich mudrocks[J]. Geophysics, 2016, 81(6): D643-D655.

[11] SENGER K, BIRCHALL T, BETLEM P, et al. Resistivity of reservoir sandstones and organic rich shales on the Barents Shelf: Implications for interpreting CSEM data[J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(6): 101063.

[12] 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 X B, ZHANG S D, ZHANG Z G, 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. (in Chinese with English abstract)

[13] SUN F J, SUN J M, ZENG X, et al. Analysis of the influencing factors on electrical properties and evaluation of gas saturation in marine shales: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formation in Sichuan Basin[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 824352.

[14] 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 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. (in Chinese with English

abstract）

[15] 廖明光, 苏崇华, 唐洪, 等. W 油藏黏土矿物特征及油层低阻成因 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(5): 70-74.
LIAO M G, SU C H, TANG H, et al. Characteristics of clay minerals in W low resistivity reservoirs and the genesis of low resistivity[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2010, 32(5): 70-74. (in Chinese with English abstract)

[16] WANG X B, ZHANG B, HE Z X, et al. Electrical properties of Longmaxi organic-rich shale and its potential applications to shale gas exploration and exploitation[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 36: 573-585.

[17] 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. (in Chinese with English abstract)

[18] ZHONG Z Q, REZAEE R, JOSH M, et al. The salinity dependence of electrical conductivity and Archie's cementation exponent in shale formations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109324.

[19] 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 H Q, DING A X, CAI X, et al. Genetic analysis of abnormal resistivity of Middle-Upper Yangtze marine shales[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(5): 578-582. (in Chinese with English abstract)

[20] 文杰, 徐尚, 苟启洋, 等. 页岩油微运移研究进展及意义 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(4): 1-14.
WEN J, XU S, GOU Q Y, et al. Research status and significance of shale oil micromigration[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(4): 1-14. (in Chinese with English abstract)

[21] 梁霄, 徐剑良, 王滢, 等. 川南地区渐变型盆—山边界条件下龙马溪组页岩气(藏)富集主控因素: 构造—沉积分异与差异性演化 [J]. 地质科学, 2021, 56(1): 60-81.
LIANG X, XU J L, WANG Y, et al. The shale gas enrichment factors of Longmaxi Formation under gradient basin-mountain boundary in South Sichuan Basin: Tectono-depositional differentiation and discrepant evolution[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2021, 56(1): 60-81. (in Chinese with English abstract)

[22] JIANG Y Q, CHEN L, QI L, et al. Characterization of the Lower Silurian Longmaxi marine shale in Changning area in the south Sichuan Basin, China[J]. Geological Journal, 2018, 53(5): 1656-1664.

[23] 陈增裕, 刘睿, 谭秀成, 等. 四川盆地南缘长宁地区五峰组—龙马溪组页岩内多源石英对页岩气富集的意义 [J]. 古地理学报, 2023, 25(4): 920-930.
CHEN Z Y, LIU R, TAN X C, et al. Implications of multi-source quartz on shale-gas enrichment in the Wufeng-Longmaxi shale of Changning area in southern margin of Sichuan Basin, China[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(4): 920-930. (in Chinese with English abstract)

[24] 赵圣贤, 杨跃明, 张鉴, 等. 四川盆地下志留统龙马溪组页岩小层划分与储层精细对比 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27(3): 470-487.
ZHAO S X, YANG Y M, ZHANG J, et al. Micro-layers division and fine reservoirs contrast of Lower Silurian Longmaxi Formation shale, Sichuan Basin, SW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(3): 470-487. (in Chinese with English abstract)

[25] SHI Z S, WANG H Y, SUN S S, et al. Graptolite zone calibrated stratigraphy and topography of the Late Ordovician-Early Silurian Wufeng-Lungmachi shale in Upper Yangtze area, South China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(3): 213.

