

doi: 10.12029/gc20210125003

苗凤彬, 彭中勤, 汪宗欣, 张保民, 王传尚, 巩磊. 2024. 雪峰地区牛蹄塘组海相页岩脆性特征及影响因素——以湘张地 1 井为例[J]. 中国地质, 51(3): 743–761.

Miao Fengbin, Peng Zhongqin, Wang Zongxin, Zhang Baomin, Wang Chuanshang, Gong Lei. 2024. Brittleness characteristics and influencing factors of marine shale of Niutitang Formation in Xuefeng region: A case study of Well XZD-1[J]. Geology in China, 51(3): 743–761(in Chinese with English abstract).

## 雪峰地区牛蹄塘组海相页岩脆性特征及影响因素 ——以湘张地 1 井为例

苗凤彬<sup>1,2</sup>, 彭中勤<sup>2</sup>, 汪宗欣<sup>2</sup>, 张保民<sup>2</sup>, 王传尚<sup>2</sup>, 巩磊<sup>3</sup>

(1. 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;  
3. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318)

**摘要:**【研究目的】开展页岩储层脆性评价对页岩气勘探开发中的有利层段优选具有重要意义。【研究方法】基于矿物组成、地球物理测井、岩石力学实验与裂缝发育程度等基础资料, 采用矿物组分析法与基于地球物理测井的岩石力学参数法对雪峰地区牛蹄塘组海相页岩的脆性特征进行分析与评价, 并以此探讨页岩脆性的影响因素。【研究结果】基于石英、长石、黄铁矿和碳酸盐含量的脆性矿物组分析法对该区牛蹄塘组页岩脆性的评价最为适用, 以区内湘张地 1 井为例, 页岩脆性指数为 59.2%~93.8%, 平均值 74.4%, 受沉积环境、成岩演化、埋深、构造作用等因素共同影响。【结论】稳定的深水陆棚-盆地相沉积环境与晚成岩演化阶段决定牛蹄塘组页岩脆性整体较高, 该环境下生物成因的硅质、黄铁矿等脆性矿物较为富集, 并受沉积时水体深度变化影响自下而上呈现先升高后降低、整体逐渐降低的含量变化趋势, 导致页岩脆性及天然裂缝发育程度具有相似的纵向变化规律, 三者之间相辅相成; 同时, 此类脆性矿物与有机质含量具有良好的正相关关系, 其对页岩脆性的贡献远大于有机质本身对塑性的加成。此外, 岩石力学参数与脆性指数之间的相关性表明, 杨氏模量在该区牛蹄塘组页岩脆性评价中的权重高于泊松比。

**关键词:** 脆性特征; 影响因素; 牛蹄塘组; 页岩气; 湘张地 1 井; 雪峰地区; 油气勘查工程

**创新点:** (1) 采用多方法有效性综合分析, 优选出适用于牛蹄塘组页岩的脆性评价方法, 明确了深水陆棚-盆地相沉积环境与晚成岩演化阶段是牛蹄塘组页岩脆性整体较高的主控因素; (2) 通过梳理脆性指数、岩石力学参数与 TOC 三者之间关系, 厘定生物成因脆性矿物与有机质含量对页岩脆性的贡献, 明确了不同岩石力学参数在脆性评价中的权重。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)03-0743-19

### Brittleness characteristics and influencing factors of marine shale of Niutitang Formation in Xuefeng region: A case study of Well XZD-1

MIAO Fengbin<sup>1,2</sup>, PENG Zhongqin<sup>2</sup>, WANG Zongxin<sup>2</sup>, ZHANG Baomin<sup>2</sup>,  
WANG Chuanshang<sup>2</sup>, GONG Lei<sup>3</sup>

收稿日期: 2021-01-25; 改回日期: 2021-09-12

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20230323)、古生物与地质环境演化湖北省重点实验室基金项目(PEL-202307)及国家科技重大专项“中扬子高演化页岩气赋存机理与富集规律研究”(2016ZX05034001-002)联合资助。

作者简介: 苗凤彬, 男, 1986 年生, 高级工程师, 主要从事非常规油气地质研究; E-mail: mfb.52163@163.com。

通讯作者: 彭中勤, 男, 1981 年生, 高级工程师, 主要从事页岩气地质研究; E-mail: 17360988@qq.com。

(1. Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 3. College of Geosciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China)

