

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.049>



# 地层压力随钻监测方法在深水 高温高压井中的研究与应用

李 中<sup>1</sup>, 张祯祥<sup>2\*</sup>, 杨 进<sup>2</sup>, 黄 熠<sup>1</sup>, 李炎军<sup>1</sup>, 李文拓<sup>1</sup>, 吴 江<sup>1</sup>

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

2. 中国石油大学石油工程学院, 北京 102249

**摘 要:** 随着深水高温高压油气勘探的逐步深入, 目前钻遇地层普遍存在着储层系统多样、压力系统复杂且高低压相间的情况, 钻井过程中井下复杂情况频发, 严重影响钻井作业安全. 结合深水高温高压 X1 井的钻井实例, 分别使用  $d_c$  指数法和岩石强度法开展地层压力随钻监测工作. 结果表明, 岩石强度法对深水高温高压井的压力监测精度更高, 可以为后续深水高温高压井的地层压力监测工作提供参考.

**关键词:** 深水高温高压; 地层压力; 随钻监测; 岩石强度法.

中图分类号: P553

文章编号: 1000-2383(2019)08-2597-06

收稿日期: 2019-01-22

## Research and Application of Formation Pressure Monitoring While Drilling in Deepwater with High Temperature and High Pressure

Li Zhong<sup>1</sup>, Zhang Zhenxiang<sup>2\*</sup>, Yang Jin<sup>2</sup>, Huang Yi<sup>1</sup>, Li Yanjun<sup>1</sup>, Li Wentuo<sup>1</sup>, Wu Jiang<sup>1</sup>

1. Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd., Zhanjiang 524057, China

2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract:** With the deepening exploration of oil and gas in deepwater with high temperature and high pressure conditions, there are various reservoir systems, which are complex and interlaced. Downhole complications occur frequently in the drilling process, which seriously affects the drilling safety. In this paper, combined the drilling example of deepwater with high temperature and high pressure well X1,  $d_c$  index method and rock strength method are used to monitor formation pressure while drilling. The results show that the rock strength method is more accurate for pressure monitoring of deepwater with high temperature and high pressure wells, and it can provide a reference for subsequent monitoring of formation pressure in deepwater with high temperature and high pressure wells.

**Key words:** deepwater; high temperature and high pressure; formation pressure; monitoring while drilling; rock strength method.

深水高温高压井具有钻井风险高、成本高昂、作业周期长等特性. 深水高温高压区域的钻井工作具有很大风险, 钻遇区域普遍存在压力系统复杂多样的情况. 当井底压力出现异常可能会导致井涌、

**基金项目:** “十三五”国家科技重大专项“莺琼盆地高温高压天然气富集规律与勘探开发关键技术(三期)”(No.2016ZX05024-005); “莺琼盆地高温高压钻井关键技术研究”(No.CNOOC-KJ135ZDXM24LTDZJ01); “莺琼盆地高温高压完井和测试关键技术研究”(No.CNOOC-KJ135ZDXM24LTDZJ03).

**作者简介:** 李中(1972-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事海洋油气钻完井的研究和管理工作. E-mail: lizhong@cnooc.com.cn

\* **通讯作者:** 张祯祥, E-mail: zzzcup@163.com

**引用格式:** 李中, 张祯祥, 杨进等, 2019. 地层压力随钻监测方法在深水高温高压井中的研究与应用. 地球科学, 44(8):2597-2602.

井漏和井喷等复杂情况(武庆河等,1999).严重影响勘探作业安全.钻前的地层压力预测多凭借分析人工地震引发的声波速度和钻井区域的地质条件.由于地震引发的声波速度的检测精度较低和钻井区域地质环境的多样性,深水高温高压井钻前的地层压力预测精度误差很大,且可能存在层位误差,不易计算出真实的地层压力.地层压力实时监测(杨进和高德利,1999)对深水高温高压区域的钻探作业起着至关重要的作用,是保障安全、高效钻探的根基.在钻井作业中,通过记录分析钻井数据和泥浆参数等相关信息获取的地层压力称之为地层压力随钻监测技术.其主要原理是依据地层中连续沉积的泥页岩之间的压实关系,通过分析已钻井段的钻井参数和水力参数等数据建立泥页岩地层的沉积压实趋势线,同时根据钻井作业中实时获取的钻井参数和泥浆性能等数据完成地层压力评估(龙海涛,2000).目前常用的地层压力监测方法有 $d_c$ 指数法(夏宏泉,2004)、伊顿法(余明发等,2008;周东华等,2011)、Sigma指数法(毛敏和郭东明,2011)、岩石强度法(王志战等,2012)和地温梯度法(武少波和赵雷青,2013)等.本文分别选取了 $d_c$ 指数法和岩石强度法对深水高温高压区域开展地层压力监测工作,并对两种地层压力监测方法在深水高温高压区域的适用性进行了对比分析,为保证深水高温高压区域的钻探作业提供技术支撑.