[26] 张福, 黄艺, 蓝宝锋, 等. 正安地区五峰组-龙马溪组页岩储层特征及控制因素 [J]. 地质科技通报, 2021, 40(1): 49-56.
ZHANG F, HUANG Y, LAN B F, et al. Characteristics and controlling factors of shale reservoir in Wufeng Formation-Longmaxi Formation of the Zheng'an area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(1): 49-56. (in Chinese with English abstract)

[27] 韦国栋, 谭秀成, 刘睿, 等. 长宁地区龙马溪组页岩沉积古地貌与页岩气差异富集的耦合机制 [J]. 沉积与特提斯地质, 2024, 44(2): 253-266.
WEI G D, TAN X C, LIU R, et al. The coupling mechanism between geomorphology of shale sedimentary and differential enrichment of shale gas in Longmaxi Formation in Changning area[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2024, 44(2): 253-266. (in Chinese with English abstract)

[28] 张砚, 惠栋, 张鉴, 等. 四川盆地海相页岩水蒸气吸附特征及其主控因素: 以川南地区下志留统龙马溪组页岩为例 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1431-1444.
ZHANG Y, HUI D, ZHANG J, et al. Characteristics and main controlling factors of water vapor adsorption in marine shale: A case study of the Lower Silurian Longmaxi shales in southern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1431-1444. (in Chinese with English abstract)

[29] 张晋言, 李淑荣, 王利滨, 等. 页岩气测井电性解析及含气性评价: 以四川盆地涪陵地区龙马溪组一段—五峰组为例 [J]. 天然气勘探与开发, 2018, 41(3): 33-41.
ZHANG J Y, LI S R, WANG L B, et al. Electrical-logging analysis and evaluation on gas-bearing property of shale gas: An example from Longmaxi 1 Member-Wufeng Formation, Fuling area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2018, 41(3): 33-41. (in Chinese with English abstract)

[30] 谢青, 王建民. 鄂尔多斯盆地志丹、安塞地区长 6 低阻油层成因机理及识别方法 [J]. 岩性油气藏, 2013, 25(3): 106-111.
XIE Q, WANG J M. Genetic mechanism and identification methods of Chang 6 low resistivity reservoir in Zhidan and Ansai area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(3): 106-111. (in Chinese with English abstract)

[31] 王立伟, 李生杰, 刘晓雪, 等. 四川盆地五峰–龙马溪组低阻页岩含水饱和度测井评价 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(16): 6456-6462.

WANG L W, LI S J, LIU X X, et al. Water saturation of low resistance shale in the Wufeng-Longmaxi Formation of Sichuan Basin logging evaluation[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(16): 6456-6462. (in Chinese with English abstract)

[32] 丰国秀, 陈盛吉. 岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系 [J]. 天然气工业, 1988, 8(3): 20-25.
FENG G X, CHEN S J. Relationship between the reflectance of bitumen and vitrinite in rock[J]. Natural Gas Industry, 1988, 8(3): 20-25. (in Chinese with English abstract)

[33] 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): 1228-1241.
LIU D H, XIAO X M, TIAN H, et al. Sample maturation calculated using Raman spectroscopic parameters for solid organics: Methodology and geological applications[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1228-1241. (in Chinese with English abstract)

[34] SCHMIDT J, MENEZES T, SOUZA I, et al. Comments on empirical conversion of solid bitumen reflectance for thermal maturity evaluation[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 201: 44-50.

[35] 曹涛涛, 邓模, 宋之光, 等. 黄铁矿对页岩油气富集成藏影响研究 [J]. 天然气地球科学, 2018, 29(3): 404-414.
CAO T T, DENG M, SONG Z G, et al. Study on the effect of pyrite on the accumulation of shale oil and gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(3): 404-414. (in Chinese with English abstract)

[36] 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 Y G, ZHANG K P, HE S, 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. (in Chinese with English abstract)

[37] 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 Y M, LI X J, WANG H, 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. (in Chinese with English abstract)

[38] 王玉满, 李新景, 陈波, 等. 海相页岩有机质炭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 Y M, LI X J, CHEN B, 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. (in Chinese with English abstract)

[39] 李艺菲, 辜海林, 毕二平. 龙马溪组页岩组分在液−岩作用过程中的释放特征 [J]. 环境化学, 2021, 40(11): 3421-3431.
LI Y F, GU H L, BI E P. Releasing characteristics of the Longmaxi Formation shale components during fluid-rock interactions[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(11): 3421-3431. (in Chinese with English abstract)

[40] MOGOLLóN J L, PéREZ-DIAZ A, LO MONACO S. The effects of ion identity and ionic strength on the dissolution rate of a gibbsitic bauxite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(5): 781-795.

[41] RENOCK D, LANDIS J D, SHARMA M. Reductive weathering of black shale and release of Barium during hydraulic fracturing[J]. Applied Geochemistry, 2016, 65: 73-86.