**Abstract:** This paper is the result of oil and gas exploration engineering.

**[Objective]** The brittleness evaluation of shale reservoir is of great significance for determining the favorable stratigraphic zone in shale gas exploration and development. **[Methods]** Based on the basic data of mineral composition, geophysical logging, rock mechanics experiment and fracture development characteristics of Lower Cambrian Niutitang Formation in Xuefeng region, the brittleness characteristics of Niutitang Formation shale are comprehensively analyzed and evaluated by mineral composition and rock mechanics parameter based on geophysical logging, and the influencing factors of shale brittleness are discussed. **[Results]** The results indicate that the brittle mineral composition based on the contents of quartz, feldspar, pyrite and carbonate is the most suitable method to evaluate the brittleness of Niutitang Formation shale in this region. Taking Well XZD-1 in this area as an example, the brittleness index of Niutitang Formation shale is 59.2%–93.8%, with an average value of 74.4%, which is influenced by sedimentary environment, diagenetic evolution, burial depth, tectonism and other factors. **[Conclusion]** The stable deep-water shelf basin facies sedimentary environment and late diagenetic evolution stage determine that the overall brittleness of Niutitang Formation shale in Xuefeng region is relatively high. In this sedimentary environment, biogenic brittle minerals such as siliceous and pyrite are more abundant. The content of brittle minerals is affected by the change in water depth during sedimentation, showing a trend of increasing first and then decreasing from bottom to top, gradually decreasing overall. This leads to a similar vertical variation law in shale brittleness and the development of natural fractures, and the three complement each other. Meanwhile, such brittle minerals have a good positive correlation with organic matter content, and their contribution to shale brittleness is much greater than that of organic matter to shale plasticity. In addition, the correlation between rock mechanics parameters and brittleness index indicates that the Young's modulus plays a more important role in the evaluation of Niutitang Formation shale brittleness in this area than the Poisson's ratio.

**Key words:** brittleness characteristics; influencing factors; Niutitang Formation; shale gas; Well XZD-1; Xuefeng region; oil and gas exploration engineering

**Highlights:** (1) The brittleness evaluation method suitable for the Niutitang Formation shale is selected by comprehensive analysis of the effectiveness of various methods, and it is clarified that the deep-water shelf basin facies sedimentary environment and late diagenetic evolution stage are the main controlling factors for the overall high brittleness of the Niutitang Formation shale. (2) By sorting out the relationship among brittleness index, rock mechanics parameters and TOC, the contribution of biogenic brittle minerals and organic matter content to shale brittleness is determined, and the weight of different rock mechanics parameters in brittleness evaluation is clarified.

**About the first author:** MIAO Fengbin, male, born in 1986, senior engineer, mainly engaged in the unconventional oil and gas geological study; E-mail: [mfb.52163@163.com](mailto:mfb.52163@163.com).

**About the corresponding author:** PENG Zhongqin, male, born in 1981, senior engineer, mainly engaged in the shale gas geological study; E-mail: [17360988@qq.com](mailto:17360988@qq.com).

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20230323), Hubei Key Laboratory Foundation of Paleontology and Geological Environment Evolution (No. PEL-202307), National Science and Technology Major Project (No. 2016ZX05034001-002).

## 1 引 言

页岩气藏具有典型的低孔低渗特征,自然条件下产出相对困难,需要借助压裂改造来实现商业开采及后期增产(袁俊亮等, 2013; 张晨晨等, 2016)。

脆性是页岩储层重要的岩石力学参数,决定储层的可压裂性,是遴选高品质页岩气藏的重要依据,页岩脆性越好,造缝能力越强,压裂后越易形成复杂的网状裂缝,改造效果越理想(付永强等, 2011; 李庆辉等, 2012)。储层脆性特征也是压裂措施与工艺

技术选择及施工参数调整的重要的依据, 实践表明, 北美及国内主要页岩气田的经济高产同产气层脆性及压裂方案的选取有重要的关系(Bowker et al., 2007; 李庆辉等, 2012; 唐颖等, 2012; 房大志等, 2015)。此外, 页岩脆性还控制着天然裂缝及部分孔隙的发育程度, 进而影响着游离气含量与总含气量。因此, 开展页岩脆性特征分析与评价对页岩气勘探与开发具有重大意义。

