



## Research Article

# Pore Connectivity of Low-resistivity Shales in the Changning Area and Its Influence on Resistivity

Ruihua Chen<sup>1,2</sup> , Zhenxue Jiang<sup>1,\*</sup> , Xing Liang<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, China

<sup>2</sup>College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, China

<sup>3</sup>Exploration and Development Integration Center, PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou, China

## Abstract

To clarify the differences in pore connectivity in different directions within low-resistivity shale reservoirs, identify factors influencing the connectivity of low-resistivity shale reservoirs, and further discuss the impact of connectivity on rock resistivity, the marine organic-rich low-resistivity shale of the Longmaxi Formation in the Changning area of the Sichuan Basin was selected as the research object. Experiments such as X-ray diffraction mineral composition analysis and spontaneous imbibition were conducted to investigate the differences in pore connectivity of low-resistivity shale. The results indicate that the overall pore connectivity of low-resistivity shale is poor, with better connectivity parallel to the bedding direction than perpendicular to it. Different mineral contents have varying controlling effects on inorganic pore connectivity, with clay minerals playing a significant role in controlling spontaneous imbibition. Organic matter content and maturity have different effects on organic pore connectivity. Higher organic matter content corresponds to better connectivity of organic pores. When maturity is below 3.0%, higher maturity favors improved connectivity, while beyond this threshold, it adversely affects connectivity. Both inorganic and organic pore connectivity exhibit a strong negative correlation with shale resistivity, suggesting that formation water in shale pores can form effective conductive pathways. Formation water content plays a crucial role in controlling resistivity, which is of great significance for further research on the causes of low resistivity in this region.

## Keywords

Low-resistivity Shale, Pore Connectivity, Spontaneous Imbibition, Changning Area

\*Correspondence: Zhenxue Jiang (jiangzx@cup.edu.cn)

Received: 19 March 2026; Accepted: 17 April 2026; Published: 30 April 2026



Copyright: © The Author(s), 2026. Published by Science Publishing Group. This is an **Open Access** article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

# 长宁地区低阻页岩孔隙连通性及其对电阻率的影响

陈瑞华<sup>1,2</sup>, 姜振学<sup>1\*</sup>, 梁兴<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 油气资源与工程国家重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京, 中国

<sup>2</sup> 地球科学学院, 中国石油大学(北京), 北京, 中国

<sup>3</sup> 勘探开发一体化中心, 中国石油浙江油田公司, 杭州, 中国

## 摘要

为明确低电阻页岩储层不同方向孔隙连通性差异, 确定低阻页岩储层连通性影响因素, 并进一步讨论连通性对于岩石电阻率的影响, 选择四川盆地长宁地区龙马溪组海相富有机质低阻页岩为研究对象, 运用 X 射线衍射矿物组分测定、自发渗吸等实验, 探讨了低电阻页岩的孔隙连通性差异。结果表明: 低阻页岩的整体的孔隙连通性较差, 平行层理方向的连通性好于垂直层理, 不同的矿物含量对于无机孔连通性的控制作用不同, 粘土矿物对自发渗吸的控制作用显著强于其他矿物。有机质含量和成熟度对于有机孔连通性的影响不同, 有机质含量越高有机孔的连通性越好, 成熟度在低于 3.0% 阶段, 成熟度越高越有利于连通性变好, 超过之后对连通性起不利的影 响。无机孔和有机孔的连通性与页岩电阻率都具有较好的负相关性, 表明页岩孔隙中地层水可以形成较好的导电电路, 地层水含量是控制电阻率的关键因素, 这对进一步研究本地区低阻成因具有重要的意义。

## 关键词

低阻页岩, 孔隙连通性, 自发渗吸, 长宁地区

## 1. 引言

美国的页岩气革命改变了世界能源供给格局, 而我国在 2010 年第一口页岩气井解决了有无页岩气的问题, 发展至今, 我国页岩气勘探开发已经经历十多年, 已经取得重大突破, 根据国家能源局 2026 年数据, 2025 年我国页岩气产量已达到  $270 \times 10^8 \text{m}^3$ , 成为我国天然气的重要来源之一。四川盆地作为我页岩气开发的主要页岩气主要产区, 具有极大的资源量[1, 2], 已经建成了涪陵、长宁、昭通等国家页岩气示范区。长宁—威远地区页岩气在十三五实现商业开发, 年产量已经突破  $100 \times 10^8 \text{m}^3$ , 具有广阔的勘探前景。在长宁地区页岩气开发过程中, 钻遇了大量低电阻率的页岩气储层, 这些低阻储层的含气量相差很大, 部分低阻井完全产水, 而有些低阻井具有较好的产气量。在传统认识中, 低电阻率的储层主要是含水饱和度所致, 对于较好的含气储层, 储层孔隙中含水饱和度较低, 具有较高的含气饱和度, 由于甲烷气体本身导电性较差, 含有页岩气的储层一般在测井中表现为较高的电阻率。相对于常规的页岩气储层的高阻特征, 本地区低阻的出现导致使用测井资料来评价储层含气性上出现的很大的困难。前人通过对

