

李红斌,王贵文,庞小娇,等.苏北盆地古近系阜宁组页岩工程品质测井评价[J].地质科技通报,2023,42(3):311-322.  
Li Hongbin, Wang Guiwen, Pang Xiaoqiao, et al. Logging evaluation of the engineering quality of the Paleogene Funing Formation oil shales in the Subei Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 311-322.

## 苏北盆地古近系阜宁组页岩工程品质测井评价

李红斌<sup>1a</sup>, 王贵文<sup>1a,1b</sup>, 庞小娇<sup>1a</sup>, 刘小平<sup>1a,1b</sup>, 王高成<sup>2</sup>, 舒红林<sup>2</sup>, 罗瑞峰<sup>2</sup>, 刘梦才<sup>2</sup>, 赖 锦<sup>1a,1b</sup>

(1.中国石油大学(北京) a.地球科学学院; b.油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2.中国石油浙江油田分公司勘探开发研究院, 杭州 310023)

**摘要:**页岩储层通常无自然产能,需要采用水平井钻井和体积压裂等手段进行商业开采,基于工程品质测井评价的页岩可压裂层段优选工作显得尤为重要。以苏北盆地古近系阜宁组页岩为例,应用阵列声波资料计算泊松比、杨氏模量等岩石力学参数,并与岩心实测资料刻度实现岩石力学参数动静态转换,以此为基础应用泊—杨法和一维岩石力学模型分别计算脆性指数与三轴地应力。综合考虑单井不同层段的脆性指数以及水平主应力差,优选了脆性指数以及脆性指数与水平最大、最小主应力差的比值作为工程品质表征参数。结合试油资料表明对于脆性指数越大、水平主应力差越小的储层,其压裂后产能越高。将苏北盆地阜宁组工程品质划分为两类:I类高产(工程品质表征参数>2.2),II类中—低产(工程品质表征参数<2.2),并且I类工程“甜点”段普遍压裂出油,表明依据该参数的“甜点”分类效果较好。页岩工程品质测井评价结果,可为可压裂性层段的优选提供理论依据与技术支撑,为页岩储层钻井轨迹设计与压裂设计工作提供科学指导。

**关键词:**页岩油;工程品质;脆性指数;水平主应力差;测井评价;阜宁组;苏北盆地

**中图分类号:**P631.8    **文章编号:**2096-8523(2023)03-0311-12    **收稿日期:**2021-11-11

**doi:**10.19509/j.cnki.dzkq.tb20210692

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Logging evaluation of the engineering quality of the Paleogene Funing Formation oil shales in the Subei Basin

Li Hongbin<sup>1a</sup>, Wang Guiwen<sup>1a,1b</sup>, Pang Xiaoqiao<sup>1a</sup>, Liu Xiaoping<sup>1a,1b</sup>,  
Wang Gaocheng<sup>2</sup>, Shu Honglin<sup>2</sup>, Luo Yufeng<sup>2</sup>, Liu Mengcui<sup>2</sup>, Lai Jin<sup>1a,1b</sup>

(1a.College of Geosciences; 1b.State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting,  
China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 2.Research Institute of Petroleum  
Exploration Development, PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Shale oil reservoirs, characterized by no productivity, are developed by horizontal drilling and volume fracturing, and it is very important to optimize shale fracable intervals based on engineering quality logging evaluation. The Paleogene Funing Formation shale in the Subei Basin is taken as a typical example in this study. A sonic scanner is used to calculate the elastic parameters, including Poisson's ratio and Young's modulus. Dynamic and static parameters are converted through core analysis data. The brittleness index and in situ stress are calculated according to Poisson's ratio and Young's modulus. In addition, a one-

基金项目:国家自然科学基金项目(42002133;42072150);中国石油大学(北京)科研启动基金项目(2462021YXZZ003);中国石油—中国石油大学(北京)战略合作科技专项(ZLZX2020-01-06-01)

作者简介:李红斌(1997— ),男,现正攻读地质学专业博士学位,主要从事测井地质学研究工作。E-mail:ab210226@163.com

通信作者:王贵文(1966— ),男,教授,博士生导师,主要从事沉积学、储层地质学与测井地质学方面的教学与科研工作。E-mail:  
wanggw@cup.edu.cn

dimensional rock mechanics model was constructed with the shear slowness in a single well to calculate three components of in situ stress. Finally, considering the difference in the brittleness index and horizontal stress differences between different layers, brittleness index ( $BI$ ) and  $(BI/(\sigma_H - \sigma_h))$  were selected to describe the engineering quality. According to oil test data, the larger the brittleness index and the smaller the horizontal stress are, the higher the capacity after fracturing. A cross plot of the brittleness index and  $BI/(\sigma_H - \sigma_h)$  is established to divide the reservoir types. Consequently, there are two types, including I high productivity (engineering quality characterization parameters  $> 2.2$ ) and II medium-low productivity (engineering quality characterization parameters  $< 2.2$ ), in the Paleogene Funing Formation in the Subei Basin. High productivity produces oil after fracturing, which suggests that the classification results of sweet spots depending on the engineering quality characterization parameters are better. Logging evaluation of the engineering quality of shale oil reservoirs can provide a theoretical basis and technical guidance for optimizing favorable fracability and high productivity layers and provide scientific guidance for drilling and fracturing layer optimization of shale reservoirs.

**Key words:** shale oil; engineering quality; brittleness index; in situ stress difference; logging evaluation; Funing Formation; Subei Basin

页岩油(广义)是指赋存于富有机质页岩层系(包括层系内的粉砂岩层、细砂岩层和碳酸盐岩层)中的石油<sup>[1]</sup>。页岩油气在现今能源格局中扮演着越来越重要的角色,目前北美页岩油气勘探开发不断取得突破<sup>[2-4]</sup>。得益于地质理论的完善及水平井钻井和体积压裂技术的进步,页岩油陆续在国内陆相深水湖盆中的泥页岩层系中发现,例如准噶尔盆地二叠系芦草沟组<sup>[5]</sup>、松辽盆地白垩系青山口组<sup>[6]</sup>、鄂尔多斯盆地三叠系延长组<sup>[7]</sup>、苏北盆地古近系阜宁组<sup>[8]</sup>等,彰显页岩油勘探开发潜力。

然而页岩油气往往不具有自然产能,需要压裂才能投产,在近 10 年,随着水力压裂等非常规油气层改造及开采技术的发展,非常规油气资源开采的难题由如何开采逐渐转变为有利压裂层段的选取,即工程品质评价显得尤为重要<sup>[9]</sup>。页岩储层工程“甜点”评价需要首先考虑地应力方向及大小的影响,同时单井可压裂层段的脆性研究,即脆性指数评价也尤为重要的<sup>[10]</sup>。研究表明,脆性指数高的层段易于压裂,易形成复杂裂缝<sup>[11]</sup>。因此,岩石的脆性评价是压裂层段优选过程中应考虑的重要因素之一<sup>[12-13]</sup>。除脆性指数外,地应力也是影响地层压裂后微裂缝发育程度的重要因素之一<sup>[14]</sup>,往往水平两向应力差相对较低的层段易于在压裂过程中形成复杂缝网<sup>[15-16]</sup>,因此脆性和地应力研究对于储层改造以及压裂模式的选择具有重要意义。目前针对苏北盆地阜二段页岩工程品质测井评价,主要进行脆性评价,而忽略了地应力大小及方向对工程品质的指导作用,以及工程品质与产能之间的耦合关系。工程“甜点”评价应综合考虑脆性与地应力两个因素,寻找压裂后易形成复杂裂缝的优质层段以及指导工程上钻井及压裂方向的选取<sup>[17]</sup>。