[42] 解经宇, 陆洪智, 陈磊, 等. 龙马溪组层状页岩微观非均质性及力学各向异性特征 [J]. 地质科技通报, 2021, 40(3): 67-77.
XIE J Y, LU H Z, CHEN L, et al. Micro scopic heterogeneity and mechanical anisotropy of the laminated shale in Longmaxi Formation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(3): 67-77. (in Chinese with English abstract)

[43] 沈金才. 页岩气井邻井压裂干扰响应特征及机理探讨: 以涪陵页岩气田为例 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(4): 87-97.
SHEN J C. Response characteristics and mechanism for fracturing interference of adjacent wells of shale gas wells: A case study in the Fuling shale gas field[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(4): 87-97. (in Chinese with English abstract)

[44] 李彦伟, 朱超凡, 曾壹坚, 等. 层理特征对油页岩水力压裂裂缝扩展规律影响的数值模拟研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(11): 44-54.
LI Y W, ZHU C F, ZENG Y J, et al. Numerical simulations of the effects of bedding planes on hydraulic fracture propagation law in oil shale[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(11): 44-54. (in Chinese with English abstract)

[45] 魏海峰. 非均质性页岩水力压裂裂缝扩展形态研究进展 [J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(4): 156-166.
WEI H F. Research progress on fracture propagation patterns of hydraulic fracturing in heterogeneous shale[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(4): 156-166. (in Chinese with English abstract)

[46] 王元, 杨恒林, 黄浩勇, 等. 四川盆地泸州区块深层页岩气地质力学研究及应用 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28(5): 68-83.
WANG Y, YANG H L, HUANG H Y, et al. Geomechanical study of deep shale gas and application in Luzhou block, Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(5): 68-83. (in Chinese with English abstract)

Summary for “基于三轴压缩模拟试验的页岩低阻成因机制”

Genetic mechanism of low resistance in shale analyzed via triaxial compression tests

GAO Tian[1,2]，LIU Rui[2*]，XU Lu[2]，CHEN Zengyu[2]，LI Jiaming[2]，LONG Siyu[2]，LIAO Qiang[2]，LIU Peng[2]，LI Pengyan[2]

1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China；
2. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

First author，E-mail：gaotianx27@163.com

* Corresponding author， E-mail：Liurui@outlook.com

Abstract：[**Objective**] The gas-rich Wufeng-Longmaxi shale of the southern Sichuan Basin exhibits low-resistance anomalies in multiple areas. Statistical analysis reveals that the low-resistivity zone (<10 Ω·m) in the Wufeng-Longmaxi shale is spatially associated with tectonic faults. This study aims to reveal the coupling mechanism between shale resistivity and tectonic faults. [**Methods**] This study determines the petrological and geochemical characteristics of outcrop samples obtained from the Wufeng-Longmaxi shale in the southern Sichuan Basin through thin-section identification, X-ray diffraction, laser Raman spectroscopy, whole-rock asphalt reflectance, and conventional physical property analyses. The characteristics of resistivity change in the shale during deformation were analyzed through triaxial compression tests. The impacts of fracture system generation and conductive fluid intrusion on low-resistivity shale were also clarified. [**Results**] The results show that the resistivity of shale samples, which have similar characteristics of clay minerals, pyrite, organic matter content, and thermal maturity level, significantly decreased after saturation with brines of various salinities. A positive correlation was observed between the resistivity reduction (95.07%-98.70%) and brine salinity. After reaching the compressive strength, the resistivity reduction of the brine-saturated samples varies from 5.7 Ω·m to 25.7 Ω·m (average: 13.3 Ω·m). This reduction shows a linearly positive correlation with the resistivity observed post cracking. The intrusion of conductive fluid and the generation of the fracture system in shale are the primary controlling factors for resistivity reduction. The resistivity after cracking is influenced by both the intruded saltwater salinity and fracture density. [**Conclusion**] This research elucidates the influence mechanism of tectonic fault zones on shale resistivity and enhances the theoretical framework for understanding the genesis of low-resistivity shale, with significant implications for the exploration and development of low-resistivity shale formations.

Key words: low-resistivity shale；low-resistivity origin；fracture；formation water；Sichuan Basin；WuFeng-Longmaxi Fromations；triaxial compression test

Received：2023-09-20；Revised：2023-12-05；Accepted：2023-12-12

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230533