低阻的研究表明页岩低阻的控制因素主要包括了矿物组分、有机质石墨化程度、地层水含量[3]。针对长宁地区, 王玉满等人认为有机质的石墨化对于低阻具有重要的贡献[4], 王滢等人认为本地区低阻的成因是多种因素的共同影响相互叠加导致的结果, 储层低阻不只与地层水的含量有关, 还与地层水在储层孔隙中分布的形式有关[5]。在砂岩储层中, 岩石的导电路径主要是由高矿化度的地层水构成, 地层水的连通性主要受控于岩石中孔隙的连通性, 孔隙连通性控制了地层水的连通性进而控制了导电网络的连通性, 考虑到页岩储层与传统的砂岩储层不同, 页岩储层本身具有低孔低渗的特点, 页岩中有限的孔隙和喉道空间是否可以保证孔隙中有足够的联通地层水作为导电介质而导致页岩低阻的形成还需进一步明确[6]。Handy 等人建立模型通过自发渗吸来表征储层的孔隙连通性[7], 岩石的孔隙结构和矿物组成及流体的性质是影响自发渗吸的主要因素, 同时这些因素也是页岩的低阻形成的重要控制因素, 本次研究主要通过对测井数据结合岩心自发渗吸、全岩

XRD、TOC测定等实验，来讨论本地区孔隙连通性对低阻页岩电阻率的影响，进而明确地层水和页岩骨架

矿物对于页岩低阻的控制作用，为评价长宁地区页岩低阻储层提供一定的借鉴。

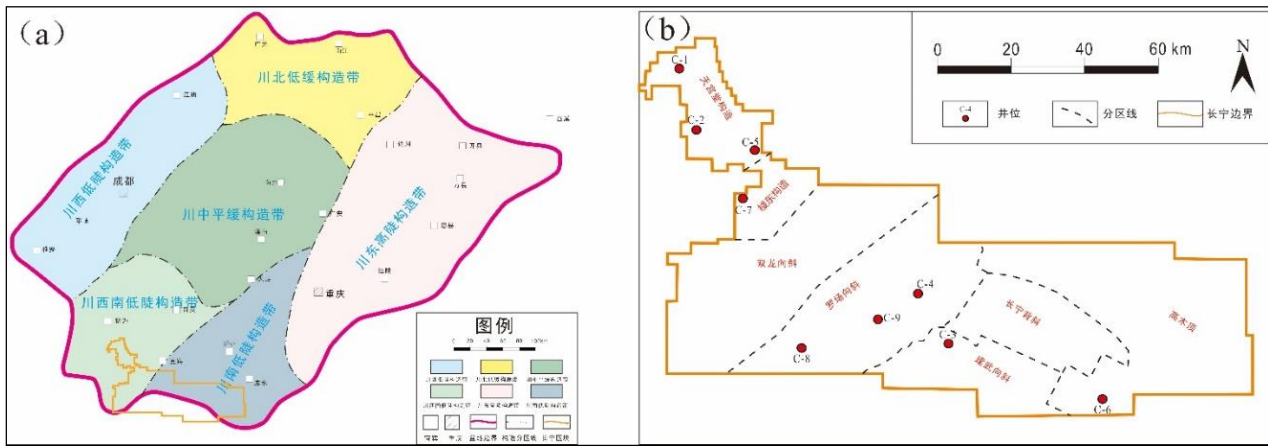


图1 四川盆地构造分区及长宁地区取样井位图。

## 2. 研究区地质概况

长宁地区位于四川盆地南部，位于四川省宜宾市境内，其南侧为黔西北宽缓褶皱带，东北部是川南低缓褶皱带，西北部为川西南低缓断褶带[8]，经历了多期构造作用，主力勘探开发的页岩气产层是下志留统龙马溪组龙一段1亚段，厚度40~50m。龙马溪组页岩是典型的海相页岩，受到四川盆地东南部构造作用而抬升，从开阔的海洋环境转变为局限的海洋环境，形成了一套有机质含量较高的海相黑色泥质页岩。龙马溪组主要划分为龙一段和龙二段，龙一段划分为龙一<sub>1</sub>亚段和龙一<sub>2</sub>亚段，龙一段<sub>1</sub>亚段划分为四个小层。本次研究层位为龙马溪组龙一段<sub>1</sub>亚段，本地区主要

研究层在白垩系经历最大埋深超过5500m，现今其成熟度普遍大于2.0%，处于过成熟度阶段。

## 3. 分析测试方法

### 3.1. 实验样品

本次研究样品取自四川盆地长宁地区重点勘探区域，选取不同构造部位9口页岩气井的下志留统龙马溪组龙一<sub>1</sub>亚段样品开展实验，样品的电阻率均小于20Ω·m，均具有低电阻特征，每口井取一组样品，共9组样品，每组样品完成4样次实验。样品测试总有机碳含量在2.59%~6.93%之间(表1)，本地区的有机质含量都较高，均大于2.5%，本次实验全部取用龙马溪组底部富有机质层段的样品。