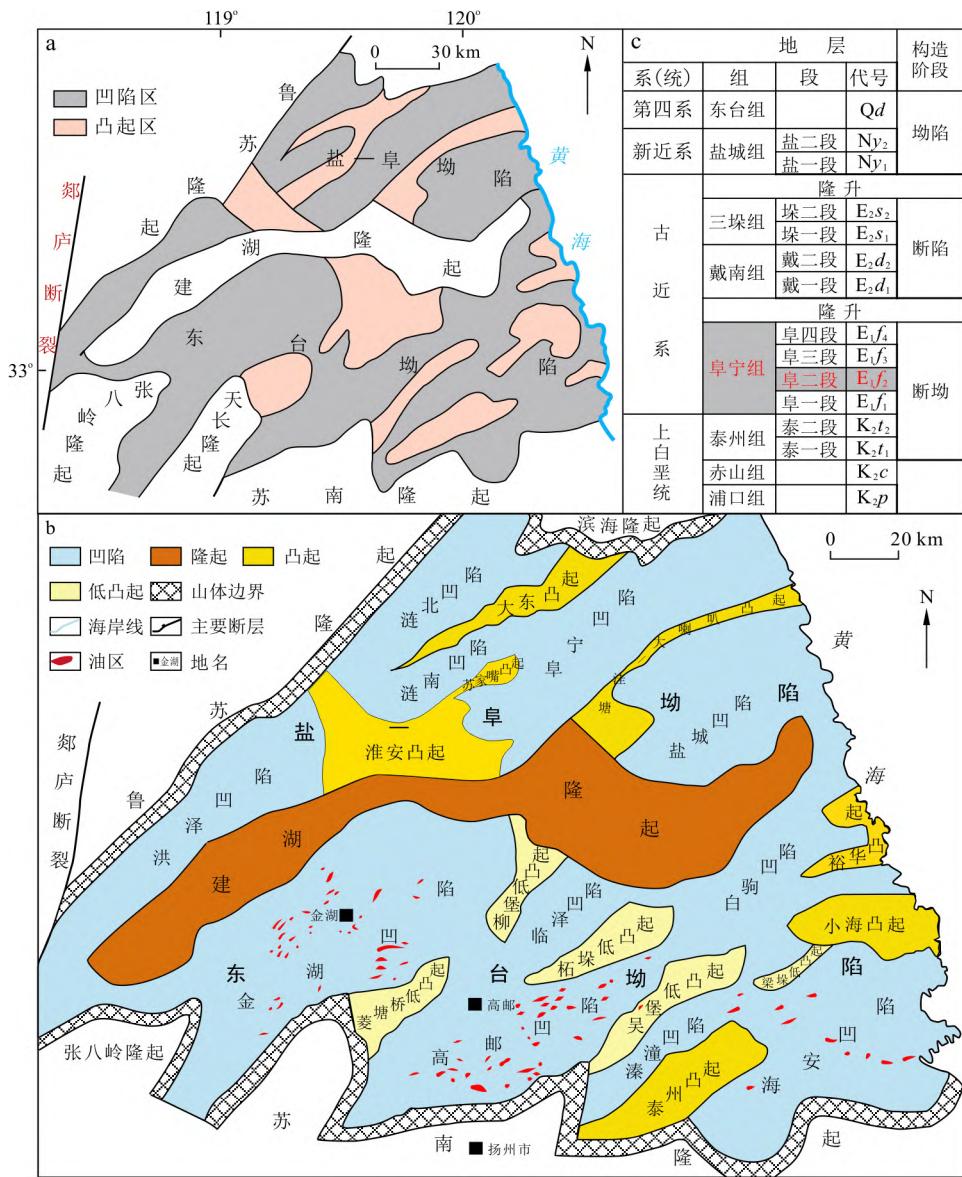
笔者将以苏北盆地阜宁组为重点研究对象开展工程品质测井评价,采用常规测井、阵列声波测井结合测试数据的方法,即岩心资料刻度测井,对研究区阜二段页岩进行脆性指数和三轴应力计算。优选脆性指数以及水平最大、最小主应力差(两向应力差)作为工程品质表征参数,通过以上 2 个参数进行综合判别并结合试油资料揭示脆性指数以及水平主应力差与压裂后产能的匹配关系。最终阐明工程品质与油气产能对应关系,实现单井纵向上工程“甜点”分类,从而对研究区阜二段页岩优质工程“甜点”段进行预测,旨在为寻找非常规油气储层工程“甜点”提供充分依据,为页岩储层钻井轨迹设计与压裂设计工作提供科学的指导。

## 1 研究区概况

苏北盆地位于江苏省东北部,属于苏北—南黄海盆地西部的陆上部分,东入黄海,北临滨海隆起,西接鲁苏隆起,南邻通扬隆起,面积约为  $3.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[18]</sup>。盆地总体为 NE 走向,北为盐城—阜宁坳陷,简称盐—阜坳陷,南为东台坳陷,中间为建湖隆起,其一级单元组成“两坳一隆”的构造格局<sup>[19]</sup>。其中,南部东台坳陷被划分为 6 个凹陷(分别为金湖凹陷、高邮凹陷、海安凹陷、临泽凹陷、溱潼凹陷和白驹凹陷)和 8 个凸起(分别为菱塘桥低凸起、柳堡低凸起、柘垛低凸起、吴堡低凸起、梁垛低凸起、泰州凸起、小海凸起和裕华凸起);北部盐—阜坳陷被划分为 5 个凹陷(分别为洪泽凹陷、涟南凹陷、涟北凹陷、阜宁凹陷和盐城凹陷)和 4 个凸起(分别为淮安凸起、大东凸起、苏家嘴凸起和塘洼一大喇叭凸起<sup>[20]</sup>)(图 1-a,b)。

苏北盆地是沉积在白垩系基底上的断陷湖盆,自下而上依次发育上白垩统泰州组( $K_2t$ ),古近系阜宁组( $E_1f$ )、戴南组( $E_2d$ )、三垛组( $E_2s$ ),新近系盐城组( $Ny$ )及第四系东台组( $Qd$ )<sup>[21]</sup>。阜宁组自下而上可以划分为4段,即:阜一段( $E_1f_1$ )、阜二段( $E_1f_2$ )、阜三段( $E_1f_3$ )和阜四段( $E_1f_4$ )。阜一段( $E_1f_1$ )主要发育棕色、棕褐色泥岩与粉砂岩互层,局部底部为砂砾岩,为滨湖沉积;阜二段( $E_1f_2$ )主

要发育灰黑色泥岩夹粉细砂岩、碳酸盐岩,为浅湖沉积;阜三段( $E_1f_3$ )主要发育灰黑色泥岩、灰黑色云质泥岩与灰黑色粉砂质泥岩,为深湖一半深湖沉积;阜四段( $E_1f_4$ )主要发育褐色、灰黑色泥岩夹泥灰岩薄层,为深湖一半深湖沉积。其中,阜二段( $E_1f_2$ )发育富含有机质的泥页岩<sup>[23]</sup>(图1-c),生烃厚度较大,页岩发育,是苏北盆地非常规油气勘探的重点层系。



a.构造区带划分图;b.区域构造位置图;c.地层分布柱状图

图1 苏北盆地构造区带划分图<sup>[21-22]</sup>

Fig.1 Structural division of the Subei Basin

## 2 岩石的力学性质及力学参数计算

### 2.1 岩石的力学性质

岩石的力学性质是指岩石在地质作用过程或各

种应力作用下的岩石变形和强度特征<sup>[24]</sup>,其除受岩性影响外,还与所处应力状态有关,而力学参数可以很好地表征岩石所处应力状态。弹性参数包括静态弹性参数和动态弹性参数,实验室测量的为静态,测井计算的则为动态。Liang等<sup>[25]</sup>对动、静态参数关

系进行了研究,发现在低围压下,静态参数普遍小于动态参数,可能是由于岩石中存在的微裂隙对动、静态应变的敏感性不同;Zhang 等<sup>[26]</sup>认为在动态参数测量条件下,岩石孔隙中的流体没有时间排出,而在静态参数测量条件下,流体有充分的时间排出,这种差异是导致动态参数普遍大于静态参数的原因。在高围压下,页岩中动、静态参数的比值接近定值<sup>[27]</sup>。针对储层的可压裂性,重点研究脆性以及水平主应力差等特征。