## 1. $d_c$ 指数法计算地层孔隙压力

### 1.1 $d_c$ 指数计算模型

$d_c$  指数考虑了地层压实程度和钻井压差对机械钻速的影响.泥页岩正常压实的地层,随着埋深增加,泥页岩受上覆压力的增加,孔隙度呈逐渐减小的趋势,岩石变得逐渐致密,从而造成机械钻速降低,此时 $d_c$ 指数呈现逐渐增加的趋势.同时还应考虑钻压转速、钻头尺寸、钻井液性能等参数对机械钻速的影响,需要在计算中对地层压力计算模型进行修正.

$$d_c = \frac{\lg\left(\frac{R}{60N}\right) \rho_n}{\lg\left(\frac{12W}{10^6 B}\right) \rho_m} \quad (1)$$

通过将公式中参数进行标准化处理后得到(Chemali *et al.*, 2014):

$$d_c = \frac{\lg\left(\frac{3.282}{NT}\right) \rho_n}{\lg\left(\frac{0.0684W}{D}\right) \rho_m} \quad (2)$$

式中: $N$ 为钻井过程的转速,单位是r/min; $T$ 为钻井所消耗的时间,单位是min/m; $W$ 为钻井时检测的压力,单位是kN; $D$ 为钻头的实际直径,单位是mm; $\rho_m$ 为实际钻井时检测的溶液密度,单位是g/cm<sup>3</sup>; $\rho_n$ 为实际压力井段地层当量密度,单位是g/cm<sup>3</sup>.

### 1.2 建立正常压实段的 $d_c$ 指数趋势线

由于不同区域地层的压实程度有所差别,压实规律有所差异,所以正常压实趋势线可能存在不同的回归模式,有指数型、对数型或多项式型(Ziegler *et al.*, 2014)等,需要结合区域已钻井的地质条件选取合适的压实趋势线及区域指数.利用 $d_c$ 指数法建立正常压实趋势线,通常选择一段连续泥页岩的随钻录井的数据得出 $d_c$ 指数值,通过分析散点趋势建立趋势线,期间结合岩性、钻井参数、钻井液密度变化等综合反映,判断趋势线偏差并进行反复调整.本文中,正常压实趋势线采用指数型(艾姣,2016),其公式为:

$$d_c = ae^{bH} \quad (3)$$

对公式(3)取对数:

$$\ln d_c = bH + \ln a \quad (4)$$

式中: $H$ 为井深(m); $b$ 为斜率; $a$ 为截距.

通过分析实时钻井数据计算出的 $d_c$ 指数值与拟合的泥页岩压实趋势线之间的偏差,可以定性判断地层的压实状况,实时值相对正常趋势左偏表明该处地层为欠压实,属于异常高压,右偏为异常低压.

### 1.3 地层孔隙压力计算模型

建立正常压实趋势线之后,利用 $d_c$ 指数计算地层压力模型可以选择等效深度法、伊顿法和比率法等,其中伊顿法的适应性最好,为目前使用最广泛的压力计算方法,其计算误差能控制在一定的合理范围内.因此在压力随钻监测中通常采用伊顿法对地层孔隙压力进行计算.

伊顿法计算公式:

$$\rho_p = \rho_o - (\rho_o - \rho_n) \left( \frac{d_c}{d_{cn}} \right)^n \quad (5)$$

考虑钻压转速、钻头尺寸、钻井液性能等参数对机械钻速的影响后,还需对地层压力计算模型进行修正(李三明等,2016;Su *et al.*, 2016).

$$\rho_p = \rho_o - \alpha(\rho_o - \rho_n) \left( \frac{d_c}{d_{cn}} \right)^n, \quad (6)$$

式中:  $\rho_p$  为地层压力当量密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\rho_n$  为正常地层压力当量密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\rho_o$  为上覆岩层压力当量密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $n$  为伊顿系数,  $\alpha$  为模型修正系数.

