

# Study of the Characteristics of Formation Stress in Changling Depression

Heng Li<sup>1</sup>, Jicheng Yan<sup>2</sup>, Lili Huo<sup>3</sup>, Hongqi Liu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited Wireline Logging Subcompany, Tianjin

<sup>2</sup>Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield, Daqing Heilongjiang

<sup>3</sup>Exploration and Exploitation Institute of Eastern Hebei of CNPC, Tangshan Hebei

<sup>4</sup>State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Email: tiancong723@163.com

Received: Aug. 30<sup>th</sup>, 2017; accepted: Sep. 10<sup>th</sup>, 2017; published: Sep. 15<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

The key issue in the fracturing operations is whether the pressure is suitable to fracture the formation open. As more and more deep formations were countered, the fracturing operation encounters rather more difficult in some reservoirs, such as shale-gas and deep-volcanics formations. And this kind of reservoir, in Lingchang depression, has the properties with deep, high-temperature, strong-heterogeneity, density-rocks and various-lithology. The complicated various formations have disunity pressure and very high abrasiveness and drillability, which bring much more difficulty for the drilling. And during the drilling, neck-down and collapse and declination are always occurring, so how to predict and calculate the fracturing pressure effectively has become very important for safety before operation in-site. This paper first uses the experimental results from tri-axial mechanics test, Kaiser experiments and fracturing data from in-site to calibrate the well logging information, and second, based on experimental models, we calculate the maximum formation stress, minimum formation stress, pore pressure, collapse pressure and fracturing press. And last we analyze the characteristics of the formation stress. The calculate results soundly agree with in-site data, which forcefully supports the fracturing operation of the oilfield.

## Keywords

Changling Depression, Deep-Gas Reservoir, Formation Stress, Fracture, Fracturing Pressure, Kaiser Experiment

---

# 长岭凹陷地应力特征研究

李 衡<sup>1</sup>, 燕继成<sup>2</sup>, 霍丽丽<sup>3</sup>, 刘红岐<sup>4</sup>

<sup>1</sup>渤海钻探工程有限公司测井分公司, 天津

<sup>2</sup>大庆油田勘探开发研究院, 黑龙江 大庆

<sup>3</sup>中国石油冀东油田分公司勘探开发研究院, 河北 唐山

<sup>4</sup>西南石油大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 四川 成都

Email: tiancong723@163.com

收稿日期: 2017年8月30日; 录用日期: 2017年9月10日; 发布日期: 2017年9月15日

## 摘要

压裂作业时, 能否压开地层是压裂施工的关键。现在的深层储层和致密储层越来越多地被发现, 如长岭凹陷的深层火山岩气藏和页岩气藏, 深部储层的开发使得压裂施工难度越来越大。长岭凹陷深层火山岩天然气储层埋藏深、温度高、储层非均质性强、岩层致密、岩性变化多样。其中的腰英台深层气藏钻井过程中遇到的问题是地层复杂多变、钻遇地层多、岩性变化快、压力不统一、地层研磨性强且可钻性级值很高; 在深井钻井过程中, 地层特别容易发生缩颈、垮塌、井斜等钻井事故。对于压裂来讲, 在现有地面施工设备能力下, 如何有效预测地层破裂压力显的尤为重要。本文针对长岭凹陷部分井的岩石弹性参数和地应力参数进行分析, 并通过岩心Kaiser声波实验和现场压裂施工数据, 对计算的参数进行校正, 得到岩石弹性参数和地应力参数剖面, 为现场有效施工提供保障。

## 关键词

长岭凹陷, 深层气藏, 地应力, 压裂, 破裂压力, Kaiser实验

Copyright © 2017 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. 地层概况

长岭凹陷面积约  $1 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 是三面隆起向北延伸的 V 型断陷, 属于松辽盆地南部 19 个断陷中面积最大的断陷之一[1]。断陷沉积基底为上古生代石炭~二叠系中酸性侵入岩和浅变质岩, 主要为一套火山岩及碎屑岩沉积[2] [3] [4]。地层岩性以泥岩、含砾砂岩、粉砂岩互层, 部分层段薄互层发育。上部为浅灰色细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩与褐色泥岩, 灰色、浅灰色砂质泥岩、灰色熔结凝灰岩、熔结角砾凝灰岩略等厚互层; 下部以浅灰色粉砂岩、细砂岩, 浅灰色、灰色泥质粉砂岩为主夹薄层灰色、浅灰色砂质泥岩、褐色泥岩、紫灰色、深灰色流纹岩互层。

