

# Experimental Study on Rock Physical Parameters of Shale Samples in Western Hubei and Eastern Chongqing Area

Kui Xiang<sup>1</sup>, Liangjun Yan<sup>2</sup>, Hua Hu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Hubei Collaborative Innovation Center for Unconventional Oil and Gas (Yangtze University), Wuhan Hubei

<sup>3</sup>School of Geophysics and Oil Resources, Yangtze University, Wuhan Hubei

Email: [cjdxk@163.com](mailto:cjdxk@163.com)

Received: Jun. 12<sup>th</sup>, 2016; accepted: Oct. 10<sup>th</sup>, 2016; published: Dec. 15<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors, Yangtze University 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

---

## Abstract

It is of great significance for the evaluation of resources to study the physical parameters of shale gas reservoir rocks and its geophysical response characteristics. The shale density, velocity, permeability and complex resistivity are measured in the laboratory based on outcrop samples of marine shale in Western Hubei and Eastern Chongqing area. The results show that the shale of study area has the characteristics of low density, low permeability and relatively medium and high resistivity, but the polarizability is different, the largest up to 40.8%, the lowest 14.5%, which are divided into 3 levels of high polarizability, medium polarizability and low polarizability. The mineral composition is mainly quartz and clay, but shale brittle mineral content of Lower Silurian Longmaxi formation is higher. Calcite and dolomite content of Lower Cambrian Shuijingtuo formation is higher compared to Longmaxi group.

## Keywords

Shale Gas, Rock Physics, Complex Resistivity, Mineral Composition

---

# 鄂西渝东地区页岩岩石物理参数试验研究

向葵<sup>1</sup>, 严良俊<sup>2</sup>, 胡华<sup>3</sup>

<sup>1</sup>油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学), 湖北 武汉

<sup>2</sup>非常规油气湖北省协同创新中心(长江大学), 湖北 武汉

<sup>3</sup>长江大学地球科学学院, 湖北 武汉

作者简介: 向葵(1980-), 男, 博士, 讲师, 现主要从事电磁勘探和岩石物理方面的教学与研究工作。

Email: cjdxxk@163.com

收稿日期: 2016年6月12日; 录用日期: 2016年10月10日; 发布日期: 2016年12月15日

## 摘要

研究页岩气储层岩石的物理参数及其地球物理响应特征对其资源评价具有重要意义。基于鄂西渝东地区海相页岩露头标本, 在实验室内测量页岩的密度、声波速度、渗透率和复电阻率。结果表明, 研究区页岩具有低密度、低渗透率、相对中高电阻率的特征, 但页岩极化率相差较大, 最高达40.8%, 最低14.5%, 分为高极化率、中极化率和低极化率3个层次。研究区页岩的矿物成分主要为石英和黏土, 但下志留统龙马溪组页岩的脆性矿物含量更高, 下寒武统水井沱组页岩方解石和白云石含量相较于龙马溪组更高。

## 关键词

页岩气, 岩石物理, 复电阻率, 矿物成分

## 1. 引言

现阶段, 中国的页岩气勘探和开采工作主要集中在四川盆地及周边地区, 烃源岩层系以多套黑色页岩为主, 主力烃源岩为下寒武统牛蹄塘组和下志留统龙马溪组(S<sub>1</sub>l)。四川盆地的页岩气地质条件和构造演化特点与美国典型盆地相似, 均属于古生界的海相沉积盆地, 具有优良的勘探前景[1]。董大忠等(2010)[2]研究讨论了中国上扬子区下古生界页岩气的形成条件和特征, 收集了露头、钻井及其岩心资料, 以页岩的沉积环境、地球化学特征和储层特性等多个方面为研究对象, 重点对该地区的下寒武统筲竹寺组、S<sub>1</sub>l页岩的地质特征进行分析, 并与美国产气页岩进行对比, 证实该地区具有非常大的勘探开发潜力。目前, 中国页岩气的勘探程度仍然不高, 钻井数逐年递增, 多数位于寒武系和志留系。

