

基于多源数据统计分析的页岩脆性定量评价方法

——以鄂西地区牛蹄塘组页岩为例

李娟^{1,2}, 王胜建¹, 田玉昆³, 周惠¹, 刘策⁴, 薛宗安¹

(1.中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2.中国地质大学(北京), 北京 100083; 3.中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055; 4.中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:【研究目的】页岩储层的脆性是反映页岩气储集层压裂品质的参数之一, 对压裂难易程度和压裂缝网形态有着重要的影响。【研究方法】对鄂西黄陵背斜南翼五口钻井进行了系统采样和全岩矿物及黏土含量测试、主微量元素含量测试、声学力学联测实验等分析测试, 利用聚类分析和主成分分析法对页岩脆性进行了定量评价。【研究结果】矿物与岩石脆性密切相关, 利用聚类分析方法可以定量表征页岩中有效脆性矿物成分和非有效脆性矿物成分; 利用主成分分析法建立了基于岩石力学、矿物组分和元素成分的脆性指数综合定量评价公式, 形成鄂西地区牛蹄塘组页岩层段的脆性指数剖面。【结论】微地震监测及压裂施工结果显示, 新建立的脆性指数剖面能准确指示页岩的高脆性层段, 与压裂结果吻合较好。

关键词: 页岩气; 页岩脆性; 矿物组分; 力学参数; 元素; 统计分析; 牛蹄塘组; 油气地质调查工程; 鄂西地区

创新点: 克服单一方法的局限性, 利用多种地质因素数学模型建立脆性指数模型; 对页岩脆性进行定量评价并在实践中检验。

Quantitative evaluation of shale brittleness based on statistics: Taking shale of Niutitang Formation in western Hubei as an example

LI Juan^{1,2}, WANG Shengjian¹, TIAN Yukun³, ZHOU Hui¹, LIU Ce⁴, XUE Zongan¹

(1. Oil & Gas, Survey, CGS, Beijing 100083, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083, China; 3. Command Center of Natural Resources Comprehensive Survey, CGS, Beijing 100055, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper is the result of the geothermal geological survey engineering.

[Objective] The brittleness of shale reservoir is one of the parameters reflecting the fracturing quality of shale gas reservoir, which has an important influence on the degree of difficulty of fracturing and the shape of fracture network. **[Methods]** In order to accurately evaluate the brittleness characteristics of Niutitang Formation shale reservoir in Western Hubei, systematic sampling, whole rock mineral and clay content test, main and trace element content test, acoustic mechanics joint test and other analytical tests were carried out on five wells in the south wing of Huangling anticline in Western Hubei. The quantitative evaluation of shale brittleness was carried out by cluster analysis and principal component analysis. **[Results]** There is a close relationship between minerals and rock brittleness, and the cluster analysis method can quantitatively characterize the effective brittle mineral composition and non-effective brittle mineral composition in shale; The comprehensive quantitative evaluation formula of

收稿日期: 2021-02-06; 改回日期: 2021-06-01

基金项目: 国家重大专项(2016ZX05034)和国家重点研发计划(2016YFC060110305)联合资助

作者简介: 李娟, 女, 1990年生, 博士生, 工程师, 主要从事沉积学和页岩气甜点评价等方面的研究; E-mail: rosejuanli@126.com。

通讯作者: 王胜, 男, 高级工程师, 主要从事储层测井评价和沉积学研究; E-mail: wshj0908@163.com。

brittleness index based on rock mechanics, mineral composition and element composition is established by using principal component analysis method, which forms the brittleness index profile of Niutitang Formation shale section in Western Hubei. **[Conclusions]**The results of microseismic monitoring and fracturing show that the newly established brittle index profile can accurately indicate the high brittle layer of shale, and the fracturing effect is good.

Key words: shale gas; shale brittleness; mineral composition; mechanical parameters; elements; statistical analysis; Niutitang Formation; oil-gas geological survey engineering; western Hubei Province

Highlights: Overcoming the limitation of a single method, a brittleness index model is established by using a variety of geological factor mathematical models; The shale brittleness is quantitatively evaluated and tested in practice.

About the first author: LI Juan, female, born in 1990, in-service doctor, engineer, mainly engaged in the study of sedimentary and shale gas dessert evaluation, E-mail: rosejuanli@126.com.

About the corresponding author: WANG Shengjian, male, senior engineer, mainly engaged in reservoir logging evaluation and sedimentary study, E-mail: wshj0908@163.com.

Fund support: Supported by the Projects of National Major Projects (No. 2016ZX05034) and National Key Research and Development (No. 2016YFC060110305)

1 引言

水平井钻井和压裂技术是页岩气开发的重要手段。页岩储层的脆性是反映页岩气储集层压裂品质的参数之一,对压裂的难易程度和压裂缝网的形态有着重要的影响(唐颖等, 2012; 孙建孟等, 2015; 王建波等, 2016; 崔文宝等, 2018)。通过调研前人研究结果可以看出,表征脆性指数的众多方法大致可以分为以下几类。一是利用岩石声学和力学参数(秦晓艳等, 2016; 丛平等, 2021)。应力加载至岩石发生破坏的整个过程中始终伴随着内部能量的平衡,实验过程随着能量的积累与释放,岩石内部出现裂缝的延伸和传播(Dashtian et al, 2011; JIN et al, 2014; Hui et al, 2018; Xinpeng et al, 2020)。如 Rickman 等(2008)认为岩石的脆性主要受杨氏模量、泊松比等影响,利用归一化数据提出了岩石弹性参数来进行储层脆性评价的方法;温韬等(2020)在综合考虑岩石峰前和峰后的能力演化特征后,建立了一种基于全应力应变曲线且可以反映岩石整个破坏过程的脆性指数评价方法。二是利用矿物成分,矿物是控制岩石裂缝形成和演化的重要内在因素,与岩石脆性关系密切(赖富强等, 2018)。但是对于如何定义脆性矿物,目前并没有统一的标准(王濡岳等, 2016; 何翔等, 2020; Arvie et al, 2007)。有些研究认为石英、长石、黄铁矿、碳酸盐矿物均可作为脆性矿物,有些则以其中一类或几类优选为脆性矿物。三是利用元素组分,元素含量主要是根据实验室主微量元素的测定或 X 射线元素录井获取,优选相关元素进行脆性评价(牛强等, 2014; 孙红华等, 2020)。

由于页岩的不均一性和复杂程度往往超乎预期,其脆性必然是由多种因素的共同作用,各类单一表征页岩脆性的方法都具有局限性,如何综合各类方法的优点并尽量克服其缺点,是本文的研究重点。本次研究的思路是利用多种地质因素数学模型和评价方法相结合来建立