其中的腰英台深层天然气储层埋藏深、温度高。该区储层非均质性强, 岩层致密、岩性变化多样。钻井在此处面临的主要困难是地层复杂多变、钻遇地层多、岩性变化快、压力系统不统一、地层研磨性强且可钻性级值高等; 深井钻井过程中, 地层特别容易发生缩颈、垮塌、井斜等钻井事故[5] [6] [7]。当井内的液柱压力低于地层坍塌压力时, 井壁岩石将产生剪切破坏。如果是塑性岩石将向井内产生塑性流动而导致缩径, 脆性岩石会引起坍塌掉块而造成井径扩大和卡钻。在进行水力加砂压裂前, 能否破开地层是压裂施工的关键。目前的井越来越向深层发展, 地层破裂压力越来越高, 施工难度越来越大, 对于压裂来讲, 在现有地面施工设备能力下, 如何有效预测地层破裂压力线的尤为重要。本文针对长岭凹陷部分井的岩石弹性参数和地应力参数进行分析, 并通过岩心 **Kaiser** 声波实验和现场压裂施工数据, 对计

算的参数进行校正, 得到岩石弹性参数和地应力参数剖面, 为现场有效施工提供保障[8] [9] [10]。

## 2. 岩心 *Kaiser* 实验

地层破裂压力的获取目前有两种途径, 一是室内岩石力学实验或油气井现场水力压裂施工, 二是从测井资料中提取地层破裂压力。

20 世纪 50 年代, 德国学者 *Kaiser* 在金属材料单向拉伸试验中发现了 *Kaiser* 效应, 不久, 美国岩石力学家 *Goodman* 用实验证实了岩石在压缩状态下的声发射也具有 *Kaiser* 效应。这些工作为利用 *Kaiser* 效应确定岩体天然应力状态奠定了基础[11] [12] [13] [14]。声发射凯塞尔效应实验可以测量野外曾经承受过的最大压应力。该类实验一般要单轴压机上进行, 测定单向应力。在轴加载过程中声发射率突然增大点对应着的轴向应力是沿该岩样钻取方向曾经受过的最大压应力。目前的实验的方法一般采用与钻井岩心轴线垂直的水平面内, 增量为  $45^\circ$  的方向钻取三块岩样, 测出三个方向的正应力, 而后求出水平最大、最小主应力。通常认为声发射是岩石的微破裂造成的, 在岩石承载大于历史最大应力条件时, 岩石出现新的微破裂, 产生较强的声发射信号, 出现凯塞尔点[15] [16] [17]。但实际情况往往会出现在最近一次应力历史中所曾受过的最大应力处的凯塞尔效应较为明显, 并非遵循上面的理论解释, 并且对于某些试样, 声发射信号过于剧烈且频繁, 凯塞尔点难于确定, 于是采用重复加载的方法, 利用抹录不尽点来寻找凯塞尔点。

本文采用了研究工区内 *YS-202* 井 3730 m 附近的岩心进行声发射凯塞尔实验, 测定其破裂压力参数。在 *MTS* 电液伺服系统以某一加载速率(0.05 MPa/s)均匀给地岩样施加轴向载荷, 在岩心的侧面放置声发射探头, 用它来接收受载过程中岩石的声发射信号, 岩样所受的载荷及声信号同时输入声发射仪进行记录和处理, 然后就给出岩样的声发射信号随载荷变化的关系。根据凯塞尔效应原理, 在声发射信号—载荷变化曲线图上找出突然明显增加处的声发射信号, 记录下此处载荷大小, 即为岩石在地下该方向上所受地应力。据此可求得试验岩石在深部地层所受的地应力(指主应力)参数, 测试结果见表 1。