## 2.2 岩石力学参数计算

岩石力学参数可以通过岩心分析和测井计算得到,岩石力学参数测井计算主要利用纵横波时差、密度等测井数据进行计算。剪切模量表征材料在剪切应力作用下产生单位剪切形变所需要的剪切应力,体积模量表征材料体积应力与体积应变的比值,杨氏模量表征材料纵向应力与应变的比值,标志着材料的刚性,泊松比表征材料在受力下径向形变与纵向形变比值的绝对值,标志着材料横向形变的难易程度<sup>[28]</sup>。

### 2.2.1 岩石动静态弹性参数转换

假定地层中的岩石一直保持着相对稳定的状态,从地层中取心上来后,岩石内部的应力状态未发生明显变化,因此经过一系列加工后的静态弹性参数分析可以很好地还原地层的应力状态。由于静态弹性参数精度普遍高于动态弹性参数,并且静态弹性参数实验成本较高,一般采用有限的静态弹性参数刻度动态弹性参数(测井计算)以获得纵向上连续且精度较高的力学参数模型<sup>[29]</sup>。

将实验测得的静态弹性参数(表 1)与测井资料计算的动态弹性参数通过多元线性回归的方法进行拟合,得到动静态弹性参数的转换公式(式(1)、式(2)),可以看出动静态杨氏模量与动静态泊松比有较好的相关性(图 2,3)。

表 1 岩石力学强度测试结果

Table 1 Rock mechanical strength test results

编号	直径/mm	长度/mm	杨氏模量/GPa	泊松比	围压/MPa	深度/m
8-62/101	24.40	36.80	30.33	0.22	40.00	3 889.32
8-95/101	24.40	53.40	31.34	0.27	40.00	3 895.00
5-65/90	24.50	32.20	29.52	0.30	40.00	3 853.15
8-29/101	24.40	53.10	32.15	0.35	40.00	3 883.66
2-18/54	24.40	49.70	26.86	0.31	40.00	3 819.66
4-59/61	24.50	49.50	29.00	0.35	40.00	3 842.32
6-58/102	24.60	46.40	32.08	0.30	40.00	3 868.45
9-63/98	24.30	51.40	29.50	0.34	40.00	3 907.50

注:测试单位为中国石油大学(华东)石油工程学院岩石力学参数实验室

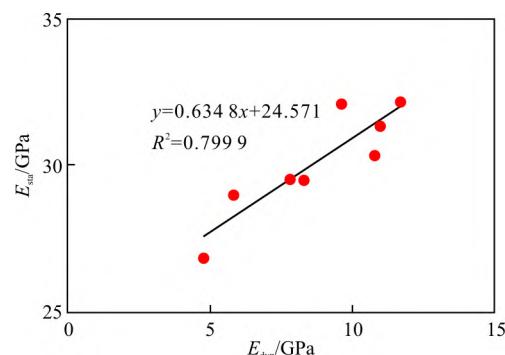


图 2 动静态杨氏模量交会图

Fig. 2 Crossplot diagram of dynamic and static Young's modulus

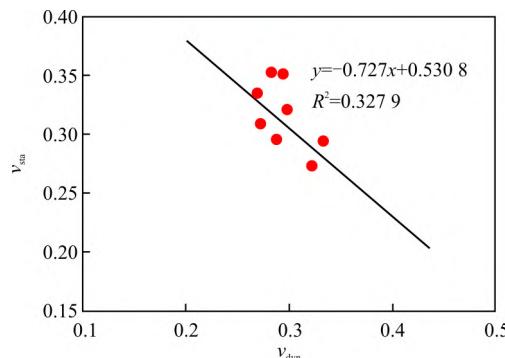


图 3 动静态泊松比交会图

Fig. 3 Crossplot diagram of dynamic and static Poisson's ratio

$$E_{\text{sta}} = 0.6348E_{\text{dyn}} + 24.571 \quad (1)$$

$$\nu_{\text{sta}} = -0.727\nu_{\text{dyn}} + 0.5308 \quad (2)$$

式中: $E_{\text{sta}}$  为静态杨氏模量(GPa); $E_{\text{dyn}}$  为动态杨氏模量(GPa); $\nu_{\text{sta}}$  为静态泊松比(无量纲); $\nu_{\text{dyn}}$  为动态泊松比(无量纲)。

### 2.2.2 脆性指数计算

脆性通常用来表征岩石的破坏特征,而脆性指数可以实现对脆性的定量评价<sup>[30]</sup>。关于脆性的算法,大致可以分为三类:一是弹性参数法即泊杨法,应用泊松比与杨氏模量进行计算;二是矿物成分法,通过计算方解石、白云石等脆性矿物占总矿物含量的比值<sup>[31]</sup>;三是地区经验公式法<sup>[32-33]</sup>。XRD 全岩衍射测试共选取样品 50 个,且上下部所取岩性皆为泥页岩(含硅质、钙质等),通过对测试结果的分析可知,阜二段无论上部还是下部其脆性矿物组分(长英质成分、碳酸盐成分)在不同深度段具有明显差异,说明脆性变化较大(图 4),但由于矿物成分计算法连续性较差(X 射线衍射数据不连续),所以本次主要采用泊杨法计算岩石的脆性指数。岩石脆性可以用杨氏模量与泊松比进行综合表征,它们可以反映岩石在一定压力下破裂的能力以及破裂后岩石维

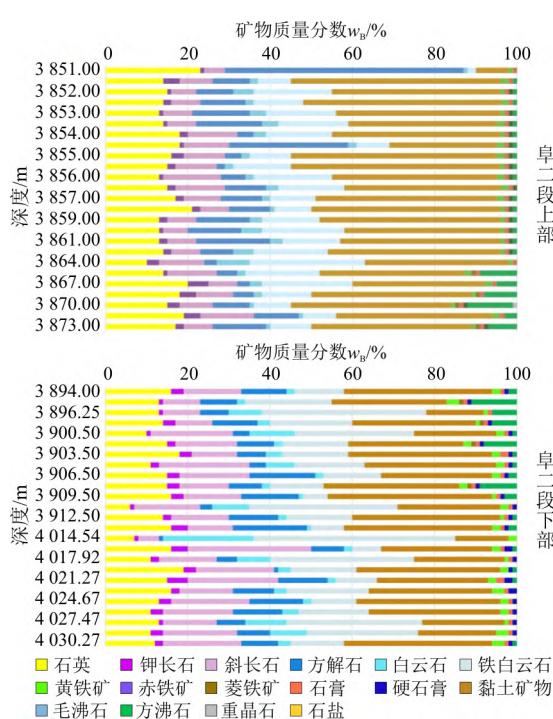


图4 阜二段 XRD 全岩衍射分析矿物质量分数分布图  
Fig.4 XRD analysis of the diffraction of all mineral content distribution of E<sub>1</sub> f<sub>2</sub>

持裂缝的能力<sup>[34]</sup>。杨氏模量越大、泊松比越小，则岩石脆性越强，越容易发生破裂；反之，杨氏模量越小、泊松比越大，则岩石脆性越差，越不易发生破裂。

根据 Techlog 软件，应用纵波时差、横波时差等测井曲线分别计算泊松比（式(3)）、杨氏模量（式(4)）、剪切模量（式(5)）与体积模量（式(6)），并根据式(7)与式(8)分别计算岩石的脆性指数，通过求取两者的平均值即可获得基于岩石力学特征的脆性指数（式(9)）<sup>[33]</sup>，用实测数据刻度测井，可以提高其精度。

泊松比：

$$\nu_{\text{dyn}} = \frac{(\Delta t_{\text{DTS}}^2 / \Delta t_{\text{DTC}}^2)^2 - 2}{2(\Delta t_{\text{DTS}}^2 / \Delta t_{\text{DTC}}^2)^2 - 2} \quad (3)$$

杨氏模量：

$$E_{\text{dyn}} = \frac{9G_{\text{dyn}} \times K_{\text{dyn}}}{G_{\text{dyn}} + 3K_{\text{dyn}}} \quad (4)$$

剪切模量：

$$G_{\text{dyn}} = \frac{\rho_b}{(\Delta t_{\text{DTS}})^2} \quad (5)$$

体积模量：

$$K_{\text{dyn}} = \frac{\rho_b}{(\Delta t_{\text{DTC}})^2} - \frac{4}{3}G_{\text{dyn}} \quad (6)$$

