

# 湖相泥页岩储层脆性评价及影响因素分析

——以苏北盆地海安凹陷曲塘次凹泥页岩为例

孙彪<sup>1,2</sup>, 刘小平<sup>1,2</sup>, 舒红林<sup>3</sup>, 焦创贇<sup>4</sup>, 王高成<sup>3</sup>, 刘梦才<sup>3</sup>, 罗瑀峰<sup>3</sup>

(1. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

3. 中国石油浙江油田分公司, 杭州 310013;

4. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710018)

**摘要:**为准确评价湖相泥页岩脆性及探究其影响因素,选取了苏北盆地海安凹陷曲塘次凹古近系阜宁组二段湖相泥页岩样品,利用全岩X衍射分析、有机碳测定、镜质体反射率测定、扫描电镜、三轴岩石力学等实验技术手段,分析了样品的矿物成分、地球化学、储集空间等特征;并采用测井、强度参数、矿物成分以及应力—应变曲线变化特征等方法评价其脆性特征。结果表明,页岩主要为云质页岩和灰质页岩,脆性矿物含量较高;有机碳含量平均为1.25%,且已达到成熟阶段;储集空间由特低孔和裂缝组成;应力—应变关系曲线表现出较强的脆性特征;不同方法的脆性评价结果存在一定差异,基于弹性参数与矿物组分评价脆性比基于强度参数的应用效果更佳,但每种方法都存在一定局限性。阜二段页岩脆性受矿物组分、有机质丰度、储集空间发育程度等共同影响,随着白云石含量、有机质成熟度、裂缝发育程度的增加,储层脆性随之增加;而方解石含量、有机质丰度、孔隙度的增加则会减弱储层脆性。

**关键词:**脆性评价;湖相泥页岩;阜宁组;古近系;海安凹陷;苏北盆地

中图分类号: TE122.24

文献标识码: A

## Evaluation and influencing factors for brittleness of lacustrine shale reservoir:

a case study of Qutang Sub-Sag, Subei Basin

SUN Biao<sup>1,2</sup>, LIU Xiaoping<sup>1,2</sup>, SHU Honglin<sup>3</sup>, JIAO Chuangyun<sup>4</sup>,

WANG Gaocheng<sup>3</sup>, LIU Mengcai<sup>3</sup>, LUO Yufeng<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou, Zhejiang 310013, China;

4. Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

**Abstract:** In order to accurately evaluate the brittleness of lacustrine shale and explore its influencing factors, the mineral compositions, geochemical characteristics and reservoir spaces of the lacustrine shale samples from the second member of Paleogene Funing Formation in the Qutang Sub-Sag, Hai'an Sag, Subei Basin were analyzed by means of whole-rock diffraction analysis, the measurement of organic carbon content (TOC) and vitrinite reflectance, scanning electron microscope (SEM) and triaxial rock mechanics experiment, combining with well logging, strength parameters, mineral compositions and stress-strain curves. The shale is mainly dolomitic and calcite ones with a high content of brittle minerals. The average TOC value is 1.25%, indicating for a mature stage. The reservoir space is composed of ultra-low pores and fractures. The stress-strain curves show a strong characteristic of brittleness. The brittleness evaluation results of different methods have certain differences. The results based on elastic parameters and mineral components are more reliable than that based on strength parameters although each method has its own limitations. The mineral compositions, organic matter abundance, and the degree of storage space development affect the brittleness of shale in the second member of Funing Formation. With the increasing of dolomite content, organic maturity and fracture development, the brittleness of the reservoir increases. The increase in calcite content, organic matter abundance and porosity will weaken the brittleness of the reservoir.

收稿日期: 2020-10-28; 修订日期: 2021-10-14。

作者简介: 孙彪(1995—), 男, 博士研究生, 从事非常规油气地质研究。E-mail: 719997758@qq.com。

通信作者: 刘小平(1971—), 男, 博士, 教授, 从事石油地质教学研究。E-mail: liuxiaoping@cup.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072150, 41372144)和国家科技重大专项(2017ZX05049001-008)资助。

**Key words:** brittleness evaluation; lacustrine shale; Funing Formation; Paleogene; Hai'an Sag; Subei Basin

页岩油是非常规油气中重要的组成部分,我国页岩油技术可采资源量丰富<sup>[1]</sup>。我国陆相页岩油主要赋存在湖相层系,而湖相页岩层系沉积构造较复杂,非均质性强,埋藏深,面积小,这对研究湖相泥页岩脆性提出了挑战。脆性较高的岩石在有效压裂后可以形成规模较大的缝网系统,进而可提高页岩油的产量。不同学者根据不同的需要提出了不同的脆性含义以及评价方法<sup>[2-8]</sup>。如通过确定岩石中脆性矿物及塑性矿物提出的矿物组分析法<sup>[9]</sup>;利用室内岩石力学实验应力—应变曲线中获得的弹性参数及其他特征参数提出的弹性参数法<sup>[10-12]</sup>和全应力—应变曲线特征参数法<sup>[13-14]</sup>;利用硬度或强度测试得到的硬度、强度参数提出的硬度法<sup>[15-16]</sup>、强度法<sup>[17-18]</sup>等方法。湖相页岩脆性是矿物成分、有机质、储集空间发育程度共同作用的结果,是评价可压裂性的重要指标。本文在调研国

内外研究成果的基础上,以苏北盆地海安凹陷曲塘次凹古近系阜宁组二段湖相泥页岩为例,采用不同方法对湖相泥页岩的脆性进行评价,全面探究泥页岩脆性的影响因素,以期对湖相页岩油藏的成功改造及高效开发提供参考。

### 1 地质背景

苏北盆地是中国东南部最大的中生代盆地<sup>[19]</sup>,海安凹陷位于苏北盆地东台坳陷的东南部,总体表现为“七次凹夹一隆”的构造格局(图1a),其内部的曲塘次凹和海北次凹为油气勘探主体区(图1b)。本文的研究区为曲塘次凹,位于海安—姜堰境内,是晚白垩世以来形成的箕状断陷。其北接泰州低凸起,东邻海北次凹,南邻通扬隆起,自北向南发育北部断阶带、中部深凹带、东部斜坡带和南部斜坡带,具有“北断南