## 3. 利用测井资料计算地层破裂压力

### 3.1. 利用压裂施工和 *Kaiser* 实验数据计算破裂压力

在地层压裂后, 瞬时停泵, 裂缝不再向前扩展, 但仍保持开启, 此时的压力  $P_s$ , (瞬时停泵压力)应与垂直裂缝的最小地应力相平衡, 即有  $\sigma_h = P_s$ 。瞬时停泵后重新启动泵, 从而使闭合的裂缝重新张开[16]-[19]。由于张开闭合裂缝所需的压力  $P_r$  与地层破裂压力  $P_f$  相比, 不需克服岩石的抗张强度  $s_t$ , 因此可以近似地认为破裂层位的抗张强度等于这两个压力的差值, 即有  $s_t = P_f - P_r$ 。

**Table 1.** Results comparison of Fracturing, Kaiser experiment and calculation using well logging data (MPa)

**表 1.** 压裂施工、岩心 *Kaiser* 实验与测井计算地应力对比表(单位: MPa)

深度(m)	<i>Kaiser</i> 实验一级应力		<i>Kaiser</i> 实验二级应力		<i>Kaiser</i> 实验三级应力	
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
3738.6	26.92	24.84	59.81	35.04	60.87	53.09
	现场破裂数据计算地应力				测井计算	
3820.4~3835.2	最大		最小		最大	最小
	79.01		65.8		81.64	65.77

利用  $P_f$ 、 $P_s$  和  $P_r$  三个从压裂曲线上可以直接读得的压力值，即可反算地层地应力：

$$\begin{aligned} \sigma_h &= P_s \\ \sigma_H &= 3\sigma_h - P_f - P_p + S_t = 3P_s - P_p - P_s \end{aligned} \quad (1)$$

式中：

$P_f$ —地层破裂压力，MPa；

$P_s$ —瞬时停泵压力，MPa；

$P_r$ —裂缝重新张开压力，MPa；

$P_p$ —为地层孔隙压力，MPa；

$S_t$ —岩石抗张强度，MPa；

$\sigma_h$ —最小水平应力，MPa；

$\sigma_H$ —最大水平应力，MPa；

图 1 为 YS-202 井在 3820.4~3835.2 m 处压裂施工作业曲线图，图中 1、4 为该井油压和套压在 160 分钟内的变化数据，通过压裂资料中压裂曲线图可以读出曲线中的地层破裂压力为 81 MPa、瞬时停泵压力为 65.8 MPa、裂缝重新张开压力为 78.30 MPa。根据上述公式可以求得最大地应力为 79.01 MPa，最小地应力为 65.80 MPa。该层位测井计算最大地应力为 81.64 MPa，最小地应力为 65.77 MPa。说明测井计算值与现场测试值吻合很好。

### 3.2. 利用测井资料计算地层压力参数

通过岩心三轴力学实验、*Kaiser* 声发射实验和现场压裂施工参数标定后获得了比较可靠的岩石力学参数，利用密度测井、声波测井等资料计算了岩石泊松比、弹性模量和岩石抗压强度等参数，然后根据泊松比、弹性模量和抗压强度这三个基本力学参数，计算地层的最大最小水平应力、垂直地应力[20] [21] [22] [23] [24]。采用 *Eaton* 法计算了长岭凹陷上白垩统层系内  $P_2C_1$ 、 $P_2C_2$ 、 $P_2C_3$ 、 $P_2C_4$  等四个砂层组，下白垩统  $P_1C_1$ 、 $P_1C_2$  和  $P_1C_3$  这三个砂组共 10 口井地层破裂压力梯度、坍塌压力梯度和地层孔隙压力梯度数值。如图 2 所示。并利用单井处理结果统计了的三压力参数变化范围，见表 2。

从上表可以看出，孔隙压力梯度最小值  $0.818 \text{ g/cm}^3$ ，最大值  $1.178 \text{ g/cm}^3$ ；坍塌压力梯度最小值  $0.671 \text{ g/cm}^3$ ，最大值  $1.370 \text{ g/cm}^3$ ；破裂压力梯度最小值  $1.635 \text{ g/cm}^3$ ，最大值  $2.345 \text{ g/cm}^3$ 。