脆性指数模型。克服单一方法的局限性，开发一种多因素有效的页岩脆性定量评价方法用以表征各个因素对页岩脆性的贡献率，并在实践中进行检验。

2.实验样品与分析方法

2.1 样品来源与区域概况

本次研究依托的样品主要来自鄂西地区黄陵隆起南部岩心样品。黄陵隆起位于宜昌地区西北部，大地构造位于扬子板块东缘，其南部主要为一缓倾单斜构造，地层产状较平缓，断裂相对不发育，属构造稳定区（Ge et al, 2020）。该区地层呈带状分布，出露相对齐全（王胜建等，2020）。其中下寒武统牛蹄塘组钻获暗色厚层泥页岩，取得页岩气工业流，实现重大调查发现（陈孝红等，2017；李浩涵等，2017；翟刚毅等，2017；翟刚毅等 2020）。本次选取的五口取样钻井分别是 YY1、YD1、ZD2、YC2 和 WD1 井（图 1）。

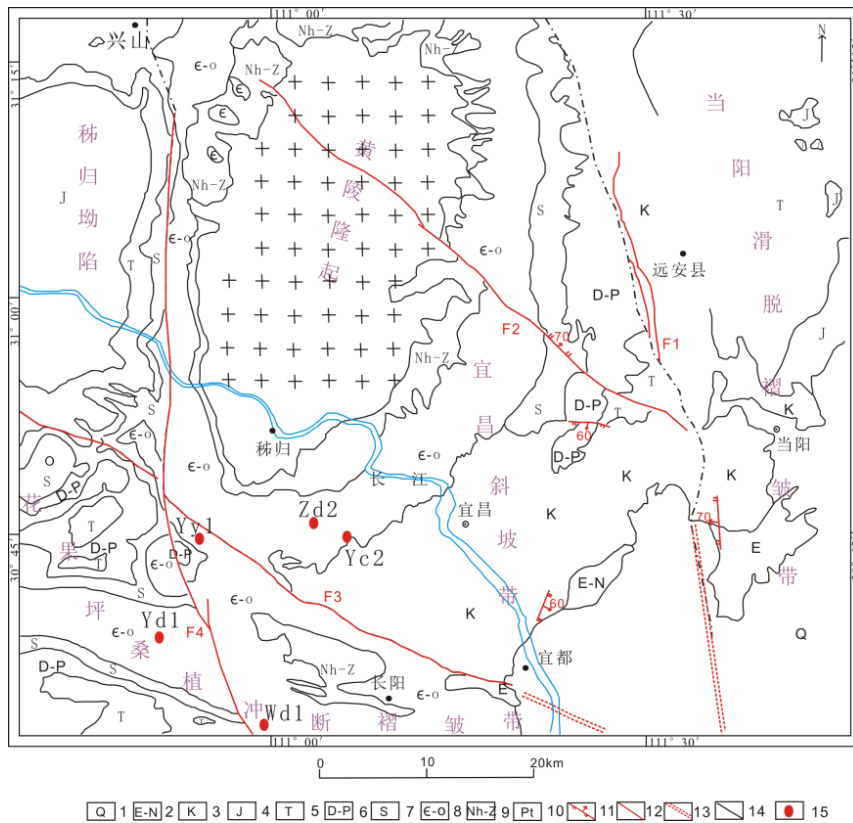


图 1 鄂西黄陵背斜周边地质略图（据陈孝红等（2018）修改）

1.第四系 2.古近系-新近系 3.白垩系 4.侏罗系 5.三叠系 6.泥盆系-二叠系;7.志留系 8.寒武系-奥陶系 9.南华系-震旦系 10.新元古代花岗岩 11.向斜轴线;12.正断层 13.性质不明断层 14.构造单元边界 15.取样钻井

Fig. 1 structural outline of Yichang area, Hubei province, China.(Revised by Chen Xiaohong et al. (2018))

1. Quaternary 2. Paleogene Neogene 3. Cretaceous 4. Jurassic 5. Triassic 6. Devonian –Permian 7. Silurian 8. Cambrian Ordovician 9. Nanhua Sinian 10. Neoproterozoic granite 11. Syncline axis 12. Normal fault 13. Unknown fault 14. Boundary of the tectonic unit 15 Sampled wells

2.2 分析方法

(1) 实验测试方法

针对牛蹄塘组页岩，主要进行了全岩矿物及黏土含量测试、岩心主微量元素含量测试、声学力学联测实验，其中前两项在中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心完成，后者在中国石油大学（华东）完成。

全岩矿物及黏土含量测量主要是根据 X 射线衍射图谱中特征峰强度与矿物含量的正相关关系来确定的。由于每一种矿物的晶体都具有特定的 X 射线衍射图谱，图谱中的特征峰强度与样品中该矿物的含量正相关，因此，采用实验的方式可以确定某种矿物的含量与其特征衍射峰的强度之间的正相关关系-K 值，进而通过测量未知样品中该矿物的特征峰的强度而求出该矿物的含量。

岩心主微量元素含量测量原理是用无水四硼酸锂熔融，以硝酸铵为氧化剂，加氟化锂和少量溴化锂作助熔剂和脱模剂，试料与熔剂的质量比为 1: 8，在熔样机上于 1150℃ 熔融，制成玻璃样片，在 X 射线荧光光谱仪上进行测量，根据荧光强度计算主、次成分的量。

声学力学联测实验使用的设备为 AutoLab1500 高温高压岩石物理综合测试系统，不同于其它设备岩心声学与力学性质分别测试，该设备能够模拟实际地层温度及压力条件下，同时测量岩心的力学与声学性质（即声力联测），避免了分别测量对岩心的影响。

(2) 数据处理方法

数据处理主要是利用 SPSS 软件进行聚类分析和主成分分析（何晓群等，2004；张文彤等，2013）。

聚类分析是一个在数据集中寻找相似元素集合的过程。聚类分析根据分类对象的不同，分为两种类型：R 型分类和 Q 型分类。R 型分类是对变量进行聚类处理，表现的是各个变量之间或者变量组合之间的远近关系，而 Q 型分类是对样本进行聚类处理，它可以利用多个变量的信息对样本聚类，分类结果也较为直观，聚类谱系图能够清楚的表达分类结果。最直观的方法是使用距离函数或相似性函数。

主成分分析，是利用降维的思想，在损失很少信息的前提下把多个指标转化为几个综合指标的多元统计方法。这样在研究复杂问题时就可以只考虑少数几个主成分而不至于损失太多信息，使问题简化，提高分析效率。

3 实验结果

3.1 岩性及矿物特征

为了统一各井段岩性，方便对比研究，本次选取各井段牛蹄塘组下部黑色泥岩、粉砂质泥岩、页岩层段样品。

样品矿物组成上主要为石英、黏土矿物、长石、碳酸盐岩矿物和黄铁矿。其中石英在五口井中均占优，平均含量在 40%~50%。其他矿物含量则各有不同，YY1 井中长石和碳酸盐岩矿物含量较多，平均约为 18%，WD1 井和 YC2 井中黏土矿物含量较多，均超过 28%（表 1）。