式中： $\Delta t_{\text{DTS}}$  为横波声波时差 ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )； $\Delta t_{\text{DTC}}$  为纵波声波时差 ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )； $G_{\text{dyn}}$  为动态剪切模量 (GPa)； $K_{\text{dyn}}$  为

动态体积模量 (GPa)； $\rho_b$  为地层密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

$$BI_E = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (7)$$

$$BI_\nu = \frac{\nu - \nu_{\max}}{\nu_{\min} - \nu_{\max}} \quad (8)$$

$$BI = \frac{BI_E + BI_\nu}{2} \times 100\% \quad (9)$$

式中： $BI$  为脆性指数 (%)；下标 min 和 max 分别代表该参数在某个地层段内的最小值与最大值； $BI_E$ ， $BI_\nu$  分别为通过杨氏模量与泊松比计算出的脆性指数 (%)。

根据上述公式计算发现，苏北盆地阜二段的脆性指数多大于 40%（图 5），且下部比上部的脆性指数略大，有利于压裂改造。

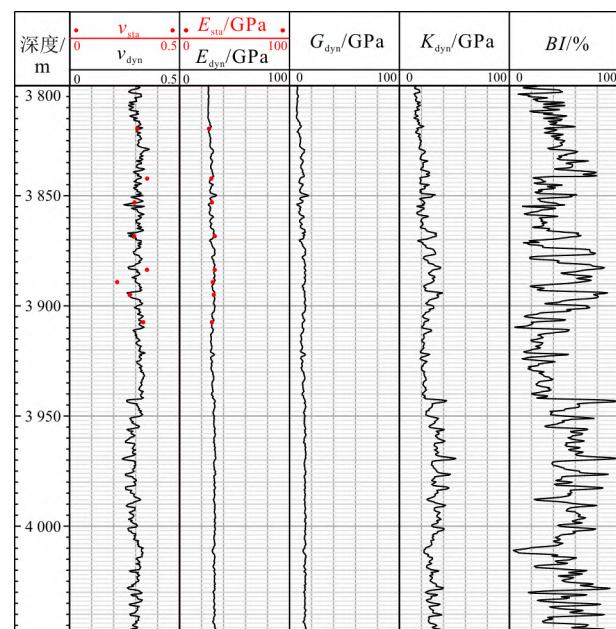


图5 岩石力学参数测井曲线图  
Fig.5 Logging curves of geomechanical parameters

### 3 孔隙压力及地应力计算

#### 3.1 孔隙压力测井计算

目前应用测井资料计算孔隙压力的方法主要有等效深度法、Eaton 法<sup>[35]</sup>、有效应力法等。等效深度法假设在不同深度具有相同岩石物理性质的泥岩骨架所受的有效应力  $\sigma$  相同<sup>[36]</sup>，忽略了温度的影响；有效应力法没有考虑除欠压外还有流体膨胀等其他机制对地层孔隙压力的影响；而 Eaton 法不仅考虑了除压实作用以外的他源机制（流体膨胀、构造挤压等）对孔隙压力的影响，还通过地层测试资料对其进行刻度建立了测井资料与实测资料之间的联系，是目前广泛用于孔隙压力计算的方法之一，因此本

研究采用 Eaton 法(式(10))来计算地层孔隙压力。

$$P_p = \sigma_v - (\sigma_v - p_{pnorm}) \times \alpha \times \left( \frac{\Delta t_{DTCnorm}}{\Delta t_{DTC}} \right)^n \quad (10)$$

式中:  $P_p$  为孔隙压力(MPa);  $\sigma_v$  为垂向地应力(MPa);  $P_{pnorm}$  为正常地层孔隙压力(MPa);  $\Delta t_{DTCnorm}$  为计算点对应的正常趋势线上的声波时差值( $\mu\text{s ft}^{-1}$ );  $\alpha, n$  分别为 Eaton 系数和 Eaton 指数, 且  $\alpha=1$ ,  $n=3$ (Techlog 软件操作手册)。

### 3.2 地应力测井计算

地应力是指地下岩石介质各个部分之间通过接触而相互作用的力, 主要是由重力、构造应力、孔隙压力等组成<sup>[37]</sup>。地应力不仅是水平井轨迹设计的关键参数, 同时也是选取优质压裂层段的重要参数。地应力的获取方法主要分为两大类, 一种是室内岩心测试(Kaiser 效应等)技术<sup>[38]</sup>, 一种是根据现场技术测试(水力压裂法等)获得。室内岩心测试技术获得的地应力数据精度更高, 但是由于测试成本高、数据点有限、纵向连续性差等原因, 工程中不将此类方法作为优选方案; 利用测井资料计算地应力的方法具有成本较低、纵向连续性较好等特点, 可以作为地应力计算的主要方法。本次应用室内测试技术获得的数据刻度测井资料计算出的地应力剖面, 以此提

高计算精度。之所以用声发射法刻度测井资料, 是因为现今应力是对古应力的继承。

#### 3.2.1 上覆地层应力

上覆地层应力  $\sigma_v$  是由上覆地层的重力引起的, 一般情况下, 与地层深度和密度呈正比, 即随着地层深度和密度的增大而逐渐增大, 因此, 应用三点外推法, 即对密度测井资料积分进行求取(式(11))。

$$\sigma_v = g \int_0^{TVD} \rho_b(h) \cdot dh \quad (11)$$

式中:  $h$  为地层埋深(m);  $\rho_b(h)$  为地层密度随地层深度变化的函数( $\text{g/cm}^3$ );  $g$  为重力加速度( $\text{m/s}^2$ );  $TVD$  为垂直深度。

#### 3.2.2 最大和最小水平地应力

针对最大、最小水平主应力计算, 本研究主要采用目前较为常用的水平应力估算模型——多孔弹性水平应变模型法(式(12)、式(13))。它以三维弹性理论为基础, 假设岩石为均质、各向同性的线弹性体, 且在沉积后期地质构造运动过程中, 地层与地层之间未发生错动, 所有地层水平方向的应变均为常数<sup>[39]</sup>。