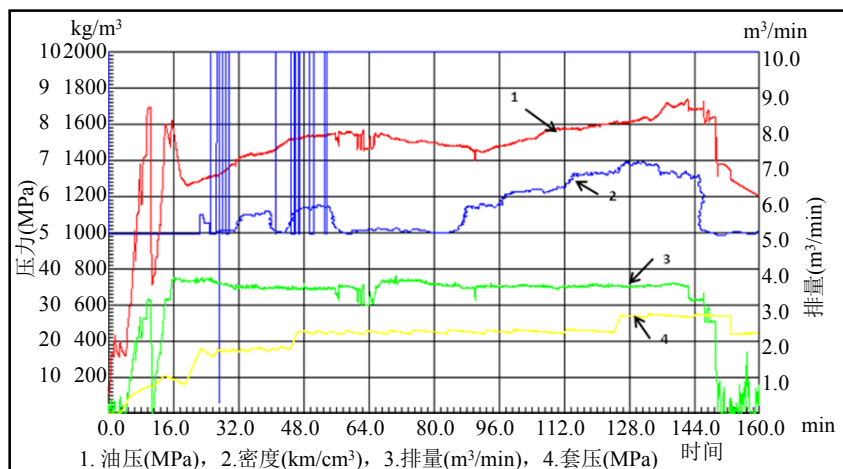


Figure 1. Comprehensive graph of fracturing of Well YS-202

图 1. YS-202 井压裂施工综合曲线图

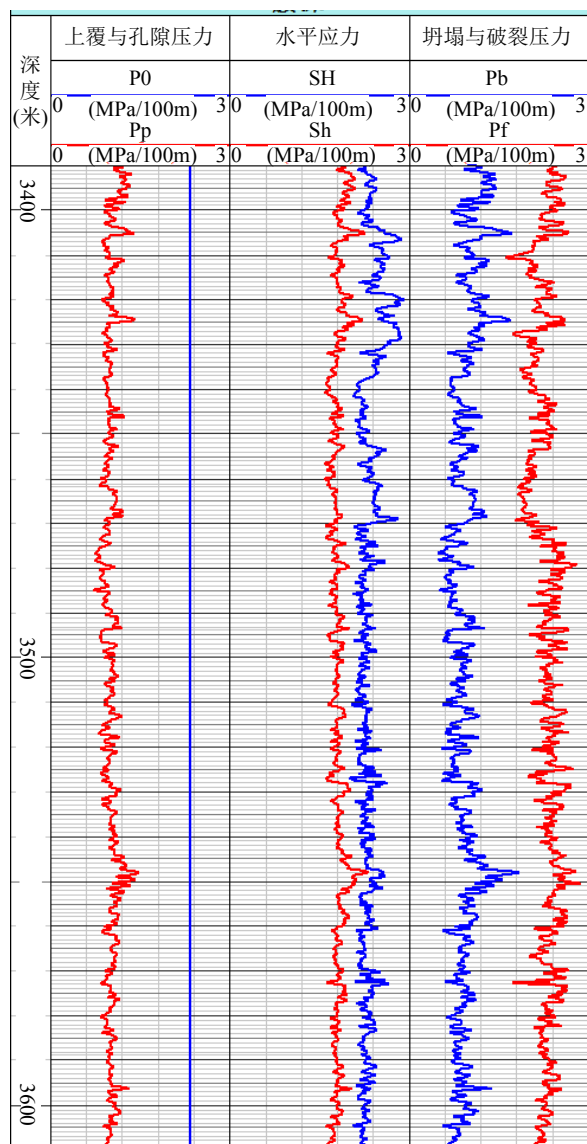


Figure 2. Three stress profile of section of Well YS-202  
 图 2. YS-202 井 3400~3600 m 层段地层三压力剖面

Table 2. Three stress values of all sections of Cretaceous  
 表 2. 白垩系各层组三压力取值统计表