## 2 岩石强度法计算地层孔隙压力

### 2.1 岩石强度法简介

岩石强度法(杨进和高德利, 1999)是基于岩石的抗钻强度大小来判断地层压力的一种随钻监测方式. 岩石的抗钻强度主要与岩石性质、钻井参数以及地层压力有关. 在钻井过程中, 如果对于同类型的岩石保持钻井参数不变, 则岩石抗钻强度大小则与地层压力有关, 通过上述现象对钻井过程进行模型计算, 并由此模型获取地层压力和岩石抗钻强度的关系.

### 2.2 岩石抗钻强度模型

岩石的抗钻程度  $S_R$ , 即为钻井作业过程中岩石的抗破碎强度(汤建荣等, 2016), 具体公式为:

$$S_R = \alpha f_1(W) f_2(N) f_3(R) f_4(D) \times f_5(E_b) f_6(B_i) f_7(L) f_8(\Delta p) f_9(Q), \quad (7)$$

式中:  $\alpha$  为常数;  $W$  为钻压, 单位是  $\text{kN}$ ;  $N$  为钻井过程的转速, 单位是  $\text{r}/\text{min}$ ;  $R$  为钻井过程中的钻速, 单位是  $\text{m}/\text{h}$ ;  $D$  为钻头的实际直径, 单位是  $\text{mm}$ ;  $B_i$  为钻头类别;  $L$  为地层岩石特性;  $\Delta p$  为井底液柱压差, 单位是  $\text{MPa}$ ;  $Q$  为钻井液排量, 单位是  $\text{L}/\text{s}$ ;  $E_b$  为钻头磨损因子.

关于模型中相关影响因素的讨论如下:

(1)  $E_b$  的值可根据钻头扭矩和钻压进行计算, 对于牙轮钻头的磨损因子(孙东征等, 2016)计算公式为:

$$E_b = f\left(\frac{T_b}{P_b}\right), \quad (8)$$

其中:  $T_b$  为钻头扭矩,  $P_b$  为钻头钻压.

(2) 钻头类型不同(刮刀钻头、牙轮钻头、PDC 钻头), 岩石的抗钻强度也不同,  $f(B_i)$  的大小也不同.

(3) 钻压对岩石抗钻强度的影响用函数  $f(W)$  表示, 其公式为:  $f(W) = W^{\beta_1}$ . 式中:  $\beta_1$  为钻压指数.

(4) 钻速对岩石抗钻强度的影响用函数  $f(R)$  表示, 其公式为:  $f(R) = R^{\beta_2}$ . 式中:  $\beta_2$  为钻速指数.

(5) 转速对岩石抗压强度的影响用函数  $f(N)$

表示, 其公式为:  $f(N) = N^{\beta_3}$ . 式中:  $\beta_3$  为转速指数.

(6) 钻头尺寸对岩石抗钻强度的影响用函数  $f(D)$  表示, 其公式为:  $f(D) = D^{\beta_4}$ . 式中:  $\beta_4$  为钻头尺寸指数.

通过室内模拟实验, 可以将公式(7)简化为(孙东征等, 2016):

$$S_R = \alpha \frac{WN}{R(B_D)^{r_3}} (E_b)^{r_1} \left[ \frac{Q}{B_D D_n} \right]^{r_2} f(t), \quad (9)$$

其中:  $f(t) = \frac{(N_i)^{\beta r_4}}{200} e^{\delta t}$ , 式中:  $\beta$  是实际钻井过程的转速指数;  $r_1, r_2, r_3, r_4, \delta$  为常数.

### 2.3 岩石抗钻强度与井底压差模型的构建

通过对深水高温高压区域已钻井的钻井、录井、测井等实钻资料进行拟合分析和处理, 得到了井底液柱压差和岩石抗钻强度的关系模型(Asadi *et al.*, 2017):

$$\Delta p = \alpha_2 \tan \left[ \pi \frac{S_{AR}/S_{RO}}{S_{Rmax}/S_{RO}} - c_2 \right] + d_2, \quad (10)$$

式中:  $\alpha_2, c_2, d_2$  为系数;  $S_{RO}$  为井底压差为零时的岩石抗钻强度 ( $\text{MPa}$ );  $S_{AR}$  为岩石平均抗钻强度 ( $\text{MPa}$ );  $S_{Rmax}$  为井底压差最大时计算的岩石最大抗钻强度 ( $\text{MPa}$ ).

图 1 是公式(10)的具体表达式, 表征井底液柱压差和岩石抗钻强度的相互作用关系, 其中  $S_{AR}/S_{RO}$  (Ma *et al.*, 2018) 为归一化的岩石抗钻强度.

