

成联正, 王赟, 张川. 2021. 黔东页岩复电阻率各向异性及其与页岩气储层参数关系研究. 地球物理学报, 64(9): 3344-3357, doi:10.6038/cjg202100273.

Cheng L Z, Wang Y, Zhang C. 2021. Anisotropy of complex resistivity of the shale in eastern Guizhou province and its correlations to reservoir parameters of shale gas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(9): 3344-3357, doi:10.6038/cjg202100273.

# 黔东页岩复电阻率各向异性及其 与页岩气储层参数关系研究

成联正<sup>1,3</sup>, 王赟<sup>1,2\*</sup>, 张川<sup>1</sup>

1 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

2 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 电法勘探因其成本低、效率高的优势,常被作为寻找页岩气储层的辅助手段.然而,到目前为止,页岩的电性特征,特别是复电阻率各向异性特征,以及其与页岩气储层参数的关系研究甚少,这在一定程度上阻碍了电法勘探在页岩气勘探中的应用.基于此,本文采集了黔东地区几种典型黑色页岩岩样,并测量了6块黑色页岩在走向、倾向和垂直层理方向的复电阻率,分析了其各向异性特性,讨论了电阻率与总有机碳(TOC)含量、脆性矿物含量、最大镜质组反射率等页岩气储层参数之间的关系.研究表明:(1)页岩复电阻率振幅各向异性存在频率依赖的特征,在中低频阶段,页岩复电阻率振幅各向异性明显,垂直层理方向复电阻率振幅显著大于走向、倾向方向复电阻率振幅,但随频率增加,页岩复电阻率振幅各向异性差异减小,甚至趋于各向同性;(2)复 Cole-Cole 模型能很好地拟合页岩三方向的复电阻率数据;(3)走向、倾向方向电阻率与 TOC 含量存在显著的线性正相关关系,通过走向、倾向方向电阻率预测 TOC 含量有一定可行性;(4)电阻率与脆性矿物含量、黏土矿物含量、最大镜质组反射率关系复杂,未发现简单的线性相关关系.上述研究结果对我们全面了解黔东地区黑色页岩的电性特征,促进电法勘探在页岩气勘探中的应用大有裨益.

**关键词** 页岩;各向异性;复电阻率;总有机碳;脆性矿物;镜质组反射率

doi:10.6038/cjg202100273

中图分类号 P631

收稿日期 2020-07-21, 2021-06-22 收修定稿

## Anisotropy of complex resistivity of the shale in eastern Guizhou province and its correlations to reservoir parameters of shale gas

CHENG LianZheng<sup>1,3</sup>, WANG Yun<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Chuan<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2 School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The electrical method is widely used to recognize the best shale reservoirs due to its low cost and high efficiency compared with the seismic method. However, there are a few studies about the electrical properties of shale, especially the anisotropy of complex resistivity and its correlations to parameters of shale gas reservoirs, which limits the application of the electrical

基金项目 国家自然科学基金项目(41425017)和国家重点研发计划项目(2016YFC0600301,2017YFC0602500)联合资助.

第一作者简介 成联正,男,1986年生,博士,主要从事进化算法及地球物理联合反演研究. E-mail: 471920691@qq.com

\* 通讯作者 王赟,男,1969年生,博士,教授,博士生导师,从事各向异性地球物理理论与多分量地震技术的研究.

E-mail: yunwang@mail.iggcas.ac.cn

method in shale gas exploration. In this paper, we discuss the anisotropic properties of complex resistivity in 3 orthogonal directions and the relationships between resistivity and reservoir parameters of shale gas such as Total Organic Carbon (TOC) content, brittle minerals content and maximum vitrinite reflectance. All discussions are based on the experimental data obtained through analyzing six typical shale samples collected from eastern Guizhou Province. Research suggests that: (1) The anisotropy of amplitudes of complex resistivity varies with the frequency. In low and medium frequency bands, the vertical amplitude of complex resistivity is significantly greater than the strike and dip ones. However, with the increasing of frequency, the differences of amplitude among 3 orthogonal directions become smaller. Even at a certain frequency, the anisotropy of amplitude disappears. (2) The double Cole-Cole model fits well with the measured complex resistivity data of shale. (3) The TOC content has significant linear positive correlations with the strike resistivity and dip resistivity. Thus, it is possible to predict TOC content through the strike or dip resistivity. (4) No evident relationships are found between the resistivity, brittle mineral content and maximum vitrinite reflectance. The reason is the complexity of the influence of brittle minerals content and vitrinite reflectance on resistivity. The presented research results are beneficial to gain a comprehensive understanding of the electrical characteristics of shale and provide a new way to evaluate shale gas reservoirs.

**Keywords** Shale; Anisotropy; Complex resistivity; Total Organic Carbon (TOC); Brittle minerals; Vitrinite reflectance

## 0 引言

近年来,随着常规能源开采难度的日益加大,页岩气资源日益受到重视.以美国为代表的许多国家和地区,已成功实现页岩气的勘探和生产(Loucks and Ruppel, 2007; Alexander et al., 2011; He et al., 2017; 区小毅等, 2019).中国页岩气资源潜力巨大,储量居世界前列,主要分布在四川、新疆、重庆及贵州,其中四川盆地的海相页岩气已率先实现商业开发,贵州海相页岩也逐渐成为勘探和研究的热点(武音茜等, 2012; 翟刚毅等, 2017; 赖富强等, 2018).

目前,地震技术是勘探页岩气的主要方法(孙伟家等, 2013),然而由于中国页岩气分布区的地形地质条件复杂,地震勘探方法的应用受到极大限制.和地震勘探相比,电法勘探具有成本低、效率高的优势(张春贺等, 2013),这让许多专家和学者在积极探索电法勘探在页岩气勘探中的可行性.到目前为止,已有许多成功将电法勘探应用于页岩气勘探的实例:张春贺等(2013, 2015)在四川盆地南部筠连地区进行了时频电磁法勘探试验工作,认为时频电磁法具有探测富有机质页岩层系的能力;闵刚等(2014)在黔东北岑巩地区开展了音频大地电磁勘

探,确定了变马冲组下部及牛蹄塘组为主要生气储气地层,并钻孔验证了大地电磁勘探和岩石样品地化分析的组合手段可以较高的分辨确定富集地层的埋深及厚度;周印明等(2015)对南方碳酸盐岩发育区开展的页岩气时频电磁法勘探工作,认为时频电磁法可以在非常规油气勘探中发挥重要作用;Yang等(2017)采用广域电磁法对湖南叭岩向斜进行了勘查,并钻孔验证勘查结果的正确性;张乔勋等(2017)采用广域电磁法对赣南某盆地进行了勘探,厘清了研究区地层展布、厚度、埋深等关键信息;孟凡洋等(2018)基于广域电磁法对渝东北巫山地区进行了页岩气有利区评价,圈定页岩气有利区3个;廖健(2019)利用大地电磁测深圈定了雪峰山地区页岩气藏的优势地段.

与此同时,页岩的电性,特别是页岩的复电阻率研究越来越受到关注:Yan等(2014)对中国南方富有机质页岩复电阻率进行大量分析测试后发现,富有机质页岩通常呈高极化、低电阻率特征,并指出黄铁矿是富有机质页岩产生高极化的主要原因,这些结论得到了向葵等(2014)、Yu等(2015)、李鹏飞(2015)的进一步验证;Burtman等(2014)建立了等效介质理论模型模拟页岩复电阻率,认为可以通过等效介质理论模型估计矿物组成和孔隙体积;Adao等(2016)研究 Posidonia 地区的页岩电阻率和成熟

度后认为页岩电阻率与成熟度无直接关系,页岩电阻率主要由孔隙控制;黄涛等(2016)对昭通两口井地区 59 块页岩的复电阻率进行了测量,并分析了页岩电阻率与饱和水盐度、总有机碳(Total Organic Carbon, 简称 TOC)含量的关系,发现页岩电阻率与饱和水盐度、TOC 含量存在负相关关系;Wang 等(2016)和 He 等(2017)均对龙马溪有机页岩的复电阻率进行了测试,并分析了页岩电阻率与 TOC 含量、黄铁矿、脆性矿物之间的关系,认为这些地球化学参数对页岩气储层的评估有着积极作用。

前人的研究,对我们了解页岩的电性特征,促进电法在页岩气勘探上的应用十分有益。然而,到目前为止,页岩的电性特征尚未广泛应用于页岩气的评估,页岩的电性特征及其机理研究仍不够深入(Passey et al., 2010; Hart et al., 2011; Zhu et al., 2011; He et al., 2017),前人对页岩电性的研究,主要基于页岩各向同性假设进行。然而页岩层理发育,具有天然各向异性,其速度各向异性很早就被发现(Levin, 1979; White et al., 1984; Banik, 1987; Jones and Wang, 1981),并认为页岩层理结构,矿物的优选排列和地应力作用产生定向排列的裂隙是导致页岩地震各向异性的三点原因(Vernik and Nur, 1992; Johnston and Christensen, 1995; 邓继新等, 2015)。基于页岩各向异性客观存在的事实,研究页岩复电阻率各向异性特征,对我们全面