表1 样品基本信息。

井名	深度/m	TOC/%	测井电阻/(Ω·m)	R <sub>0</sub> /%
c-1	3506.06	2.59	19.77	3.37
c-2	3782.43	2.78	16.38	2.70
c-3	3594.66	6.85	11.53	2.93
c-4	2344.74	3.37	9.71	2.83
c-5	3933.41	4.58	8.21	3.00
c-6	3195.31	3.77	1.54	2.90
c-7	3639.60	3.48	1.13	3.30
c-8	3519.33	3.38	0.39	3.22
c-9	4327.14	6.93	0.19	3.00

## 3.2. 实验仪器及方法原理

### 3.2.1. 自发渗吸实验

自发渗吸是指岩石中一种润湿相流体在毛细管力的作用下自发的取代另一种非润湿相流体的流动过程,其核心受力是孔隙内多相流体的毛细管力[9, 10],对于自发渗吸的研究,其最开始是指出现在油气田开发压裂过程中压裂液滞留在储层的这一现象,进一步研究之后发现自发渗吸实验不仅可以用来对岩心的润湿性进行研究,通过孔隙网络模拟结果和渗流理论,自发渗吸实验的曲线斜率也可以用于量化的评价孔隙的连通性[11]。

实验使用边长1cm的立方块,每个深度分别选取平行(P)和垂直(T)于层理面的样品,样品的顶部和底部不做处理,其余四面使用环氧树脂覆盖,以隔绝与液体和空气的接触。实验样品处理完之后放入干燥箱烘干48小时,干燥后取出,放入自发渗吸实验装置上,分别进行吸水(离子

水(W))和吸油(正癸烷(O))实验。使用自动记录每秒样品的重量数据变化。通过重量的增加速率来确定样品液体吸入的快慢情况,进而使用自发渗吸的斜率来反应页岩孔隙的连通性[12, 13]。

### 3.2.2. X射线衍射实验

使用X射线衍射来确定岩心的矿物含量(XRD),实验使用MiniFlex600/600-C X射线衍射仪进行测量,首先将岩心研磨成200目的粉末,之后压制成薄片,进行测量。

### 3.2.3. 有机碳实验

样品的有机碳含量(TOC)使用TOC-LCPH硫碳分析仪测试,测试前将岩心研磨制成200目的粉末,采用盐酸进行酸洗,之后使用蒸馏水冲洗,待样品呈现中性,放入烘干箱中干燥48小时,制备成标准溶液使用。

## 4. 模型和结果

### 4.1. 自发渗吸结果

表2 自发渗吸斜率数据表。

序号	水吸实验(W)		油吸实验(O)	
	平行层理(P)	垂直层理(T)	平行层理(P)	垂直层理(T)
c-1	0.26	0.30	0.39	0.40
c-2	0.24	0.25	0.46	0.25
c-3	0.26	0.23	0.53	0.31
c-4	0.36	0.35	0.43	0.29
c-5	0.35	0.29	0.46	0.37
c-6	0.38	0.32	0.47	0.39
c-7	0.39	0.33	0.44	0.35
c-8	0.45	0.44	0.38	0.35
c-9	0.32	0.29	0.54	0.37

实验结果如表3,对于使用去离子水的样品,其平行层理自发渗吸斜率在0.24~0.45之间,平均值在0.33,中位线在0.35,分布较为分散,垂直平行层理自发渗吸斜率在0.23~0.44之间,平均值在0.31,其中位线在0.30,分布较为集中。油吸样品的平行层理自发渗吸斜率普遍

较高,在0.38~0.54之间,平均值在0.45,中位线在0.45,分布较为集中,垂直平行层理自发渗吸斜率在0.25~0.40之间,平均值在0.34,中位线在0.35,分布较为集中(图2a)。

## 4.2. XRD 矿物分析结果

表3为研究的低阻页岩按样品X-射线全岩衍射测试结果，可看出矿物组分中石英的含量最高，在38.4%~64%之

间，平均在49.5%。方解石含量次之，在6%~30%之间，平均在17.1%。粘土含量在8%~32.4%之间，平均在15%。黄铁矿含量在2%~6%之间平均为3.4%。

表3 样品各矿物组分表。

序号	矿物含量/%					
	石英	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	黏土矿物
c-1	69.5	2.4	7.4	3.4	3.0	14.3
c-2	41.2	8.4	8.9	5.9	3.2	32.4
c-3	43.0	4.0	23.0	20.0	2.0	8.0
c-4	43.4	1.8	21.6	16.6	2.0	14.6
c-5	51.1	2.7	21.7	11.2	2.3	11.0
c-6	38.4	3.7	27.5	13.8	2.5	14.3
c-7	40.0	4.0	30.0	10.0	6.0	10.0
c-8	61.6	6.7	7.4	4.7	5.7	13.9
c-9	64.0	5.0	6.0	8.0	3.0	14.0

## 5. 讨论

### 5.1. 低阻页岩岩石连通性发育特征

在前人的研究中，页岩孔隙结构非常复杂，按照成因类型进行划分可以分为无机孔、有机孔[14, 15]。有机孔主

要发育在有机质颗粒中，无机孔主要发育在无机矿物中。有机孔和无机孔本生对于页岩电阻率的影响是不同的，有机孔更加偏向于油润湿，而无机孔偏向于水润湿，所以我们可以利用润湿性的差异，通过不同流体的来确认不同类型孔隙[16, 17]。在自发渗吸实验中我们通过不同的流体自发渗吸的斜率来区分不同孔隙类型的连通性，使用油吸的斜率来代表亲油的有机质孔隙的连通性，使用水吸的斜率来代表亲水的无机孔的连通性。