该模型的主要特征为: 首先当  $\Delta p$  为负值时, 即欠平衡钻进工况, 岩石抗钻强度表现出类似的指数形式, 这种特性可以在已钻井的随钻录井资料中获取证实; 其次, 当  $\Delta p$  为较高的正值时, 岩石抗压强度存在最大值, 该特性也可在实验室内开展围压下的钻速实验进行验证(邱楠生等, 2018); 最后, 当在较

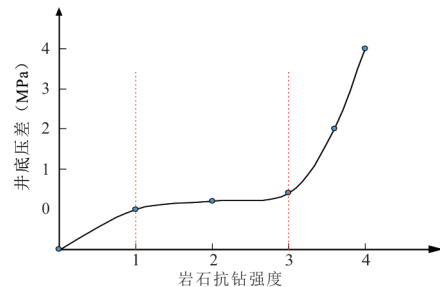


图 1 井底压差与岩石抗钻强度关系

Fig.1 Relation diagram between bottom-hole pressure difference and rock strength

表 1 岩石强度法、 $d_c$  指数法监测地层孔隙压力梯度值与实测值对比表Table 1 Comparison table of pore pressure values monitored by rock strength method and  $d_c$  index method

井号	井深(m)	实测压力梯度 当量密度(g/cm <sup>3</sup> )	岩石强度法		$d_c$ 指数法	
			压力梯度(g/cm <sup>3</sup> )	误差(%)	压力梯度(g/cm <sup>3</sup> )	误差(%)
X1	3 065	1.66	1.58	4.8	1.51	9.0
	3 987	2.17	2.25	4.7	2.02	6.9
	4 023	2.20	2.12	3.6	1.86	5.5
	4 057	2.20	2.21	0.5	2.04	7.3
	4 098	2.25	2.23	0.9	2.06	8.5

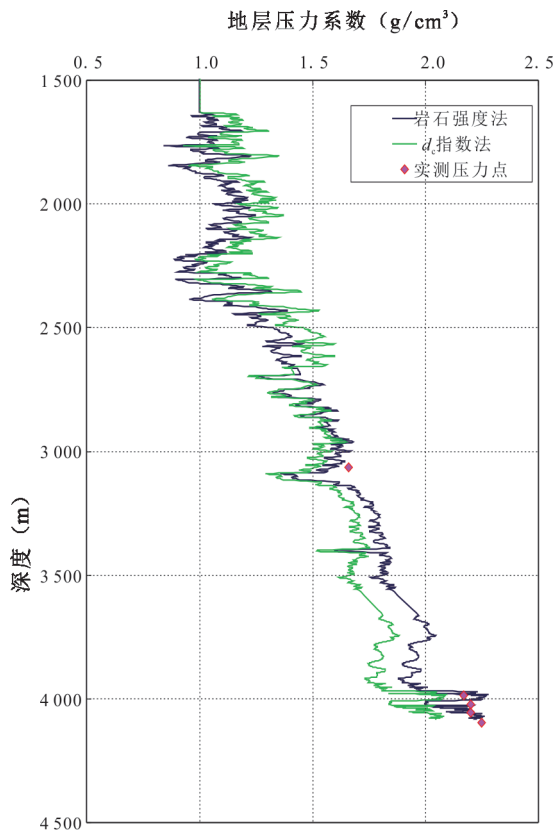


图 2 X1 井两种方法监测结果对比

Fig.2 Comparison diagram of two monitoring methods in well X1

低的正压差条件下钻进时,  $\Delta p$  的微弱差异将导致岩石抗钻强度的急剧变化, 本模式可灵敏的检测异常地层压力。

#### 2.4 地层孔隙压力计算

通过井底液柱压差可以定量评估地层孔隙压力。即:

$$P_p = P_n - \Delta p, \quad (11)$$

式中:  $P_p$  为地层孔隙压力(MPa);  $P_n$  为钻井液井底液柱压力(MPa)。

### 3 现场应用

X1 井是南海海域的一口深水高温高压探井, 所处水深为 1 006 m, 井深 4 100 m, 井底温度 187 °C。主要目的层为黄流组, 目的层附近孔隙压力系数范围为 2.17~2.25, 通过  $d_c$  指数法和岩石强度法对 X1 井的地层孔隙压力进行随钻监测, 并与钻后的地层压力实测结果进行对比分析, 结果如表 1 所示。结果表明: 基于  $d_c$  指数法的地层压力计算结果精度大于 90%, 基于岩石强度法的压力计算精度大于 95%。图 2 是 X1 井中使用两种方法计算的地层压力监测结果对比图。