表 1 鄂西地区部分页岩样品矿物组分表

Table 1 Composition of mineral from the drilling wells in western Hubei

井名	矿物组分/%					采样深度/m	样品数量
	石英	长石	碳酸盐岩矿物	黄铁矿	黏土矿物		
YY1	$\frac{26\sim64}{45.38}$	$\frac{11\sim23}{17.62}$	$\frac{8\sim31}{18}$	$\frac{3\sim7}{4.9}$	$\frac{8\sim21}{13.92}$	2936~3064	13
YC2	$\frac{29.6\sim92.1}{43.22}$	$\frac{0\sim7.3}{4.17}$	$\frac{7.9\sim40}{16.33}$	$\frac{0\sim8.8}{6.0}$	$\frac{0\sim42.9}{28.31}$	2440~2490	10
YD1	$\frac{38.6\sim71.8}{49.71}$	$\frac{5.6\sim16}{8.49}$	$\frac{6.3\sim16}{10.18}$	$\frac{2.2\sim9.2}{5.99}$	$\frac{3.1\sim39.2}{25.07}$	1061~1182	9
ZD2	$\frac{29.3\sim90.6}{52.6}$	$\frac{0\sim13.3}{5.87}$	$\frac{2.2\sim22.9}{11.28}$	$\frac{0\sim7.6}{3.7}$	$\frac{2.9\sim50.4}{25.36}$	700~835	13
WD1	$\frac{36.4\sim90.9}{50.28}$	$\frac{0\sim9.9}{7.34}$	$\frac{0\sim16.5}{5.46}$	$\frac{0\sim5.5}{2.2}$	$\frac{2.9\sim48.9}{33.52}$	670~1315	25

注：表中矿物组分体积分数表示： $\frac{\text{最小值}\sim\text{最大值}}{\text{平均值}}$

3.2 元素特征

从岩心元素测量结果中选取脆性指数常用的五种元素，即硅、钙、镁、钾、铝。五口钻井中硅元素占主导，在 24%-29%之间，其含量与取样岩性一致；其余四种元素在各个钻井中含量均有一定的差异，如表 2 所示。

3.3 岩石声学-力学特征

地震岩石物理声学力学联合测制实验中每个样品完成 20 个温度压力点声学与力学测试，测试结果表明波形初至明显，波尾波形清晰(图 2)；静态杨氏模量及体积模量随压力及温度的升高而升高，温度超过 80℃，变化较大(图 3A 代表静态杨氏模量，图 3B 代表体积模量)。

表 2 鄂西地区部分页岩样品元素含量表

Table 2 Composition of elements from the drilling wells in western Hubei

井名	元素含量/%				
	Si	Ca	Mg	K	Al
YY1	$\frac{20.41\sim33.42}{28.12}$	$\frac{1.62\sim17.20}{4.79}$	$\frac{0.46\sim2.58}{1.07}$	$\frac{1.44\sim3.01}{2.09}$	$\frac{3.48\sim9.16}{5.74}$
YC2	$\frac{18.48\sim39.05}{24.48}$	$\frac{2.66\sim17.32}{8.89}$	$\frac{0.56\sim2.45}{1.8}$	$\frac{0\sim3.62}{2.48}$	$\frac{0.16\sim9.26}{6.98}$
YD1	$\frac{18.11\sim29.03}{24.58}$	$\frac{2.09\sim9.03}{4.34}$	$\frac{0.54\sim2.52}{1.51}$	$\frac{1.1\sim2.8}{2.06}$	$\frac{3.67\sim8.14}{6.37}$
ZD2	$\frac{21.17\sim36.67}{28.73}$	$\frac{1.21\sim14.83}{7}$	$\frac{0.51\sim2.32}{1.77}$	$\frac{1.12\sim3.22}{2.44}$	$\frac{2.05\sim9.83}{6.68}$
WD1	$\frac{3.99\sim33.92}{26.56}$	$\frac{0.26\sim25.47}{4.64}$	$\frac{0.42\sim10.46}{2.09}$	$\frac{0.15\sim3.5}{1.97}$	$\frac{1.02\sim11.26}{7.22}$

注：采样深度和样品数量见表 1。

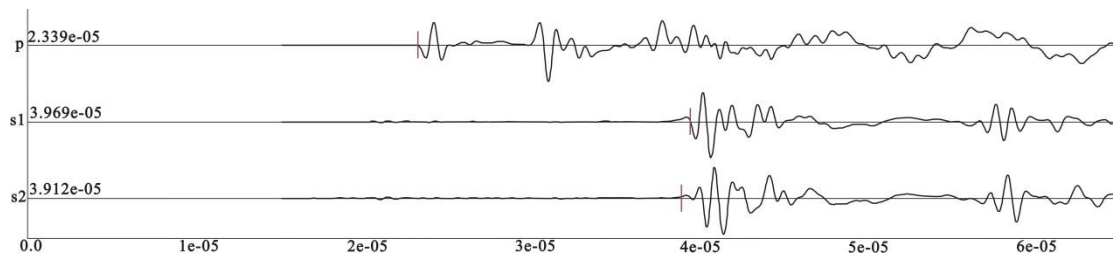


图 2 岩心在不同温压条件下声学（纵波速度、横波速度及其波形）测试结果图（20℃，80MPa）

Fig.2 Results of acoustic (P-wave velocity, shear wave velocity and wave shape) of core samples under different temperature and pressure conditions (20℃, 80MPa)

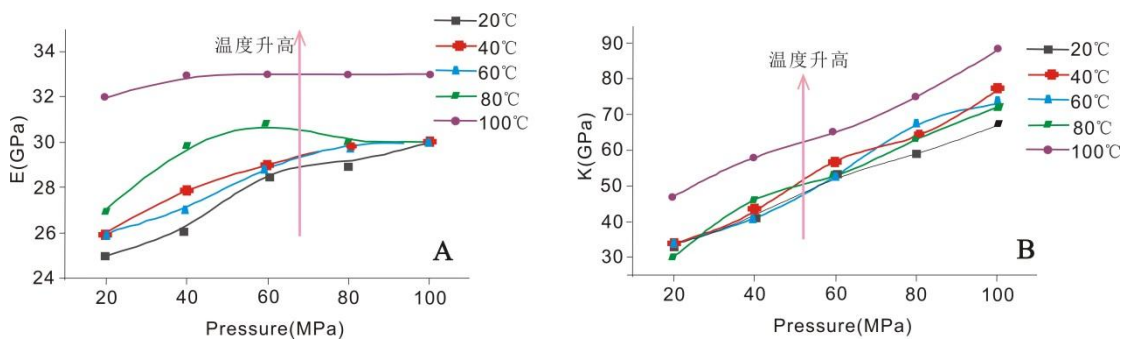


图 3 静态杨氏模量 (A) 和体积模量 (B) 随温度和压力变化关系曲线图

Fig.3 Results of the Static Young's modulus (A) and the bulk modulus (B) versus temperature and pressure