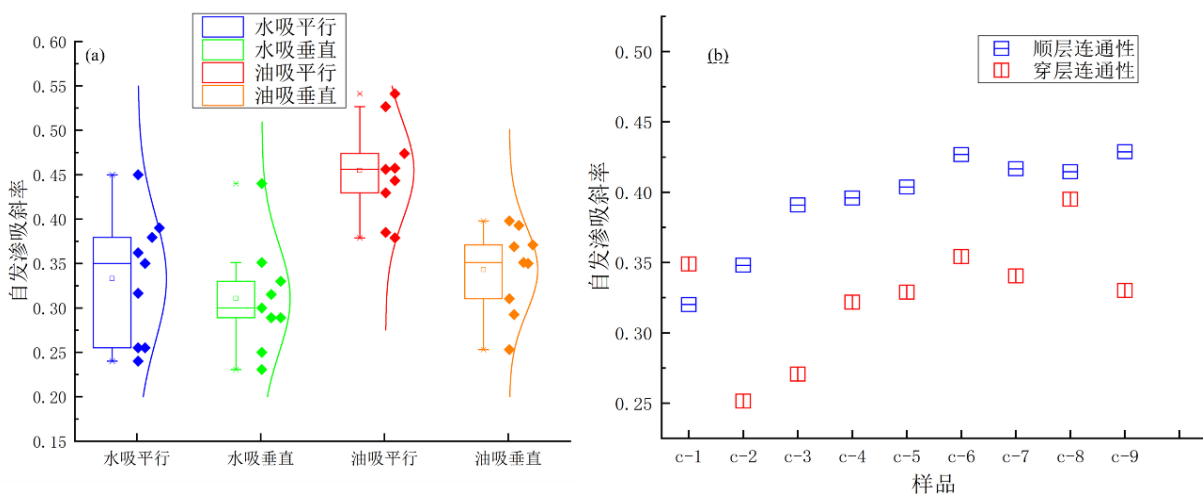


图2 自发渗吸斜率数据统计图。

通过表2中自发渗吸的数据的分布可以看出, 低阻页岩的自发渗吸的斜率多数小于0.5, 表明低阻页岩整体的孔隙连通性较差。由于不同类型孔隙的润湿性不同, 润湿性的不同对自发渗吸会有一定的影响, 所以为了去除不同流体对于自发渗吸的影响, 将同一组样品按照前人对于川南页岩的有机孔(34%)和无机孔(66%)占比[18], 将油样水平样品和水样水平样品的斜率进行加权平均, 通过加权平均后的斜率评价顺层样品和穿层样品孔隙的连通性。自发渗吸的斜率都大于穿层的样品, 表明本地区低阻

页岩平行层理的孔隙连通性都是好于垂直层理的, 更有利与内部流体的顺层流动。对于页岩气来看, 页岩储层在垂向上的扩散能力弱于水平层理的运移能力。

通过图2b我们可以看出, 对于长宁地区低阻页岩来说, 除了样品c-1, 其他样品的顺层自发渗吸的斜率都大于穿层的样品, 表明本地区低阻页岩平行层理的孔隙连通性都是好于垂直层理的, 更有利与内部流体的顺层流动。对于页岩气来看, 页岩储层在垂向上的扩散能力弱于水平层理的运移能力。