应用公式(12)、(13)计算最大、最小水平主应力, 与实测最大、最小水平主应力进行刻度, 如图 6 所示, 拟合效果较好, 同时以计算结果为基础, 可以

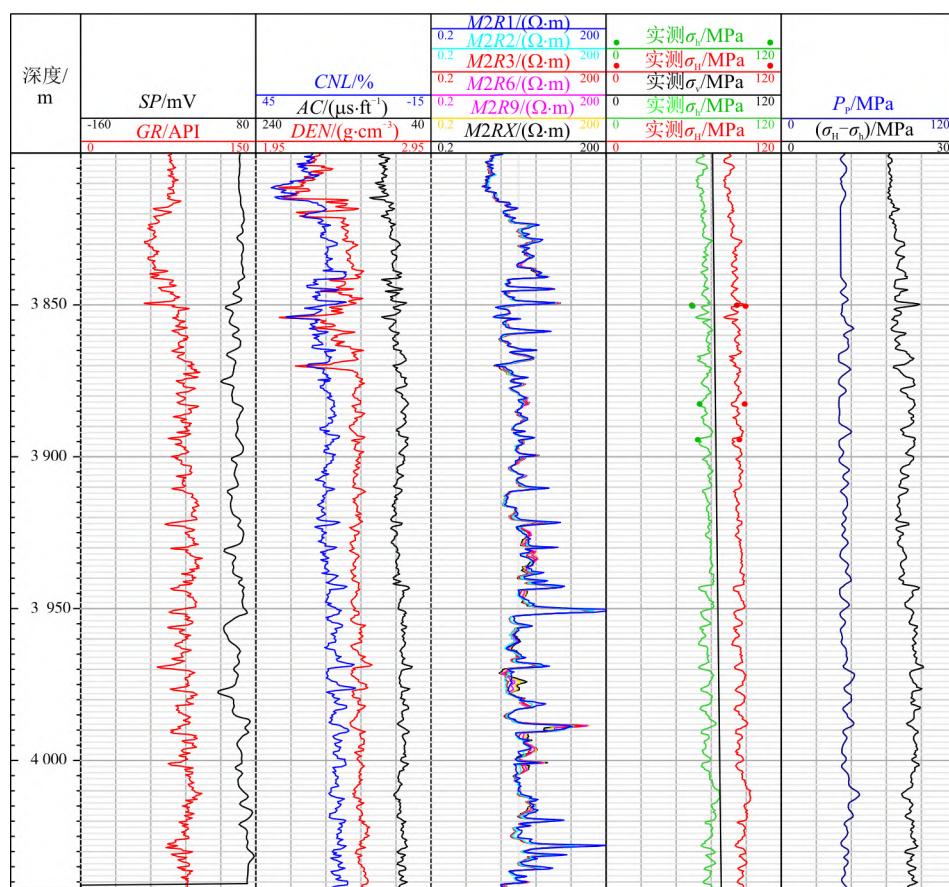


图 6 地应力测井曲线图  
Fig.6 Logging curve of in-situ stress

得到本次所用的另一个可压裂性评价参数——水平主应力差。一般情况下,水平主应力差越小,地层的可压裂性越好,压裂过程中越易于形成复杂缝网<sup>[16]</sup>,但并不代表当水平主应力差无限接近于零时是最好的,相反,当水平主应力差过小时,压裂时内部应力提供的能量过少,导致压裂后形成的裂缝也会过于单一,无法形成有效沟通的复杂裂缝。苏北盆地阜二段的水平主应力差多大于18 MPa,上部比下部略小(图6)。

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha' P_p) + \alpha' P_p + \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_H + \nu \epsilon_h) \quad (12)$$

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha' P_p) + \alpha' P_p + \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_h + \nu \epsilon_H) \quad (13)$$

式中: $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$  分别为最大、最小水平主应力(MPa); $\nu$  为泊松比(无量纲); $E$  为杨氏模量(GPa); $\alpha'$  为 Biot

系数,研究区取值为1; $\epsilon_H$ 、 $\epsilon_h$  分别为最大、最小水平主应变,研究区取值分别为0.000 97、0.000 05。

通过地应力的计算可以确定好的压裂层段,除此之外,压裂方向的确定也至关重要。一般情况下,水平井钻井通常沿最小水平主应力方向钻入,压裂的方向与最大水平主应力方向平行,压裂后的裂缝易与天然裂缝沟通,形成复杂连通的裂缝网络<sup>[40]</sup>。本次借助阵列声波提取的快慢横波确定最大、最小水平主应力的方位<sup>[41]</sup>(图7)。当横波在各向异性介质中传播时,会产生横波分裂的现象,形成快横波与慢横波<sup>[42]</sup>。岩石在最大水平主应力方向传播速度最快,即为快横波的传播方向,岩石在最小水平主应力方向传播速度最慢,即为慢横波的传播方向<sup>[43]</sup>。本次应用阵列声波测井(XMAC)资料进行横波方向的提取,结果表明,单井的最大水平地应力方向总体为NE—SW方向(图8)。

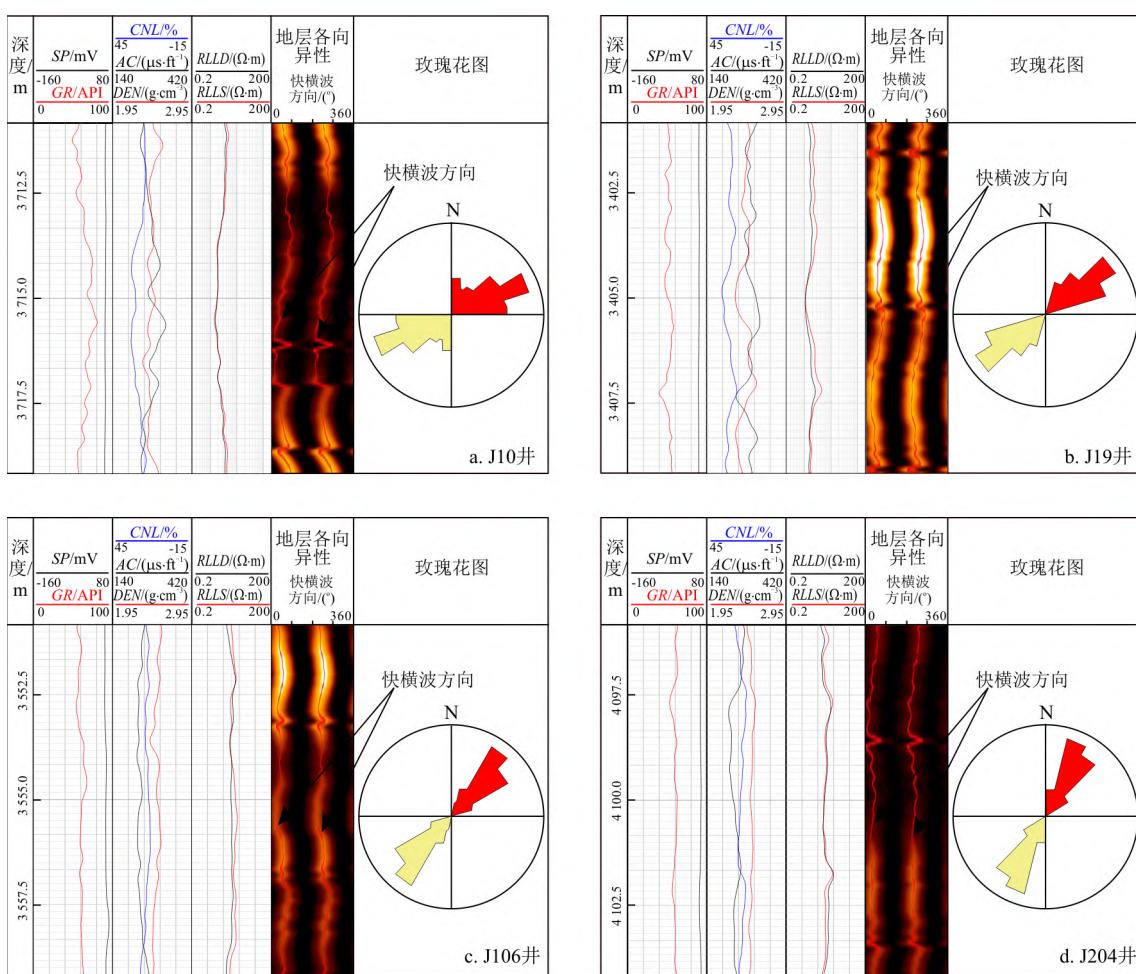


图7 J10(a)、J19(b)、J(106)(c)和J204(d)井基于阵列声波测井的地应力方向判别

Fig.7 Discrimination of in-situ stress direction according to XMAC in J10(a), J19(b), J(106)(c) and J204(d) wells

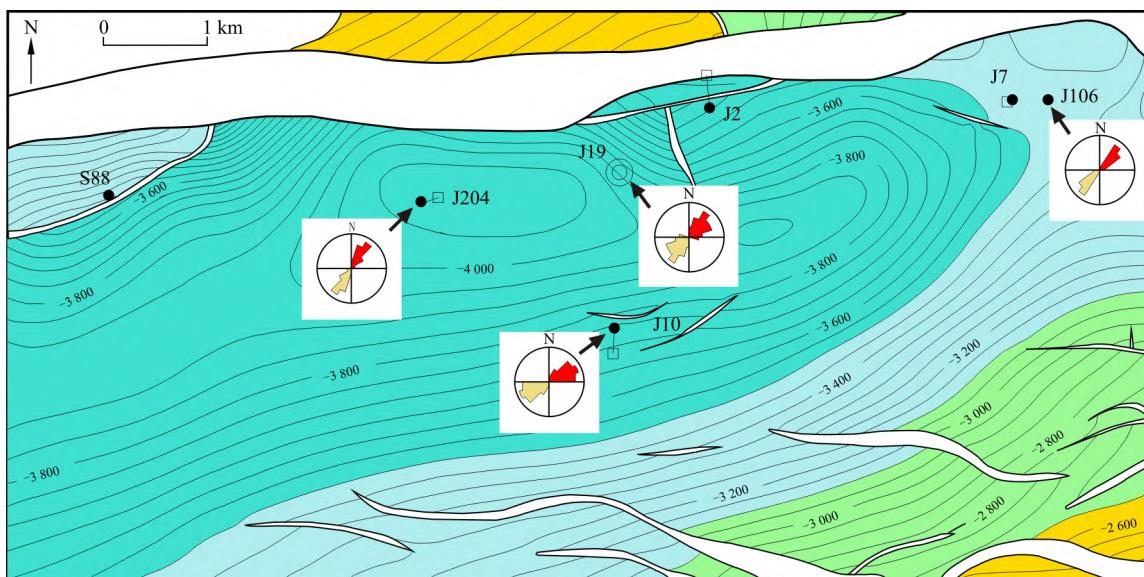


图 8 地应力方向平面分布图(等高线单位为 m)