4 脆性指数的计算模型

4.1 基于力学参数的计算方法

力学参数的获取是根据高温高压岩石物理综合测试系统测得的数据,将岩样放于两个声波探头之间,其中一个探头是用来发射超声波,超声波透过岩样后,被另一探头接收,电子信号通过程序在电脑上被显示出来,通过显示屏上的波形,我们可获得声波透过岩样所需的时间,根据岩样长度,就可以计算出岩样的速度。将岩样放于两个力学加压探头之间,两个力学探头用于对岩样施加轴向上的应力,岩样在两个探头的加压下会发生压缩形变,通过安装在岩样上的形变传感器来测量岩样发生形变量的大小。利用广义虎克定律,通过弹性系数坐标变换,计算方向性模量和泊松比。

根据上述实验结果,把得到的杨氏模量和泊松比分别进行归一化处理,进而可以算出基于力学参数的脆性指数。

$E_p = \frac{E_s - E_{smin}}{E_{smax} - E_{smin}}$, 式中 E_p 为归一化杨氏模量,单位为 GPa; E_s 为静态杨氏模量,单位为 GPa; E_{smin} 、 E_{smax} 分别为静态杨氏模量最小值和最大值,单位为 MPa;

$\mu_y = \frac{\mu_{smax} - \mu_s}{\mu_{smax} - \mu_{smin}}$, 式中 μ_y 为归一化泊松比; μ_s 为静态泊松比; μ_{smax} 、 μ_{smin} 分别为静态泊松比最小值和最大值;

$BI1 = \frac{E_p + \mu_y}{2}$, 式中 $BI1$ 为岩石力学脆性指数; E_p 为归一化杨氏模量,单位为 GPa; μ_y 为归一化泊松比。

4.2 基于矿物组分的计算方法

基于矿物组分计算脆性指数的经验公式有很多,这些公式的本质都在于如何定义脆性矿物和塑性矿物。前人研究表明,石英可作为典型的脆性矿物,黏土矿物可作为典型的塑性矿物,而长石、碳酸盐岩矿物、黄铁矿等矿物是否属于脆性矿物,却没有明确的定义。那么可以利用聚类分析的方法来判断其他矿物与黏土矿物和石英的相近性来判断其性质。这里采用欧式距离代表两个样品之间相近程度的系数,距离越小越相近(何晓群等, 2004)。

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (X_{ik} - X_{jk})^2}$$

式中 d_{ij} 为第 i 个样品与第 j 个样品的欧式距离; N 为变量的数目; X 为矿物组分的体积分数;

k 为 N 个变量中的第 k 个变量。

聚类分析的结果中横坐标是欧式距离，纵向是各类矿物，可以看出所有的井中石英和黏土矿物都在聚类树状图中都不属于一类，这说明石英和黏土矿物可以作为典型的脆性和塑性矿物（图 4）。那么聚类树状图中与石英同属一类的矿物组分就可以被界定为有效脆性矿物的类别。聚类树状图中与黏土同属一类的矿物组分就可以被界定为非有效脆性矿物的类别。聚类结果显示，WD1 和 ZD2 井中长石属于非有效脆性矿物，碳酸盐岩矿物和黄铁矿属于有效脆性矿物；YD1 和 YC2 井中长石和黄铁矿属于非有效脆性矿物，碳酸盐岩矿物属于有效脆性矿物；YY1 井中长石和黄铁矿属于有效脆性矿物，碳酸盐岩矿物属于非有效脆性矿物。

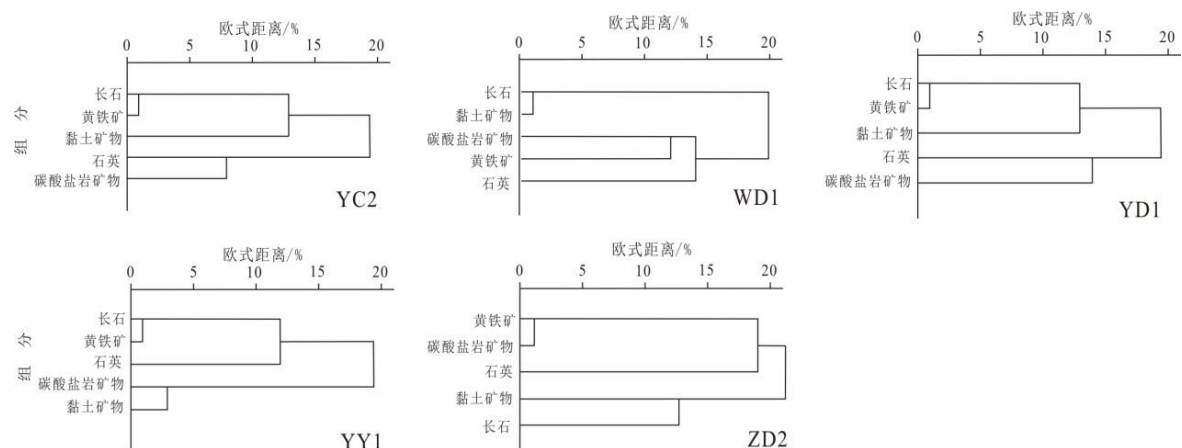


图 4 鄂西地区下寒武统牛蹄塘组矿物成分聚类分析树状图

Fig.4 Dendrogram of mineral composition cluster analysis of Lower Cambrian Niutitang Formation in Western Hubei

根据上述分类结果，可以计算出基于矿物组分的脆性指数，石英和黏土矿物与脆性指数的变化规律明显。五口井均显示石英与脆性指数呈正相关，黏土矿物与脆性指数呈负相关(图 5)，这也验证了在进行聚类分析前关于石英和黏土矿物的分类是合理的，聚类分析的方法是可行的。

4.3 基于元素成分的计算方法

目前岩石中元素数据的获取主要是通过 X 射线元素录井和实验室主微量元素测定两种方法，前者方便快捷，后者数据精确（牛强等，2014；孙红华等，2020）。为了使统计方法更加准确可靠，本文元素数据全部来自实验室测定。

综合前人研究结果，文中选取钙、镁、硅、铝等元素进行脆性指数计算，发现大部分井中基于元素的脆性指数与石英和黏土矿物的相关性不明显（图 6），这也说明基于元素的脆性指数方法与基于矿物组分的脆性方法是不同的，主要是因为元素在各类矿物中均会出现，比如，硅元素在石英、长石、伊利石等矿物中都含有。