## 5.2. 有机孔和无机孔的连通性及其影响因素

### 5.2.1. 有机孔连通性及其影响因素

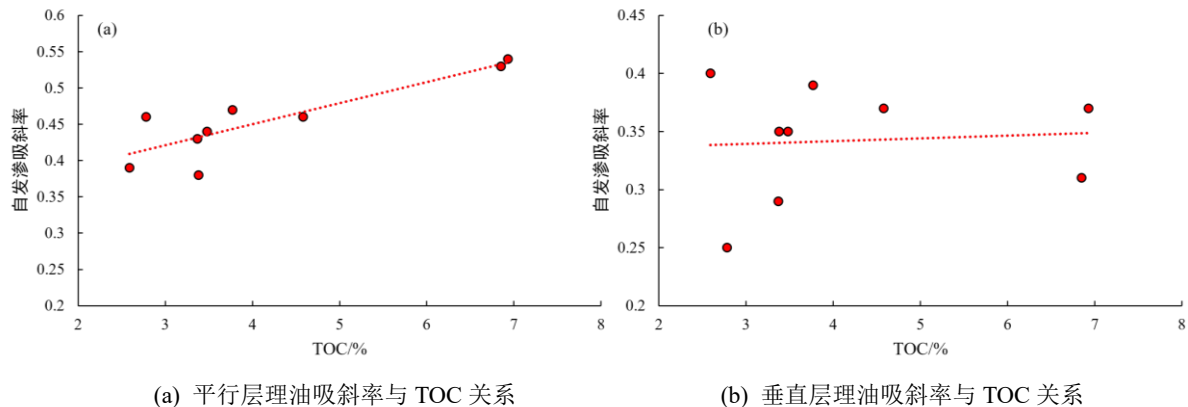


图3 油吸样品自发渗吸斜率与 TOC 关系图。

油吸样品水平层理和垂直层理自发渗吸斜率平均值与TOC有较好的相关性, 对于有机质孔隙的连通性, 有机质含量对其呈现有利的影响, 页岩中有机质含量的增加会导致有机孔数量的增加, 有机孔的数量增加会使页岩中有机孔的连通性变好。对于页岩中有机孔的连通性, 不但有机孔数量会影响, 有机孔在页岩中的分布形式也会影响其连通性。在图3a可以看出, 平行层理面的油吸样品自发渗吸斜率与TOC有更好的相关性。垂直层理面的油吸样品自发渗吸斜率与TOC相关性较差(图3b), 虽然总体随着TOC含量增加, 连通性有变好的趋势, 但相关性极差无法表现其相关性。这表示对于有机质中连通的有机孔在页岩中主要以顺层分布为主。有机质在沉积时期主要是以水平分布, 导致在有机质中发育的有机孔的分布在页岩中主要以平行层理分布为主, 造成平行层理中有机孔连通性随有机质

含量变化明显, 而垂直层理的有机孔连通性与有机质含量的相关性差。

有机质成熟度对于有机孔连通性的影响(图4), 有机质孔隙的连通性先随着成熟度的增加而变好, 当成熟度超过3.0%后, 随着成熟度的增加有机质孔隙连通性变差, 呈现一个先增加后减小的趋势。这于有机孔随成熟度发育的趋势是相同的, 有机孔数量变化趋势和孔隙结构的发育趋势主要控制了有机质孔隙的连通性的变化。根据前人研究, 有机孔的发育在成熟度2.0%~3.0%阶段, 随着成熟度的增加, 有机质孔数量和孔隙结构得发育都变好。当成熟度超过3.0%之后, 有机质发生石墨化(碳化)导致有机质孔隙开始发生坍塌[19], 孔隙发育变差, 这也导致孔隙整体的连通性也变差。