序号	层系	砂组	孔隙压力梯度(g/cm <sup>3</sup> )	坍塌压力梯度(g/cm <sup>3</sup> )	破裂压力梯度(g/cm <sup>3</sup> )
1	上白垩	P <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	0.842~1.034	0.897~1.262	1.714~2.234
2		P <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	0.818~1.077	0.943~1.325	1.835~2.244
3		P <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	0.970~1.156	0.816~1.351	1.831~2.241
4		P <sub>2</sub> C <sub>4</sub>	0.934~1.110	0.831~1.370	1.779~2.223
5	下白垩	P <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	0.952~1.105	0.822~1.313	1.770~2.240
6		P <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	0.942~1.117	0.774~1.292	1.812~2.129
7		P <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	0.937~1.178	0.678~1.328	1.635~2.161

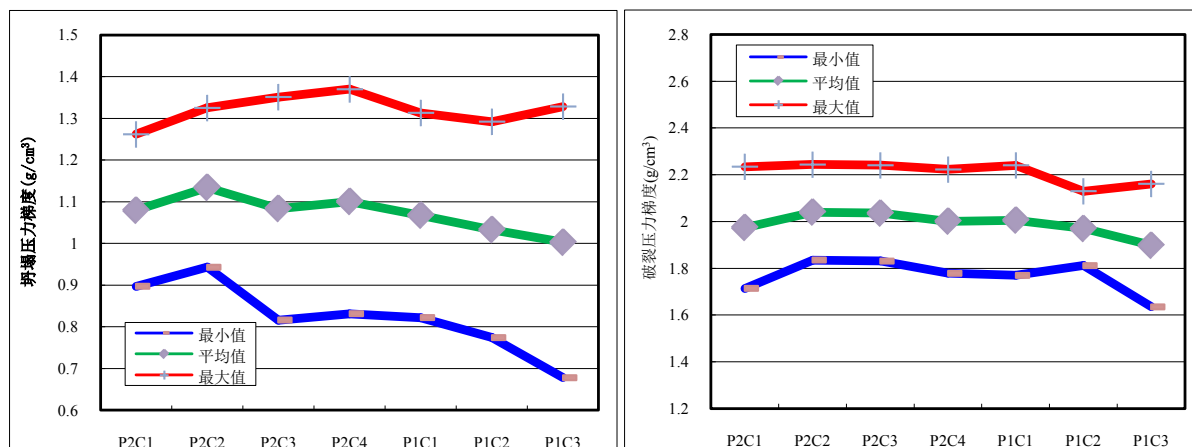


Figure 3. Illustration of collapse pressure and fracturing pressure of different sections

图 3. 长岭凹陷不同层组坍塌压力和破裂压力梯度变化趋势图

### 3.3. 地层三压力剖面分布特征

根据前面计算的地应力参数和地层的坍塌压力与破裂压力分析了其变化趋势，如图 3 所示，其规律如下：

- 1) 最大坍塌压力梯度值分布在青山口组，可达 1.35 MPa/100m 以上，最小坍塌压力梯度也出现在青山口组，低于 0.7 MPa/100m；
- 2) 最大破裂压力梯度值分布在泉头组，可达 2.35 MPa/100m 以上，最小破裂压力梯度出现在营城组，低于 1.65 MPa/100m；
- 3) 总体上，坍塌压力梯度呈下降趋势，而破裂压力总体变化趋势不大，在登娄库组和营城组有所降低，这是由于深部地层火山岩脆性成分增加，岩石本身裂缝较上覆地层发育所导致的。

## 4. 结论

- 1) 整体变化趋势为泉头组之上的地层随着埋深的增加而略有减小，泉头组增高后又开始继续降低；破裂压力梯度曲线在登娄库组和营城组降了下来。这是由于深部地层火山岩脆性成分增加，岩石本身裂缝较上覆地层发育所导致的。
- 2) 长岭凹陷的嫩江组、姚家组、青山口组、登娄库组、营城组均属于钻井易坍塌地层，这些层段的坍塌压力梯度较低，破裂压力梯度数值范围为 1.635 MPa/100m~2.244 MPa/100m 之间。
- 3) 通过岩心三轴力学实验、*Kaiser* 实验和现场压裂施工数据对理论计算模型的检验和修正，可以建立起比较精确的计算模型。
- 4) 基于实验对理论模型的修正，利用工区的测井资料，计算了长岭凹陷白垩系 7 个砂层组地应力参数，连续的泊松比、杨氏模量、地应力以及坍塌压力和破裂压力参数剖面为现场施工提供了依据。