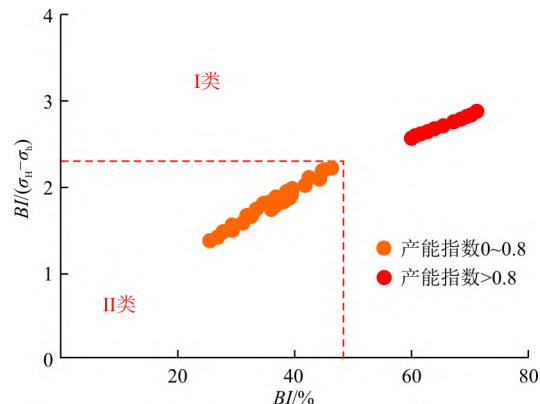
Fig.8 Plane map of in-situ stress orientation

#### 4 工程品质测井综合评价

由于影响页岩压裂投产的参数是现今地应力(大小和方向)和脆性,因此工程品质评价包括岩石脆性评价和地应力评价,旨在寻找可压裂性较好的层段。综合前文中脆性指数越大地层脆性越强,以及水平主应力差越小地层压裂后裂缝越复杂、连通性越好两种性质,可应用脆性指数以及水平主应力差两个参数构建工程品质综合评价参数——脆性指数与水平主应力差的比值( $BI/(\sigma_H - \sigma_h)$ )。根据以上两种性质可以得知,该综合评价参数值越大,证明地层的可压裂性越好,压裂后越容易形成复杂且连通性越好的裂缝网络。

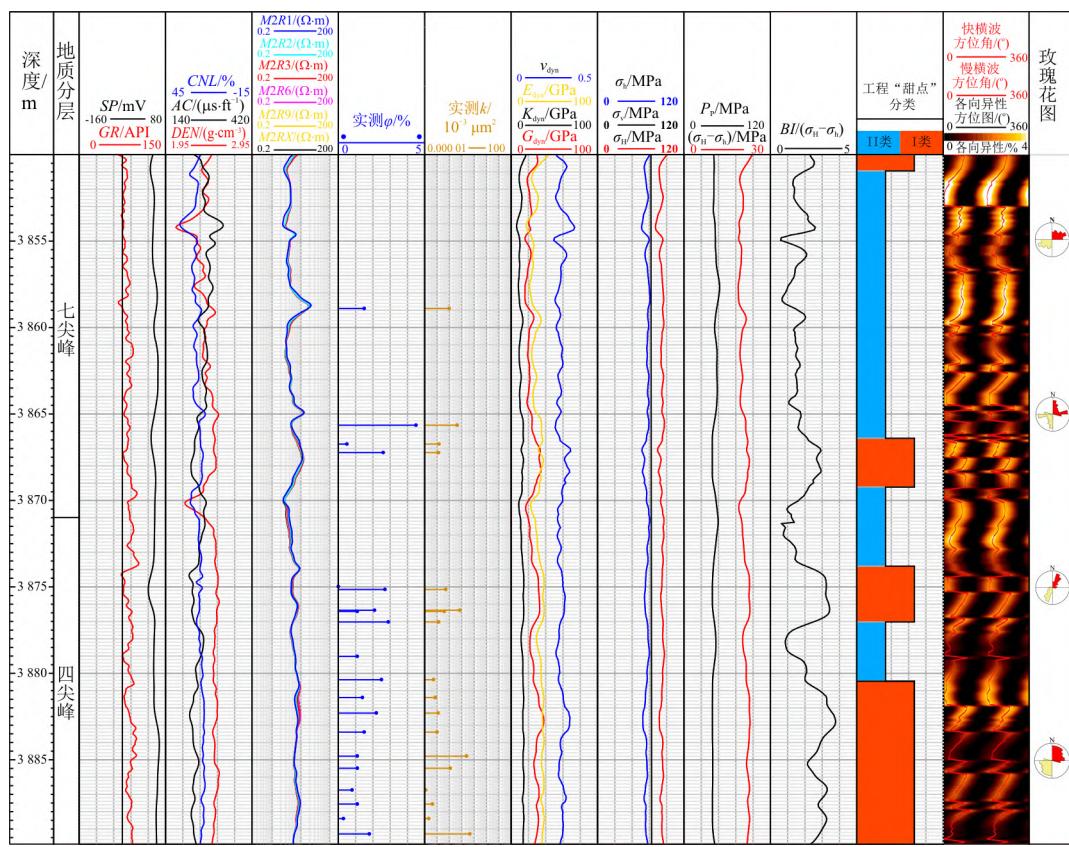
本次应用脆性指数与上述综合评价参数交会,并结合单井的产能指数,即每米层段的日产油量,制定不同产能层段的划分指标,由图 9 可以看出,以产能指数  $0.8 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{d})$  为划分标准,共分为两类: I 类高产(综合评价参数  $> 2.2$ ), II 类中一低产(综合评价参数  $< 2.2$ )。

根据上述制定的划分指标,可以划分单井纵向上不同产能的工程“甜点”(图 10),并与实测孔渗性能进行对比,结果表明,综合评价参数  $> 2.2$ ,即 I 类高产段对应的储层孔渗性能较好,综合评价参数  $< 2.2$ ,即 II 类中一低产段对应的储层孔渗性能较差。工程“甜点”与物性“甜点”对应关系较好,I 类高产段可以作为压裂的优选层段。同时根据快慢横波的传播方向,可以确定不同层位最大水平主应力的方

I. 高产段,综合评价参数  $> 2.2$ ; II. 中一低产段,综合评价参数  $< 2.2$ Fig.9 Crossplot diagram of  $BI$  and  $(BI/(\sigma_H - \sigma_h))$ 

向,基本为 NE—SW 方向,少见 EW 方向,以此确定水平井的压裂方向应当沿 NE—SW 方向压裂。

同时还可以将划分指标应用至其他井(图 11),结果表明,J106 井阜二段水平主应力差分布范围为  $18 \sim 21 \text{ MPa}$ ,以综合评价参数  $> 2.2$  为划分标准,其上部综合评价参数值明显大于下部,即上部多为 I 类工程“甜点”,下部多为 II 类工程“甜点”,并与试油资料(王八盖、七尖峰和四尖峰组三层合试,累计产油  $299.03 \text{ m}^3$ ;中山字组累计产油  $120.17 \text{ m}^3$ )进行对比,结果表明, I 类工程“甜点”段普遍压裂出油,说明工程“甜点”划分结果与试油资料匹配效果较好,也证明 I 类高产段可以作为压裂的优选层段。

图 10 J19 井阜二段工程品质测井评价<sup>[44]</sup>Fig.10 Logging evaluation of the engineering quality of E<sub>1</sub> f<sub>2</sub> in Well J19

## 5 结 论

(1)根据岩石力学实验测试得到的静态弹性参数与测井资料计算得到的动态弹性参数实现动静态参数转化,实验数据刻度测井,应用泊杨法计算脆性指数,实现了脆性评价,结果表明脆性指数在20%~80%之间,多大于40%,且下部比上部的脆性指数略大,有利于压裂改造。

(2)根据多孔弹性水平应变模型法计算单井最大、最小水平主应力,以此计算水平主应力差,结果表明水平主应力差大于18 MPa,同时根据阵列声波提取的快慢横波指示最大水平主应力的方向,整体为NE-SW向,基于上述地应力大小的计算和方向的提取实现了地应力评价。