## 2. 页岩气储层评价要素及现状

Curtis (2002) [3]对美国 Fort Worth 盆地的 Barnett 页岩、Appalachian 盆地的 Ohio 页岩、Illinois 盆地的 New Albany 页岩、Michigan 盆地的 Antrim 页岩和 San Juan 盆地的 Lewis 页岩的成藏条件和地质特征进行了综合分析, 对上述 5 套商业性页岩气层的热成熟度、储集层厚度、吸附气含量和总有机碳质量分数(w(TOC))等关键参数进行了归纳与对比。研究表明, 页岩气的产量与 8 个控制因素密切相关, 分别是: 原地含气量、w(TOC)、热成熟度、页岩层厚度、地层压力、页岩的脆性、矿物成分和渗透率。

Karastathis A. (2007) [4]通过对美国德克萨斯州北部的页岩地层取心、试验和分析, 完成了密度、孔隙度、矿物成分、纵横波速度、速度各向异性和裂缝方向的测量及研究工作, 发现相较于孔隙度, 页岩

的纵横波速度对  $w(\text{TOC})$  更为敏感。Sondhi N. (2011) [5] 研究了美国 Eagle Ford 页岩的岩石物理特性, 进行了岩石物理测量, 包括矿物成分、 $w(\text{TOC})$ 、孔隙度、核磁共振孔隙度、速度和毛细管压力, 建立了一套基于矿物学、 $w(\text{TOC})$ 、孔隙度、声波速度和毛细管压力的理论方法, 用于岩相识别。

美国的页岩气勘探开发技术和成功经验值得中国借鉴, 但中国页岩气勘探仍处于初级阶段, 页岩气成藏条件和储层特征有别于美国。因此, 需要依据我国页岩气的成藏条件、分布范围、 $w(\text{TOC})$  等特点, 在页岩发育地区采集不同地层的页岩标本(包括井心)进行试验分析, 完成页岩岩石物理参数测量(包括密度、声波速度、渗透率、孔隙度和电性等, 还包括页岩的矿物组分、 $w(\text{TOC})$  和微观孔隙结构), 综合页岩的多项评价指标, 研究关键的岩石物理参数, 为页岩气勘探提供依据。

煤层气、裂缝型页岩气等非常规含气系统的地质特征和地球化学特征与构造和地层圈闭无关, 且成藏要素及其形成过程与常规天然气存在区别[6]。李新景等(2007) [7] 研究了北美页岩气的基本特征, 结合中国的页岩气资源进行了初步分析: 指出页岩气投入商业开发必须具有足够的地质储量和渗流能力, 虽然美国各大盆地页岩层的上述关键参数存在差异, 但存在一些共同点, 如  $w(\text{TOC})$  与页岩气产率相关、吸附气含量高、页岩气储集层石英含量高、裂缝系统发育程度好等; 认为中国四川盆地发育多套海相烃源岩, 是未来页岩气资源的勘探方向。张金川等[8] [9] [10] 研究了页岩气的成藏机理, 从中国的页岩气地质特征和分布情况着手, 探讨了中国的页岩气资源潜力, 强调页岩气及其勘探研究意义, 并分析了页岩气富集类型及资源特点, 指出在南方扬子地区从震旦纪到三叠纪连续发育大规模的海相沉积, 形成了 8 套黑色页岩, 主力地层分别为下寒武统、上奥陶统 - 下志留统、下二叠统和上二叠统。

前人主要是从岩石物理测量方法和结果入手, 研究了各参数的相关性, 尤其是孔隙度、矿物成分和声波速度之间的关系, 为物性分析和储层评价奠定了基础, 也为实验室测量开拓了思路。但是, 上述成果没有涉及到页岩的电性测量方法及电性参数与孔隙度、矿物成分和  $w(\text{TOC})$  等参数之间的关系。为此, 笔者基于鄂西渝东地区的页岩样品, 分析了密度、渗透率、弹性、电性和矿物成分等岩石物理参数的特征, 为研究区页岩气勘探和储层评价提供了物性基础。

### 3. 页岩岩石物理参数分析

#### 3.1. 样品来源

采样点位于鄂西渝东地区, 分别为湖北省宜昌分乡(S01)、宜昌王家坪(S02)、宜昌五峰(S05、S06)、重庆石柱(S03)和重庆郁山(S04) (图 1)。采样区位于中上扬子地台, 下古生界富有机质页岩层发育, 主要包含 2 套区域性的黑色富有机质烃源岩: 下寒武统牛蹄塘组(筲竹寺组、水井沱组( $\in_{1s}$ ))和上奥陶统五峰组  $S_{1l}$ 。2 套页岩在研究区分布面积广, 厚度较大, 岩性以泥页岩为主。该次采样在勘探区域及周边地区采集不同地层的页岩露头标本, 测量参数包括密度、渗透率、声波速度、复电阻率、矿物成分。

