

# Measurement and Analysis of Physical Parameters of Shale of Longmaxi Area

Jionglong Xin, Hongqi Liu, Nan Zhang, Kaixu Zong, Yutong Zhang

School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan  
Email: lhqjp1@126.com

Received: Jan. 4<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2018; published: Jan. 29<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Electrical conductivity and dielectric are the basic properties of the reservoir. In the exploration and development of unconventional reservoir, the conventional electric method cannot adapt to the requirements of field operation, and the dielectric properties of the rock are more obvious in the dense reservoir. In this paper, the main content for the use of shale borehole core simulation environment, under the laboratory environment, different parameters of the core of resistance capacity measurement, based on the analysis of measured data regularity of electric double core physical properties. The experimental results show that the resistivity and capacitance of shale are decreased with the increase of frequency, but the dispersion effect of the capacitance parameter is higher than that in the same condition. The study found that different frequency bands have different characteristics of the resistance of rock, 1 Hz - 10 kHz, the change of capacitance rate is large, 10 kHz - 100 kHz, and the change in capacitance rate is small. The study also found that the frequency dispersion of core capacitance is closely related to the saturation of core, and the larger the water saturation of the same core, the more obvious the dispersion effect is. Finally, the statistics of core data and water saturation are used to provide a new way to evaluate saturation.

## Keywords

Core Tests, Litho-Electric Experiment, Resistivity, Capacitance, Frequency Dispersion, Saturation

---

# 龙马溪页岩物理参数测量与分析

辛炯堃, 刘红岐, 张 南, 宗开旭, 张雨桐

西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都  
Email: lhqjp1@126.com

收稿日期: 2018年1月4日; 录用日期: 2018年1月22日; 发布日期: 2018年1月29日

## 摘要

导电性和介电性是储层的两大电学基础性质。传统电法在非常规储层的勘探和开发中,越来越不能适应现场作业要求,而岩石的介电性能在致密储层中更加明显。本文主要内容为运用页岩岩心模拟井眼环境,在实验室环境下,进行不同岩心的阻容参数的测量,根据对测量数据的分析得出岩心物性的双电规律。实验表明,页岩电阻率和电容率随着频率的增加而降低,但其电容率参数的频散效应比同条件下的电阻率参数频散效应显著。研究发现,不同的频率段,岩石的阻容频散特征是存在差异的,1 Hz~10 kHz,电容率变化量大,10 kHz~100 kHz,电容率的变化量小。研究还发现,岩心电容率的频散与岩心的饱和度有密切关系,对于同一块岩心,含水饱和度越大,频散效应越明显。最后,统计岩心双电数据与含水饱和度的规律,为评价饱和度提供一种新的途径。