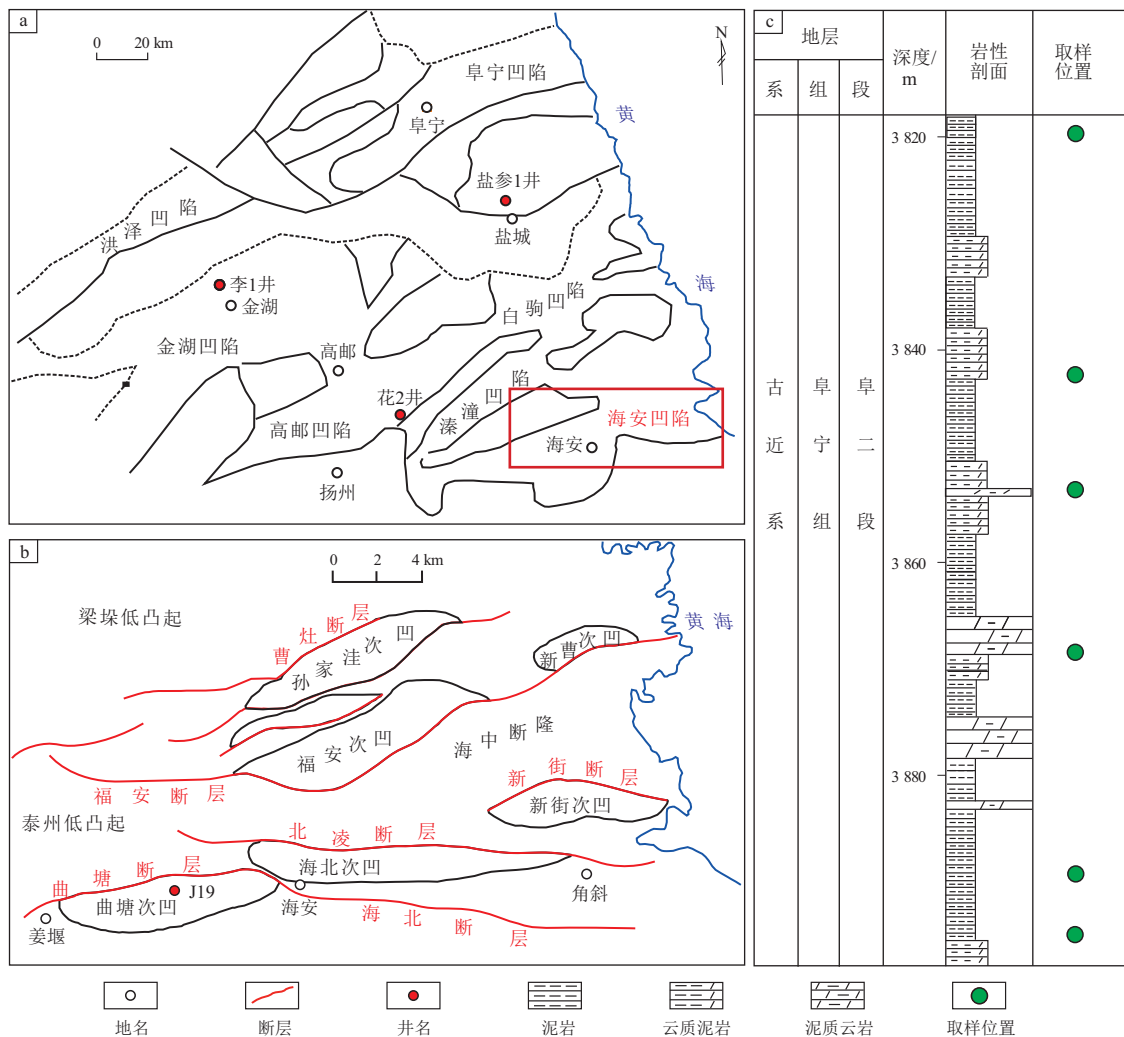


图1 苏北盆地构造单元划分(a)、曲塘次凹位置(b)及J19井取样位置(c)

Fig.1 Tectonic division of Subei Basin (a), location of Qutang Sub-Sag (b) and samples' location in well J19 (c)

超、北陡南缓、北深南浅”等特征<sup>[20]</sup>；自上而下依次发育阜宁组一段、二段、三段、四段 4 个层段。阜二段( $E_1f^2$ )为一套湖相沉积,岩性以深灰色—黑色泥岩/页岩为主,夹泥灰岩、灰岩和白云岩,是研究区最重要的生油岩<sup>[21-23]</sup>。目前已在海安凹陷曲塘次凹阜宁组地层中获得油流,预示着盆地内存在巨大的油气勘探潜力<sup>[24]</sup>。

## 2 样品与方法

### 2.1 样品与实验

6 个样品采自海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜二段(图 1),全部样品均为深湖—半深湖相,岩性为云质泥页岩和灰质泥页岩。

实验室岩石力学特征测试是研究岩石力学性质最直接的方法。为了全面分析、精确刻画岩石脆性特征,对样品的物理性质、应力—应变特征进行了测试。岩石力学实验设备是从长春市朝阳试验仪器有限公司引进的岩石力学三轴应力测试系统,实验对圆柱形岩样的横向施加液体围压,然后逐渐增大轴向载荷,测出岩石破坏时的轴向应力,并绘出应力—应变关系曲线。样品为直径 25 mm 的圆柱形试样,基面偏差在 2.5% 范围内,岩样的长径比为 1.5。在三轴压缩试验中,测试温度为 20 ℃,围压为 40 MPa。此外,利用中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室设备对样品进行 X 射线衍射(XRD)、总有机碳(TOC)以及镜质体反射率( $R_o$ )测定以及扫描电镜实验,以探究湖相泥页岩样品脆性的影响因素。