#### 3.2. 页岩岩石物理参数

##### 3.2.1. 密度

根据研究区页岩发育段  $S_{1l}$  和  $\in_{1s}$  的实际测量资料, 将岩石标本密度划分如下: 岩石平均密度  $2.70 \text{ g/cm}^3$  以上为高密度,  $2.62 \sim 2.69 \text{ g/cm}^3$  为中高密度,  $2.55 \sim 2.61 \text{ g/cm}^3$  为中等密度,  $2.55 \text{ g/cm}^3$  以下为低密度。所有岩心测量结果如表 1 所示, 宜昌五峰地区岩石密度相对较大, 宜昌分乡地区最小, 但页岩均为低密度。

##### 3.2.2. 渗透率

渗透率是岩石物性参数中的重要参数, 也是页岩气储层评价的指标之一。测量结果如表 2 所示, 渗

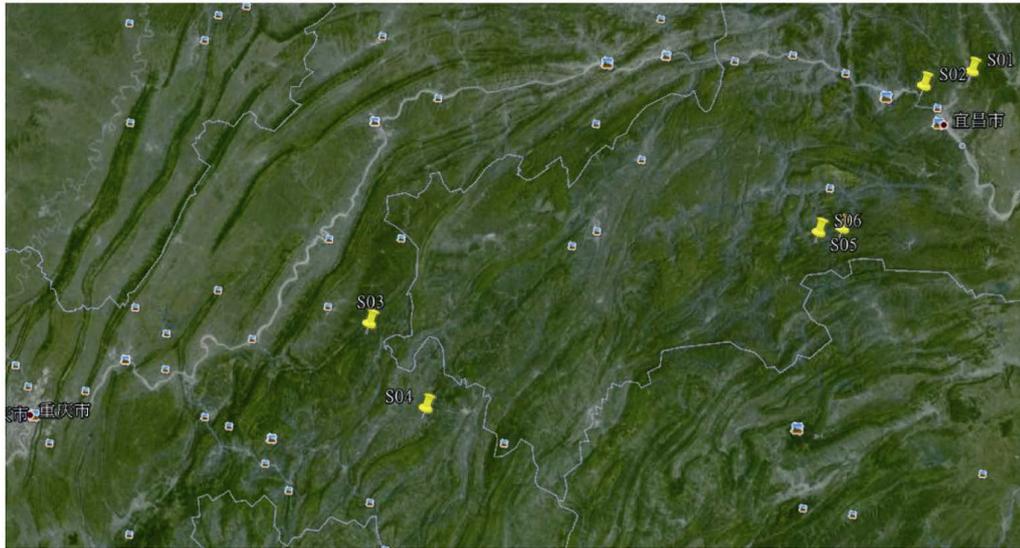


Figure 1. Distribution map of sampling points

图 1. 采样点分布图

Table 1. Statistical result of density

表 1. 岩石密度参数统计表

采样位置	地层层位	岩心数/块	岩石密度/(g·cm <sup>-3</sup> )		
			最小值	最大值	平均值
宜昌分乡	S <sub>1</sub> l	6	1.396373	2.9806500	2.1778880
宜昌王家坪	∈ <sub>1</sub> s	6	2.236539	2.7775800	2.4749891
宜昌廊坪	S <sub>1</sub> l	6	2.1501237	2.5024848	2.3697816
重庆石柱	S <sub>1</sub> l	25	1.9417847	3.1197333	2.4369889
重庆郁山	S <sub>1</sub> l	28	2.010895	2.7991810	2.4462344
宜昌五峰	S <sub>1</sub> l	43	2.1723333	2.9625415	2.5389486

Table 2. Statistical result of permeability

表 2. 页岩渗透率统计表

采样位置	地层层位	岩心数/块	渗透率/mD		
			最小值	最大值	平均值
宜昌分乡	S <sub>1</sub> l	3	0.0089880	0.2165530	0.0940249
宜昌王家坪	∈ <sub>1</sub> s	6	0.0315700	0.0892150	0.0622580
宜昌廊坪	S <sub>1</sub> l	3	0.0507066	0.0726053	0.0642260
重庆石柱	S <sub>1</sub> l	26	0.0030650	0.7741230	0.0955350
重庆郁山	S <sub>1</sub> l	28	0.0021150	0.7139180	0.1053220
宜昌五峰	S <sub>1</sub> l	37	0.0030651	0.7741230	0.0955348