### 4 认识与建议

(1) X1 井中的压力计算结果显示,  $d_c$  指数法的计算结果误差在 10% 以内, 岩石强度法的计算结果误差小于 5%, 这表明基于岩石强度法的地层压力监测方式可获取更加精准的结果, 并通过及时准确的监测地层压力变化为后续的深水高温高压井作业提供指导。

(2) 基于岩石强度法的地层压力监测模型, 在实际计算中考虑了钻头类别、钻井参数和水力参数的影响, 弥补了  $d_c$  指数法的不足, 避免了人为建立正常压实趋势线对计算结果的干扰。

(3) 基于岩石强度法的地层压力计算模型是建立在岩石本身的物理性质上的, 计算结果不受岩性的制约, 应用范围比  $d_c$  指数法更广泛。

#### References

- Ai, J., 2016. Analysis of MWD Pressure Monitoring Technology. *Petrochemical Industry Technology*, 23 (10): 174(in Chinese with English abstract).
- Asadi, M.S., Ghosh, A., Bordoloi, S., et al., 2017. Inte-



- grated Pre-Drill and Real-Time Geomechanical Modeling Brings Significant Benefits to Deepwater Wildcat Exploration Drilling Campaign—A Case Study. *The AP-PEA Journal*, 57(2): 698. <https://doi.org/10.1071/aj16245>
- Chemali, R., Semac, W., Balliet, R., et al., 2014. Formation-Evaluation Challenges and Opportunities in Deep-Water. *Petrophysics*, 55(02):124—135.
- Li, S.M., Wu, Z.C., Deng, W.H., 2016. Formation Pressure Monitoring Technology in Yuanba Area. *Mud Logging Engineering*, 27(1): 36—39, 91(in Chinese with English abstract).
- Long, H.T., 2000. Follow-Up Monitoring and Evaluation of the Formation Pressure in the Process of Drilling. *Natural Gas Industry*, 20(4): 33—36(in Chinese with English abstract).
- Ma, T., Peng, N., Ping, C., et al., 2018. Study and Verification of a Physical Simulation System for Formation Pressure Testing while Drilling. *Geofluids*, 2018(7): 1—18. <https://doi.org/10.13039/100010097>
- Mao, M., Guo, D.M., 2011. The Application of Mud Logging Technology of the Formation Pressure while Drilling in High Temperature and Pressure Wells. *Mud Logging Engineering*, 22(3): 42—46(in Chinese with English abstract).
- Mao, M., Guo, D.M., 2011. Application of Formation Pressure Logging While Drilling Technology in High Temperature and High Pressure Wells. *Logging Engineering*, 22(3): 42—46(in Chinese).
- Qiu, N.S., Liu, W., Xu, Q.C., et al., 2018. Temperature and Pressure Fields of Deep-Ancient Marine Strata and Hydrocarbon Accumulation. *Geoscience*, 43(10): 3511—3525(in Chinese with English abstract).
- Su, Y.D., Jiang, C., Zhuang, C.X., et al., 2016. Joint Inversion of Logging-While-Drilling Multipole Acoustic Data to Determine P- and S-Wave Velocities in Unconsolidated Slow Formations. *Geophysics*, 81(5): D553—D560. <https://doi.org/10.1190/geo2016-0133.1>
- Sun, D.Z., Yang, J., Yang, J.Q., et al., 2016. Application of Formation Pressure Prediction while Drilling Technology in HTHP Wells. *Oil Drilling & Production Technology*, 38(6): 746—751(in Chinese with English abstract).
- Tang, J.R., Wang, H., Meng, L.J., et al., 2016. Pressure Evolution and Its Effect on Petroleum Accumulation in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 41(5): 809—820(in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.Z., Gai, S.S., Xu, A.S., 2012. Two New Methods Based on Dc Exponent for Abnormal Pressure Prediction and Detection during Drilling. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 43(4): 1429—1433(in Chinese with English abstract).
- Wu, Q.H., Yan, G.P., Zhao, T.S., 1999. The Origin and Characteristic of Gas-Show Types. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 6(3): 15—18(in Chinese with English abstract).
- Wu, S.B., Zhao, L.Q., 2013. Brief Discussion on the Influence Factors of Dc Index Method in Predicting Formation Pressure. *Western Prospecting Engineering*, 25(12): 46—48, 52(in Chinese).
- Xia, H.Q., Zhong, J.M., Shi, X.B., et al., 2004. Formation Pressure Prediction Methods for Offshore Drilling. *Natural Gas Industry*, 24(11): 73—75, 19(in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Gao, D.L., 1999. Technologies for Inspecting and Predicting Formation Pressure while Drilling. *Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science)*, 23(1): 35—37(in Chinese with English abstract).
- Yu, M.F., Xu, X.R., Huang, Y.Q., 2008. Application of LWD Technology for Abnormally High Pressure Caused by under Compaction. *Journal of Petroleum and Natural Gas*, 20(3): 326—328(in Chinese).
- Zhou, D.H., Li, C.N., Du, J., et al., 2011. Research on Monitoring and Forecasting Techniques of Formation Pressure with Drilling. *Drilling & Production Technology*, 34(6): 27—28, 40(in Chinese with English abstract).
- Ziegler, F.E., Jones, J.F., 2014. Predrill Pore-Pressure Prediction and Pore Pressure and Fluid Loss Monitoring during Drilling: A Case Study for a Deepwater Subsalt Gulf of Mexico Well and Discussion on Fracture Gradient, Fluid Losses, and Wellbore Breathing. *Interpretation*, 2(1): SB45—SB55. <https://doi.org/10.1190/int-2013-0099.1>