## 关键词

岩心测试, 岩电实验, 电阻率, 电容率, 频散, 饱和度

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

激电法测井是我国应用较广,效果甚好的一种电法测井方法。从50年代末开始研究并取得成效以来,已有30多年的发展历史。激发极化法在金属矿勘查中已获得广泛应用,其主要优点是在所有电子导电性的矿体或矿化体上,都能观测到明显的激电异常;而在能引起电阻率法异常的离子导体上,不会产生明显的激电异常。但常规激电法也经常受到不含矿的黄铁矿化和石墨化地层引起的非矿激电异常的干扰。此外,为了提高野外观测的信噪比,降低供电电流强度,近年人们注重在频率域中作激电观测(即频率域激电法或交流激电法。而在较高频段上的观测结果,必然会包含电磁效应,如何区分电磁效应和激电效应就成为了频率域激电法的一大难题。为了识别、分别提取及利用激电效应和电磁效应,区分不同矿和非矿激电异常,从上世纪70年代末期开始,国际上发展了频谱激电法(SIP),也称复电阻率法(CR) [1] [2]。虽然,早在上世纪50年代末, J. R. Wait 以其著名论文“双频法”开创了在频率域开展激电法的先河;但通过复电阻率频谱测量,分别提取电磁效应和激电效应,并识别激电异常,奠定频谱激电法基础的功劳,应属美国犹他大学 W. H. Pelton 博士和他的导师 S. H. Ward 等。1981年, K. L. Zonge 等提出利用复电阻率测量提取激电、电阻率和电磁散射参数,进行油气勘探,成功地利用复电阻率法和剩余电磁效应(REM)找到油气,使该方法在国际上获得重视和认可,进一步开拓了频谱激电法和复电阻率法的应用领域。我国从上世纪80年代初开始引进频谱激电法,并在方法的物性基础,基本理论,方法技术和实际应用等方面开展了全面和深入的研究,形成了比较完善的方法理论和应用技术体系,并在金属矿产和油气勘探中,取得一大批良好的地质找矿效果,对频谱激电法的发展做出了显著的贡献[3] [4] [5] [6]。自1997年起,胜利油田和美国的EMI公司合作,开展井间电磁成像系统的应用研究[7] [8],在胜利油田进行了井间实际测量并对采集的数据进行处理。大量研究表明,地层复电阻率解释的发展[9] [10]在改善油气评价的质量和能对确定储层的含油饱和度[11] [12]以及油田开发中后期水淹油层的水淹程度[13] [14] [15]等方面都能发挥有效的作用。

## 2. 实验测量

### 2.1. 实验材料

主要实验设备有日本 LCR 测量仪, BH-II 型高压真空饱和仪和 Galaz (格兰仕)微波炉、电子天平和游标卡尺。

### 2.2. 实验测量过程

首先,对岩心样品进行基础参数的称量,包括岩心高度、直径、干重等参数,用圆柱体体积计算公式计算出岩样体积,并在岩样饱和后测量其湿重数据,用体积法算出岩样孔隙度,测量及计算结果见表 1。

然后配制 0.125 mol/L 的盐溶液,测量过程中,将其倒入高压真空饱和仪的溶液室,把岩心放入岩心室,密封后,进行加压抽真空饱和。进行岩心的抽真空加压饱和。将岩心放入 BH-II 型高温高压真空饱和仪,在压力为 30 MPa,真空度为-0.092 MPa 条件下饱和 13~24 h 小时。待岩心 100% 饱和后,开始测量全饱和时的岩心电阻和电容参数。接下来,进行岩心烘干测量。将岩心放入微波炉进行烘干,在中火条件下烘干 5 分钟,取出岩心,测量其重量,重复以上步骤,直到相邻两次岩心重量相差 2 g 为止,计算其饱和度。然后连接 LCR 仪器进行测量。重复上述实验过程,统计每一次测量的重量与含水饱和度。所谓含水饱和度,即岩石孔隙中水的体积与孔隙体积之比。

$$S_w = \frac{V_w}{V_\phi}$$

式中:  $S_w$ ——含水饱和度, %;

$V_w$ ——岩石中水的体积,  $\text{cm}^3$ ;

$V_\phi$ ——岩石中孔隙的体积,  $\text{cm}^3$

测量的重量与含水饱和度计算见表 2。

## 3. 数据测量与数据分析

### 3.1. 岩心阻容参数测量

本次实验中,测量的频率范围是 1 Hz~100 KHz。按照以上的方法饱和 0.125 mol/L 盐溶液,对 1~4 号岩心进行烘干,烘干后在 1 Hz~100 kHz 的频率下进行阻容双电参数测量,对每次烘干测量后的电阻率数据记为  $R_{p1}$ ,  $R_{p2}$ ,  $R_{p3}$ ,  $R_{p4}$ , 每次烘干测量后的电容率数据记为  $C_{p1}$ ,  $C_{p2}$ ,  $C_{p3}$ ,  $C_{p4}$ 。测量时从 1 Hz~100 KHz 进行扫频,采用对数间隔步长,由于数据量较大,仅选取 4 号岩心部分数据进行列表,见表 3。