了解页岩的电性特征,促进电法在页岩气勘探上的应用具有重要意义。

本文采集了黔东地区几种典型的黑色页岩岩样,并制作成标准样本,对其中 6 块页岩测量了三个正交方向(走向、倾向、垂直层理方向)的复电阻率,分析了其各向异性特征;借助复 Cole-Cole 模型采用差分进化法对测量数据进行了反演拟合,获取了页岩三方向极化率参数和零频电阻率参数,并对三方向电阻率与总有机碳(TOC)含量、脆性矿物含量、最大镜质组反射率等关系进行了分析。

## 1 样品采集和加工

本次实验页岩采自黔东前寒武纪陡山沱组、乌叶组,其在大地上属于扬子板块和南华活动带两大构造单元(图 1)。黔北、黔东等地黑色页岩厚度为 20~70 m(Wang and Wang, 2008; Yang et al., 2011),其中陡山沱组是埃迪卡拉统地层中研究最广泛的单元之一,其化石记录保存异常完好(Jiang et al., 2011),岩性主要为页岩、泥岩、砂页岩。乌叶组是由贵州 108 地质队在 1962 年命名的,其地层主要由页岩和板岩组成;黑色炭质页岩主要位于该地层上部和下部(Yang et al., 2011)。

所有页岩采样时均在现场标记走向  $x$ 、倾向  $y$ 、和垂直层理方向  $z$ (图 2a),然后在实验室沿三个方

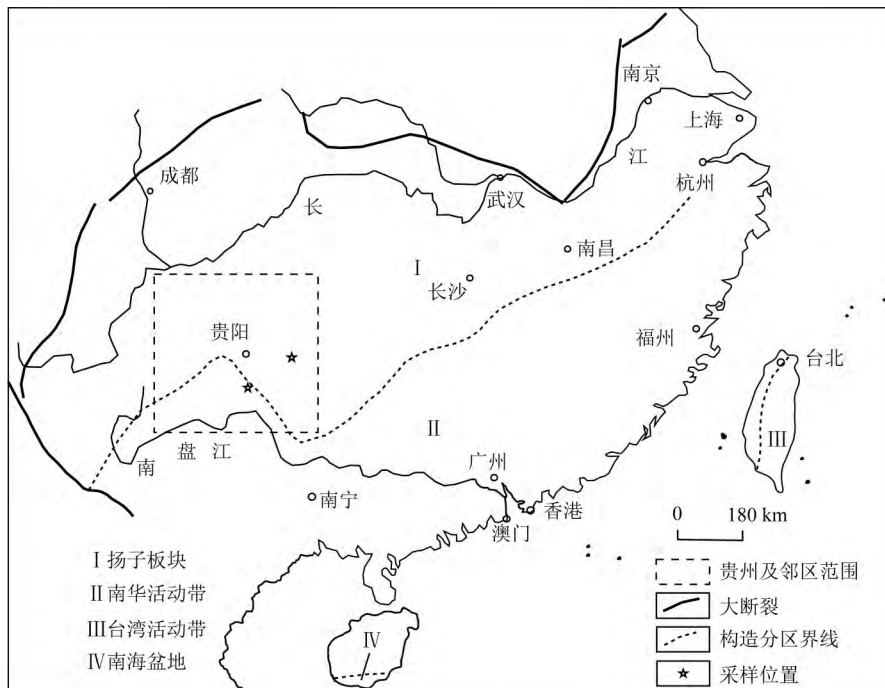


图 1 贵州及周围的大地构造位置

Fig. 1 Tectonic setting of Guizhou Province and adjacent areas

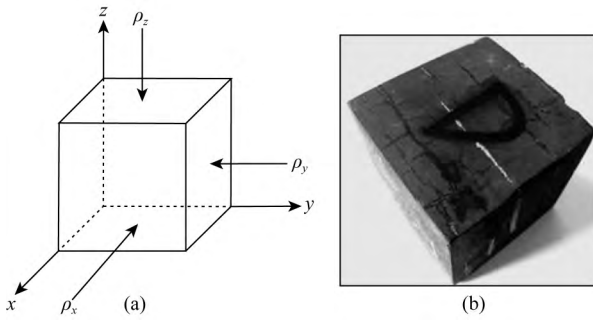


图 2 (a) 页岩三方向示意图.  $x$  代表走向,  $y$  代表倾向,  $z$  代表垂直层理方向; (b) 加工后页岩

Fig. 2 (a) Schematic diagram of three directions.  $x$  is the strike direction,  $y$  is the dip direction and  $z$  is the vertical direction; (b) Photo of processed shale sample

向加工成立方体(图 2b). 由于页岩的易碎性, 实验室最终加工成功 6 件; 加工成功样品的详细信息见表 1.

表 1 页岩信息

Table 1 Detailed information of shale samples

页岩编号	地层	岩性	加工规格
A	乌叶组	黑色页岩	5 cm 见方
B	乌叶组	黑色页岩	5 cm 见方
C	陡山沱组	黑色页岩	5 cm 见方
D	陡山沱组	黑色页岩	5 cm 见方
E	乌叶组	黑色页岩	5 cm 见方
F	乌叶组	黑色页岩	5 cm 见方

## 2 实验方法和过程

### 2.1 复电阻率测量

#### 2.1.1 实测阻容(RC)电路与理论计算结果对比

本次复电阻率测量仪器为日本NF公司ZM2371

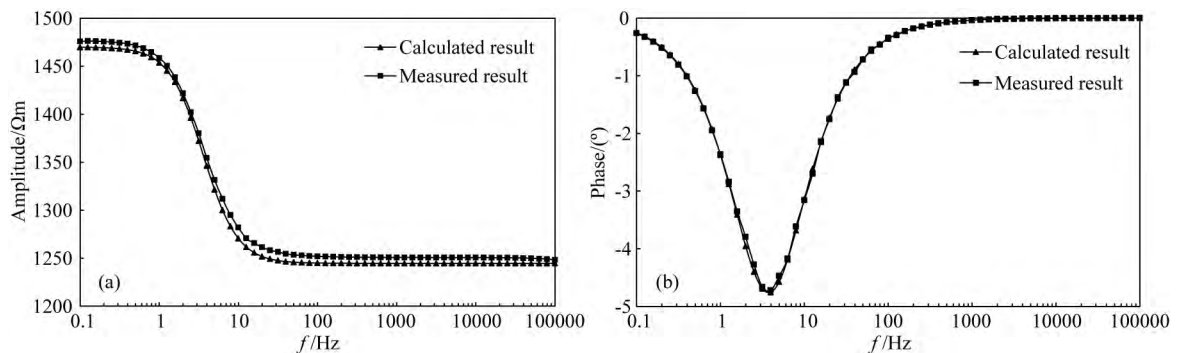


图 4 实测值和理论计算值对比

(a) 振幅对比; (b) 相位对比.

Fig. 4 Comparison of measured result and calculated result

(a) Amplitude comparison; (b) Phase comparison.

测试仪, 测量方式为二极测量. 该仪器具备精度高、测量速度快, 可直接连接计算机并同步记录阻抗振幅、相位的优点. 为验证仪器的可靠性, 在 0.1 Hz~100 kHz 范围内, 等对数间距选取 61 个频点进行测量. 设计一个如图 3 所示阻容(RC)检测电路, 其中电阻  $R_0=1000 \Omega$ ,  $R_1=470 \Omega$ ,  $R_2=51 \Omega$ , 电容  $C=47 \mu\text{F}$ , 则复阻抗计算公式为

$$Z(i\omega) = R_0 + \frac{R_1 \times [R_2 - i(1/\omega C)]}{R_1 + [R_2 - i(1/\omega C)]}, \quad (1)$$

其中,  $\omega=2\pi f$  为角频率,  $f$  为频率, 单位为 Hz.

实测和理论计算的振幅谱和相位谱对比如图 4 所示. 振幅的相对误差范围为 0.29%~0.9%, 平均为 0.52%, 相位的相对误差为 0.51%~4.74%, 平均为 2.09%. 可以认为, 本次实验所选取的测量仪器满足实验要求.

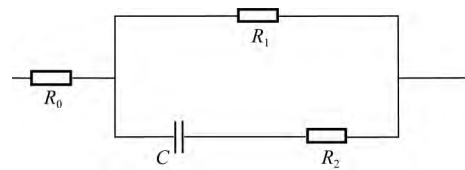


图 3 RC 检测电路

Fig. 3 RC test circuit

#### 2.1.2 复电阻率测量过程

##### (1) 电极选择

电极的选取是实验的一个重要环节, 电极选取不恰当可能会造成电极与页岩标本接触不好, 导电能力下降, 无法获取真实有效的实验数据; 另外, 在交流信号下, 如果电极本身电化学性质不稳定也会造成数据异常. 本次实验采用浸泡饱和硫酸铜溶液的海绵为中间媒介加铜片作为测量电极. 铜-硫酸铜电极相比于其他电极的优势, 前人已做过详细论述

(程辉, 2010; 向葵等, 2016).

### (2) 水分条件的控制

岩石的含水量对电阻率有着非常大的影响, 岩石在干燥状态和饱水状态下的电阻率差异可以到一个量级以上(傅良魁, 1982; 李金铭, 2005). 为尽可能的还原自然条件下页岩的含水情况, 将页岩用水浸泡 24 h 后取出, 自然风干 1 h, 确保电流不从标本表面流过.