### 2.2 脆性评价方法

#### 2.2.1 基于测井方法的岩石脆性评价

影响岩石脆性的 2 个弹性参数为杨氏模量和泊松比,其分为静态弹性参数与动态弹性参数,可利用阵列声波测井得到的速度信息计算动态弹性参数。

$$\nu = \frac{v_s^2 - 2v_p^2}{2(v_s^2 - v_p^2)} \quad (1)$$

$$E = \frac{\rho_b}{v_p^2} \frac{3v_s^2 - 4v_p^2}{v_s^2 - v_p^2} \times 10^6 \quad (2)$$

式中: $\nu$  为泊松比; $E$  为杨氏模量, GPa; $v_s$  为横波时差,  $\mu\text{s}/\text{m}$ ;  $v_p$  为纵波时差,  $\mu\text{s}/\text{m}$ ;  $\rho_b$  为体积密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

利用岩石三轴应力资料,根据 Rickman 方程<sup>[3]</sup>,将动态弹性参数转化为静态弹性参数,可以得到阜二段的静态弹性参数。总的来说,一个适用

于研究区湖相页岩的修正脆性指数模型如下:

$$BI_E = \frac{E - 25.374}{36.363 - 25.374} \quad (3)$$

$$BI_\nu = \frac{0.353 - \nu}{36.363 - 25.374} \quad (4)$$

$$BI_1 = \frac{BI_E + BI_\nu}{2} \quad (5)$$

式中: $BI_E$  为归一化的杨氏模量; $BI_\nu$  为归一化的泊松比; $BI_1$  为脆性指数。

#### 2.2.2 基于强度参数的岩石脆性评价

基于强度参数的脆性评价方法主要是利用抗压强度和抗拉强度的差异性来评价。20 世纪 80 年代, HUCKA 和 DAS<sup>[25]</sup> 认为抗压强度和抗拉强度的差异随着脆性的增加而增加,可利用二者或二者组合之间的比值关系来评价脆性,其计算模型如下:

$$BI_2 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (6)$$

式中: $\sigma_c$  为抗压强度; $\sigma_t$  为抗拉强度; $BI_2$  为脆性指数。

#### 2.2.3 基于矿物成分含量的岩石脆性评价

岩石的全岩矿物组分(质量分数)通过 XRD 方法测定,定量分析储层中脆性矿物与黏土矿物的相对含量<sup>[26]</sup>。页岩储层脆性矿物含量对压裂过程中裂缝的发育程度具有重要影响<sup>[27]</sup>。

其中,页岩储层中脆性矿物含量越高,越易在压裂时形成裂缝网络。WANG 和 GALE<sup>[28]</sup> 通过分析北美地区页岩气储层及其开采情况,在考虑其他脆性矿物(如脆性白云岩)和塑性矿物(如塑性石灰岩)以及总有机物含量(TOC)之后,提出了新的岩石脆性指数计算公式。根据研究区泥页岩的矿物组成,采用以下脆性矿物含量评价模型:

$$BI_3 = \frac{\omega(\text{Si}) + \omega(\text{Car})}{\omega(\text{Si}) + \omega(\text{Car}) + \omega(\text{Clay})} \quad (7)$$

式中: $\omega(\text{Si})$  为长英质矿物的含量; $\omega(\text{Car})$  为碳酸盐质矿物的含量; $\omega(\text{Clay})$  为黏土矿物的含量; $BI_3$  为脆性指数。

#### 2.2.4 基于应力—应变曲线的岩石脆性评价

BISHOP<sup>[15]</sup> 提出岩石峰值强度与残余强度参数组合关系的脆性指数计算方法; HUCKA 和 DAS<sup>[25]</sup> 则利用可恢复应变以及可恢复应变能等多种岩石力学参数,分别提出脆性指数的计算方法;

ANDREEV<sup>[13]</sup>提出利用岩石破坏时轴向应变来计算其脆性指数。21世纪以来,也有学者不断提出脆性评价方法,TARASOV和POTVIN<sup>[11]</sup>认为脆性大小主要取决于弹性模量与峰后模量,其评价模型如下:

$$K = \frac{M - E_x}{M} \quad (8)$$

式中: $K$ 为脆性评价指标; $M$ 为弹性模量; $E_x$ 为峰后模量。根据前人经验表明, $K$ 值越小,岩石脆性越大。

### 3 泥页岩特征与脆性指数

#### 3.1 岩石矿物成分特征

海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜二段泥页岩样品矿物组分以石英、长石、黏土、方解石、白云石为主,样品黏土含量高,主体矿物占比近似一致,上下岩性差异小,主要发育云质泥页岩和灰质泥页岩,脆性矿物含量均大于 50%(表 1)。

#### 3.2 地球化学与储层特征

研究区阜二段泥页岩样品 TOC 值为 0.53%~2.29%,平均值为 1.25%,有机质丰度较高;有机质成熟度( $R_o$ )为 0.88%~1.21%,平均值为 1.06%,已达到成熟阶段(表 2)。

样品孔隙度为 1.07%~3.36%,平均值为 2.12%(表 2),表明阜二段泥页岩整体致密,具有特低孔

特征。由扫描电镜结果(图 2)可见,研究区阜二段泥页岩裂缝较发育,主要发育收缩缝、差异压实缝、微裂缝等多种裂缝。

#### 3.3 脆性特征

6个样品基于三轴应力实验的结果见表 3;不同类型页岩在 40 MPa 围压下的应力应变曲线见图 3。可以看出,在相同的加载条件下,页岩样品变形特征、力学参数存在明显差异。页岩样品全应力应变曲线形态主要体现为弹—塑性变形类型,实验样品的破坏模式均为剪切破坏模式(图 4)。样品表现为弹—塑性变形,变形曲线由近似直线的弹性变形阶段和破坏前小的塑性变形阶段组成(图 3),部分样品在破坏后仍具有一定的残余强度;4号样品表现为弹性变形较强、曲线呈近似直线,岩石变形主要为弹性变形,较其他样品弹性较好。