目前, 页岩脆性评价主要依靠岩石力学实验、脆性矿物含量、地球物理测井及压裂试验监测等方法(徐赣川等, 2014; 王濡岳等, 2016), 多采用脆性指数来进行定量表征。国内外页岩气勘探开发经验认为, 页岩脆性程度与脆性矿物含量具有良好的正相关性, 即高脆性矿物含量的页岩往往具有高脆性(袁俊亮等, 2013; 徐赣川等, 2014); 页岩脆性也与杨氏模量、泊松比等力学参数有关, 杨氏模量越高、泊松比越低, 页岩脆性越好, 杨氏模量与泊松比可通过岩石力学实验、地球物理测井等方法来获取; 此外, 天然裂缝的发育程度对脆性也有很好的指示作用, 岩石脆性越高, 天然裂缝越发育。页岩脆性差异主要是由矿物组成、内部结构和构造差异所导致, 这与页岩本身的沉积环境、埋深条件、成岩演化及经受的构造运动等众多因素有关。由于不同地区、不同层系与性质的页岩, 其脆性影响因素有所差异, 采用单一方法进行脆性评价往往比较局限, 容易产生较大偏差, 故需要对多个方法进行综合分析验证, 优选出适合该地区的合理评价方法。

下寒武统牛蹄塘组海相页岩在雪峰地区广泛发育, 有效厚度大、有机质丰度高, 具有优越的生烃物质基础, 近年来部署实施的多口探井均发现良好的页岩气显示(苗凤彬等, 2020), 虽暂未取得工业突破, 却证实了该区良好的页岩气资源潜力, 有待进行进一步的有利区与有利层段优选与评价工作, 因此, 开展该区牛蹄塘组页岩储层脆性研究不可或缺。鉴于雪峰地区下寒武统牛蹄塘组海相页岩形成时代老、成岩阶段晚、经历多期构造运动等问题(赵文智, 2016; 黄俨然, 2018), 本文以区内湘张地 1 井为例, 利用岩石矿物组分、地球物理测井、岩石力学实验及岩心裂缝发育程度等资料, 优选出合理的方法, 对牛蹄塘组页岩脆性特征进行综合分析评价, 并在此基础上探讨影响脆性的地质因素, 以

期为雪峰及整个南方地区海相页岩储层评价及压裂层段优选提供参考与帮助。

## 2 地质概况

### 2.1 区域地质特征

雪峰地区位于华夏地块与扬子地块拼合部位, 是以晚前寒武纪浅变质岩系为主体的古隆起带, 走向 NNE-NE 向, 总体向 NW 突出呈弧形展布, 具有复杂的演化历史(梅廉夫等, 2012; 邓大飞等, 2014)。隆起区北西以慈利—保靖基底断裂为界与湘鄂西褶皱带相邻, 南东大致以安化—溆浦断裂组合为界与湘中拗陷相接, 本文研究区主要位于雪峰隆起西缘的张家界—花垣至东缘安化—溆浦一带, 面积约 25000 km<sup>2</sup>(图 1), 隆起西缘大致以沅麻盆地与东缘相隔, 区内已部署实施了湘张地 1 井、慈页 1 井、JD1 井、XD1 井、湘临地 1 井等多口页岩气探井。整个隆起区经历多期复杂构造运动, 形成一系列以 NNE-NE 为主的断裂与褶皱构造样式, 并存在多个不整合面与滑脱构造带, 地表出露新元古界冷家溪群与板溪群、震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系—下三叠统、上三叠统—中侏罗统及白垩系等多套地层。