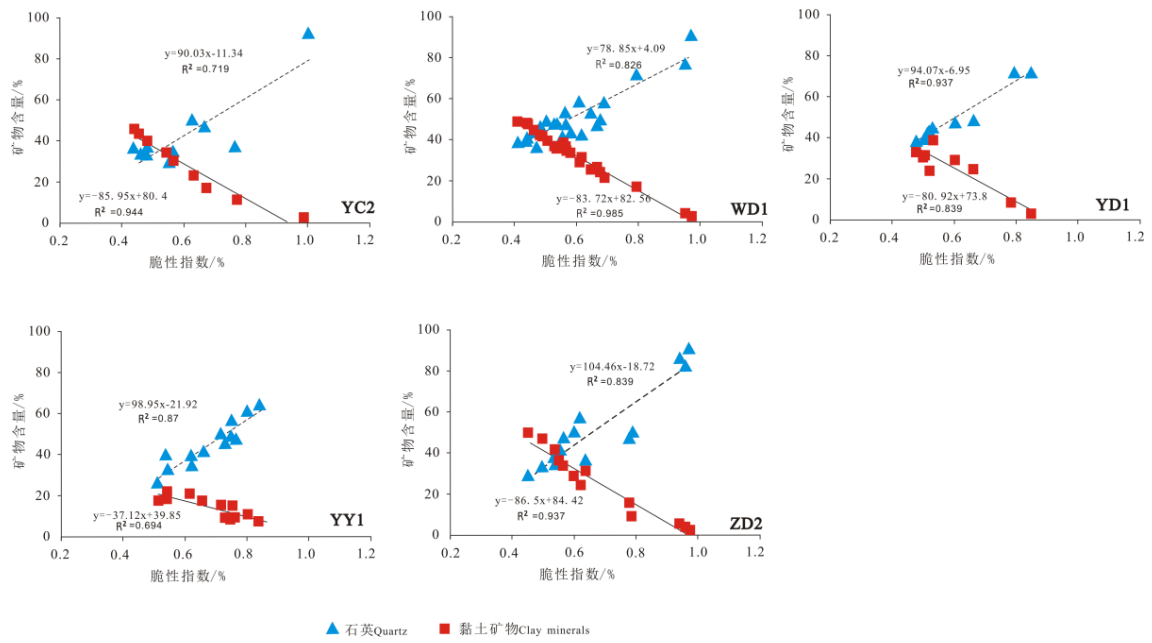


图 5 黏土矿物和石英与脆性指数变化关系

Fig.5 Relationship between clay minerals, quartz and brittleness index

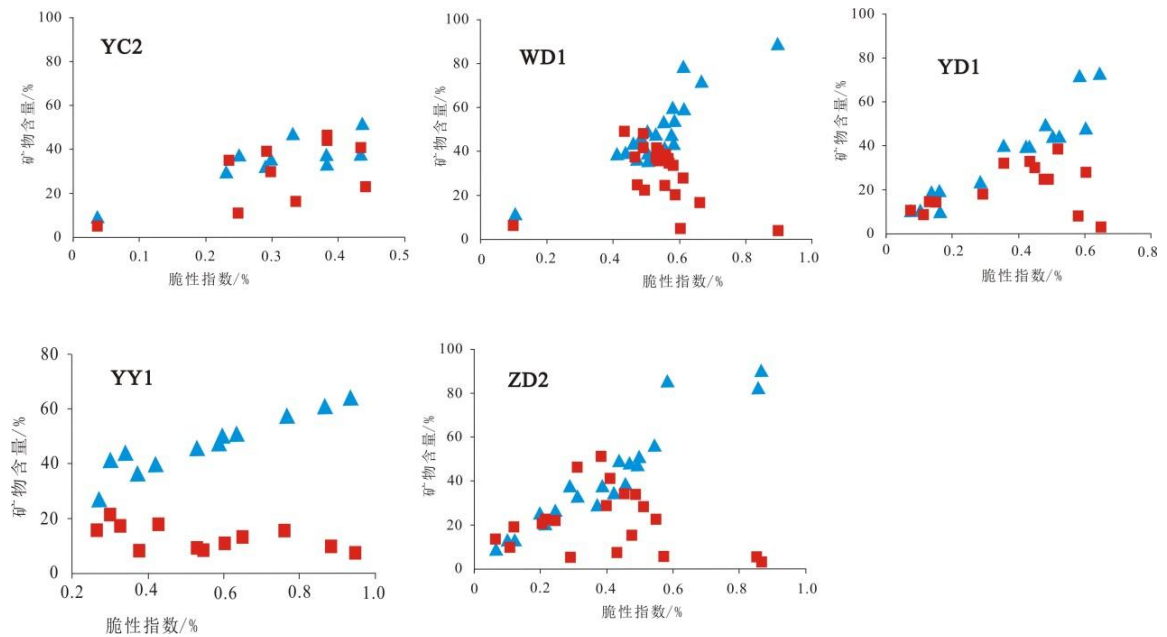


图 6 基于元素成分的脆性指数与石英和黏土的变化关系

Fig.6 Relationship between brittleness index and quartz and clay based on element composition

5 综合评价与实际应用

为了能够准确评价上述三种脆性指数计算模型的重要程度,可以利用主成分分析法确定三种方法在脆性指数计算中所占的比重,从而达到简化系统结构、抓住问题实质的目的。

主成分分析的基本理论:设对某一事物的研究涉及 p 个指标,分别用 X_1, X_2, \dots, X_p 表示,这 p 个指标构成的 p 维随机向量为 $X=(X_1, X_2, \dots, X_p)'$ 。对 X 进行线性变换,可以形成新的综合变量,用 F 表示,也就是说新的综合变量可以由原来的变量线性表示。根据线性约束的原则, F_1, F_2, \dots, F_p 分别称为原始变量的第一、第二、 \dots 、第 p 个主成分(薛薇, 2001; 张文彤等, 2013)。提取主成分的原则是同时满足特征根大于 1, 且累计方差贡献率大于 85%这两个条件,根据计算结果,表 3 中有两个满足条件的主成分:第一主成分的特征值是 1.375, 载荷向量为 (0.939,0.580,-0.395); 第二主成分的特征值是 1.317, 载荷向量为 (-0.100,0.750,0.863), 根据数学变换,可以得到主成分线性组合,公式为:

$$F_1=0.8008x_1+0.4946x_2-0.2985x_3$$

$$F_2=-0.0871x_1+0.6535x_2+0.7520x_3$$

对各变量在 F_1 和 F_2 两个主成分线性组合中的系数做加权平均,然后对各变量的系数进行归一化处理,得到其在综合模型中所占的新权重,最终得到综合脆性指数计算公式:

$$BI=0.3175BI_1+0.4959BI_2+0.1866BI_3$$

表 3 解释的总方差

Table 3 Total variance explained

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差%	累积%	合计	方差%	累积%
1	1.375	45.843	45.843	1.375	45.843	45.843
2	1.317	43.896	89.739	1.317	43.896	89.739
3	0.308	10.261	100			