### (3) 测量

准备工作做好后, 按图 5 所示的二极装置进行测量. 首先测量走向方向复电阻率, 测量频率设定为 0.1 Hz~100 kHz, 对数等间距取 61 个频率点, 从电脑上可以直接获得阻抗振幅和相位, 根据欧姆定律, 我们可以得到走向方向复电阻率, 如式(2)所示:

$$\rho(i\omega) = \frac{Z(i\omega) \cdot S}{L}, \quad (2)$$

其中,  $Z(i\omega)$  为页岩复阻抗,  $S$  为页岩样的横截面积,  $L$  为页岩样的长度. 本次实验中,  $S=L^2$ , 故式(2)可以简化为

$$\rho(i\omega) = Z(i\omega) \cdot L. \quad (3)$$

走向复电阻率测量完成后, 依次测量倾向和垂直层理方向的复电阻率. 需要说明的是, 本次实验所有的复电阻率测量都是在常温常压下进行的.

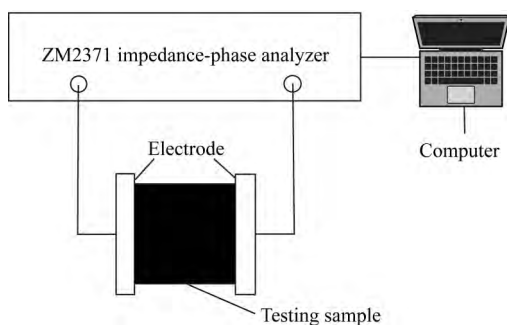


图 5 测量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of measurement

## 2.2 矿物组成和含量测量

岩石矿物组成和含量分析采用的是德国布鲁克 D8-X 射线衍射仪进行分析, 其测量原理是每种矿物晶体都具有特定的 X 射线衍射图谱, 试样中某种矿物的含量与其衍射峰的强度成正相关关系, 沉积岩中黏土矿物总量和常见非黏土矿物含量采用参比强度法测定(中国石油天然气总公司, 2010).

## 2.3 TOC 测量

总有机碳含量(TOC)采用中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院研制的 Rock-Eval-II 型热解仪进行分析, 其测试原理是由氢火焰离子化

检测器检测岩样在热解过程中排出的烃, 热解后的残余有机质加热氧化生成的二氧化碳, 由热导检测器检测(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China and China National Standardization Management Committee, 2012). 直接测得的原始参数包括最大热解峰温  $T_{max}$ 、可溶烃  $S_1$ 、热解烃  $S_2$  和残余烃  $S_4$  数据, 通过分析计算得出 TOC 含量.

## 2.4 最大镜质组反射率 $R_{o,max}$ 测量

镜质组反射率是指波长  $546 \pm 5$  nm(绿光)处, 镜质组抛光面的油浸反射光强度对垂直入射光强度的百分比. 它是利用光电效应原理, 通过光电倍增管将反射光强度转变为电流强度, 并与相同条件下已知反射率的标样产生的电流强度相比较而得出(国家能源局, 2012); 原始数据包括最小随机反射率、最大随机反射率、平均随机反射率和偏差, 平均最大反射率通过分析得出. 需要说明的是, 本文最大镜质组反射率均指平均最大镜质组反射率.

## 3 结果与讨论

### 3.1 测试结果

我们对 6 块页岩的复电阻率、矿物含量、TOC 含量、最大镜质组反射率  $R_{o,max}$  进行了详细测量. 复电阻率振幅谱(Amplitude)和相位(Phase)谱如图 6 所示, TOC、矿物含量及最大镜质组  $R_{o,max}$  测量结果见表 2.

### 3.2 幅频特征和相频特征

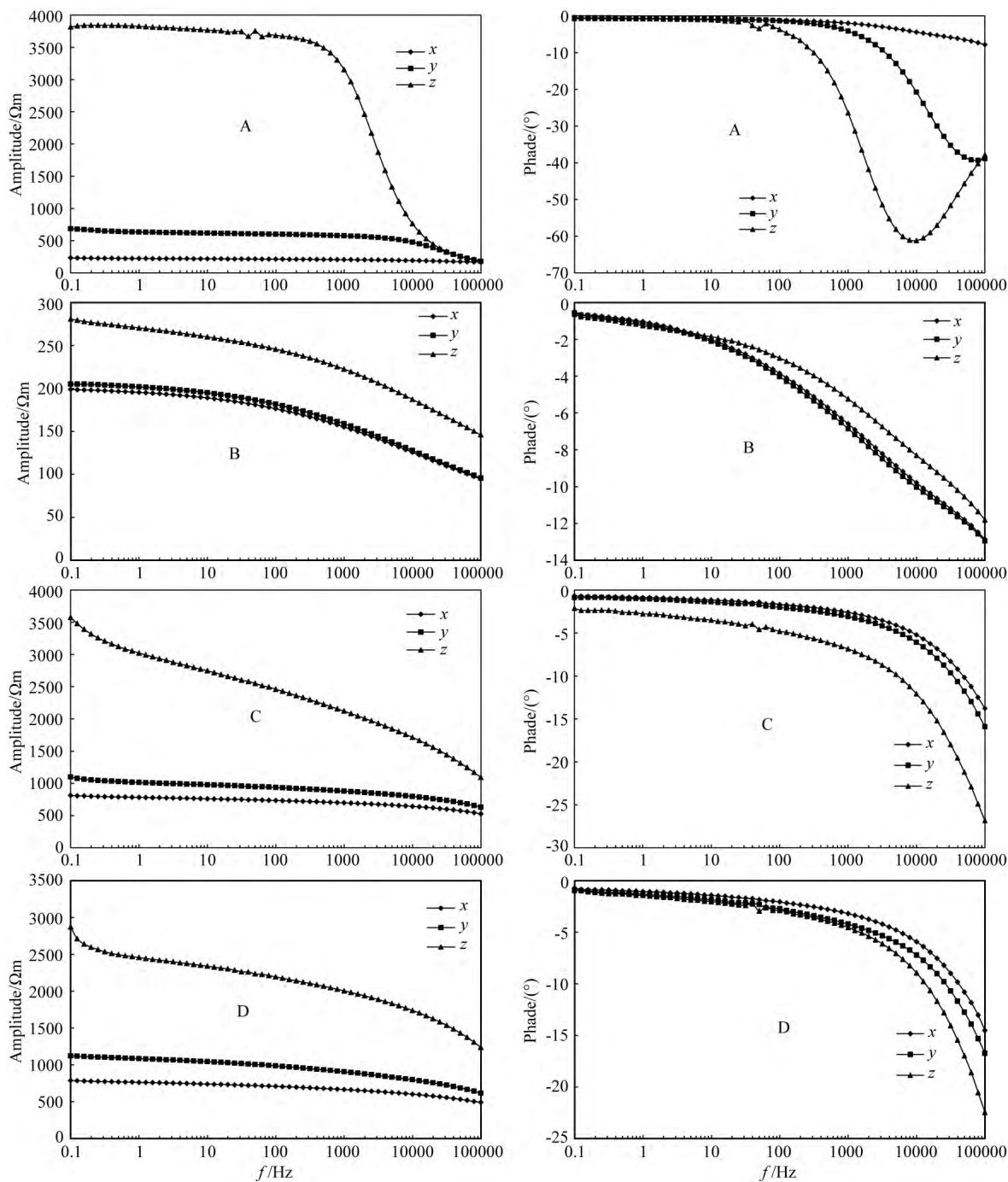
图 6a 为页岩的幅频曲线, 在测量的 0.1 Hz~100 kHz 的范围内, 6 块页岩在走向  $x$ 、倾向  $y$ 、垂向  $z$  的幅频曲线均呈单调递减, 符合一般岩石的激发极化特征(何继善, 2006). 这是因为在交变电流中, 频率  $f$  与电流单向供电时间  $t = 1/2f$  相对应, 频率越低, 供电时间越长, 激电效应就越强, 叠加的总场幅值(复电阻率振幅)就越大. 相反, 频率越高, 极化不充分, 复电阻率振幅就越小. 尤其频率无限大( $f \rightarrow +\infty$ )时, 激电效应趋于 0, 这是总场趋于无激电效应的一次场, 复电阻率幅值最小.

图 6b 为页岩的相频曲线, 在测量的 0.1 Hz~100 kHz 的范围内, 6 块页岩相位均为负值, 表明页岩具有容抗性质. 频率  $f \rightarrow 0$  ( $T \rightarrow +\infty$ ) 相当于直流, 介质受到充分的激发极化, 电压和电流不存在相位差, 相位趋于 0; 当频率  $f \rightarrow +\infty$  ( $T \rightarrow 0$ ), 介质来不及极化, 相位也将趋于 0, 在中间某一个频率相位

表 2 矿物含量、TOC、 $R_{0,max}$  测量结果

Table 2 Mineral content, TOC content and maximum vitrinite reflectance

页岩编号	石英/%	长石/%	白云石/%	云母/%	伊利石/%	黄铁矿/%	黏土矿物/%	脆性矿物/%	TOC/%	$R_{0,max}/\%$
A	38	6	0	30	26	0	56	44	0.06	5.648
B	41	0	0	20	38	0	59	41	0.44	1.919
C	72	24	2	0	0	2	24	74	6.90	1.408
D	32	4	2	17	47	0	64	34	7.23	1.426
E	31	0	0	20	49	0	69	31	2.35	4.110
F	26	45	0	22	0	0	29	71	0.17	1.415



(续)