#### 附中文参考文献

- 艾姣, 2016. 随钻压力监测技术分析. 石化技术, 23(10): 174.
- 李三明, 吴志超, 邓文辉, 2016. 地层压力监测技术在元坝地区的应用. 录井工程, 27(1): 36—39, 91.
- 龙海涛, 2000. 钻进过程中地层压力跟踪监测与评价. 天然气工业, 20(4): 33—36.
- 毛敏, 郭东明, 2011. 随钻地层压力录井技术在高温高压井中的应用. 录井工程, 22(3): 42—46.
- 邱楠生, 刘雯, 徐秋晨, 等, 2018. 深层—古老海相层系温压场与油气成藏. 地球科学, 43(10): 3511—3525.
- 孙东征, 杨进, 杨翔骞, 等, 2016. 地层压力随钻预测技术在高温高压井的应用. 石油钻采工艺, 38(6): 746—751.
- 汤建荣, 王华, 孟令箭, 等, 2016. 渤海湾盆地南堡凹陷地层

压力演化及其成藏意义. 地球科学, 41(5): 809—820.

王志战, 盖姗姗, 许爱生, 2012. 基于  $d_c$  指数的 2 种异常压力随钻监测新方法. 中南大学学报(自然科学版), 43(4): 1429—1433.

武庆河, 严国平, 赵铁锁, 1999. 常见气显示的成因及特征. 断块油气田, 6(3): 15—18.

武少波, 赵雷青, 2013. 浅谈 DC 指数法预测地层压力的影响因素. 西部探矿工程, 25(12): 46—48, 52.

夏宏泉, 钟敬敏, 石晓兵, 等, 2004. 海上钻探地层压力预测方法. 天然气工业, 24(11): 73—75, 19.

杨进, 高德利, 1999. 地层压力随钻监测和预测技术研究. 石油大学学报(自然科学版), 23(1): 35—37.

余明发, 徐孝日, 黄彦庆, 2008. 欠压实成因异常高压的随钻检测技术应用研究. 石油天然气学报, 30(3): 308—310.

周东华, 李翠楠, 杜娟, 等, 2011. 随钻地层压力监测和预测技术研究. 钻采工艺, 34(6): 27—28, 40.

\*\*\*\*\*

## 《地球科学》

2019年9月 第44卷 第9期 要目预告

典型岩溶小流域水体中硝酸盐分布特征及成因:以普定后寨河流域为例.....李 耕等

六盘水矿区关键带岩溶水水化学演化特征及驱动因子.....叶慧君等

贵州主要碳酸盐岩含水层污染现状与特征.....罗 维等

黔东北地区地热水化学特征及起源.....宋小庆等

岩溶地下水脆弱性评价的城镇化因子:以水城盆地为例.....汪 莹等

水力压裂对地下水影响的深部脆弱性评价.....芦 红等

黔东注溪黑色岩系地球化学特征及矿化富集规律.....刘 文等

粤北长江铀矿田辉长闪长岩的岩石成因及其与铀成矿的关系.....钟福军等