雪峰地区早寒武世处于华南深水海相沉积环境, 牛蹄塘组以深水陆棚—盆地相沉积的暗色炭质页岩、硅质页岩为主, 底部夹少量石煤及硅磷质结核, 页岩在区内发育稳定, 富含有机质、黄铁矿及硅藻、海绵、放射虫等生物化石, 反映了当时低能、缺氧的还原沉积环境(刘安等, 2013; 王传尚等, 2013; 柏道远等, 2022)。牛蹄塘组在隆起西缘慈利—张家界—吉首一带主要以深水陆棚—棚外斜坡相沉积为主, 局部含钙质及少量粉砂质, 向南东至安化—溆浦一带过渡为半深海—深海盆地相沉积, 钙质、砂质有所减少。此外, 牛蹄塘组沉积期内水体深度变化较大, 早期的沉积水体深度整体大于后期。平面上, 牛蹄塘组存在于整个雪峰隆起地区, 西缘分布更为广泛, 埋深 0~4000 m, 炭质页岩、硅质页岩累计厚度主要为 100~200 m, 东缘部分地区因隆升剥蚀而出现缺失, 其构造变形及褶皱、断裂的发育程度远强于西缘。雪峰地区牛蹄塘组页岩有机质含量整体较高, 总有机碳含量 TOC 普遍大于 2.0%, 且下部页岩 TOC 明显高于上部, 有机质类型以 I 型