Table 1. Basic parameters of rock samples

表 1. 岩样基础参数

编号	高/cm	直径/cm	密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	干重/kg	体积/ $\text{cm}^3$	湿重/kg	孔隙度%
1	14.91	10.49	2.596	3.346	1288.895	3.358	0.931
2	14.87	10.50	2.612	3.364	1287.817	3.376	0.932
3	14.75	10.30	2.421	2.912	1202.950	2.972	4.988
4	14.75	10.30	2.597	3.124	1202.951	3.198	6.151

**Table 2.** Weight and saturation of core dried @ salinity of 7.3125 g/L  
**表 2.** 7.3125 g/L 矿化度下岩心烘干后重量与饱和度数据表

1	岩心重量/g	3358	3346	/	/
	饱和度/%	100	0	/	/
2	岩心重量/g	3376	3364	/	/
	饱和度/%	100	0	/	/
3	岩心重量/g	2972	2962	2960	2958
	饱和度/%	100	83	80	76
4	岩心重量/g	3198	3190	3184	3178
	饱和度/%	100	89	81	73

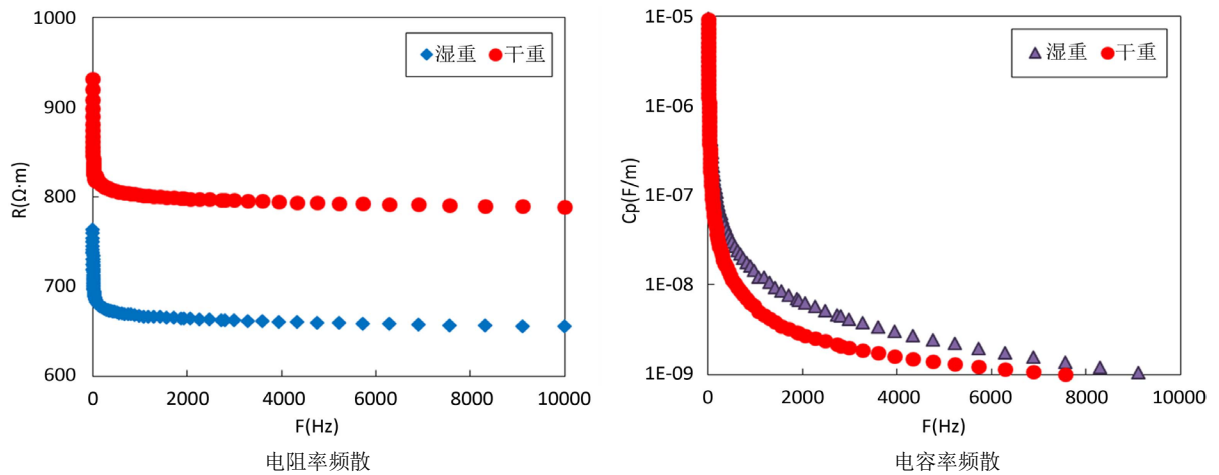
**Table 3.** Resistivity ( $\Omega\cdot m$ ) and capacitance (F/m) of core 4# @ salinity of 7.3125 g/L (part of data)  
**表 3.** 4 号岩心 7.3125 g/L 矿化度下部分频率电阻率( $\Omega\cdot m$ )、电容率(F/m)数据