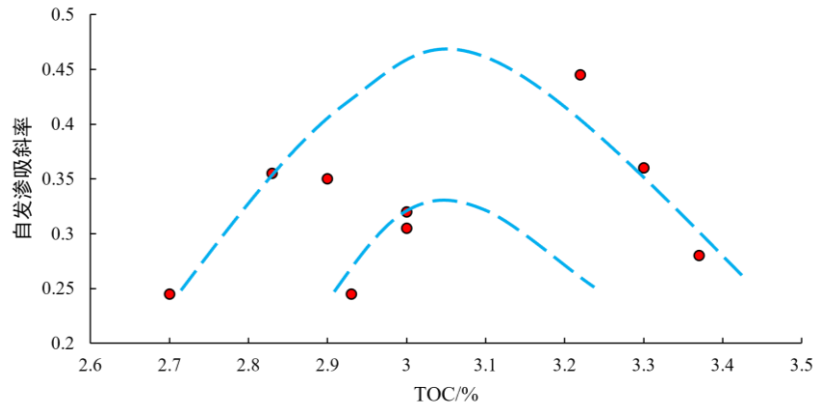


图 4 油吸样品自发渗吸斜率平均值与成熟度相关性图。

### 5.2.2. 无机孔连通性及其影响因素

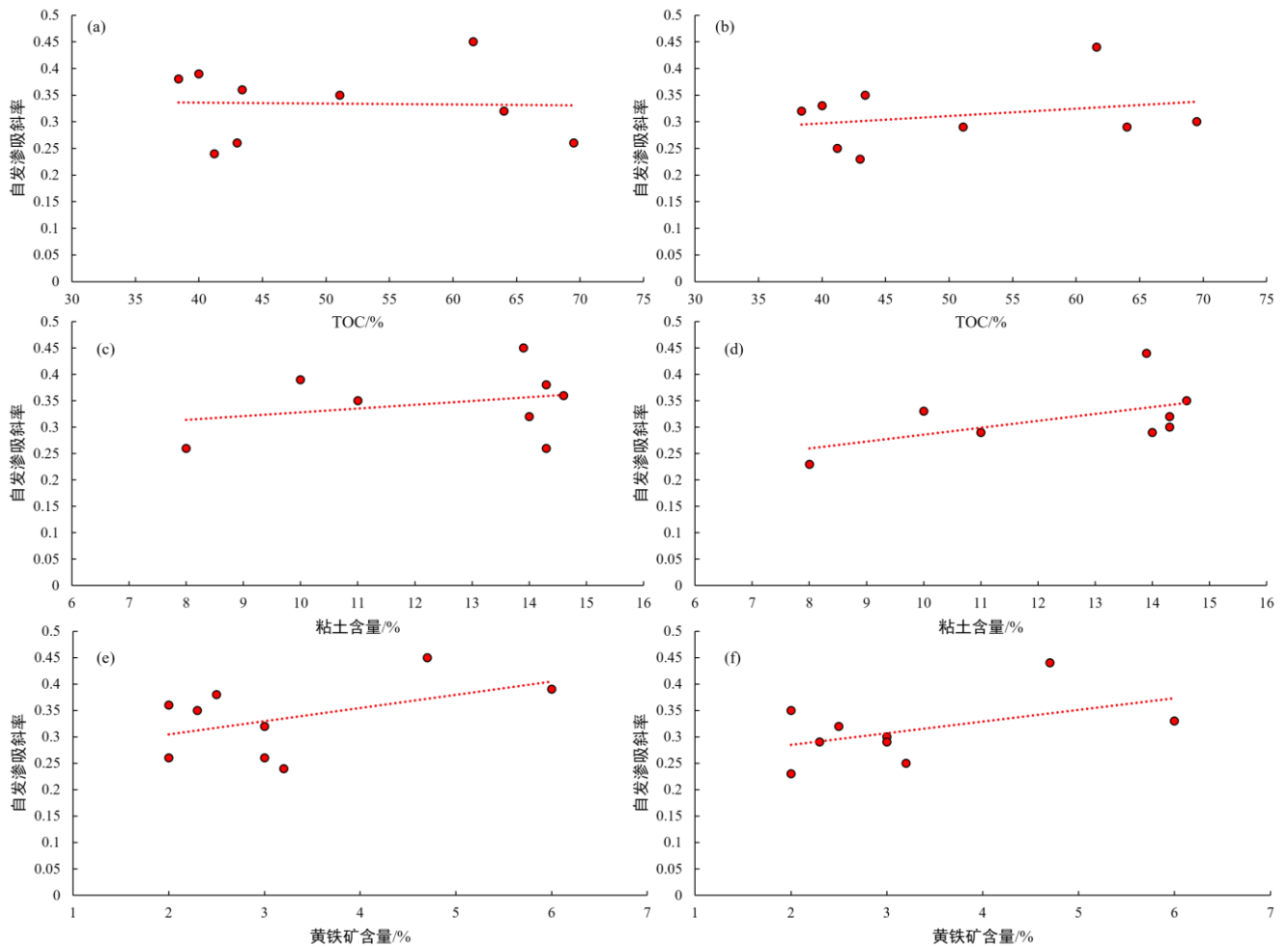


图 5 水吸自发渗吸斜率与不同矿物含量相关性图。

(a) 平行层理样品水吸自发渗吸斜率与石英含量关系图；(b) 垂直层理样品水吸自发渗吸斜率与石英含量关系图；(c) 平行层理样品水吸自发渗吸斜率与粘土含量关系图；(d) 垂直层理样品水吸自发渗吸斜率与粘土含量关系图；(e) 黄铁矿含量与平行层理样品水吸自发渗吸斜率关系图；(f) 黄铁矿含量与垂直层理样品水吸自发渗吸斜率关系图

对于无机孔隙对于页岩的整体孔隙也具有重要的贡献,无机孔隙更加偏向于水润湿,使用去离子水作为自吸流体来对页岩无机孔隙的连通性进行评价,本地区低阻页岩矿物含量中石英矿物含量最高,石英颗粒是无机孔的发育的主要矿物颗粒之一,石英矿物颗粒之间接触边缘普遍发育粒间孔,对于无机孔的发育具有重要影响,水自发渗吸斜率与石英矿物含量关系如图5a和图5b,石英矿物含量对于无论是平行层理还是垂直层理的自发渗吸斜率都呈现为正相关性,随着石英含量的增加,样品无机孔的连通性都变好。页岩中的石英含量越高无机孔的发育的数量越多,越有利于无机孔的连通性变好。但其本身的相关性较弱,表明石英对于无机孔连通性的控制作用有限。

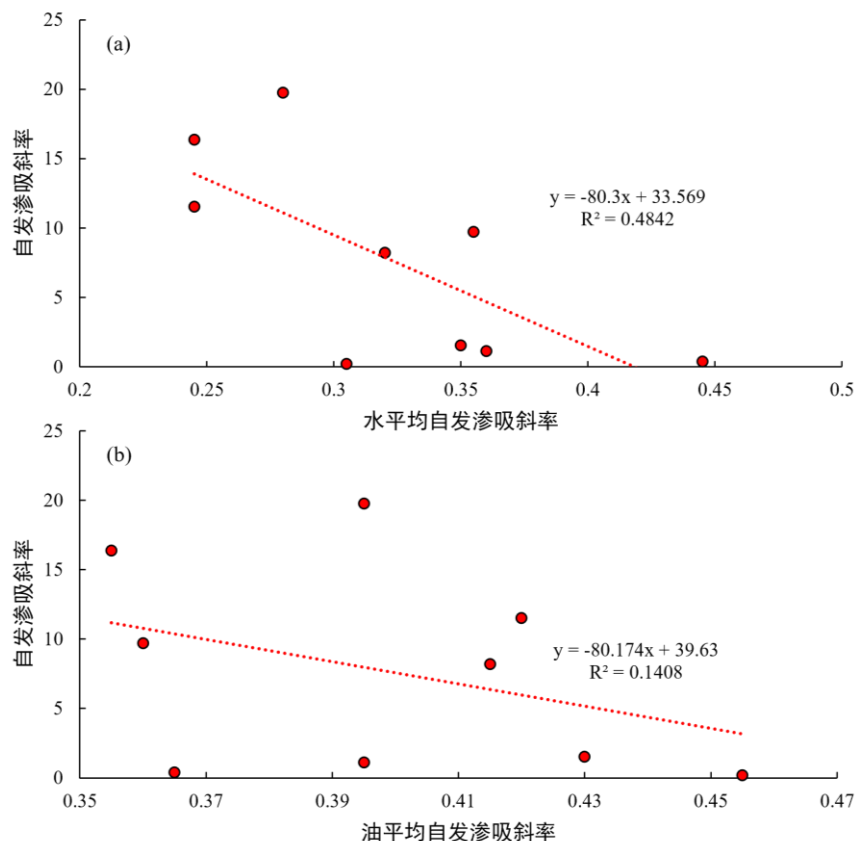
粘土矿物含量在地层条件下对于地层水的分布和无机孔连通具有重要的影响。通过图5c和图5d可以看到,粘土矿物与水吸样品顺层和穿层自发渗吸斜率都具有较好的相关性,随着粘土含量的增加,自发渗吸的斜率增加,无机孔的连通性越好,粘土矿物含量增加会导致自发渗吸斜率升高,这与粘土矿物本身的性质有关,粘土矿物具有较强的水润湿性且具有较强吸附水的能力,粘土含量的增加,使得束缚水饱和度增加,会使自发渗吸样品的斜率升