(3)基于综合脆性指数与水平主应力差建立了苏北盆地阜二段工程品质综合评价参数——脆性指数与水平主应力差的比值,并结合产能指数建立了工程“甜点”评价标准,以产能指数0.8 t/(m·d)为划分标准,综合评价参数>2.2为I类,综合评价参数<2.2为II类,实现了单井纵向上工程品质测井评价。

## 参考文献:

- [1] 金之钧,王冠平,刘光祥,等.中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J].石油学报,2021,42(7):821-835.  
Jin Z J, Wang G P, Liu G X, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. Acta Petroleii Sinica, 2021, 42 (7): 821-835 (in Chinese with English abstract).
- [2] Sonnenberg S A, Pramudito A. Petroleum geology of the giant Elm Coulee field, Williston Basin[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93 (9): 1127-1153.
- [3] Jarvie D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2. Shale-oil resource systems[J]. AAPG Memoir, 2012, 97: 89-119.
- [4] Liu X, Jin Z, Lai J, et al. Fractal behaviors of NMR saturated and centrifugal  $T_2$  spectra in oil shale reservoirs: The Paleogene Funing Formation in Subei Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 129: 105069.
- [5] Liu Y, Zeng J, Yang G, et al. An innovative method for the characterization of oil content in lacustrine shale-oil systems: A case study from the Middle Permian Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 130: 105112.
- [6] Cao H, Zou Y R, Lei Y, et al. Shale oil assessment for the Songliao Basin, northeastern China, using oil generation-sorption method[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(5): 4826-4842.
- [7] Cui J, Li S, Mao Z. Oil-bearing heterogeneity and threshold of tight sandstone reservoirs: A case study on Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin[J]. Marine & Petroleum Geology, 2019,