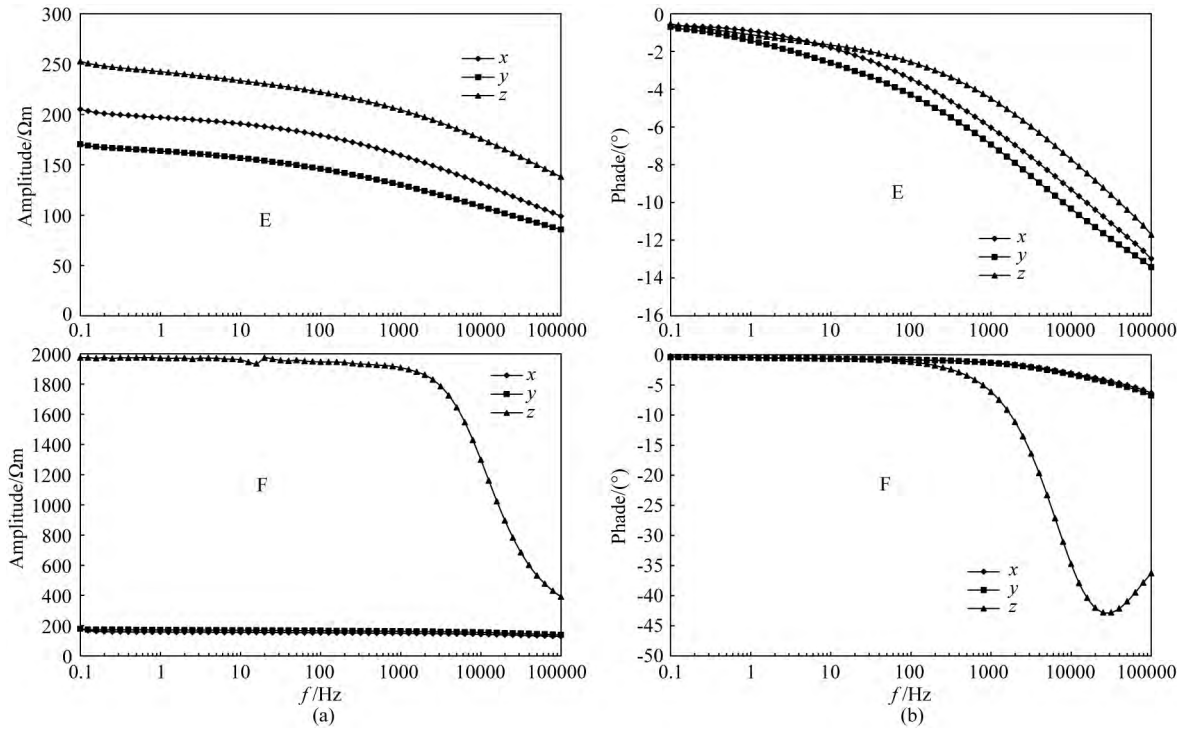


图 6 页岩复电阻率测试结果

(a) 幅频曲线; (b) 相频曲线.  $x$  代表走向,  $y$  代表倾向,  $z$  代表垂直层理方向.

Fig. 6 Test results of complex resistivity of shale samples

(a) The amplitude spectrum; (b) The phase spectrum.  $x$  is the strike direction,  $y$  is the dip direction and  $z$  is the vertical direction.

取得极小值. 本次实验中, 页岩 A 和 F 的垂向  $z$  方向完整的显示了这一规律, 其他页岩呈现了规律的一部分, 但未出现极小值点, 推测极小值点可能出现在测量频率之外, 但因仪器测量范围所限, 未能进行验证.

### 3.3 复电阻率各向异性特征

岩石电阻率的各向异性系数  $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}}$  (李金铭, 2005), 其中  $\rho_t$  为水平方向电阻率,  $\rho_n$  为垂直方向电阻率,  $\lambda > 1$ . 然而实际测量中, 水平的走向  $x$  和倾向  $y$  之间电阻率仍然存在差异, 为了直观的描述页岩走向、倾向、垂向三方向电阻率的差异, 进一步定义页岩的各向异性系数为: 走向  $x$  和垂向  $z$  电阻率各向异性系数  $\lambda_{xz} = \sqrt{\frac{\rho_z}{\rho_x}}$ , 倾向  $y$  和垂向  $z$  电阻率各向异性系数  $\lambda_{yz} = \sqrt{\frac{\rho_z}{\rho_y}}$ , 走向  $x$  和倾向  $y$  电阻率各向异性系数  $\lambda_{xy} = \sqrt{\frac{\max(\rho_x, \rho_y)}{\min(\rho_x, \rho_y)}}$ . 上述定义表明, 各向异性系数越大, 则两个方向电阻率差异越大.

在 0.1 Hz~100 kHz 内, 按对数等间距选取 61 个频点, 计算各频点三方向的电阻率各向异性系数, 结果如图 7 所示. 从图 7 可知, 在中低频阶段,  $\lambda_{xz}$  和

$\lambda_{yz}$  显著大于  $\lambda_{xy}$ , 说明在中低频阶段, 页岩垂向电阻率显著高于走向、倾向电阻率; 但随着频率增加,  $\lambda_{xz}$ 、 $\lambda_{yz}$ 、 $\lambda_{xy}$  均单调较小, 甚至趋近于 1, 说明随着频率增加, 页岩电阻率各向异性减小, 甚至趋于各向同性. 以页岩 A 为例详细说明. 当频率小于 1000 Hz 时, 各向异性系数  $\lambda_{xz}$ 、 $\lambda_{yz}$  分别大于 4 和 2, 意味着在频率小于 1000 Hz 时, 垂向电阻率比走向电阻率大 16 倍, 比倾向电阻率大 4 倍以上. 当频率继续增加, 各向异性系数均减小, 特别是当频率达到 100 kHz 时,  $\lambda_{xz}$ 、 $\lambda_{yz}$  和  $\lambda_{xy}$  接近 1, 此时页岩 A 趋向于各向同性.

我们认为, 页岩的层理结构是垂向电阻率大于水平的走向和倾向电阻率的主要原因; 而走向电阻率和倾向电阻率的差异则可能是由岩石中矿物定向排列或者裂隙定向排列等造成的, 其内在机理需要今后进一步研究. 至于页岩三方向电阻率差异随频率增加而减小, 其很大程度上是岩石的容抗特性引起的. 我们知道容抗为

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}, \tag{4}$$

其中,  $f$  为频率,  $C$  为电容.

从式(4)可以看出容抗具有通高频阻低频的特性. 在低频阶段页岩不同方向复电阻率的差异是由普通电阻和容抗共同影响的, 随着频率升高, 容抗减

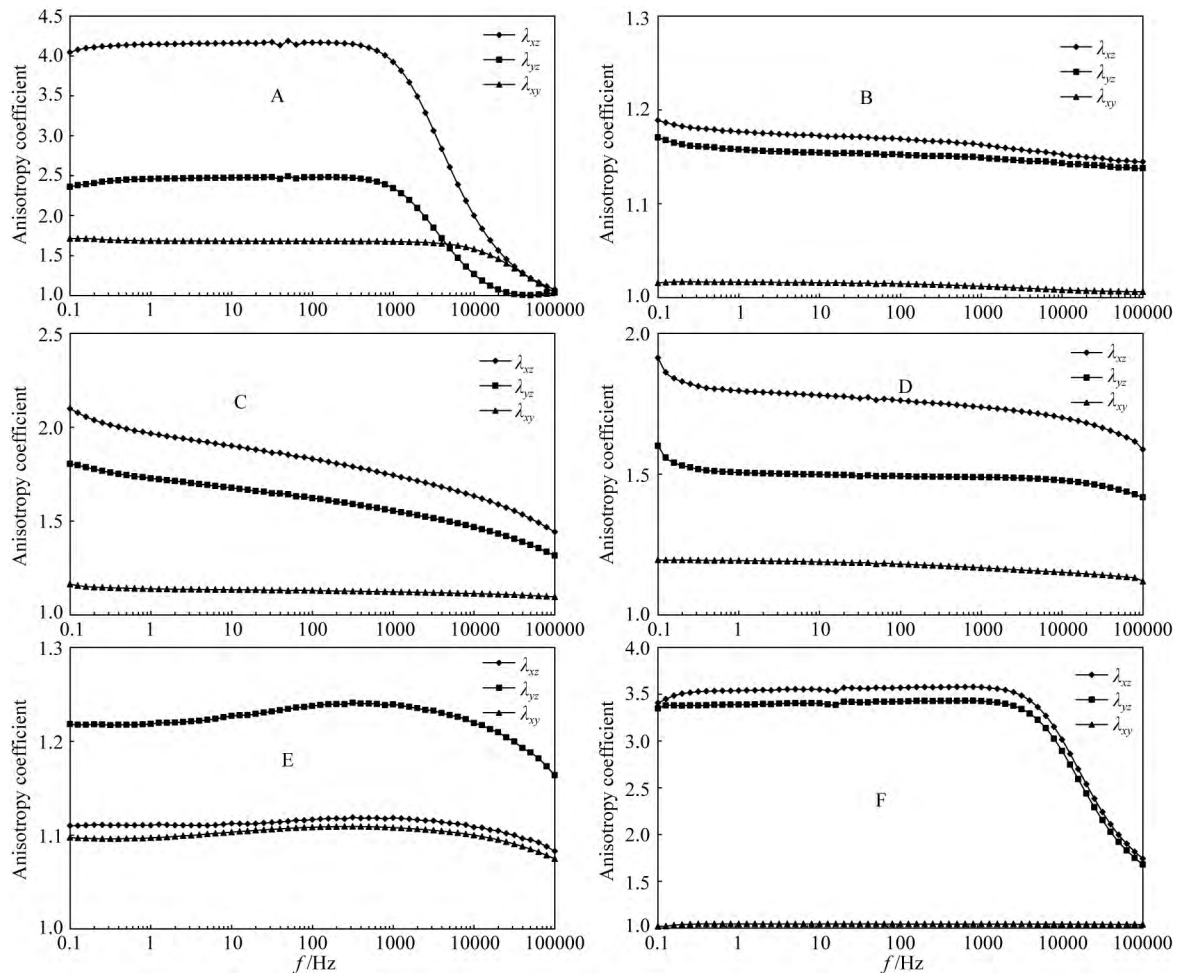


图 7 页岩各向异性系数

Fig. 7 Anisotropy coefficient of shale

小,当频率足够大时,容抗对复电阻率大小的影响可以忽略,此时页岩不同方向复电阻率的差异仅受普通电阻影响.这可能是页岩电阻率各向异性随频率增加减小的原因.