高,同时粘土矿物吸附地层水后具有双电层结构,在粘土表面形成阳离子交换作用增强导电性,进一步促进了导电网络的形成[20],将降低岩石电阻率。粘土矿物其本身粘土层间会发育粒内孔,同时与石英、长石、有机质等之间挤压也会发育长条或者不规则的多边形粒间孔,而且其形成的孔隙本身具有一定的连通性,对于页岩整体孔隙的连通性具有重要影响。

黄铁矿本身作为低阻矿物,其存在会导致页岩整体的电阻变低,对于页岩低阻具有一定的贡献,同时黄铁矿颗粒之间以及黄铁矿与有机质之间的粒间孔也较为发育,通过分析数据表明(图5e和图5f),无机孔的连通性与黄铁矿含量呈现正相关关系,但两者的相关性较弱,黄铁矿对于无机孔的连通性有一定的贡献,但其影响很有限。

无机矿物含量对于无机孔垂直和平行层理连通性的控制作用相差不多,没有明显的区别,表明无机矿物对无机孔发育的影响与层理方向相关性不强。无机孔的连通性相对于有机孔来看受层理的影响较小,无机孔在页岩言样品整体的发育更加均匀,有机孔连通性受层理影响大,其在不同层理方向上的非均质性更强。

### 5.2.3. 孔隙连通性对于电阻率的影响



(a) 电阻率与水吸自发渗吸斜率关系图; (b) 电阻率与油吸自发渗吸斜率关系

图 6 电阻率与不同流体自发渗吸斜率数据关系图。

由于地层水具有较高的矿化度,富含丰富的导电离子,所以岩石导电时电子的移动路径与孔隙中地层水的连通路径几乎是相同的,地层水是否可以形成较好的连通路径对于测井电阻率值具有很大的影响,对于本地区低阻页岩,其本身具有低孔低渗的特点,由于其本身孔隙度低的特点导致相同含水饱和度的情况下页岩储层中地层水绝对含值较少,由于其低渗透率的特点,相同孔隙度情况下孔隙中的地层水连通性比较差的。在这种情况下,页岩的地层水是否连通可以形成导电网络,主要受控于受孔隙连通性。测井对于岩石电阻的测量是岩石本身电性的一个响应,对于本次实验选取的样品,为 $1\times 1\text{cm}$ 的块状样,无论是水平层理的连通性还是垂直层理的连通性对于电阻都具有一定影响,所以我们取用水平和垂直样品的平均值来代表本样品综合的连通性,图6为样品综合连通性与测井电阻率的关系图。通过图6可知,岩石的电阻率与孔隙自发渗吸的斜率具有较好的负相关关系,无论是对于水吸的实验还是油吸的实验,随着自发渗吸的斜率越高,页岩孔隙的连通性越好,测井的电阻率值越低,表明无论是无机孔还是有机孔的连通性对于页岩电阻率都具有重要的影响。对比图6a和图6b可看出无机孔连通性与电阻率的相关性好于有机孔连通性与电阻率的相关性,表明在地层条件下页岩无机孔的连通性对电阻的控制作用更加明显,由于无机孔更加偏向于水润湿,无机孔中的束缚水饱和度也更高也更容易形成很好的导电网络。

页岩有机孔对于电阻率也具有一定的控制作用,但其本身对于电阻的影响弱于无机孔,有机孔偏向于油润湿,含水饱和度低于无机孔,相对于无机孔含气饱和度更高,但其在平行层理的连通性更好,所以对于电阻也具有一定的控制作用,而且有机孔主要发育在有机质内部,当有机质成熟度较高时,有机质发生石墨化,其本身的电阻也开始降低,成为页岩中的低电阻组分,此时不只是内部孔隙充填地层水后出现较低的导电通路,其本身的骨架也构成导电的通路,对于页岩电阻的控制增强。有机孔连通性对于电阻的控制不仅仅体现在有机孔隙含水,在其具有较高的演化程度后,有机质颗粒本身的连续分布和连接也会导致储层的低阻。