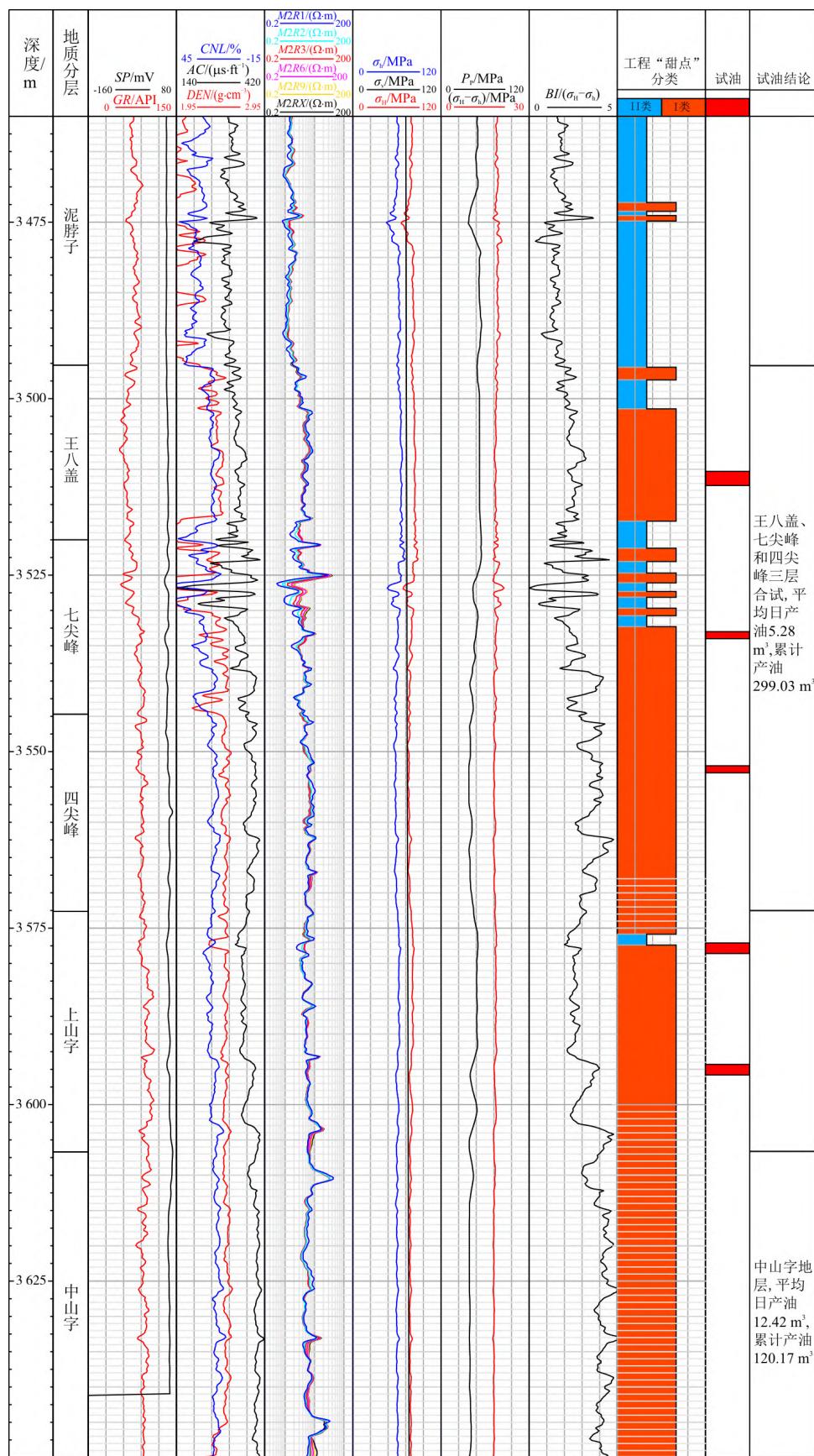


图 11 J106 井阜二段工程品质测井评价

Fig.11 Logging evaluation of the engineering quality of  $E_1 f_2$  in Well J106

- 104:180-189.
- [8] Liu X P, Lai J, Fan X C, et al. Insights in the pore structure, fluid mobility and oiliness in oil shales of Paleogene Funing Formation in Subei Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 114: 104228.
- [9] 夏一军,胡向阳,魏水健.页岩气勘探开发中地球物理技术的应用[J].地球物理学进展,2015,30(4):1798-1803.  
Xia Y J, Hu X Y, Wei S J. Application of geophysics in shale gas exploration and exploitation[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1798-1803(in Chinese with English abstract).
- [10] 陈林,陈孝红,张保民,等.鄂西宜昌地区五峰组—龙马溪组页岩储层特征及其脆性评价[J].地质科技通报,2020,39(2):54-61.  
Chen L, Chen X H, Zhang B M, et al. Reservoir characteristics and brittleness evaluation of Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale in Yichang area, western Hubei Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(2): 54-61(in Chinese with English abstract).
- [11] Rybacki E, Meier T, Dresen G. What controls the mechanical properties of shale rocks? Part II. Brittleness[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 144: 39-58.
- [12] Guo Z, Li X Y, Liu C, et al. A shale rock physics model for analysis of brittleness index, mineralogy and porosity in the Barnett Shale[J]. Journal of Geophysics & Engineering, 2013, 10(2): 025006.
- [13] 周立宏,陈长伟,甘华军,等.歧口凹陷沙一下亚段页岩形成环境及页岩油潜力综合评价[J].地质科技通报,2022,41(5):19-30.  
Zhou L H, Chen C W, Gan H J, et al. Shale formation environment and comprehensive evaluation of shale oil potential of the Lower First Member of Shahejie Formation in Qikou Sag[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 19-30(in Chinese with English abstract).
- [14] Boersma Q D, Douma L A N R, Bertotti G, et al. Mechanical controls on horizontal stresses and fracture behaviour in layered rocks: A numerical sensitivity analysis [J]. Journal of Structural Geology, 2020, 130: 103907.
- [15] Beugelsdijk L J L, Pater C, Sato K. Experimental hydraulic fracture propagation in a multi-fractured medium[C]// Anon. SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management.[S.l.]:[s.n.], 2000.
- [16] 覃建华,张景,蒋庆平,等.玛湖砾岩致密油“甜点”分类评价及其工程应用[J].中国石油勘探,2020,25(2):110-119.  
Qin J H, Zhang J, Jiang Q P, et al. Sweet spot classification evaluation of tight conglomerate reservoir in Mahu Sag and its engineering application[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 110-119(in Chinese with English abstract).
- [17] 邹才能,杨智,张国生,等.常规—非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J].石油勘探与开发,2014,41(1):14-25,27,26.  
Zou C N, Yang Z, Zhang G S, et al. Conventional and unconventional petroleum "orderly accumulation": Concept and practical significance [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 14-25, 27, 26(in Chinese with English abstract).
- [18] 陈友飞,严钦尚,许世远.苏北盆地沉积环境演变及其构造背景[J].地质科学,1993,28(2):151-160.  
Chen Y F, Yan Q S, Xu S Y. Evolution of the sedimentary environments in north Jiangsu Basin and its tectonic setting[J]. Scientia Geologica Sinica, 1993, 28(2): 151-160 (in Chinese with English abstract).
- [19] 舒良树,王博,王良书,等.苏北盆地晚白垩世—新近纪原型盆地分析[J].高校地质学报,2005,11(4):534-543.  
Shu L S, Wang B, Wang L S, et al. Analysis of Northern Jiangsu Prototype Basin from Late Cretaceous to Neogene[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(4): 534-543 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王旭影.苏北盆地古近系阜三段沉积体系研究[D].北京:中国地质大学(北京),2017.  
Wang X Y. Study on the sedimentary system of the Third Member of Paleogene Funing Formation in the Subei Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2017 (in Chinese with English abstract).
- [21] 李维,朱筱敏,段宏亮,等.苏北盆地高邮—金湖凹陷古近系阜宁组细粒沉积岩纹层特征与成因[J].古地理学报,2020,22(3):469-482.  
Li W, Zhu X M, Duan H L, et al. Characteristics and forming mechanism of laminae fine-grained sedimentary rock of the Paleogene Funing Formation in Gaoyou and Jinhu Sags, Subei Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(3): 469-482 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王旭影,姜在兴.苏北盆地古近系阜三段物源特征及其形成的构造背景分析[J].地学前缘,2021,28(2):376-390.  
Wang X Y, Jiang Z X. Provenance characteristics and tectonic setting analysis of the 3rd Member of the Paleogene Funing Formation, Subei Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(2): 376-390 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张廷山,彭志,祝海华,等.海安凹陷曲塘次凹阜二段页岩油形成条件及勘探潜力[J].地质科技情报,2016,35(2):177-184.  
Zhang T S, Peng Z, Zhu H H, et al. Forming conditions and exploration potential of shale oil from Member 2 of Funing Formation in Quatang Subsag, Hai'an Sag[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(2): 177-184 (in Chinese with English abstract).
- [24] 许东俊,耿乃光.岩体变形和破坏的各种应力途径[J].岩土力学,1986,7(2):17-25.  
Xu D J, Geng N G. The various stress paths causing deformation and failure in rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 1986, 7(2): 17-25 (in Chinese with English abstract).
- [25] Liang X, Qiu K, Shu H, et al. Geomechanical evaluations of deep shale gas reservoir in Sichuan Basin, western China[C]// Anon. Unconventional Resources Technology Conference.[S. l.]:[s.n.], 2020: 1797-1816.
- [26] Zhang H, Qiu K, Fuller J, et al. Geomechanical-evaluation enabled successful stimulation of a high-pressure/high-temperature tight gas reservoir in western China[J]. SPE Drilling & Completion, 2016, 18(4): 157-170.
- [27] Cheng C H, Johnston D H. Dynamic and static moduli[J]. Geophysical Research Letters, 1981, 8(1): 39-42.
- [28] 姜在兴,张文昭,梁超,等.页岩油储层基本特征及评价要素[J].石油学报,2014,35(1):184-196.  
Jiang Z X, Zhang W Z, Liang C, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184-196 (in Chinese with English abstract).
- [29] Shaver M A, Segret G, Yudhia D P, et al. A geomechanical

- model and workflow for calibrating elastic moduli and min/max horizontal stress from well logs in the Nahr Umr Shale [C]// Anon.SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition.[S.l.]:[s.n.],2021.
- [30] Zhang D, Ranjith P G, Perera M S A. The brittleness indices used in rock mechanics and their application in shale hydraulic fracturing: A review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 143: 158-170.
- [31] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [32] Zhao P Q, Mao Z Q, Huang Z H, et al. A new method for estimating total organic carbon content from well logs[J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(8): 1311-1327.
- [33] 赖锦,王贵文,范卓颖,等.非常规油气储层脆性指数测井评价方法研究进展[J].石油科学通报,2016,1(3):330-341.  
Lai J, Wang G W, Fan Z Y, et al. Research progress in brittleness index evaluation methods with logging data in unconventional oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(3): 330-341(in Chinese with English abstract).
- [34] Rickman R, Mullen M, Petre E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett shale[C]// Anon. SPE Annual Technical Conference & Exhibition.[S.l.]: Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [35] Eaton B A. The equation for geopressure prediction from well logs[R].[S.l.]:SPE, 1975: 5544.
- [36] 张筠,林绍文.利用测井进行地层弹性特征及应力场分析[J].测井技术,2001,25(6):467-472,480.  
Zhang J, Lin S W. Analysis of formation elastic characteristics and stress field with log data[J]. Well Logging Technology, 2001, 25(6): 467-472, 480(in Chinese with English abstract).
- [37] Lai J, Li D, Wang G, et al. Earth stress and reservoir quality evaluation in high and steep structure: The Lower Cretaceous in the Kuqa Depression, Tarim Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 101: 43-54.
- [38] 王亚超,窦斌,喻勇,等.不同冷却方式下高温花岗岩巴西劈裂及声发射特性试验研究[J].地质科技通报,2022,41(3):200-207.  
Wang Y C, Dou B, Yu Y, et al. Experimental study on Brazilian split test and acoustic emission characteristics of high temperature granite under different cooling methods[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(3): 200-207(in Chinese with English abstract).
- [39] 沈海超,程远方,赵益忠,等.靖边气田煤层地应力及井壁稳定性研究[J].岩土力学,2009,30(增刊2):123-126,131.  
Shen H C, Chen Y F, Zhao Y Z, et al. Research on in-situ stresses and borehole stability of coal seam in Jingbian Gas Field [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (S2): 123-126, 131 (in Chinese with English abstract).
- [40] 郭建春,尹建,赵志红.裂缝干扰下页岩储层压裂形成复杂裂缝可行性[J].岩石力学与工程学报,2014,33(8):1589-1596.  
Guo J C, Yin J, Zhao Z H. Feasibility of formation of complex fractures under cracks interference in shale reservoir fracturing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(8): 1589-1596(in Chinese with English abstract).
- [41] 赖锦,王贵文,庞小娇,等.测井地质学前世、今生与未来:写在《测井地质学·第二版》出版之时[J].地质论评,2021,67(6): 1804-1828.  
Lai J, Wang G W, Pang X J, et al. The past, present and future of Well Logging Geology: To celebrate the publication of second edition of " Well Logging Geology" [J]. Geological Review, 2021, 67(6): 1804-1828(in Chinese with English abstract).
- [42] Stadtmuller M, Lis-Śledziona A, słota-Valim M. Petrophysical and geomechanical analysis of the Lower Paleozoic shale formation, North Poland[J]. Interpretation, 2018, 6(3): 91-106.
- [43] 魏周拓,范宜仁,陈雪莲.横波各向异性在裂缝和应力分析中的应用[J].地球物理学进展,2012,27(1):217-224.  
Wei Z T, Fan Y R, Chen X L. Application of shear wave anisotropy in fractures and in-situ stress analysis[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27 (1): 217-224 (in Chinese with English abstract).
- [44] 赖锦,凡雪纯,黎雨航,等.苏北盆地阜宁组页岩油七性关系与三品质测井评价[J/OL].地质论评,2022,68(2):751-768.  
Lai J, Fan X C, Li Y H, et al. Well logging evaluation of seven relationships and three properties of Paleogene Funing Formation oil shales in Subei Basin[J/OL]. Geological Review, 2022, 68(2): 751-768(in Chinese with English abstract).