从图 7 中可以看出, YY1 井中综合脆性指数在牛蹄塘组二段 3030m-3040m 的深度段脆性评价结果较好,再结合测井资料、含气性解析结果、TOC 等地质资料,最终选取 3032-3037 米深度段作为水平段穿行靶窗,该深度段在脆性指数评价优的深度段范围内,有利于后期压裂施工。

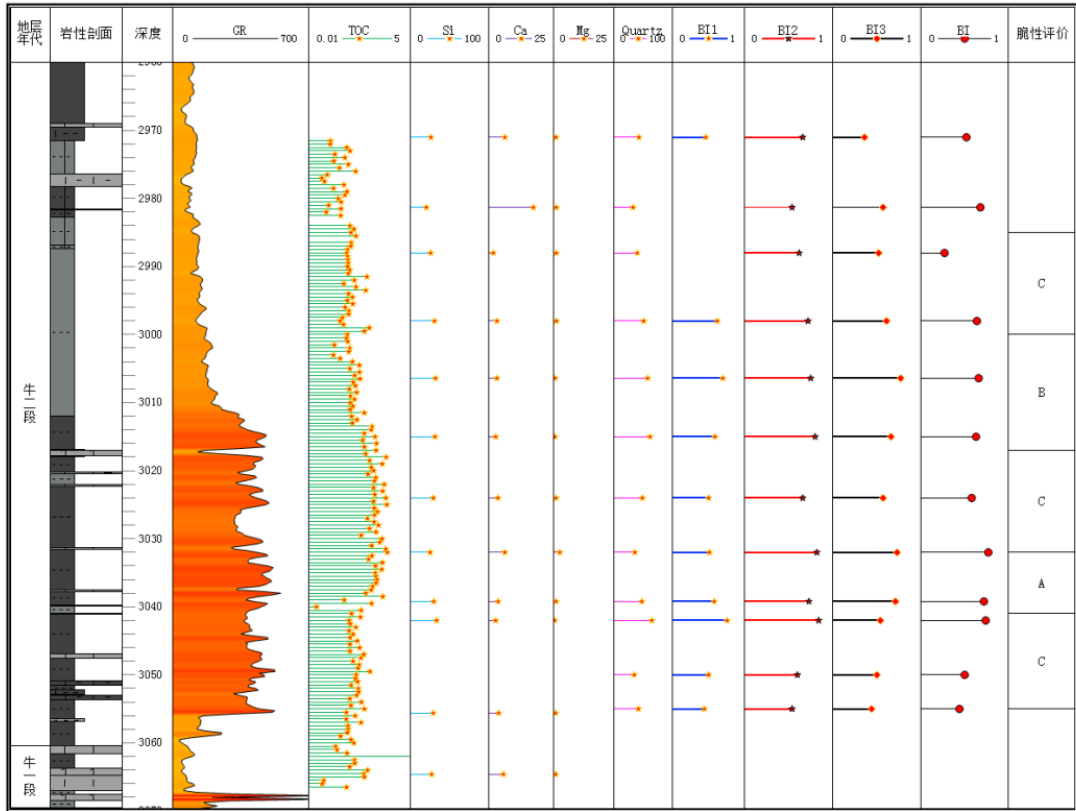


图 7 YY1 井脆性指数剖面图

Fig.7 Brittle index profile of YY1 well

EYY1HF 井共完成了 33 段压裂施工，累计注入液量 67799m³，加砂量 2818m³，全程进行微地震实时监测，取得了良好的压裂效果。以 22 段为例具体说明。

第 22 段压裂深度为 3930-3980m，排量为 14-18m³/min，入井总液量 2099.4m³，总砂量 130.4m³。后期施工压力呈上升趋势，实时处理过程中监测有效微地震事件 223 个。储层破裂后，逐渐增加砂比、提高排量增加压裂液，压力基本稳定在低压 55MPa，呈现平直状，该阶段是主缝网线形成期（图 8），从图 8 中蓝色缝网线可以看出，该段主体缝网整体呈直线状结构，相对比较单一，井眼附近呈以井眼为中心向四周辐射状；然后更换中砂，逐次提高排量，持续加大砂比后，压力缓慢上升至 60MPa，压力曲线呈微幅波浪状，是次缝网形成阶段，压裂效果较好。

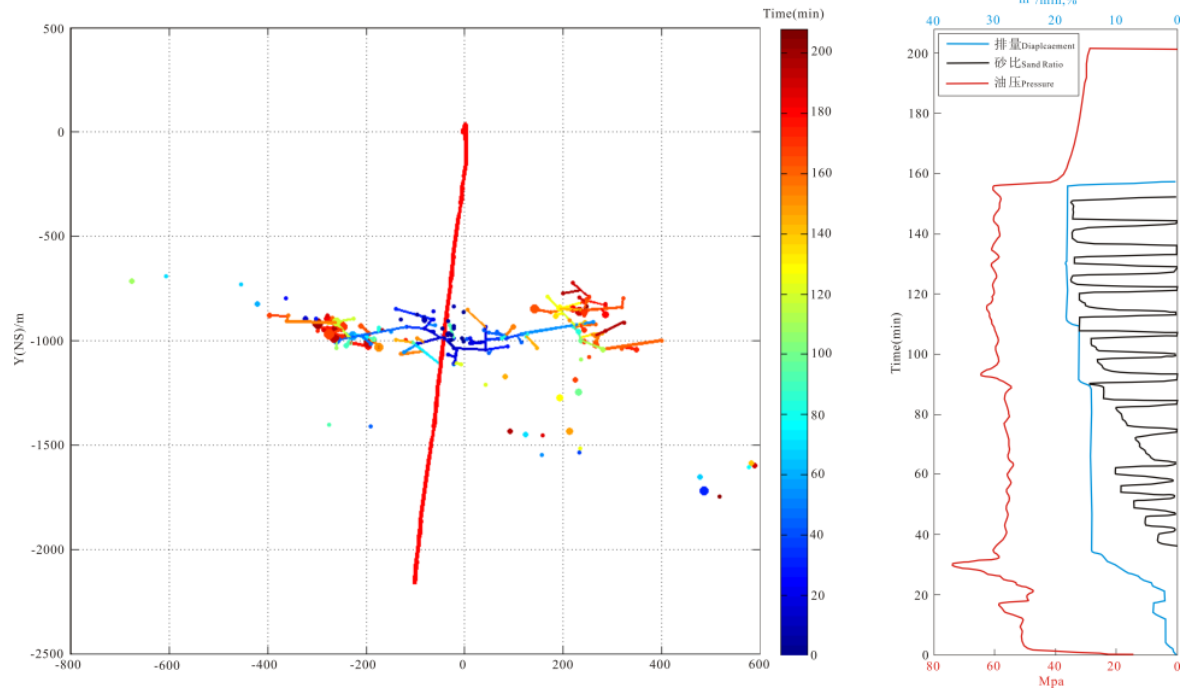


图 8 EYY1HF 井压裂参数及微地震监测缝网图

Fig.8 Fracture parameters and micro seismic monitoring fracture network of EYY1HF well