Frequency	Cp1	Cp2	Cp3	Cp4	Rp1	Rp2	Rp3	Rp4
1	1.49E-04	1.64E-04	2.04E-04	2.04E-04	1.95E+02	1.71E+02	1.64E+02	1.38E+02
1.123	1.27E-04	1.40E-04	1.75E-04	1.75E-04	1.93E+02	1.69E+02	1.61E+02	1.36E+02
1.262	1.06E-04	1.18E-04	1.48E-04	1.48E-04	1.91E+02	1.68E+02	1.59E+02	1.35E+02
1.417	8.90E-05	9.96E-05	1.27E-04	1.27E-04	1.90E+02	1.66E+02	1.58E+02	1.33E+02
1.592	7.59E-05	8.52E-05	1.08E-04	1.08E-04	1.88E+02	1.65E+02	1.56E+02	1.32E+02
1.789	6.39E-05	7.17E-05	9.13E-05	9.13E-05	1.86E+02	1.64E+02	1.54E+02	1.31E+02
2.009	5.38E-05	6.10E-05	7.86E-05	7.86E-05	1.85E+02	1.63E+02	1.53E+02	1.30E+02
2.257	4.57E-05	5.18E-05	6.64E-05	6.64E-05	1.84E+02	1.61E+02	1.51E+02	1.29E+02
2.535	3.84E-05	4.40E-05	5.72E-05	5.72E-05	1.83E+02	1.60E+02	1.50E+02	1.28E+02
2.848	3.26E-05	3.73E-05	4.84E-05	4.84E-05	1.82E+02	1.59E+02	1.48E+02	1.27E+02
3.199	2.78E-05	3.20E-05	4.15E-05	4.15E-05	1.81E+02	1.58E+02	1.47E+02	1.26E+02
3.594	2.36E-05	2.71E-05	3.57E-05	3.57E-05	1.80E+02	1.57E+02	1.46E+02	1.25E+02
4.037	1.99E-05	2.30E-05	3.03E-05	3.03E-05	1.79E+02	1.57E+02	1.45E+02	1.24E+02
4.535	1.70E-05	1.98E-05	2.60E-05	2.60E-05	1.78E+02	1.56E+02	1.44E+02	1.23E+02
5.094	1.44E-05	1.69E-05	2.22E-05	2.22E-05	1.77E+02	1.55E+02	1.43E+02	1.22E+02
5.722	1.23E-05	1.44E-05	1.90E-05	1.90E-05	1.76E+02	1.54E+02	1.42E+02	1.22E+02
6.428	1.04E-05	1.22E-05	1.64E-05	1.64E-05	1.75E+02	1.53E+02	1.41E+02	1.21E+02
7.221	8.96E-06	1.05E-05	1.39E-05	1.39E-05	1.74E+02	1.53E+02	1.40E+02	1.20E+02