#### 3.4 不同方法脆性评价结果

利用上述 4 种方法对岩石样品脆性进行评价,计算出阜二段页岩样品脆性指数和评价指标(表 4)。 $BI_1$ 、 $BI_2$ 、 $BI_3$ 分别为利用测井方法、强度参数、矿物组分含量计算得到的脆性指数; $K$ 值为应力—应变曲线测试得到的脆性评价指标。

## 4 讨论

#### 4.1 四种脆性评价方法对比

本文分别采用四种方法对湖相泥页岩脆性进

表 1 苏北盆地海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜宁组二段泥页岩样品矿物组成

Table 1 Mineral components of shale samples from second member of Funing Formation, well J19, Qutang Sub-Sag, Haian Sag, Subei Basin

样品编号	深度/m	岩性	黏土矿物/%	石英/%	钾长石/%	斜长石/%	方解石/%	白云石/%	铁白云石/%	脆性矿物/%
1	3 819.66	含灰泥页岩	40	28	1	6	20	0	0	55
2	3 842.32	灰质泥页岩	36	4	1	7	28	0	1	61
3	3 853.15	含灰质泥页岩	40	13	1	7	14	4	17	56
4	3 868.45	含云泥页岩	39	18	4	9	5	2	12	50
5	3 889.32	泥质云岩	17	12	2	10	5	8	35	72
6	3 895.00	云质泥页岩	28	13	1	9	9	2	21	55

表 2 苏北盆地海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜宁组二段泥页岩地化和储层特征

Table 2 Geochemical characteristics of shale and reservoir features in second member of Funing Formation, well J19, Qutang Sub-Sag, Haian Sag, Subei Basin

样品编号	深度/m	岩性	$\omega(\text{TOC})/\%$	$R_o/\%$	孔隙度/%
1	3 819.66	含灰泥页岩	2.25	1.10	3.36
2	3 842.32	灰质泥页岩	2.29	0.88	
3	3 853.15	含灰质泥页岩	0.84	1.06	1.47
4	3 868.45	含云泥页岩	0.73	1.09	2.57
5	3 889.32	泥质云岩	0.53	1.21	1.07
6	3 895.00	云质泥页岩	0.83	1.01	



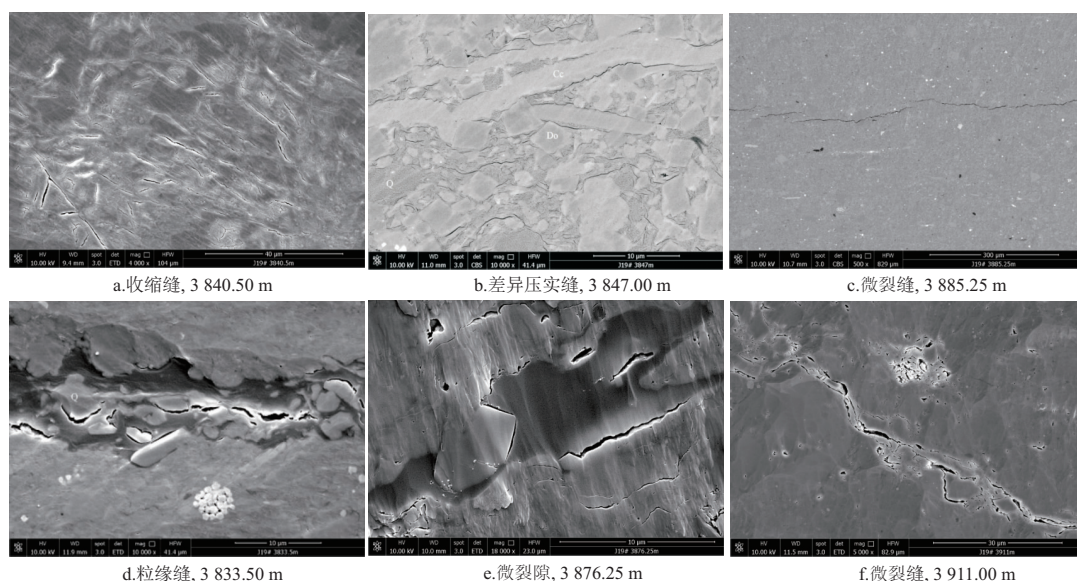


图 2 苏北盆地海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜宁组二段泥页岩扫描电子显微镜照片

Fig.2 SEM images of shale samples from second member of Funing Formation, well J19, Qutang Sub-Sag, Haian Sag, Subei Basin

表 3 苏北盆地海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜宁组二段泥页岩样品脆性特征  
Table 3 Brittleness characteristics of shale samples from second member of Funing Formation, well J19, Qutang Sub-Sag, Haian Sag, Subei Basin

编号	深度/ m	岩性	直径/ mm	长度/ mm	抗压强度/ MPa	杨氏模量/ GPa	泊松比	弹性模量 $M$ / GPa	峰后模量 $E_x$ / GPa
1	3 819.66	含灰泥页岩	24.4	49.7	274.76	26.86	0.31	0.24	-0.46
2	3 842.32	灰质泥页岩	24.5	49.5	288.64	30.61	0.35	0.27	-1.38
3	3 853.15	含灰质泥页岩	24.5	32.2	216.89	25.37	0.30	0.24	-0.23
4	3 868.45	含云泥页岩	24.6	46.4	354.77	36.36	0.30	0.33	-0.35
5	3 889.32	泥质云岩	24.4	36.8	315.44	30.33	0.22	0.25	-0.06
6	3 895.00	云质泥页岩	24.4	53.4	259.91	31.34	0.27	0.21	-0.46