综合来看，EYY1HF 井在压裂过程中，加砂顺利且量大，施工波动压力不大，微地震监测事件较多，缝网主缝发育，次缝明显，裂缝复杂度高，地层可压性好，说明文中建立的综合脆性指数与工程施工的关联度较好，脆性越高的页岩段，压裂效果越好。

6 结论

(1) 通过对鄂西黄陵背斜南翼五口钻井进行系统采样和全岩矿物及黏土含量测试、主微量元素含量测试、声学力学联测实验等分析测试，分析了三种评价脆性指数的方法，并利用聚类分析的方法定量表征了泥页岩中有效脆性矿物成分和非有效脆性矿物成分。

(2) 为克服单一方法的局限性，利用多种地质因素数学模型和评价方法相结合来建立脆性指数模型，通过主成分分析法建立了基于岩石力学、矿物组分和元素成分的脆性指数综合定量评价公式，形成鄂西地区牛蹄塘组页岩层段的脆性指数剖面。微地震监测及压裂施工结果显示，新建立的脆性指数剖面能准确指示页岩的高脆性层段，压裂效果较好。

References

Chen Xiaohong, Wang Chuanshang, Liu An, Luo Shengyuan, Li Hai, Wei Kai. 2017. The discovery of the shale gas in the Cambrian Shuijingtu Formation of Yichang area, Hubei Province[J]. Geology in China, 4(1):188-189(in Chinese).
 Chen Xiaohong, Wei Kai, Zhang Baoming, Li Peijun, Li Hai, Liu An, Luo Shengyuan. 2018. Main geological

- factors controlling shale gas reservoir in the Cambrian Shuijingtuo Formation in Yichang of Hubei Province as well as its and enrichment patterns[J]. *Geology in China*, 45(2): 207-226(in Chinese with English abstract).
- Cong Ping, Yan Jianping, Jing Cui, Zhang Jiahao, Tang Mingjun, Wang Jun, Geng Bin, Wang Min, Chao Jing. 2021. Logging evaluation and distribution characteristics of fracturing grade in shale gas reservoir: a case study from Wufeng Formation and Longmaxi Formation in X area, southern Sichuan Basin[J]. *Lithologic reservoirs*, 33(3):1-11(in Chinese with English abstract).
- Dashtian H, Jafari G R, Sahimi M, et al. 2011. Scaling, multifractality, and long-range correlations in well log data of largescale porous media[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390(11):2096-2111.
- He Xiang, LI Qun. 2020. Quantitative definition and evaluation of brittle minerals in shale based on statistics: taking shale of Wufeng – Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its peripheral area as an Example[J]. *Journal of Xi'an Shi you University(Natural Science Edition)*, 35 (2):42-49(in Chinese with English abstract).
- He Xiaoqun. 2004. *Multivariate statistical analysis*[M]. Beijing: China Renmin University Press(in Chinese).
- Hui Zhou, Jun Chen, Jingjing Lu, Yue Jiang, Fanzhen Meng. 2018. A New Rock Brittleness Evaluation Index Based on the Internal Friction Angle and Class I Stress–Strain Curve[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51:2309–2316.
- JIN X C, SHAH S N, ROEGIERS J C, et al. Fracability evaluation in shale reservoirs: an integrated petrophysics and geomechanics approach[J]. *SPE168589*, 2014.
- JARVIE D M, HILL R, JRUBLE T E, et al. 2007. Unconventional shale gas systems the Mississippian Barnett Shale of northcentral Texas as one model for thermogenic shale gas assessment J. *AAPG Bulletin* .91(4):475-499.
- JIN X C, SHAH S N, ROEGIERS J C, et al. 2014. Fracability evaluation in shale reservoirs: an integrated petrophysics and geomechanics approach[J]. *SPE168589*.
- Lai Fuqiang, Luo Han, Gong Dajian, Xia Weixu, Li Fei. 2018. New evaluation model for brittle index of shale reservoir: a case study of Niutitang formation shale reservoir in Guizhou province[J]. *Progress in Geophysics(in Chinese)*, 33(6):2358-2367(in Chinese with English abstract).
- Li Haohan, Song Teng, Chen Ke; Lin Tuo; Jin Chunshuang; Meng Fanyang. Wang Peng, Zhang Yanlin. 2017. The discovery of shale gas from Sinian Formation at ZD-2 well in western Hubei[J]. *Geology in China*, 44(4):812-813(in Chinese).
- Ming-na Ge, Ke Chen, Xiang-lin Chen, Chao Wang, Shu-jing Bao. 2020. The influence factors of gas-bearing and geological characteristics of Niutitang Formation shale in the southern margin of Xuefeng Mountain ancient uplift: A case of Well Huangdi 1[J]. *China Geology*, 3(4):533-544.
- Niu Qiang, Zeng Jianhui, Wang Xin, Zhou Kaifu, Li Xiangfeng, Sun Peng. 2014. Application of X-ray element logging to shale brittleness evaluation in Shengli oil&field[J]. *PGRE*, 21(1):24-27(in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaoyan, Wang Zhenliang, Yu Hongyan, Cheng Hao, Lei Yuhong, Luo Xiaorong, Zhang Lixia, Jiang Chengfu, Gao Chao. 2016. Geophysical well logging in brittleness evaluation based on rock mechanics characteristic-a case study from the member 7 shale of Yanchang Formation in southeast Ordos Basin[J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 31(2):762-769(in Chinese with English abstract).
- Rickman R, Mullen M, Petre, E, et al. 2008. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett shale[R]. *SPE115258*, Doi: 10.2118/115258-MS.
- Sun Honghua, Jiang Weizhai, Meng Qingfeng, Fan Wei, Xu Hao, Zhang Mingyang, Zhao Yan, Wang Candanting. 2020. Method of accurately evaluating the brittleness of marine shale by elementary composition[J]. *Mud Logging Engineering*, 31(3):1-7(in Chinese with English abstract).
- Sun Jianmeng, Han Zhilei, Qin Ruibai, Zhang Jinyan. 2015. Log evaluation method of fracturing performance in tight gas reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 36(1):74-80(in Chinese with English abstract).
- Tang Ying, Xing Yun, Li Lezhong, Zhang Binhai, Jiang Shixin. 2012. Influence factors and evaluation methods of the gas fracability[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(5):356-363(in Chinese with English abstract).
- Wang Jianbo, Feng Minggang, Yan Wei, Liu Shuai. 2016. Influence factors and evaluation methods for shale reservoir fracability in Jiaoshiba Area [J]. *FaultBlock Oil & Gas Field*, 23 (2): 216-220(in Chinese with English abstract).
- Wang Ruyue, Gong Dajian, Ding Wenlong, Leng Jigao, Yin Shuai, Wang Xinghua, Sun Yaxiong. 2016. Brittleness evaluation of the Lower Cambrian Niutitang shale in the Upper Yangtze region: A case study in the Cengong block, Guizhou Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(1):87-95(in Chinese with English abstract).
- Wang Shengjian, Ren Shoumai, Zhou Zhi, Wu Liyan, Guo Tianxu, Liu Yimin, Hou Qidong. 2020. Discussion on petrophysical evaluation of shale gas reservoir in the second Member of Sinian Doushantuo Formation in Western Hubei Province, South China[J]. *Geology in China*, 47(1):133-143(in Chinese with English abstract).
- Wen Tao, Zhang Xin, Sun Jinshan, Jia Yongsheng, Lang Min, Jia Wenjun, Li Decheng, Sun Lixia, Tang Mingjun[J]. 2020. Brittleness evaluation based on energy evolution at pre-peak and post-peak stage. *Earth Science*.