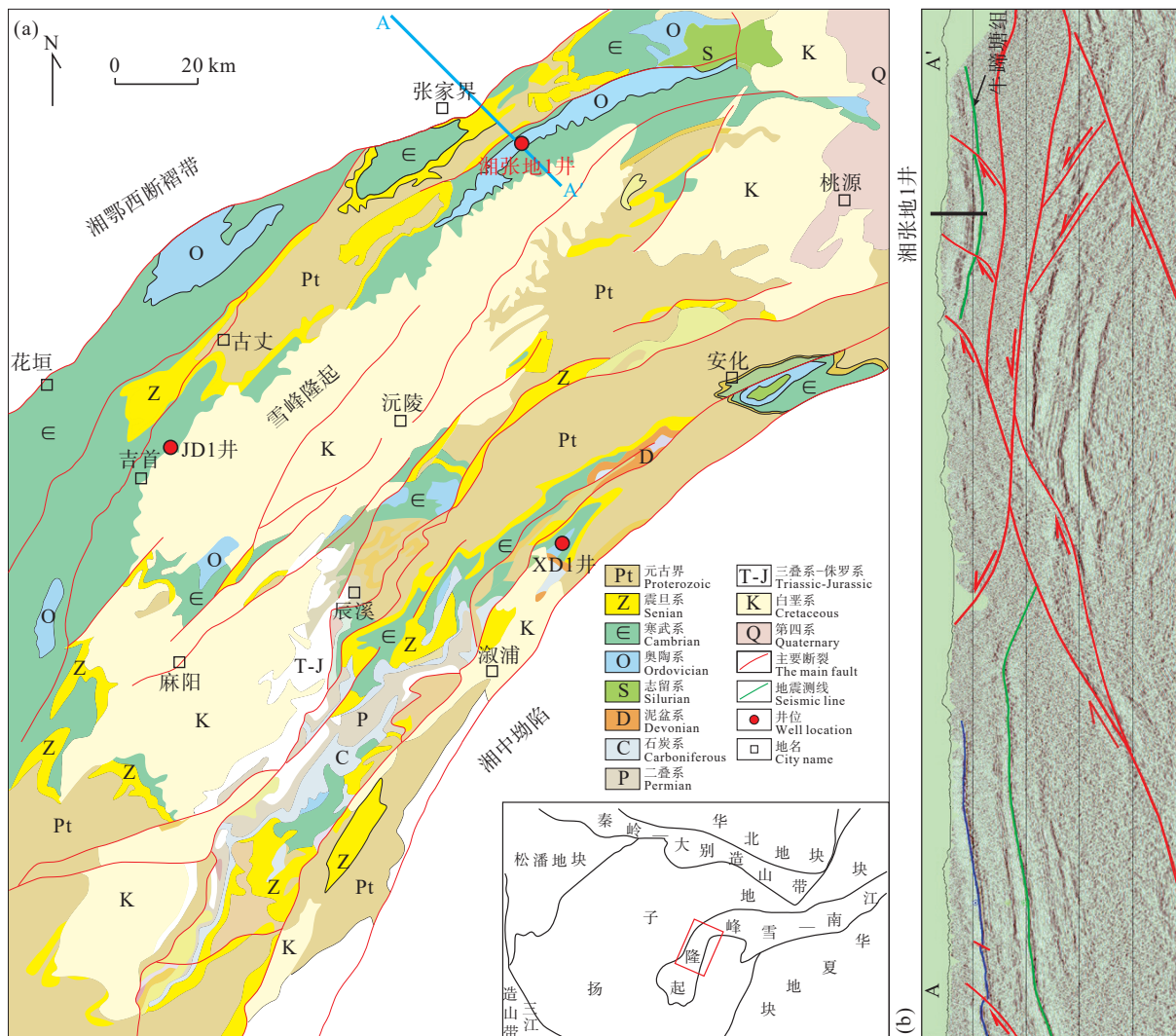


图1 雪峰地区位置与地质特征

a—研究区地质图; b—地震剖面图

Fig.1 Location and geological characteristics of Xuefeng region

a—Geological map of the study area; b—Seismic section

为主, 含少量  $II_1$  型, 热演化程度高, 等效镜质体反射率  $R_o$  多大于 2.5%, 石英、长石、黄铁矿等脆性矿物含量多在 50% 以上 (苗凤彬等, 2019; 彭中勤等, 2019), 具有良好的页岩气资源潜力。

## 2.2 湘张地 1 井概况

湘张地 1 井位于雪峰隆起西缘、慈利—保靖断裂东侧的沅古坪向斜核部, 该向斜呈北东向狭长带状展布, 与雪峰地区主体构造方位相一致, 地表出露奥陶系灰岩, 地层整体较为平缓, 倾角主要集中在  $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。地震测线解释剖面显示, 该区存在多个逆冲推覆构造, 其上发育叠瓦扇反向逆冲断层组合 (图 1), 断层间地层相对宽缓。湘张地 1 井位于逆

冲断层之间的稳定带上, 地层上倾方向存在反向断层遮挡, 挤压背景下封闭性较好, 钻探过程中牛蹄塘组页岩气显示良好, 录井气测全烃值最高可达 3.75%, 现场最大解析气含量为  $2.29\text{ m}^3/\text{t}$ , 连续含气页岩段累计厚度大, 证实了该井所在区具有较好的页岩气潜力。湘张地 1 井开孔层位为下奥陶统灰岩, 钻穿整个寒武系, 进入震旦系灯影组完钻, 钻遇地层序列正常, 牛蹄塘组顶深 1792.8 m, 底深 1998 m, 钻探厚度 205.2 m, 岩性主要为暗色泥页岩 (黑色炭质页岩、硅质页岩为主)。牛蹄塘组页岩有机质含量高, TOC 分布范围为 1.19%~10.50%, 平均为 4.44%, TOC 大于 4% 的页岩主要分布在该组下部

(1905~1998 m), 等效镜质体反射率  $R_o$  为 2.56%~3.30%, 总体处于过成熟演化阶段。

### 3 页岩脆性表征方法

#### 3.1 矿物组分法

页岩矿物组分中的脆性矿物是影响页岩脆性、裂缝发育和破裂方式等的重要因素(钟城等, 2018)。脆性矿物一定程度上决定页岩储层的脆性与可压裂性, 其含量越高, 页岩脆性越强, 受力后越易发生破裂并形成复杂网状裂缝, 因此运用矿物组成来表征脆性是页岩储层脆性评价的重要方法。页岩矿物组分主要有石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿及黏土矿物等, 通常情况下, 石英被作为主要的脆性矿物, 其含量决定着页岩的脆性强弱(Jarvie et al., 2007; 伍岳等, 2015), 长石和黄铁矿含量占比相对较低, 但对页岩脆性也有一定贡献, 随岩石学与矿物学的深入研究发现, 碳酸盐矿物对增加页岩脆性也起重要作用(赵佩等, 2014; 夏遵义等, 2019), 尤其对于碳酸盐矿物含量较高的页岩。因此, 对于不同地区、不同层位及矿物学特征的页岩, 对脆性矿物的界定也存在着差异。雪峰地区牛蹄塘组为典型的海相页岩层, 其矿物组成中石英含量高, 碳酸盐矿物占比低, 仅在局部较为富集, 且普遍含黄铁矿、长石等矿物。本文以湘张地 1 井为例, 分别以石英含量与石英、长石、黄铁矿、碳酸盐矿物含量之和来计算页岩的脆性指数(公式 1, 公式 2)。