### 3.4 复电阻率模型

为了描述频率域岩石的复电阻率频率特征,国内外专家陆续提出了不同的模型,如 Dias 模型(Dias, 1972, 2000)、Zonge 模型(Zonge et al., 1972)和 Cole-Cole 模型(Pelton et al., 1978)等.其中 Cole-Cole 模型因其参数物理意义比较明确,应用最为广泛.考虑到页岩是多相极化介质,单 Cole-Cole 模型已经不能够充分描述页岩的复电阻率特征(Wang et al., 2016),本文采用乘积形式的复 Cole-Cole 模型对实验结果进行拟合.乘积形式的复 Cole-Cole 模型的表达式为

$$\rho(i\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m_1 \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau_1)^{c_1}} \right] \right\} \times \left\{ 1 - m_2 \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau_2)^{c_2}} \right] \right\}, \quad (5)$$

式中: $\rho_0$  为零频电阻率; $m_1$ 、 $\tau_1$ 、 $c_1$  和  $m_2$ 、 $\tau_2$ 、 $c_2$  分别是表征激电效应和电磁响应的频谱参数:极化率、时间常数和频率相关系数.

利用复 Cole-Cole 模型和差分进化法(Storn and Price, 1997)对页岩三方向复电阻率数据进行拟合.以页岩 A 为例,图 8 是三方向测量结果和反演结果的对比,从图中可以看出,除低频存在一定误差外,整体拟合程度很高.因此,采用复 Cole-Cole 模型描述页岩复电阻率是可行的.通过复 Cole-Cole 模型反演,我们可以获得零频电阻率、极化率、频率相关系数和时间常数,反演页岩 A 的 7 个参数见表 3.本次研究,我们只讨论在激发极化法中利用最广泛的零频电阻率和极化率  $m_1$ .从表 3 可以看出,页岩 A 三方向的极化率分别为 0.18、0.25、0.35,也表现出明显的各向异性.这提醒我们在数据解释和利用激发极化法勘探页岩气时,应该注意极化率各向异性(Winchen et al., 2009; Kenkel et al., 2012; Kenkel and Kemna, 2017).



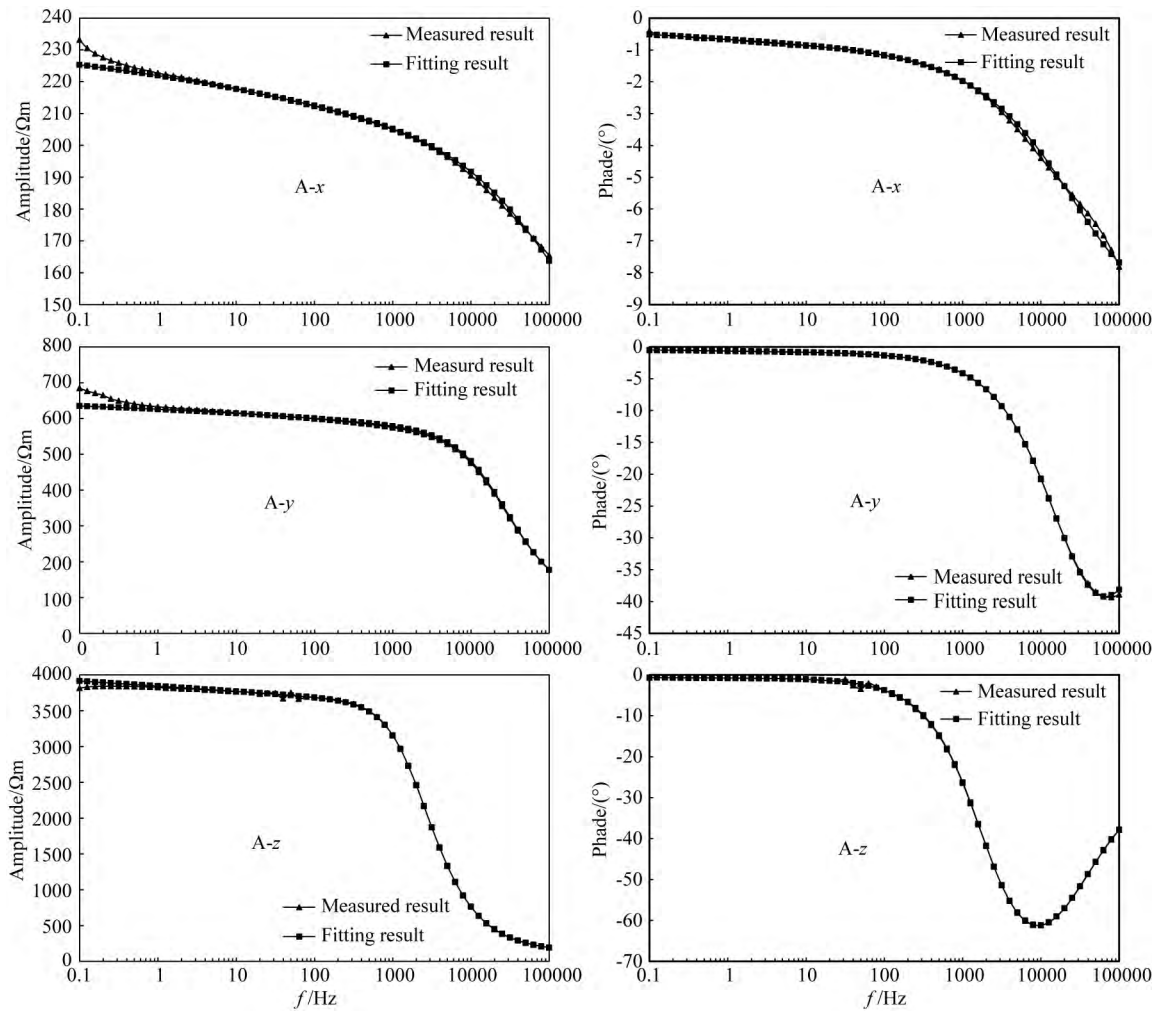


图 8 页岩 A 三方向的振幅和相位拟合图

A-x 代表页岩 A 的走向, A-y 代表页岩 A 倾向方向, A-z 代表页岩 A 垂直层理方向.

Fig. 8 Amplitude and phase fitting diagrams of three directions of shale A

A-x represents the strike direction of shale A, A-y represents the dip direction of shale A and A-z represents the vertical direction of shale A.

表 3 反演页岩 A 的 7 个参数

Table 3 Seven parameters of shale A to be inverted

方向	$\rho_0$	$m_1$	$\tau_1$	$c_1$	$m_2$	$\tau_2$	$c_2$
x	233	0.18	$9.67 \times 10^{-4}$	0.18	0.37	$1.15 \times 10^{-6}$	0.55
y	660	0.25	$4.86 \times 10^{-5}$	0.15	0.70	$7.60 \times 10^{-6}$	0.86
z	4455	0.35	$8.17 \times 10^{-4}$	0.08	0.75	$8.50 \times 10^{-5}$	0.97

此外,为后面分析方便,表 4 列出了 6 块页岩三方向的零频电阻率,后文分析电阻率跟页岩气储层参数(TOC 含量,脆性矿物含量,最大镜质组反射率)关系中所指的电阻率,均指零频电阻率.

### 3.5 电阻率与脆性矿物、黏土矿物关系

脆性矿物和黏土矿物含量是评价页岩的关键参数之一,它们不仅影响页岩气含量和页岩的可压裂性,同时也控制页岩孔隙特征 (Schettler et al., 1991;

表 4 反演的页岩零频电阻率(单位:Ωm)

Table 4 Inverted zero-frequency resistivity of shale samples (unit: Ωm)

方向	A	B	C	D	E	F
x	233	304	1053	862	217	164
y	660	297	1598	1808	169	228
z	4455	459	3525	2607	325	2728

Bowker, 2007; Hill et al., 2007; 聂海宽等, 2009; Burtman et al., 2014; He et al., 2017). 因此,在利用电法勘探评价页岩气储层时,有必要研究脆性矿物、黏土矿物对电阻率的影响.