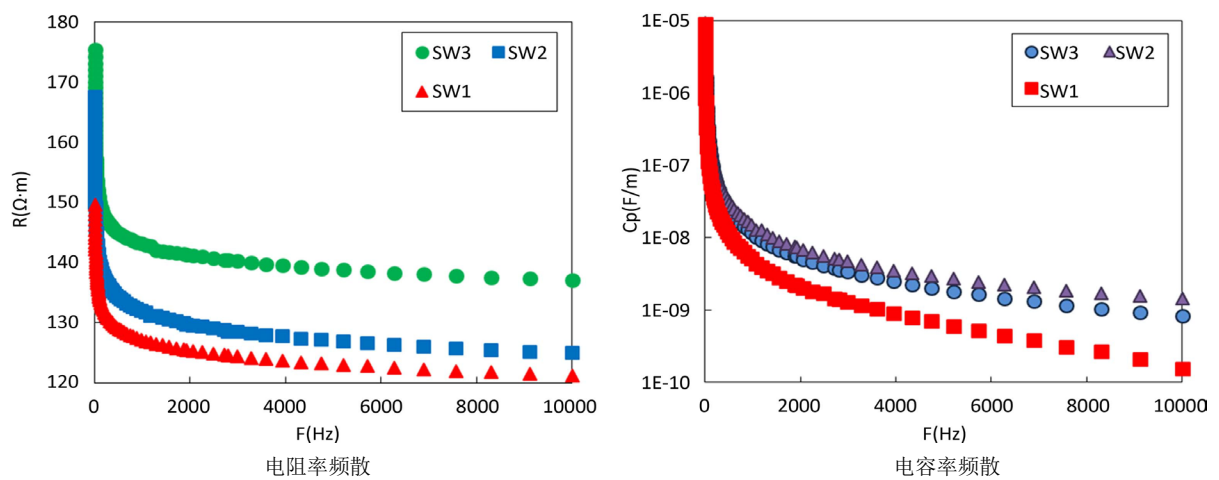
### 3.2. 岩心阻容参数分析

图 1 表示的是 2 号岩心在干重与湿重下的电阻率、电容率频散图；图 2 表示的是 3 号岩心在 3 种饱和度下( $Sw_1 = 76\%$ 、 $Sw_2 = 80\%$ 、 $Sw_3 = 83\%$ )的电阻率、电容率频散图；图 3 表示的是 4 号岩心在 4 种饱和度下( $Sw_1 = 73\%$ 、 $Sw_2 = 81\%$ 、 $Sw_3 = 89\%$ 、 $Sw_4 = 100\%$ )的电阻率、电容率频散图。

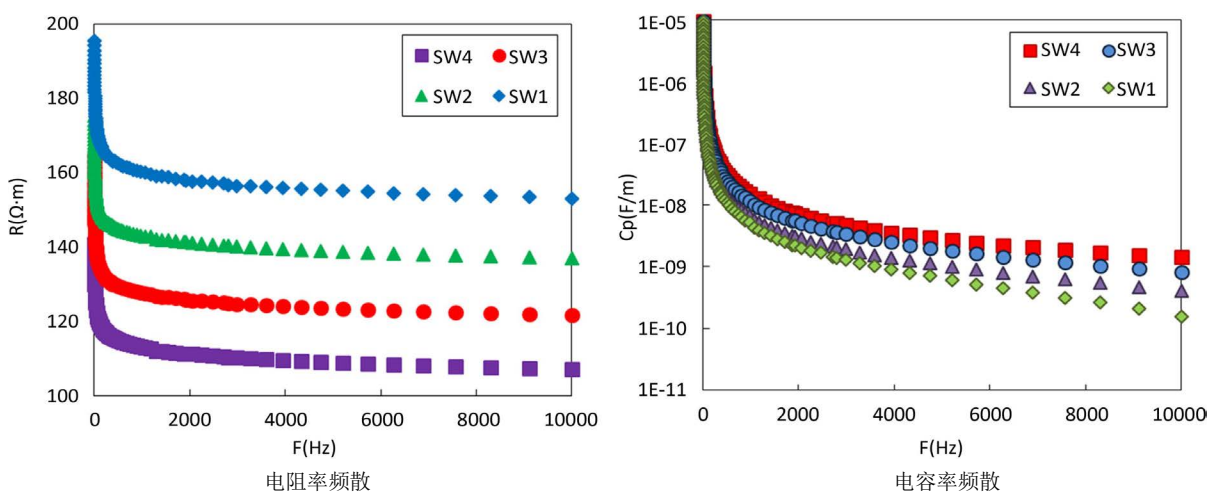
从图 1 可以看出，电阻率和电容率在 0~10 K HZ 频率范围内存在明显频散现象，干重岩心电阻率从 931  $\Omega\cdot m$  降低到 788  $\Omega\cdot m$ ，湿重岩心电阻率从 763  $\Omega\cdot m$  降低到 655  $\Omega\cdot m$ ；干重岩心电容率从  $9.26 \times 10^{-5}$  F/m



**Figure 1.** Frequency dispersion diagram of resistivity and capacitance of Core 2# before- and after-dried  
**图 1.** 2 号岩心干重和湿重下电阻率、电阻率频散图



**Figure 2.** Frequency dispersion diagram of resistivity and capacitance of core 3# with different saturation  
**图 2.** 3 号岩心不同饱和度下电阻率、电容率频散图



**Figure 3.** Frequency dispersion diagram of resistivity and capacitance of core 4# with different saturation  
**图 3.** 4 号岩心不同饱和度下电阻率、电容率频散图

降低到  $8.74 \times 10^{-10}$  F/m, 湿重岩心电容率从  $1.34 \times 10^{-5}$  F/m 降低到  $9.89 \times 10^{-10}$  F/m, 电容率比电阻率的频散变化范围要大 5~6 个数量级。