综合来看,本地区的低阻页岩孔隙连通性与页岩电阻率具有较好的相关性,只有当孔隙中充填地层水可以构成较好的导电路径时,孔隙连通性才会与电阻产生相关关系,同时,地层水在储层中是否可以形成完善的导电网络,是决定是否可以通过阿尔齐公式模型来计算含水饱和度的基础。通过自发渗吸斜率与电阻率的关系来看,表明本地区虽然是低孔低渗的页岩储层,但页岩孔隙中的地层水含量是可以形成较为完善的导电通路,地层水对于本地区电阻的具有重要控制作用。

## 6. 结论

川南地区龙马溪组页岩的孔隙连通性总体较低,水平层理面实验样品自发渗吸斜率普遍高于垂直层理面样品的斜率。

有机质的含量的增加有利于有机孔的连通性变好,有机质成熟度对有机质连通性的控制在成熟度低于3.0%时有利,之后对于连通性的变化不利。石英和黄铁矿含量对于无机孔连通性的具有一定积极的影响,粘土矿物含量对无机孔连通性的控制作用最明显。

无机孔和有机孔的连通性变好都会导致低阻页岩的电阻更低,地层水的连通性与页岩电阻的相关性较好,本地区低阻页岩孔隙内部的地层水含量是足够可以形成完善的导电通路的。地层水对于低阻成因具有重要控制作用。

## 基金项目

本文为国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U24A20592)和国家自然科学基金面上项目(42272137)的阶段性成果之一。

## 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. <https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2021.01.001>
- [2] 姜振学, 李鑫, 王幸蒙, 等. 中国南方典型页岩孔隙特征差异及其控制因素 [J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 41-53. <https://doi.org/10.11743/ogg20210104>
- [3] 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. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-9727.2015.06.07>
- [4] 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. <https://doi.org/10.11698/PED.2018.03.03>
- [5] 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. <https://doi.org/10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202104014>
- [6] Zixin Xue, Zhenxue Jiang, Xin Wang, et al. Genetic mechanism of low resistivity in high-mature marine shale: Insights from the study on pore structure and organic matter graphitization [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 144: 105825. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105825>

- [7] Zhiye Gao, Qinong Hu. Initial water saturation and imbibition fluid affect spontaneous imbibition into Barnett shale samples [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34: 541-551. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.07.038>
- [8] 郭旭升, 李宇平, 腾格尔, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组深水陆棚相页岩生储机理探讨 [J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(1): 193-201. <https://doi.org/10.11698/PED.2020.01.19>
- [9] 李耀华, 宋岩, 徐兴友, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段凝灰质页岩油层的润湿性及自发渗吸特征 [J]. *石油学报*, 2020, 41(10): 1229-1237. <https://doi.org/10.7623/syxb202010007>
- [10] 郭建春, 陶亮, 陈迟, 等. 川南龙马溪组页岩储层水相渗吸规律 [J]. *计算物理*, 2021, 38(5): 565-572. <https://doi.org/10.19596/j.cnki.1001-246x.8313>
- [11] 高之业, 熊书琴, 成雨, 等. 川南地区龙马溪组页岩储层水接触角及其稳定性影响因素 [J]. *特种油气藏*, 2021, 28(5): 10-16. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6535.2021.05.002>
- [12] 蔡建超. 多孔介质自发渗吸关键问题与思考 [J]. *计算物理*, 2021, 38(5): 505-512. <https://doi.org/10.19596/j.cnki.1001-246x.8440>
- [13] 叶洪涛, 宁正福, 王庆, 等. 页岩储层自发渗吸实验及润湿性研究 [J]. *断块油气田*, 2019, 26(01): 84-87. <https://doi.org/CNKI:SUN:DKYT.0.2019-01-020>
- [14] 黄睿哲, 姜振学, 高之业, 等. 页岩储层组构特征对自发渗吸的影响 [J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(1): <https://doi.org/CNKI:SUN:YQCS.0.2017-01-019>
- [15] Li X, Jiang Z, Wang S, et al. Differences of marine and transitional shales in the case of dominant pore types and exploration strategies, in China [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022: 104628. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104628>
- [16] 李军, 金武军, 王亮, 等. 页岩气岩心核磁共振 T<sub>2</sub> 与孔径尺寸定量关系 [J]. *测井技术*, 2016, 40(4): 460-464. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-2552.2011.02.025>
- [17] 姚艳斌, 刘大锰. 基于核磁共振弛豫谱技术的页岩储层物性与流体特征研究 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 181-189. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2017.4002>
- [18] 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. <https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2013.07.001>
- [19] Wang X, Jiang Z, Jiang S, et al. Pore Evolution and Formation Mechanism of Organic-Rich Shales in the Whole Process of Hydrocarbon Generation: Study of Artificial and Natural Shale Samples [J]. *Energy & Fuels*, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03789>
- [20] 邹德鹏, 柯式镇, 李君建, 等. 含黏土矿物岩心电频散特性实验研究 [J]. *测井技术*, 2018, 42(3): 261-266. <https://doi.org/10.16489/j.issn.1004-1338.2018.03.003>