图 9a 为脆性矿物含量和黏土矿物含量的关系图,可以看出脆性矿物和黏土矿物呈现显著的负线性相关关系,其决定系数趋近于 1,即电阻率与脆性

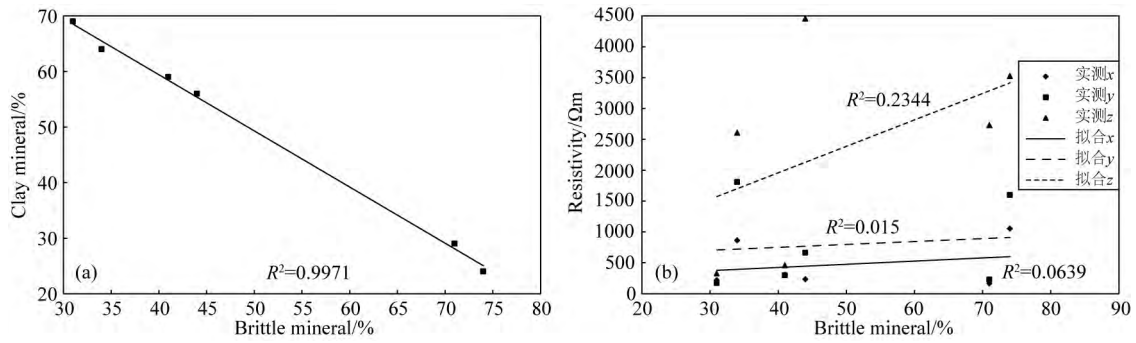


图9 页岩脆性矿物和黏土矿物、电阻率关系

(a) 脆性矿物含量和黏土矿物含量关系; (b) 脆性矿物含量和电阻率关系。

Fig. 9 Relationships between brittle minerals content, clay minerals content and resistivity in shale samples

(a) Relationship between brittle minerals content and clay minerals content; (b) Relationship between brittle minerals and resistivity.

矿物关系跟电阻率与黏土矿物关系是相反的. 因此, 本节仅分析脆性矿物含量和电阻率的关系. 图 9b 为脆性矿物含量与走向、倾向、垂向电阻率的关系图. 很明显, 页岩三方向电阻率与脆性矿物含量之间的线性回归决定系数  $R^2$  最大也仅为 0.23, 未发现显著线性相关关系.

页岩是由脆性矿物、黏土矿物、矿物间孔隙以及孔隙中流体组成的多孔介质(刘树根等, 2013). 一般情况下, 脆性矿物对孔隙的形成有利, 而更多孔隙有利于吸收水分, 从而降低页岩的电阻率 (Wang et al., 2016; Leroy and Revil, 2009). 但同时, 我们应该注意到, 脆性矿物的重要组成石英, 是一种电阻率极高的矿物, 其电阻率超过了  $10^6 \Omega\text{m}$ (李金铭, 2005), 高石英含量岩石通常具有较高的电阻率. 因此, 页岩一方面由于脆性矿物较多, 其多孔隙可以导致页岩电阻率低, 另一方面又由于脆性矿物(如石英)本身的电阻率高可致页岩的高电阻率, 这两种情况同时影响着页岩最终的电阻率, 这使得页岩电阻率与脆性矿物并不存在简单的对应关系.

### 3.6 电阻率与 TOC 关系

鉴于总有机碳含量(TOC)、电阻率分别是评价页岩储层的重要参数(Liu et al., 2019; 张丰麒等, 2021)和反映页岩电性特征的重要依据. 本节试图研究电阻率与 TOC 之间存在的联系. 图 10 为电阻率  $\rho_0$  与 TOC 含量关系图. 从图 10 可以看出, 在走向  $x$  和倾向  $y$  上, 页岩电阻率与 TOC 呈较显著的线性正相关关系(其决定系数  $R^2$  均大于 0.8), 而垂向  $z$  电阻率与 TOC 决定系数  $R^2$  小于 0.1, 不存在显著的线性相关关系.

通常, 岩石中的水是影响岩石电阻率最重要的因素, 然而当岩石中的水被不导电的油或气取代时, 会造成电阻率升高(Passey et al., 2010), 而总有机

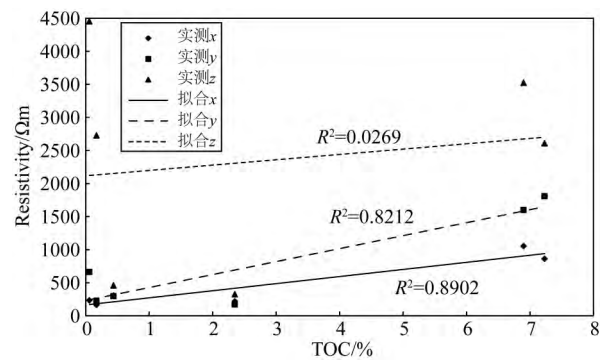


图10 电阻率与 TOC 关系

Fig. 10 Correlation between the TOC content and resistivity of shale samples

碳含量(TOC)既可作为页岩气产气的基础条件, 又可以作为吸附气的主要载体, 页岩层中 TOC 越高越有利于页岩气的富集(孟召平等, 2015), 刘树根等(2013)分析龙马溪组页岩 TOC 和含气量关系时也证实了这一点, 即 TOC 含量与含气量存在较好的正线性相关关系. 因此, 当页岩 TOC 含量高时, 含气量也可能高, 从而导致页岩电阻率也高, 这就是走向和倾向上, 页岩电阻率随 TOC 含量增加而增大的原因. 然而, 在垂向上, TOC 含量和电阻率未发现明显关系, 其决定系数仅为 0.15. 这可能是由于页岩层理结构引起, 即垂向上的层理对电阻率的影响远大于 TOC 的影响, 使得该方向上的电阻率与 TOC 线性相关关系不显著.

### 3.7 电阻率与最大镜质组反射率 $R_{o,max}$ 关系

镜质体反射率是一种稳定的、可大量横向对比的有机质成熟度指标, 应用广泛. 同时其与发生生烃和保存烃过程的地下深度之间存在经验关系, 对油气勘探至关重要(Lupoi et al., 2019). 基于上述原因, 分析电阻率与镜质组反射率关系, 对了解电阻率与页岩成熟度之间的关系, 可以促进电法用于页岩

气勘探. 页岩三方向电阻率与最大镜质组反射率  $R_{o,max}$  之间的关系如图 11 所示. 从图 11 可知, 倾向  $y$  电阻率与最大镜质组反射率  $R_{o,max}$  线性回归决定系数  $R^2$  最大为 0.27, 走向  $x$  决定系数  $R^2$  为 0.14, 垂向  $z$  决定系数  $R^2$  为 0.03, 说明页岩三方向电阻率与最大镜质组反射率  $R_{o,max}$  线性关系不显著, 即页岩成熟度与电阻率无明显线性相关关系, 这与 Adão 等(2016)的结论一致. Adão 认为页岩电阻率主要受孔隙度控制, 孔隙度对电阻率主导性的影响使得成熟度对电阻率的影响无法体现. 笔者认为, 除 Adão 提到的孔隙度外, 页岩的层理结构, 矿物的定向排列等, 都是掩盖成熟度与电阻率关系的原因, 具体机理仍需今后进一步研究.

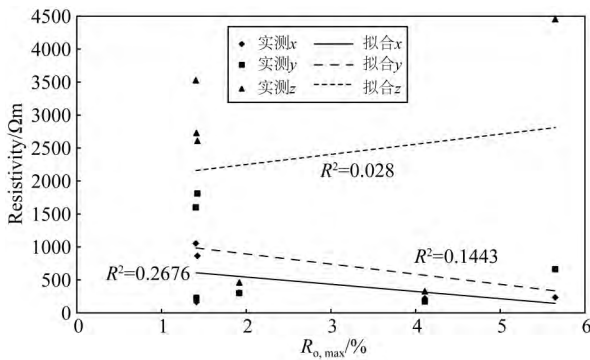


图 11 电阻率与  $R_{o,max}$  关系

Fig. 11 Correlation between  $R_{o,max}$  and resistivity of shale samples

### 3.8 应用潜力

页岩气电法勘探的一个关键问题是了解页岩的电性性质 (Wang et al., 2016), 而地球介质的物理性质各向异性是客观存在且不能忽视 (王赞等, 2017). 研究页岩复电阻率各向异性特征及其与页岩气储层参数的关系, 可以为评估页岩气藏提供一种新的思路. 一方面, 我们可以对页岩的电性性质有更全面的理解, 了解频率对页岩电阻率各向异性的影响, 从而改进勘探方法, 完善对采集电性数据的解释. 另一方面, 脆性矿物含量、TOC 含量和最大镜质组反射率均是评价页岩气藏的重要指标, 通过研究电阻率与这些页岩气储层参数的关系, 可以由实验室测量的电阻率估计 TOC 含量、脆性矿物含量和镜质组最大反射率, 这可以大大降低测试成本.

## 4 结论和认识

在 0.1 Hz~100 kHz 范围内, 通过对黔东南地区

6 块页岩三个正交方向 (走向、倾向、垂直层理方法) 复电阻率、总有机碳 (TOC) 含量、脆性矿物含量和黏土矿物含量、最大镜质组反射率  $R_{o,max}$  的测试与分析, 可以取得以下结论:

(1) 页岩复电阻率振幅各向异性存在频率依赖特征, 在中低频阶段, 页岩复电阻率振幅的各向异性明显, 垂向复电阻率振幅显著大于走向、倾向复电阻率振幅, 但随频率增加, 页岩复电阻率振幅各向异性差异减小, 甚至趋于各向同性.

(2) 借助差分进化, 复 Cole-Cole 模型可以很好的拟合测量数据.