从图 2 可以看出, 电阻率和电容率频散在低频段非常明显, 电阻率和电容率下降较快, 而在较高频段, 尽管电阻率和电容率也随着频率增加而降低, 但变化率远小于低频阶段; 对比图五与图四的电阻率频散图, 可以看出, 孔隙度较大的 3 号岩心的电阻率频散效应较孔隙度较小的 2 号岩心的电阻率频散效应明显。

从图 2 和图 3 均可看出, 不同饱和度下的岩心电阻率和电容率存在区别, 以 3 号岩心为例, 当  $S_w = 83\%$  时, 岩心在 1 HZ 频率扫描下电容率为  $2.09 \times 10^{-4}$  F/m, 电阻率为  $154 \Omega \cdot m$ , 当  $S_w = 76\%$  时, 岩心在 1 HZ 频率扫描下电容率为  $1.77 \times 10^{-4}$  F/m, 电阻率为  $176 \Omega \cdot m$ , 即在同一频率下, 饱和度越大, 其电容率越大, 电阻率越小。

#### 4. 结论

- 1) 在 0~10 kHz 的频率范围内, 岩石电阻率和电容率均存在频散特征, 且在低频段频散效应明显;
- 2) 在相同条件下, 孔隙度较大的岩石的电阻率频散效应较孔隙度较小的岩心的电阻率频散效应明显;
- 3) 在相同条件下, 同一岩石的电容率的频散效应比电阻率的频散效应明显, 电容率比电阻率的频散变化范围要大 5~6 个数量级;
- 4) 岩心的电容率电阻率与其饱和度有关, 在同一频率下, 岩石的饱和度越大, 电容率越大, 电阻率越小。

#### 参考文献 (References)

- [1] 童茂松. 激发极化测井的谱采集与分析技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [2] 唐炼, 韩有信, 张守谦, 于宝. 大庆油田泥质砂岩介电特性实验研究[J]. 大庆石油学院学报, 1994, 8(4): 12.
- [3] 王伟男, 童茂松, 陈国华, 等. 泥质砂岩的物理性质及其测井应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [4] 柯式镇, 冯启宁, 孙艳茹. 岩石复电阻率频散模型及其参数的获取方法[J]. 测井技术, 1999, 23(6): 416-418.
- [5] 张辉. 复电阻率三维电磁场正反演研究[M]. 吉林: 吉林大学, 2006.
- [6] 陈序三, 赵文杰, 朱留方. 复电阻率测井方法及其应用[J]. 测井技术, 2001(5): 327-331, 399.
- [7] 邵长金, 李相方. 油田开发中后期井间电磁成像技术研究[J]. 石油学报, 2006(5): 88-91.
- [8] 梁秋锦, 魏宝君. 井间电磁成像方法的最新进展[J]. 油气地质与采收率, 2002(3): 63-66+1.
- [9] 梁盛军. 复电阻率法三维正反演问题研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [10] 范翠松. 基于有限元法的复电阻率正反演研究及应用[D]: [博士学位论文]. 吉林: 吉林大学, 2013.
- [11] 李振涛. 利用核磁共振二维谱技术研究岩心含油饱和度[D]: [硕士学位论文]. 中国科学院研究生院(渗流流体力学研究所), 2012.
- [12] 梁忠奎, 周灿灿, 杨春梅, 徐红军. 利用炷柱高度计算含油饱和度在低阻油层中的应用[J]. 国外测井技术, 2010(1): 40-42+4.
- [13] Liu, H., Pei, X.H., Luo, K., Sun, F.C., Zheng, L.C. and Yang, Q.H. (2013) Current Status and Trend of Separated Layer Water Flooding in China. *Petroleum Exploration and Development*, 785-790.
- [14] Song, W., Yu, H.M., Shao, Z.G., Yi, B.L., Lin, J. and Liu, N. (2014) Effect of Polytetrafluoroethylene Distribution in the Gas Diffusion Layer on Water Flooding in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Chinese Journal of Catalysis*, 468-473.
- [15] 姜大鹏. 油层水淹特征提取方法及应用[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2013.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7567，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)