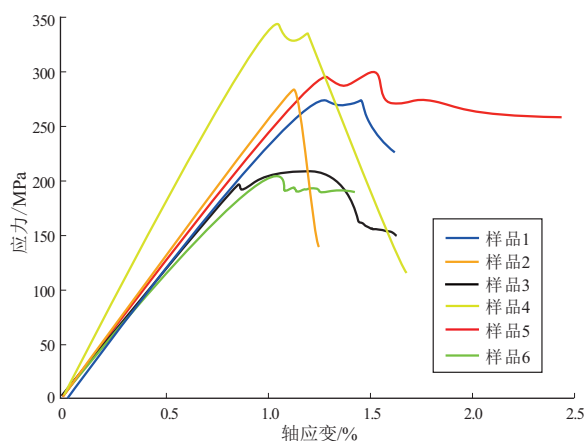


图 3 苏北盆地海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜宁组二段泥页岩样品应力—应变曲线  
围压 40 MPa。

Fig.3 Stress-strain curves of shale samples from second member of Funing Formation, well J19, Qutang Sub-Sag, Haian Sag, Subei Basin

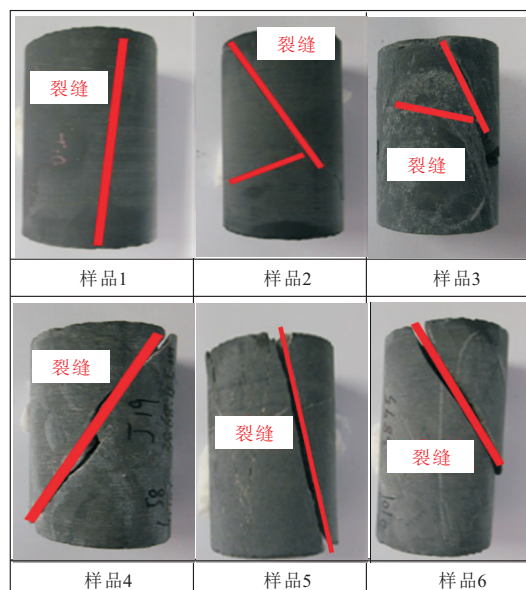


图 4 苏北盆地海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜宁组二段泥页岩样品三轴压缩试验后的破裂形态

Fig.4 Rupture geometry after triaxial compression of shale samples from second member of Funing Formation, well J19, Qutang Sub-Sag, Haian Sag, Subei Basin

行评价。通过分析本次实验结果发现,三种方法计算的脆性指数( $BI_1$ 、 $BI_2$ 、 $BI_3$ )与实验结果计算的脆

表 4 苏北盆地海安凹陷曲塘次凹 J19 井  
阜二段泥页岩样品不同方法脆性指数评价

Table 4 Brittleness index of shale samples by different methods, second member of Funing Formation, well J19, Qutang Sub-Sag, Haian Sag, Subei Basin

编号	深度/m	岩性	BI <sub>1</sub>	BI <sub>2</sub>	BI <sub>3</sub>	K
1	3 819.66	含灰泥页岩	22.94	68.69	55.00	2.91
2	3 842.32	灰质泥页岩	23.82	72.16	61.00	6.07
3	3 853.15	含灰质泥页岩	20.96	54.22	56.00	1.97
4	3 868.45	含云泥页岩	71.32	88.69	50.00	2.06
5	3 889.32	泥质云岩	72.55	78.86	72.00	1.26
6	3 895.00	云质泥页岩	56.19	64.98	55.00	3.20

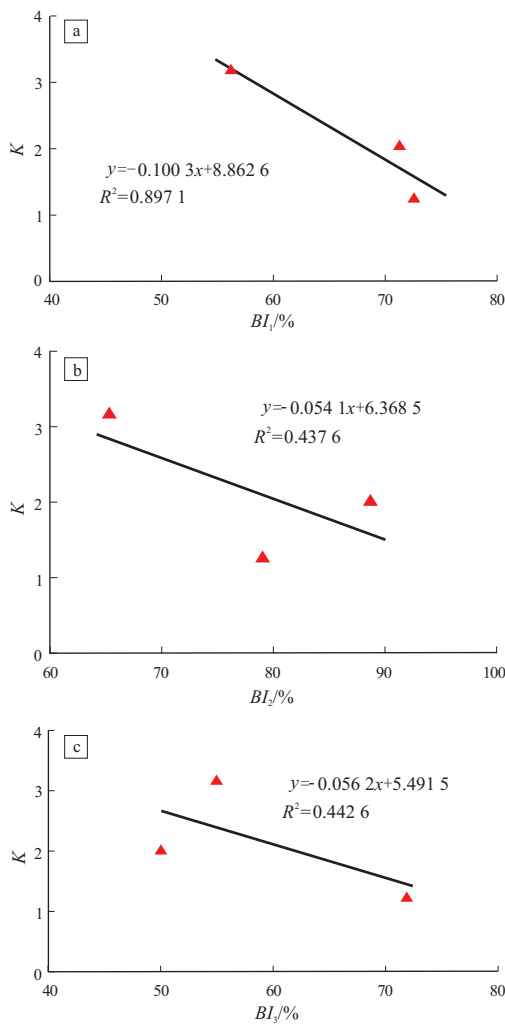


图 5 苏北盆地海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜二段云质泥页岩 K 值与脆性指数的关系

Fig.5 Correlations between K values and brittleness index of dolomitic shale samples from second member of Funing Formation, well J19, Qutang Sub-Sag, Haian Sag, Subei Basin

性评价指标(K)具有良好的相关性(图 5,图 6),但也存在一定差异,原因如下:

(1)基于矿物成分含量的脆性评价存在差异主要由两方面原因造成。一方面是其方法依赖岩石中脆性矿物含量,但在不同地区不同矿物组分对

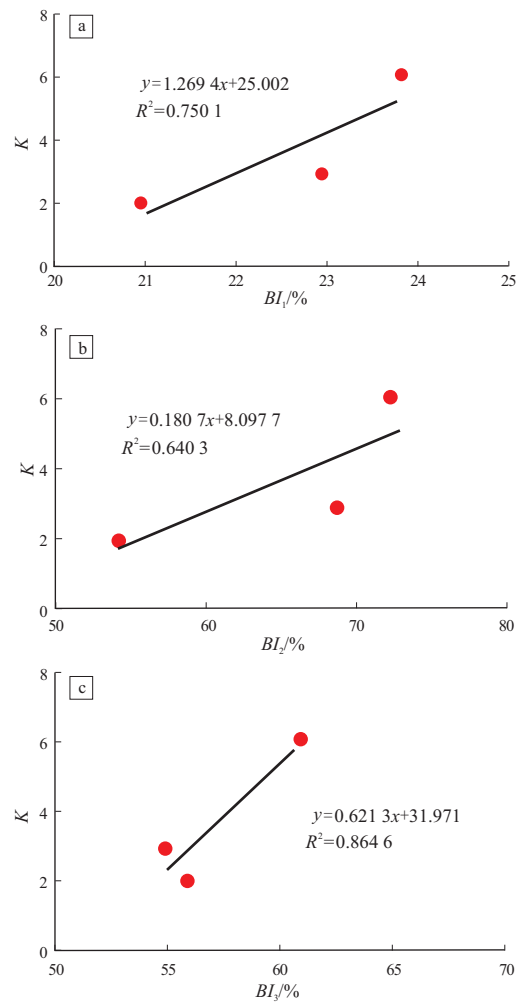


图 6 苏北盆地海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜二段灰质泥页岩 K 值与脆性指数的关系

Fig.6 Correlations between K values and brittleness index of limy shale samples from second member of Funing Formation, well J19, Qutang Sub-Sag, Haian Sag, Subei Basin

岩石脆性影响程度是不同的。如四川龙马溪组下部沉积了硅质页岩,硅质成为主要脆性矿物<sup>[29]</sup>,值得注意的是,黄铁矿的存在也有可能对岩石脆性产生影响<sup>[30-31]</sup>。另一方面是该方法考虑因素较单一,仅仅考虑矿物组分含量,而忽略了成岩作用、胶结作用以及围压等的影响。

(2)基于弹性参数的脆性评价也存在一定缺陷。首先,利用弹性参数计算脆性指数公式具有较强的地区适用性,计算公式主要根据不同地区岩石样品研究得来,普适性较差;其次,利用公式(4)计算过程中杨氏模量与泊松比对脆性指数影响程度相同,这种认识并没有理论依据<sup>[32]</sup>;再次,在利用纵横波时差计算动态弹性参数时,声波时差易受到 TOC 的影响而改变;最后,静态弹性参数是由室内实验测得,其脆性特征容易受围压、温度等因素影响。

(3) 基于强度参数的脆性评价其效果相对上两种方法较差。由于利用三轴应力—应变实验得到的参数,强度计算的脆性参数是岩石破裂的临界值,而脆性是整个破裂过程中的性质,不能仅仅考虑应变曲线前的力学参数或峰后情况。

## 4.2 脆性影响因素

### 4.2.1 矿物成分

通过研究岩层的矿物成分类型及含量,可以判断脆性大小。分析发现白云石、方解石的含量对脆性指数的影响不同。白云石含量与  $K$  值成反比(图 7a),即与其表示的脆性成正相关关系,是由于当白云石含量增加时,白云石含量占主导地位,其对岩石脆性的影响越来越大,在该阶段,云质泥岩的脆性指数与  $K$  值所表现的脆性成正比;而灰质含量与  $K$  值成正比(图 7b),即与其表示的脆性成负相关关系,是由于灰质泥岩中随着方解石含量的增加,杨氏模量减少,泊松比增加,其脆性越来越弱。

### 4.2.2 有机质丰度

一般来说,泥页岩储层中有机质含量越高, $K$  值越大,岩石的脆性越低(图 8a)。因为有机质丰度与泥质含量有关,而泥质含量影响脆性。以干酪根为主的有机质,随着成熟度的升高,脆性增加(图 8b)。由于碳氢比升高,使得干酪根逐渐以芳

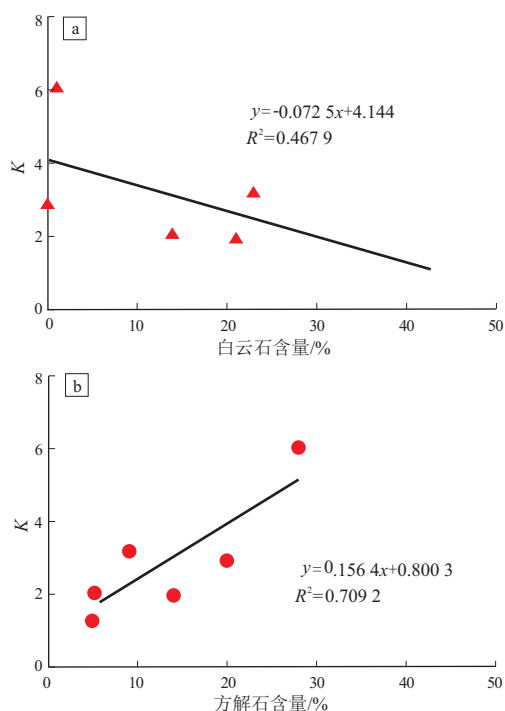


图 7 苏北盆地海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜二段泥页岩  $K$  与矿物组分含量的关系

Fig.7 Correlations between  $K$  values and mineral compositions of shale samples from second member of Funing Formation, well J19, Qutang Sub-Sag, Haian Sag, Subei Basin