(3) 页岩走向、倾向电阻率与 TOC 含量呈较显著的正线性相关关系, 其可以在一定程度上反映 TOC 的含量.

(4) 页岩电阻率与脆性矿物含量、黏土矿物含量、最大镜质组反射率关系复杂, 它们之间不存在简单的线性关系.

此外, 由于页岩的易碎性及实验采样、制样数量有限, 未能进行大量采样测试, 从而总结出来的规律, 可能与我国页岩的多样性和复杂性不匹配. 同时, 岩石电阻率的影响因素还有很多, 如矿物定向排列、温度、压力等, 本文的研究仅限于常温压条件, 更进一步的研究有待于今后深入.

致谢 感谢中国科学院地球化学研究所肖加飞研究员在野外采样方面提供的帮助和指导.

## References

- Adão F, Ritter O, Spangenberg E. 2016. The electrical conductivity of Posidonia black shales—from magnetotelluric exploration to rock samples. *Geophysical Prospecting*, 64(2): 469-488, doi: 10.1111/1365-2478.12288.
- Alexander T, Baihly J, Boyer C, et al. 2011. Shale gas revolution. *Oilfield Review*, 23(3): 40-55.
- Banik N C. 1987. An effective anisotropy parameter in transversely isotropic media. *Geophysics*, 52(12): 1654-1664, doi: 10.1190/1.1442282.
- Bowker K A. 2007. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: issues and discussion. *AAPG Bulletin*, 91(4): 523-533, doi: 10.1306/06190606018.
- Burtman V, Fu H Y, Zhdanov M S. 2014. Experimental Study of induced polarization effect in unconventional reservoir rocks. *Geomaterials*, 4(4): 117-128, doi: 10.4236/gm.2014.44012.
- Cheng H. 2010. The study on rocks' electrical properties base on frequency response [Ph. D. Thesis] (in Chinese). Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.
- China National Petroleum Corporation. 2010. SY/T 6210-1996 Analysis

- method for clay minerals and ordinary non-clay minerals in sedimentary rocks by the X-ray diffraction (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press.
- Deng J X, Wang H, Zhou H, et al. 2015. Microtexture seismic rock physical properties and modeling of Longmaxi Formation shale. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(6): 2123-2136, doi: 10.6038/cjg20150626.
- Dias C A. 1972. Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 77(26): 4945-4956, doi: 10.1029/JB077i026p04945.
- Dias C A. 2000. Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks. *Geophysics*, 65(2): 437-451, doi: 10.1190/1.1444738.
- Fu L K. 1982. Excited Polarization Method (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Management Committee. 2012. Rock pyrolysis analysis. Beijing: China Standards Press.
- Hart B, Sayers C M, Jackson A. 2011. An introduction to this special section: shales. *The Leading Edge*, 30(3): 272-273, doi: 10.1190/1.3567257.
- He J S. 2006. Dual Frequency IP Method (in Chinese). Beijing: Higher Education Press.
- He L F, Chen L, Wang X B, et al. 2017. Electrical properties and its correlation to the petrology of the Upper Yangtze organic shales. *Geophysics*, 82(4): D199-D209, doi: 10.1190/geo2016-0203.1.
- Hill R J, Zhang E T, Katz B J, et al. 2007. Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 91(4): 501-521, doi: 10.1306/12060606063.
- Huang T, Yu G, Wang X B, et al. 2016. Experiment research of the main influence factors of shale sample complex resistivity dispersion characteristics. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 38(2): 167-174, doi: 10.3969/j.issn.1001-1749.2016.02.04.
- Jiang G Q, Shi X Y, Zhang S H, et al. 2011. Stratigraphy and paleogeography of the Ediacaran Doushantuo Formation (ca. 635-551 Ma) in South China. *Gondwana Research*, 19(4): 831-849, doi: 10.1016/j.gr.2011.01.006.
- Johnston J E, Christensen N I. 1995. Seismic anisotropy of shales. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B4): 5991-6003, doi: 10.1029/95JB00031.
- Jones L E A, Wang H F. 1981. Ultrasonic velocities in Cretaceous shales from the Wolliston Basin. *Geophysics*, 46(3): 1221-1222, doi: 10.1190/1.1441199.
- Kenkel J, Höerdt A, Kemna A. 2012. 2D modelling of induced polarization data with anisotropic complex conductivities. *Near Surface Geophysics*, 10(6): 533-544, doi: 10.3997/1873-0604.2012050.
- Kenkel J, Kemna A. 2017. Sensitivity of 2-D complex resistivity measurements to subsurface anisotropy. *Geophysical Journal International*, 208(2): 1043-1057, doi: 10.1093/gji/ggw353.
- Lai F Q, Luo H, Gong D J, et al. 2018. New evaluation model for brittle index of shale reservoir: a case study of Niutitang formation shale reservoir in Guizhou province. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 33(6): 2358-2367, doi: 10.6038/pg2018BB0501.
- Leroy P, Revil A. 2009. A mechanistic model for the spectral induced polarization of clay materials. *Journal of Geophysical Research: solid earth*, 114(B10): B10202, doi: 10.1029/2008JB006114.
- Levin F K. 1979. Seismic velocities in transversely isotropic media. *Geophysics*, 44(5): 918-936, doi: 10.1190/1.1440985.
- Li J M. 2005. Geoelectric Field and Electrical Exploration (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House.
- Li P F. 2015. Complex resistivity measurement and research of induced polarization mechanism based on rich organic shale from Southern China [Master's Thesis] (in Chinese). Wuhan: Yangtze University.
- Liao J. 2019. Application of magneto telluric sounding in shale gas exploration in Xuefeng mountain area [Master's Thesis] (in Chinese). Nanchang: East China University of Technology.
- Liu L, Tang S H, Xi Z D. 2019. Total organic carbon enrichment and its impact on pore characteristics: a study for Niutitang formation shales in northern Guizhou. *Energies*, 12(8): 1480, doi: 10.3390/en12081480.
- Liu S G, Wang S Y, Sun W, et al. 2013. Characteristics of black shale in Wufeng formation and Longmaxi formation in Sichuan basin and its peripheral areas. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 40(6): 621-639, doi: 10.3969/j.issn.1671-9727.2013.06.02.
- Loucks R G, Ruppel S C. 2007. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 91(4): 579-601, doi: 10.1306/1102060606059.
- Lupoi J S, Hackley P C, Birsic E, et al. 2019. Quantitative evaluation of vitrinite reflectance in shale using Raman spectroscopy and multivariate analysis. *Fuel*, 254: 115573, doi: 10.1016/j.fuel.2019.05.156.
- Meng F Y, Bao S J, Chen K, et al. 2018. The prediction of shale gas favorable area based on wide area electromagnetic method: A case study of Wushan area in northeast Chongqing. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 42(1): 68-74, doi: 10.11720/wtyht.2018.1.08.
- Meng Z P, Guo Y S, Liu W. 2015. Relationship between organic carbon content of shale gas reservoir and logging parameters and its prediction model. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 40(2): 247-253, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1490.
- Min G, Wang X B, Zhang B, et al. 2014. A shale gas exploration test with AMT method in Cengong area, Northeast Guizhou. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 49(4): 815-824.
- National Energy Administration. 2012. SY/T 5124-2012 Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite in sedimentary rock (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press.
- Nie H K, Tang X, Bian R K. 2009. Controlling factors for shale gas

- accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 40(7): 484-491, doi: 10.3321/j.issn:0253-2697.2009.04.002.
- Passey Q R, Bohacs K M, Esch W L, et al. 2010. From oil-prone source rock to gas-producing shale reservoir—geologic and petrophysical characterization of unconventional shale-gas reservoirs. // 80th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys. Expanded Abstracts, doi: 10.2118/131350-MS.
- Pelton W H, Ward S H, Hallof P G, et al. 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43(3): 588-609, doi: 10.1190/1.1440839.
- Qu X Y, Li H L, Yang F Q, et al. 2019. Application of integrated gravitational, magnetic and electrical geophysical methods to the shale gas geological exploration in southern: a case study of Luzhai, Guizhong depression. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 34(3): 1081-1088, doi: 10.6038/pg2019CC0115.
- Schettler P D Jr, Parmely C R. 1991. Contributions to total storage capacity in Devonian shales. // 61st Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys. Expanded Abstracts, 77-88, doi: 10.2118/23422-MS.
- Storn R, Price K. 1997. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4): 341-359, doi: 10.1023/A:1008202821328.
- Sun W J, Fu L Y, Guan X Z, et al. 2013. A study on anisotropy of shale using seismic forward modeling in shale gas exploration. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(3): 961-970, doi: 10.6038/cjg20130324.
- Vernik L, Nur A. 1992. Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks. *Geophysics*, 57(5): 727-735, doi: 10.1190/1.1443286.
- Wang X B, Zhang B, He Z X, et al. 2016. Electrical properties of Longmaxi organic-rich shale and its potential applications to shale gas exploration and exploitation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 36: 573-585, doi: 10.1016/j.jngse.2016.10.027.
- Wang Y, Wang X L. 2008. Annelid from the Neoproterozoic doushantuo formation in northeastern Guizhou, China. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 257-265, doi: 10.1111/j.1755-6724.2008.tb00576.x.
- Wang Y, Yang D H, Yin C C, et al. 2017. Anisotropic geophysics and vector field. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 62(23): 2594-2605, doi: 10.1360/N972016-01114.
- White S H, Shaw H F, Huggett J M. 1984. The use of back-scattered electron imaging for the petrographic study of sandstones and shales. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54(2): 487-494, doi: 10.1306/212F844F-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Winchen T, Kemna A, Vereecken H, et al. 2009. Characterization of bimodal facies distributions using effective anisotropic complex resistivity: a 2D numerical study based on Cole-Cole models. *Geophysics*, 74(3): A19-A22, doi: 10.1190/1.3113986.
- Wu Y Q, Jin Z G, Cai X D. 2012. Evaluation on resource potential and thoughts on exploitation of shale gas from Guizhou province, China. *Acta Mineralogica Sinica* (in Chinese), 32(4): 569-575, doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2012.04.008.
- Xiang K, Hu W B, Yan L J, et al. 2014. Complex resistivity dispersion characteristics of shale samples in Sichuan and Guizhou area. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 49(5): 1013-1019, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2014.05.053.
- Xiang K, Hu W B, Yan L J, et al. 2016. Study on measurement technology and calibration method of rock complex resistivity. *Science Technology and Engineering* (in Chinese), 16(5): 138-141, 153, doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.05.025.
- Yan L J, Xiang K, Li P F, et al. 2014. Study on the induced polarization model in the exploration for shale gas in southern China. // 84th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys. Expanded Abstracts, 912-916, doi: 10.1190/segam2014-0186.1.
- Yang X, Zhou J X, Yang J, et al. 2011. Geological-geophysical-geochemical characteristics and prospecting of Congjiang Nage Cu polymetallic deposit, Guizhou Province, China. *Acta Mineralogica Sinica* (in Chinese), 31(3): 353-359, doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2011.03.004.
- Yang X L, Li B, Peng C S, et al. 2017. Application of a wide-field electromagnetic method to shale gas exploration in South China. *Applied Geophysics*, 14(3): 441-448, doi: 10.1007/s11770-017-0633-x.
- Yu G, He Z X, He L F, et al. 2015. Complex resistivity characteristics of high TOC marine shale core samples and its applications. // 85th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys. Expanded Abstracts, 41-44, doi: 10.1190/GEM2015-011.
- Zhai G Y, Wang Y F, Bao S J, et al. 2017. Major factors controlling the accumulation and high productivity of marine shale gas and prospect forecast in southern China. *Earth Science* (in Chinese), 42(7): 1075-1068, doi: 10.3799/dqkx.2017.085.
- Zhang C H, Liu X J, He L F, et al. 2013. A study of exploration organic rich shales using Time-Frequency Electromagnetic Method (TFEM). *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(9): 3173-3183, doi: 10.6038/cjg20130930.
- Zhang C H, Liu X J, Zhou H, et al. 2015. A step forward study for the exploration of organic-rich shale by using time-frequency electromagnetic method (TFEM). *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 54(5): 627-634, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2015.05.016.
- Zhang F Q, Jiang D J, Du R L, et al. 2021. Methodology of a TOC inversion based on linearized rock physics model of shale. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 36(3): 1154-1165, doi: 10.6038/pg2021EE0239.
- Zhang Q X, Li D Q, Tian M J. 2017. Application of wide field electromagnetic method to the hydrocarbon exploration in a basin of South Jiangxi. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 52(5): 1085-1092, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2017.05.023.
- Zhou Y M, Liu X J, Zhang C H, et al. 2015. The TEEM technology for quick identification of 'sweet spot' of shale gas and its application. *Geophysical & Geochemical Exploration* (in Chinese), 39(1): 60-

63, 83, doi: 10.11720/wtyht.2015.1.10.

Zhu Y P, Liu E R, Martinez A, et al. 2011. Understanding geophysical responses of shale-gas plays. *The Leading Edge*, 30(3): 332-338, doi: 10.1190/1.3567265.

Zonge K L, Sauck W A, Sumner J S. 1972. Comparison of time, frequency, and phase measurements in induced polarization. *Geophysical Prospecting*, 20(3): 626-648, doi: 10.1111/j.1365-2478.1972.tb00658.x.

## 附中文参考文献

程辉. 2010. 岩(矿)石物性参数的频率响应研究[博士论文]. 北京: 中国科学院大学.

邓继新, 王欢, 周浩等. 2015. 龙马溪组页岩微观结构、震岩石物性特征与建模. *地球物理学报*, 58(6): 2123-2136, doi: 10.6038/cjg20150626.

傅良魁. 1982. 激发电极化法. 北京: 地质出版社.

国家能源局. 2012. SY/T 5124-2012 沉积岩中镜质体反射率测定方法. 北京: 石油工业出版社.

何继善. 2006. 双频激电法. 北京: 高等教育出版社.

黄涛, 余刚, 王绪本等. 2016. 页岩岩芯复电阻率频散特征主要影响因素的实验研究. *物探化探计算技术*, 38(2): 167-174, doi: 10.3969/j.issn.1001-1749.2016.02.04.

赖富强, 罗涵, 龚大建等. 2018. 一种新的页岩气储层脆性指数评价模型研究——以贵州下寒武统牛蹄塘组页岩储层为例. *地球物理学进展*, 33(6): 2358-2367, doi: 10.6038/pg2018BB0501.

李金铭. 2005. 地电场与电法勘探. 北京: 地质出版社.

李鹏飞. 2015. 南方富有机质页岩复电阻率测试分析与激电机理研究[硕士论文]. 武汉: 长江大学.

廖健. 2019. 大地电磁测深法在雪峰山地区页岩气勘探中的应用研究[硕士论文]. 南昌: 东华理工大学.

刘树根, 王世玉, 孙伟等. 2013. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组黑色页岩特征. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 40(6): 621-639, doi: 10.3969/j.issn.1671-9727.2013.06.02.

孟凡洋, 包书景, 陈科等. 2018. 基于广域电磁法的页岩气有利区预测——以渝东北巫山地区为例. *物探与化探*, 42(1): 68-74, doi: 10.11720/wtyht.2018.1.08.

孟召平, 郭彦省, 刘尉. 2015. 页岩气储层有机碳含量与测井参数的关系及预测模型. *煤炭学报*, 40(2): 247-253, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1490.

闵刚, 王绪本, 张兵等. 2014. AMT 法在黔东北岑巩地区的页岩气勘探试验. *石油地球物理勘探*, 49(4): 815-824.

聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 2009. 页岩气成藏控制因素及中国南方页

岩气发育有利区预测. *石油学报*, 30(4): 484-491, doi: 10.3321/j.issn:0253-2697.2009.04.002.

区小毅, 黎海龙, 杨富强等. 2019. 重磁电综合物探技术在南方页岩气地质调查中的应用研究——以桂中坳陷鹿寨地区为例. *地球物理学进展*, 34(3): 1081-1088, doi: 10.6038/pg2019CC0115.

孙伟家, 符力耘, 管西竹等. 2013. 页岩气地震勘探中页岩各向异性的地震模拟研究. *地球物理学报*, 56(3): 961-970, doi: 10.6038/cjg20130324.

王赞, 杨顶辉, 殷长春等. 2017. 各向异性地球物理与矢量场. *科学通报*, 62(23): 2594-2605, doi: 10.1360/N972016-01114.

武首茜, 金中国, 蔡贤德. 2012. 贵州页岩气资源潜力评价与开发思考. *矿物学报*, 32(4): 569-575, doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2012.04.008.

向葵, 胡文宝, 严良俊等. 2014. 川黔地区页岩复电阻率的频散特性. *石油地球物理勘探*, 49(5): 1013-1019, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2014.05.053.

向葵, 胡文宝, 严良俊等. 2016. 岩石复电阻率测量技术及标定方法研究. *科学技术与工程*, 16(5): 138-141, 153, doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.05.025.

杨旭, 周家喜, 杨捷等. 2011. 贵州从江那哥铜多金属矿床地-物-化特征与找矿前景. *矿物学报*, 31(3): 353-359, doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2011.03.004.

翟刚毅, 王玉芳, 包书景等. 2017. 我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测. *地球科学*, 42(7): 1057-1068, doi: 10.3799/dqkx.2017.085.

张春贺, 刘雪军, 何兰芳等. 2013. 基于时频电磁法的富有机质页岩层系勘探研究. *地球物理学报*, 56(9): 3173-3183, doi: 10.6038/cjg20130930.

张春贺, 刘雪军, 周惠等. 2015. 基于时频电磁法的富有机质页岩层系勘探进一步研究. *石油物探*, 54(5): 627-634, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2015.05.016.

张丰麒, 姜大建, 杜润林等. 2021. 基于页岩线性岩石物理模型的 TOC 反演方法研究. *地球物理学进展*, 36(3): 1154-1165, doi: 10.6038/pg2021EE0239.

张乔勋, 李帝铨, 田茂军. 2017. 广域电磁法在赣南某盆地油气勘探中的应用. *石油地球物理勘探*, 52(5): 1085-1092, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2017.05.023.

中国石油天然气总公司. 2010. SY/T 6210-1996 沉积岩中黏土矿物总量和常见非黏土矿物 X 射线衍射定量分析方法. 北京: 石油工业出版社.

周印明, 刘雪军, 张春贺等. 2015. 快速识别页岩气“甜点”目标的时频电磁勘探技术及应用. *物探与化探*, 39(1): 60-63, 83, doi: 10.11720/wtyht.2015.1.10.

(本文编辑 张正峰)