透率最大值 0.216553 mD, 最小值 0.002115 mD, 平均值小于 0.1 mD; 宜昌王家坪地区 ∈<sub>1</sub>s 页岩平均值最小, 渗透性最差, 但整体上都表现为低渗透的特征。

### 3.2.3. 声波速度

为了解页岩的弹性参数，测量了干燥页岩样品的纵、横波速度，测量结果如表 3、表 4 所示，纵、横波交会图如图 2 所示。

### 3.2.4. 电性

交变电场中岩、矿物的激电效应主要表现为，当用一对供电电极向岩、矿石供以固定大小的低频交变电流，并用另一对电极测量电位差时，测量到的电位差会随频率的增高而逐渐降低，且电位差的相位相对于电流的相位有一定的滞后，因此得到交变电阻率为频率的复变函数，又称为复电阻率。在实验室条件下，测量了清水饱和条件下岩石的复电阻率，电阻率和相位幅值随频率的变化具有较好的一致性，但不同地区岩石差别较大。图 3~6 分别为宜昌分乡地区和重庆石柱地区页岩清水饱和条件下岩心的复电阻率幅和相位曲线，前者低频电阻率和相位变化缓慢，后者低频电阻率和相位变化异常突出。

根据复电阻率测量的数据(清水饱和)，反演提取零频电阻率、极化率 2 个电性参数，统计结果如表 5 和表 6 所示。

根据反演结果，重庆郁山地区  $S_{1l}$  页岩的零频电阻率平均值最大，达到  $662.3 \Omega \cdot m$ ，宜昌廊坪地区  $S_{1l}$  次之，整体上看，该次采样样本电阻率测量结果属于中高电阻率。

宜昌廊坪和重庆石柱地区  $S_{1l}$  页岩极化率平均值最大，分别为 40.8% 和 38.6%，重庆郁山地区  $S_{1l}$  次之，宜昌五峰地区  $S_{1l}$  和宜昌王家坪地区  $\in_{1s}$  最低，均在 15% 左右。由此可见，重庆石柱和宜昌廊坪地区的  $S_{1l}$  页岩表现出高极化率特性，重庆郁山地区  $S_{1l}$  页岩次之，宜昌分乡地区  $S_{1l}$ 、宜昌王家坪地区  $\in_{1s}$ 、宜昌五峰地区  $S_{1l}$  极化率相对较低。

综合反演结果，在页岩地层中，重庆石柱和宜昌廊坪地区的  $S_{1l}$  为中高电阻率、高极化率层；重庆郁山地区  $S_{1l}$  为高电阻率、中高极化率层；宜昌分乡地区  $S_{1l}$ 、宜昌王家坪地区  $\in_{1s}$  和宜昌五峰地区  $S_{1l}$  为中低电阻率、低极化率层。

### 3.2.5. 矿物成分

为了解研究区露头页岩的矿物成分，分别对  $S_{1l}$  和  $\in_{1s}$  的 13 块页岩进行 X-射线衍射定量分析(见图 7)。根据矿物成分鉴定结果，页岩的矿物成分主要为石英和黏土，并含有少量斜长石、方解石、白云石和黄铁矿，其中 13 块样品中 8 块都含有黄铁矿。此外， $S_{1l}$  页岩的方解石体积分数较  $\in_{1s}$  低，石英、长石等脆性矿物体积分数较高，基本达到 50% 以上。

## 4. 结论

根据不同地区岩石的密度、渗透率、声波速度、电阻率和极化率的统计分析，采样区页岩属于低密度、低渗透层，纵、横波速度具有良好的线性相关性，电阻率均值在  $150 \Omega \cdot m$  以上，极化率变化范围较大。岩石物理参数特征如下：

1) 鄂西渝东地区页岩具有低密度、低渗透、相对中高电阻率特征，但页岩极化率相差较大，宜昌廊坪和重庆石柱地区的  $S_{1l}$  页岩极化率平均值最高，达到 40.8% 和 38.6%，属高极化率层；宜昌分乡和重庆郁山地区页岩地层极化率平均值在 20% 左右，属于中极化率层；宜昌王家坪和宜昌五峰地区页岩地层极化率平均值远低于 20%，属于低极化率层。