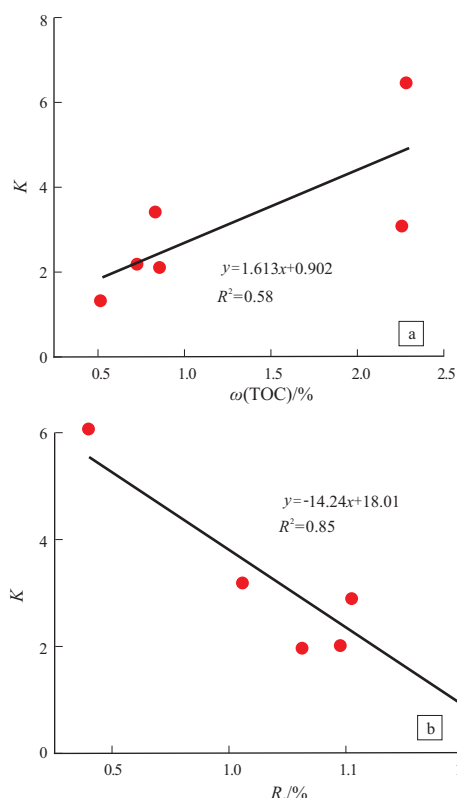


图 8 苏北盆地海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜二段泥页岩样品脆性与 TOC 和  $R_o$  的相关性

Fig.8 Correlations between  $K$  values and TOC and  $R_o$  of shale samples from second member of Funing Formation, well J19, Qutang Sub-Sag, Haian Sag, Subei Basin

烃化合物为主,芳烃化合物内部结构重新排列,稳定性增强,从而脆性增加。

### 4.2.3 储集空间发育程度

湖相泥页岩层系发育多种孔缝类型,当泥页岩受到地应力加载后,造成孔缝末段应力集中,从而诱导产生张性裂缝,造成岩石脆性发生改变。孔隙度对岩石应力—应变关系具有重大影响,随着孔隙度的增加, $K$  值变大,岩石的弹性模量降低, $K$  值变大造成岩石脆性逐渐下降(图 9)。研究区发育多种类型裂缝,天然裂缝的存在会与水力压裂缝相互作用,造成逐级裂缝交会贯穿,共同形成多级裂缝网格系统。

## 5 结论

(1) 通过以应力—应变曲线实验得到的  $K$  值,对利用弹性参数、强度参数、矿物组分含量计算得到的脆性指数  $BI_1$ 、 $BI_2$ 、 $BI_3$  进行标定,发现基于弹性参数和矿物组分含量评价脆性比基于强度参数评价脆性的应用效果更佳,但每种方法都存在一定的局限性。

(2) 云质泥岩与灰质泥岩脆性评价的应用效

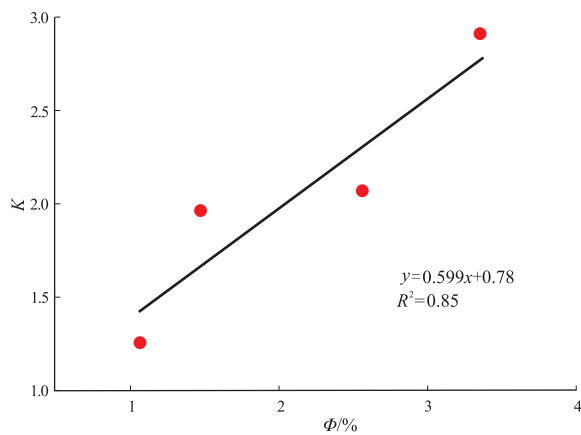


图9 苏北盆地海安凹陷曲塘次凹 J19 井阜二段泥页岩样品脆性与孔隙度的关系

Fig.9 Correlations between brittleness and porosity of shale samples from second member of Funing Formation, well J19, Qutang Sub-Sag, Hai'an Sag, Subei Basin

果不同,云质泥岩的三种方法计算的脆性指数与  $K$  值成反比,即与其表示的脆性成正相关关系,而灰质泥岩则成负相关关系。

(3)页岩脆性主要受矿物组分、有机质储集空间发育程度影响。白云石含量、有机质成熟度、裂缝发育程度与脆性呈正相关关系;方解石含量、有机质丰度、孔隙度与脆性呈负相关关系。

#### 参考文献:

- [1] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望:以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2012,33(2):173-187.  
ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [2] 袁俊亮,邓金根,张定宇,等.页岩气储层可压裂性评价技术[J].石油学报,2013,34(3):523-527.  
YUAN Junliang, DENG Jin'gen, ZHANG Dingyu, et al. Fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(3): 523-527.
- [3] RICKMAN R, MULLEN M J, PETRE J E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett shale[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: SPE, 2008.
- [4] SONDERGELD C H, NEWSHAM K E, COMISKY J T, et al. Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources[C]//SPE Unconventional Gas Conference. Pittsburgh, Pennsylvania: SPE, 2010.
- [5] GUO Zhiqi, LI Xiangyang, LIU Cai, et al. A shale rock physics model for analysis of brittleness index, mineralogy and porosity in the Barnett shale[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2013, 10(2): 2-9.