- <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20201229.0905.002.html> (in Chinese with English abstract).
- Xinpeng Pan, Guangzhi Zhang, Jiaojiao Chen. 2020. The construction of shale rock physics model and brittleness prediction for high porosity shale gas bearing reservoir[J]. Petroleum Science, 17:658–670.
- Xue Wei, 2001. Statistical analysis and application of SPSS [M]. Beijing: China People's publishing house(in Chinese).
- Zhai Gangyi, Bao Shujing, Wang Yufang, Chen Ke, Wang Shengjian, Zhou Zhi, Song Teng, Li Haohao.2017. Reservoir accumulation model at the edge of palaeohigh and significant discovery of shale gas in Yichang area, Hubei province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(4):441-447(in Chinese with English abstract).
- Zhai Gangyi, Wang Yufang, Liu Guoheng, Lu Yongchao, He Sheng, Zhou Zhi, Li Juan, Zhang Yunxiao. 2020. Accumulation model of the Sinian-Cambrian shale gas in western Hubei Province, China[J]. Journal of Geomechanics, 26 (5): 696-713(in Chinese with English abstract).
- Zhai Wenbao, Li Jun, Zhou Yingcao, Liu Gonghui, Huang Tao, Song Xuefeng. 2018. New evaluation method of shale reservoir fracability based on logging data[J]. Lithologic Reservoirs, 30(3): 112-123(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wentong, Dong Wei. 2013. Advanced course of SPSS statistical analysis[M]. Beijing: Higher Education Press(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈孝红, 王传尚, 刘安, 罗胜元, 李海, 危凯. 2017. 湖北宜昌地区寒武系水井沱组探获页岩气[J]. 中国地质, 4(1):188-189.
- 陈孝红, 危凯, 张保民, 李培军, 李海, 刘安, 罗胜元. 2018. 湖北宜昌寒武系水井沱组页岩气藏主控地质因素和富集模式[J]. 中国地质, 45(2):207-226.
- 丛平, 闫建平, 井翠, 张家浩, 唐洪明, 王军, 耿斌, 王敏, 晁静. 2021. 页岩气储层可压裂性级别测井评价及展布特征—以川南 X 地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 岩性油气藏, 33(3):1-11.
- 何翔, 李群. 2020. 基于统计学页岩脆性矿物定量界定及评价:以四川盆地及其周缘五峰—龙马溪组页岩为例[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 35(2):42-49.
- 何晓群. 2004. 多元统计分析[M].北京:中国人民大学出版社.
- 赖富强, 罗涵, 龚大建, 夏炜旭, 李飞. 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[J].地球物理学进展, 33(6):2358-2367.
- 李浩涵, 宋腾, 陈科, 林拓, 金春爽, 孟凡洋, 王鹏, 张焱林.2017.鄂西地区(秭地2井)震旦纪地层发现页岩气[J]. 中国地质, 44(4):812-813.
- 牛强, 曾溅辉, 王鑫, 周开富, 李向峰, 孙鹏. 2014. X 射线元素录井技术在胜利油区泥页岩脆性评价中的应用[J].油气地质与采收率, 21(1):24-27.
- 秦晓艳, 王震亮, 于红岩, 程昊, 雷裕红, 罗晓容, 张丽霞, 姜呈馥, 高潮. 2016. 基于岩石力学特征的陆相泥页岩脆性地球物理测井评价—以鄂尔多斯盆地东南部下寺湾地区延长组长7段为例[J]. 地球物理学进展, 31(2):762-769.
- 孙红华, 姜维寨, 孟庆峰, 范伟, 徐皓, 张明扬, 赵岩, 王灿丹婷. 2020. 利用元素成分准确评价海相页岩脆性的方法[J].录井工程, 31(3):1-7.
- 孙建孟, 韩志磊, 秦瑞宝, 张晋言. 2015. 致密气储层可压裂性测井评价方法[J]. 石油学报, 36(1):74-80.
- 唐颖, 邢云, 李乐忠, 张滨海, 蒋时馨. 2012. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J].地学前缘, 19(5):356-363.
- 王建波, 冯明刚, 严伟, 刘帅. 2016. 焦石坝地区页岩储层可压裂性影响因素及计算方法[J].断块油气田, 23(2):216-220.
- 王濡岳, 龚大建, 丁文龙, 冷济高, 尹帅, 王兴华, 孙雅雄. 2016. 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层脆性评价-以贵州岑巩区块为例[J].地学前缘, 23(1):87-95.
- 王胜建, 任收麦, 周志, 吴丽艳, 郭天旭, 刘一珉, 侯啓东. 2020. 鄂西地区震旦系陡山沱组二段页岩气储层测井评价初探[J].中国地质, 47(1):133-143.
- 温韬, 张馨, 孙金山, 贾永胜, 郎珉, 贾文君, 李德成, 孙莉霞, 唐辉明. 2020. 基于峰前和峰后能量演化特征的岩石脆性评价[J].地球科学. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20201229.0905.002.html>
- 薛薇, 2001. 统计分析与 SPSS 的应用[M].北京:中国人民大学出版社.
- 翟刚毅, 包书景, 王玉芳, 陈科, 王胜建, 周志, 宋腾, 李浩涵. 2017. 古隆起边缘成藏模式与湖北宜昌页岩气重大发现[J]. 地球学报, 2017, 38(4):441-447.
- 翟刚毅, 王玉芳, 刘国恒, 陆永潮, 何生, 周志, 李娟, 张云泉. 2020. 鄂西地区震旦系-寒武系页岩气成藏模式[J]. 地质力学学报, 26 (5): 696-713.
- 翟文宝, 李军, 周英操, 柳贡慧, 黄涛, 宋学锋. 2018. 基于测井资料的页岩储层可压裂性评价新方法[J]. 岩性油气藏, 30(3):112-123.
- 张文彤, 董伟. 2013. SPSS 统计分析高级教程[M].北京:高等教育出版社.