2) 页岩矿物成分分析结果表明，研究区页岩的矿物成分主要为石英和黏土，但  $S_{1l}$  页岩的脆性矿物含量更高， $\in_{1s}$  页岩方解石和白云石含量相较于  $S_{1l}$  更高。

3) 13 块页岩样品中，8 块岩心均含有黄铁矿，页岩均表现出低电阻率、高极化率特征，该特征可能与黄铁矿和有机质富集有关，有待进一步研究和验证。

**Table 3.** Statistical result of pressure wave velocity in dry condition  
**表 3.** 干燥页岩样品纵波速度统计表

采样位置	地层层位	岩心数/块	纵波速度/(m·s <sup>-1</sup> )		
			最小值	最大值	平均值
宜昌分乡	S <sub>1</sub> l	5	4573.9870	5117.7340	4892.4706
宜昌王家坪	∈ <sub>1</sub> s	5	4486.6850	4910.9300	4728.7983
宜昌廊坪	S <sub>1</sub> l	5	3385.6261	5260.3942	4046.5890
重庆石柱	S <sub>1</sub> l	18	2514.6640	5427.1563	4290.1864
重庆郁山	S <sub>1</sub> l	28	3679.4448	5374.6334	4545.0758
宜昌五峰	S <sub>1</sub> l	40	1852.3265	5929.9779	4335.0139

**Table 4.** Statistical result of shear wave velocity in dry condition  
**表 4.** 干燥页岩样品横波速度统计表

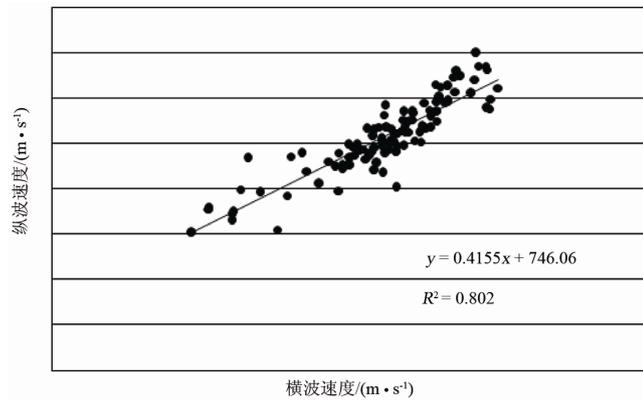
采样位置	地层层位	岩心数/块	横波速度/(m·s <sup>-1</sup> )		
			最小值	最大值	平均值
宜昌分乡	S <sub>1</sub> l	5	2418.345	2866.672	2662.174
宜昌王家坪	∈ <sub>1</sub> s	5	2503.544	2695.882	2598.090
宜昌廊坪	S <sub>1</sub> l	5	2196.770	3148.627	2492.628
重庆石柱	S <sub>1</sub> l	18	1547.229	3256.785	2463.904
重庆郁山	S <sub>1</sub> l	28	1976.898	3313.076	2656.249
宜昌五峰	S <sub>1</sub> l	40	1527.872	3515.364	2582.907

**Table 5.** Statistical result of shale resistivity  
**表 5.** 页岩零频电阻率统计表

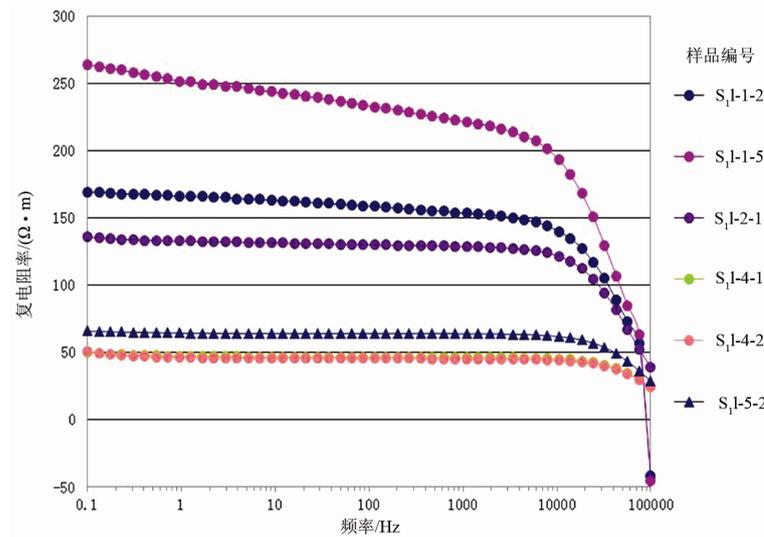
采样位置	地层层位	岩心数/块	零频电阻率/(Ω·m)		
			最小值	最大值	平均值
宜昌分乡	S <sub>1</sub> l	6	71.9	443.5	176.4
宜昌王家坪	∈ <sub>1</sub> s	6	157.3	440.7	286.7
宜昌廊坪	S <sub>1</sub> l	7	260.2	585.8	448.0
重庆石柱	S <sub>1</sub> l	27	80.1	942.1	211.8
重庆郁山	S <sub>1</sub> l	28	105.9	3057.6	662.3
宜昌五峰	S <sub>1</sub> l	44	96.5	725.0	227.6