- [6] 刁海燕.泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J].岩石学报,2013,29(9):3300-3306.  
DIAO Haiyan. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoir[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9): 3300-3306.
- [7] 李庆辉,陈勉,金衍,等.页岩脆性的室内评价方法及改进[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1680-1685.  
LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1680-1685.
- [8] 张矿生,刘顺,蒋建方,等.长7致密油藏脆性指数计算方法及现场应用[J].油气井测试,2014,23(5):29-32.  
ZHANG Kuangsheng, LIU Shun, JIANG Jianfang, et al. Calculation method about brittleness index in Chang 7 dense reservoir and its field application[J]. Well Testing, 2014, 23(5): 29-32.
- [9] 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.
- [10] LUAN Xinyuan, DI Bangrang, WEI Jianxin, et al. Laboratory measurements of brittleness anisotropy in synthetic shale with different cementation[M]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014. Denver: SEG, 2014: 3005-3009.
- [11] TARASOV B, POTVIN Y. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 59: 57-69.
- [12] 陈吉,肖贤明.南方古生界3套富有机质页岩矿物组成与脆性分析[J].煤炭学报,2013,38(5):822-826.  
CHEN Ji, XIAO Xianming. Mineral composition and brittleness of three sets of Paleozoic organic-rich shales in China South area[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 822-826.
- [13] ANDREEV G E. Brittle failure of rock materials[M]. Rotterdam: A.A. Balkema, 1995.
- [14] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(1): 35-48.
- [15] BISHOP A W. Progressive failure with special reference to the mechanism causing it[C]//Proceedings of the Geotechnical Conference. Oslo, Norw. Geotech. Inst., 1967: 142-150.
- [16] ALTINDAG R. Correlation of specific energy with rock brittleness concepts on rock cutting[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 103(3): 163-171.
- [17] LAWN B R, MARSHALL D B. Hardness, toughness, and brittleness: an indentation analysis[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1979, 62(7/8): 347-350.
- [18] HONDA H, SANADA Y. Hardness of coal[J]. Fuel, 1956, 35(4): 451-461.
- [19] CHENG Qingsong, ZHANG Min, LI Hongbo. Anomalous distribution of steranes in deep lacustrine facies low maturity-maturity source rocks and oil of Funing Formation in Subei Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 181: 106190.
- [20] 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 Tingshan, PENG Zhi, ZHU Haihua, et al. Forming conditions and exploration potential of shale oil from member 2 of Funing Formation in Qutang Subbasin, Hai'an Sag [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(2): 177-184.
- [21] 段宏亮, 刘世丽, 付茜. 苏北盆地古近系阜宁组二段富有机质页岩特征与沉积环境 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 612-617.
- DUAN Hongliang, LIU Shili, FU Qian. Characteristics and sedimentary environment of organic-rich shale in the second member of Paleogene Funing Formation, Subei Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 612-617.
- [22] 李旭, 徐蒙, 蔡进功, 等. 东营凹陷泥页岩孔隙结构特征及其演化规律 [J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 88-100.
- LI Xu, XU Meng, CAI Jingong, et al. Structure characteristics and evolution characteristics of pores in mud shale in Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 88-100.
- [23] 付茜, 刘启东, 刘世丽, 等. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组二段页岩油成藏条件分析 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 625-631.
- FU Qian, LIU Qidong, LIU Shili, et al. Shale oil accumulation conditions in the second member of Paleogene Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 625-631.
- [24] 柳雪青, 胡维强, 刘玉明, 等. 海安凹陷曲塘次凹阜宁组页岩油油源分析 [J]. 非常规油气, 2018, 5(6): 38-41.
- LIU Xueqing, HU Weiqiang, LIU Yuming, et al. Analysis of shale oil sources of Funing Formation in Qutang Subbasin, Hai'an Sag [J]. Unconventional Oil & Gas, 2018, 5(6): 38-41.
- [25] HUCKA V, DAS B. Brittleness determination of rocks by different methods [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1974, 11(10): 389-392.
- [26] 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 Jin, WANG Guiwen, FAN Zhuoying, 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.
- [27] ROSS D J K, BUSTIN R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 916-927.
- [28] WANG F P, GALE J F W. Screening criteria for shale-gas systems [J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 2009, 59: 779-793.
- [29] 赵迪斐, 郭英海, 陈蕾, 等. 页岩储层脆性特征及其影响因素探讨 [J]. 非常规油气, 2016, 3(6): 6-11.
- ZHAO Difei, GUO Yinghai, CHEN Lei, et al. Discussion on brittleness characteristics and influencing factors of shale gas reservoirs [J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 3(6): 6-11.
- [30] 王乔, 李虎, 刘廷, 等. 页岩脆性的表征方法及主控因素 [J]. 断块油气田, 2020, 27(4): 458-463.
- WANG Qiao, LI Hu, LIU Ting, et al. Characterization method and main controlling factors of shale brittleness [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(4): 458-463.
- [31] 赖富强, 冷寒冰, 龚大建, 等. 综合矿物组分和弹性力学参数的页岩脆性评价方法 [J]. 断块油气田, 2019, 26(2): 168-171.
- WLAI Fuqiang, LENG Hanbing, GONG Dajian, et al. Evaluation of shale brittleness based on mineral compositions and elastic mechanics parameters [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(2): 168-171.
- [32] 于庭, 巴晶, 钱卫, 等. 非常规油气储层脆性评价方法研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2019, 34(1): 236-243.
- YU Ting, BA Jing, QIAN Wei, et al. Research progress on evaluation methods of rock brittleness in unconventional oil/gas reservoirs [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1): 236-243.

(编辑 徐文明)

~~~~~

(上接第 995 页)

- [13] 曹烈, 安凤山, 王信. 川西拗陷须家河组气藏与古构造关系 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 224-229.
- CAO Lie, AN Fengshan, WANG Xin. Relationship between palaeo-structure and gas reservoirs in Xujiahe Formation in Western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 224-229.
- [14] 袁晓宇, 胡焯, 刘光祥, 等. 川西拗陷印支期古隆起成因初探 [J]. 海相油气地质, 2020, 25(1): 63-69.
- YUAN Xiaoyu, HU Ye, LIU Guangxiang, et al. A preliminary research on the genesis of Indosinian palaeo-uplift in the Western Sichuan Depression [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(1): 63-69.
- [15] 胡焯, 袁晓宇, 王彦青, 等. 四川盆地川西拗陷印支早期古隆起发育特征及控油气作用 [J]. 石油实验地质, 2018, 40(5): 650-654.
- HU Ye, YUAN Xiaoyu, WANG Yanqing, et al. Developmental characteristics and oil control of Indosinian paleo-uplifts in West Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(5): 650-654.
- [16] 梁世友, 陈迎宾, 赵国伟, 等. 四川盆地川西拗陷雷口坡组四段稀土元素地球化学特征及意义 [J]. 石油实验地质, 2017, 39(1): 94-98.
- LIANG Shiyu, CHEN Yingbin, ZHAO Guowei, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements and their geological significance in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(1): 94-98.
- [17] 许国明, 宋晓波, 冯霞, 等. 川西地区中三叠统雷口坡组天然气勘探潜力 [J]. 天然气工业, 2013, 33(8): 8-14.
- XU Guoming, SONG Xiaobo, FENG Xia, et al. Gas potential of the Middle Triassic Leikoupo Fm in the western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8): 8-14.

(编辑 徐文明)