## 参考文献 (References)

- [1] 门吉华. 长岭凹陷登娄库组成岩作用及储层评价[J]. 特种油气藏, 2011, 18(3): 24-38.
- [2] 陈娟, 张庆龙, 王树良, 等. 松辽盆地长岭凹陷盆地断陷期构造转换及油气地质意义[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1027-1035.
- [3] 王春香, 袁浩, 吕延防, 等. 松辽盆地南部十屋断陷成岩作用[J]. 大庆石油学院学报, 2008, 32(4): 13-15.
- [4] 张玮, 李洪革, 李明杰. 松辽盆地南部长岭凹陷区深层构造特征与天然气聚集[J]. 石油与天然气地质, 2008,



- 29(1): 120-127.
- [5] 李根生, 刘丽, 黄中伟, 牛继磊. 水力射孔对地层破裂压力的影响研究[J]. 中国石油大学学报自然科学版, 2006, 30(5): 42-45.
- [6] 严世才, 周大千, 舒中选, 刘修善, 齐林. 井底钻具力学模型的讨论[J]. 大庆石油学院学报, 1991, 15(4): 30-37.
- [7] 刘丽, 李根生. 水力射孔对套管强度的影响研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 83-85.
- [8] 刘丽, 李根生, 黄中伟. 高压水射流射孔井眼应力数值模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(4): 64-67.
- [9] 蒋惶跃, 王允诚, 孟慕尧, 朱过才. 水力压裂机理及破裂压力的探讨[J]. 天然气工业, 1981, 2(2): 83-97.
- [10] 曲占庆, 许江华, 王岩峰, 孙东海. 斜井射孔完井地层破裂压力三维有限元分析[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(1): 13-15.
- [11] 薛亚东, 高德利. 声发射地应力测量中凯塞点的确定[J]. 石油大学学报, 2000, 24(5): 1.
- [12] 姜永东, 鲜学福, 许江. 岩石声发射 Kaiser 效应应用于地应力测试的研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 946-950.
- [13] 翟小洁, 傅荣华, 张兵. 利用 Kaiser 效应测试地应力的实验研究[J]. 四川地震, 2008(3): 18-21.
- [14] 李彦兴, 董平川. 利用岩石的 Kaiser 效应测定储层地应力[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(A1): 2802-2807.
- [15] 魏伟, 付小敏. 岩石声发射 Kaiser 效应测试玄武岩地应力应用[J]. 山西建筑, 2010, 36(2): 130-132.
- [16] 张卓元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[J]. 北京: 地质出版社, 1993: 86-89.
- [17] 傅鹤林. 岩石声发射的 Kaiser 效应及其在地应力场测试中的应用[J]. 化工矿物与加工, 2002, 32(5): 20-22.
- [18] Coates, G.R. and Denoo, S.A. (1981) Mechanical Properties Program using Borehole Analysis and Mohr's Circle. *SPWLA*, 79, 23-26.
- [19] 李俊平, 周创兵. 岩体的声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 28(3): 374-378.
- [20] 楼一珊. 利用声波测井计算岩石的力学参数[J]. 探矿工程, 1993, 35(3): 47-48.
- [21] 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发[J]. 石油工业出版社, 1997: 402-420.
- [22] 苏远大, 乔文孝, 孙建孟, 等. 正交偶极声波资料在评价地层各向异性中的应用[J]. 石油物探, 2005, 44(4): 319-412.
- [23] 郑淑芬. 地层速度各向异性及其应用[J]. 测井技术, 2000, 24(3): 223-226.
- [24] 章成广, 李维彦, 樊小意, 等. 用全波列测井资料预测地层破裂压力的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(2): 120-124.

#### 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: [me@hanspub.org](mailto:me@hanspub.org)