**Table 6.** Statistical result of shale polarizability  
**表 6.** 页岩极化率统计表

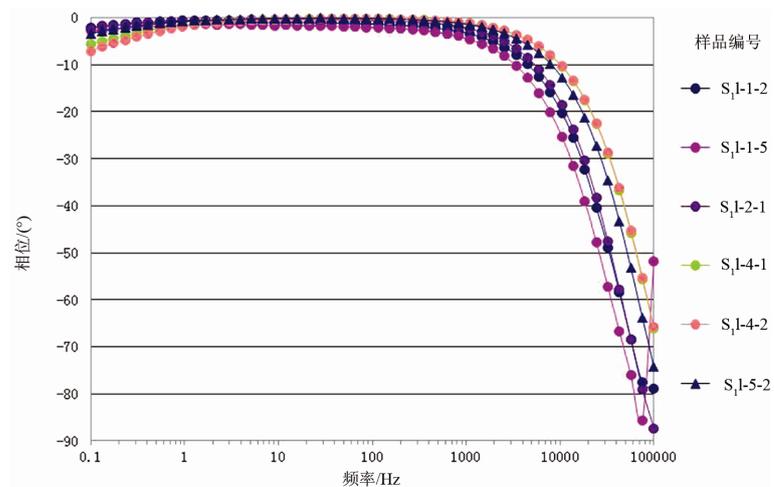
采样位置	地层层位	岩心数/块	极化率/%		
			最小值	最大值	平均值
宜昌分乡	S <sub>1</sub> l	6	12.2	24.60	21.4
宜昌王家坪	∈ <sub>1</sub> s	6	8.60	23.50	16.0
宜昌廊坪	S <sub>1</sub> l	7	18.9	57.00	40.8
重庆石柱	S <sub>1</sub> l	27	14.4	79.00	38.6
重庆郁山	S <sub>1</sub> l	28	11.4	58.10	25.5
宜昌五峰	S <sub>1</sub> l	44	7.10	36.15	14.5



**Figure 2.** The cross-plot of pressure and shear wave velocity in dry condition  
**图 2.** 干燥条件纵、横波速度交会图



**Figure 3.** Shale complex resistivity amplitude curve in Yichang  
**图 3.** 宜昌分乡地区页岩复电阻率幅值曲线



**Figure 4.** Shale complex resistivity phase curve in Yichang  
**图 4.** 宜昌分乡地区页岩复电阻率相位曲线

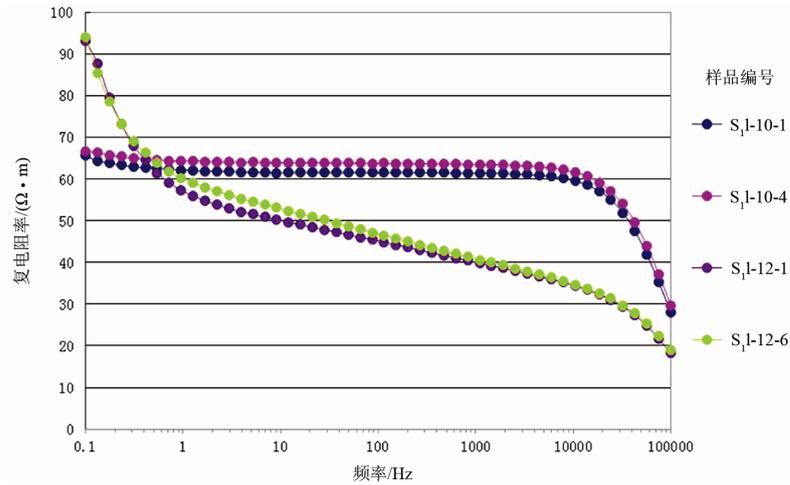


Figure 5. Shale complex resistivity amplitude curve in Chongqing  
 图 5. 重庆石柱地区页岩复电阻率幅值曲线

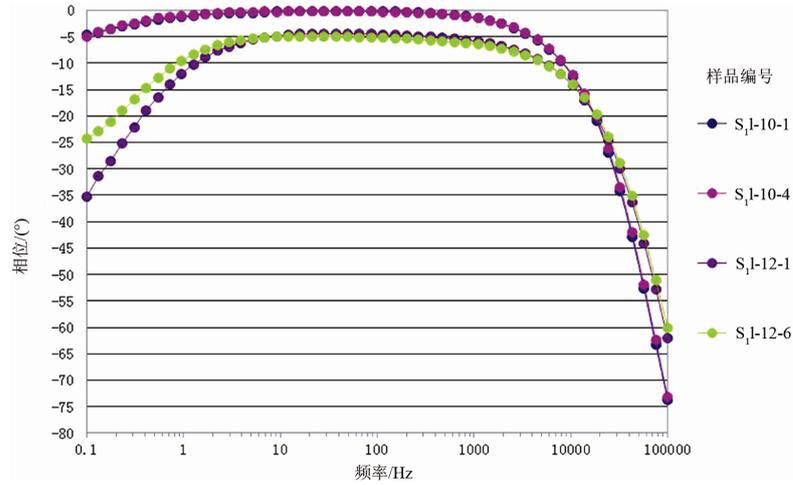


Figure 6. Shale complex resistivity phase curve in Chongqing  
 图 6. 重庆石柱地区页岩复电阻率相位曲线

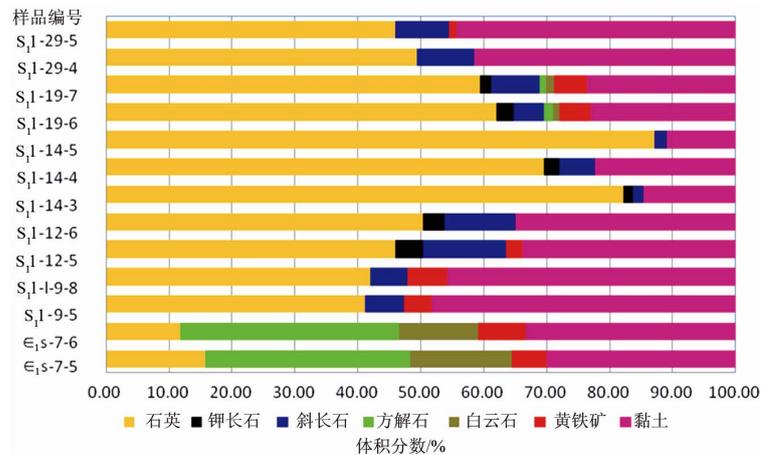


Figure 7. Distribution map of shale mineral composition and relative content  
 图 7. 页岩矿物组分及含量分布图

## 基金项目

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB228605); 国家自然科学基金项目(41404087, U1562109, 41574064)。

## 参考文献 (References)

- [1] U.S. Energy Information Administration (2013) World Shale Gas and Shale Oil Resource Assessment. U.S. Department of Energy, Washington DC.
- [2] 董大忠, 程克明, 王玉满, 等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 288-299.
- [3] Curtis, J.B. and Montgomery, S.L. (2002) Recoverable Natural Gas Resource of the United States: Summary of Recent Estimates. *AAPG Bulletin*, **86**, 1671-1678.
- [4] Karastathis, A. (2007) Petrophysical Measurements on Tight Gas Shale. Ph.D. Thesis, University of Oklahoma, Oklahoma.
- [5] Sondhi, N. (2011) Petrophysical Characterization of Eagle Ford Shale. Ph.D. Thesis, University of Oklahoma, Oklahoma.
- [6] 陈建渝, 唐大卿, 杨楚鹏. 非常规含气系统的研究和勘探进展[J]. 地质科技情报, 2003, 22(4): 55-59.
- [7] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.
- [8] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.
- [9] 张金川, 汪宗余, 聂海宽, 等. 页岩气及其勘探研究意义[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 640-646.
- [10] 张金川, 姜生玲, 唐玄, 等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 109-114.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

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

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