$$BRIT_{m1} = \frac{W_{\text{石英}}}{W_{\text{石英}} + W_{\text{长石}} + W_{\text{方解石}} + W_{\text{白云石}} + W_{\text{黄铁矿}} + W_{\text{黏土}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$BRIT_{m2} = \frac{W_{\text{石英}} + W_{\text{长石}} + W_{\text{方解石}} + W_{\text{白云石}} + W_{\text{黄铁矿}}}{W_{\text{石英}} + W_{\text{长石}} + W_{\text{方解石}} + W_{\text{白云石}} + W_{\text{黄铁矿}} + W_{\text{黏土}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $BRIT_{m1}$  与  $BRIT_{m2}$  为基于岩石矿物组分的脆性指数,  $W_{\text{石英}}$ 、 $W_{\text{长石}}$ 、 $W_{\text{方解石}}$ 、 $W_{\text{白云石}}$ 、 $W_{\text{黄铁矿}}$ 、 $W_{\text{黏土}}$  分别为石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿和黏土矿物的质量占比。

对湘张地 1 井牛蹄塘组页岩样品进行 X 射线全岩衍射矿物定量分析, 结果显示, 石英含量占比

为 36.9%~65.9%, 平均为 50.0%, 方解石与白云石等碳酸盐岩矿物占比为 2.2%~46.0%, 平均为 8.5%, 黏土矿物占比为 6.2%~65.9%, 平均为 25.6%, 且以伊利石为主, 伴随少量的绿泥石和高岭石, 长石与黄铁矿占比分别为 8.8% 和 7.0%(图 2)。由牛蹄塘组页岩矿物组成三角图可知, 除少量泥灰岩和钙质页岩夹层样品外, 大部分样品分布在硅质页岩类型区(图 3), 硅质矿物含量对页岩脆性影响较大。利用上述两种矿物组分方法分别对牛蹄塘组页岩脆性指数进行计算(图 2),  $BRIT_{m1}$  分布范围为 36.9%~65.9%, 平均为 50.0%, 且大部分样品值超过 40.0%;  $BRIT_{m2}$  分布范围为 59.2%~93.8%, 平均为 74.4%。两种方法计算的脆性指数纵向上变化趋势相近, 均自上而下逐渐增加, 且自 1905 m 深度处向下陡然升高, 下部页岩脆性指数  $BRIT_{m1}$  与  $BRIT_{m2}$  均值分别为 57.8% 和 84.4%。脆性指数纵向上的变化主要由石英、黄铁矿、碳酸盐矿物含量纵向上的变化所导致, 与黏土矿物呈相反的变化趋势。此外, 两种方法得到的脆性指数  $BRIT_{m1}$  与  $BRIT_{m2}$  呈较好的正相关关系(图 4), 相关系数高达 0.83(未含少量泥灰岩样品), 二者的相关性说明基于矿物组分的岩石脆性分析反映出该区牛蹄塘组页岩整体脆性随深度增加而增强, 下部页岩脆性明显高于上部。

#### 3.2 岩石力学参数法

杨氏模量与泊松比是反映岩石脆性的主要物理力学参数, 杨氏模量反映了页岩破裂后保持裂缝的能力, 泊松比反映了页岩在应力作用下破裂的能力, 国内外页岩气勘探开发实践与经验表明, 高杨氏模量、低泊松比的页岩, 其脆性更好(Rickman et al., 2008; 唐颖等, 2012; 袁俊亮等, 2013; 刁海燕等, 2013; 何建华等, 2015), 更易形成天然裂缝与压裂缝, 因此本文主要采用杨氏模量、泊松比来表征该区牛蹄塘组页岩的脆性。目前, 杨氏模量和泊松比等力学参数主要通过岩石力学实验与地球物理测井方法获取。岩石力学实验主要通过静载以获取试样变形破坏过程中的应力-应变关系、破裂特征及静态岩石力学参数, 认识其力学变形破坏规律(刁海燕等, 2013; 袁俊亮等, 2013), 受样品数量的影响, 该方法获得的数据往往缺少纵向上的连续性; 而地球物理测井法则通过测量纵波、横波在岩石中的传播速度与时差数据来计算获

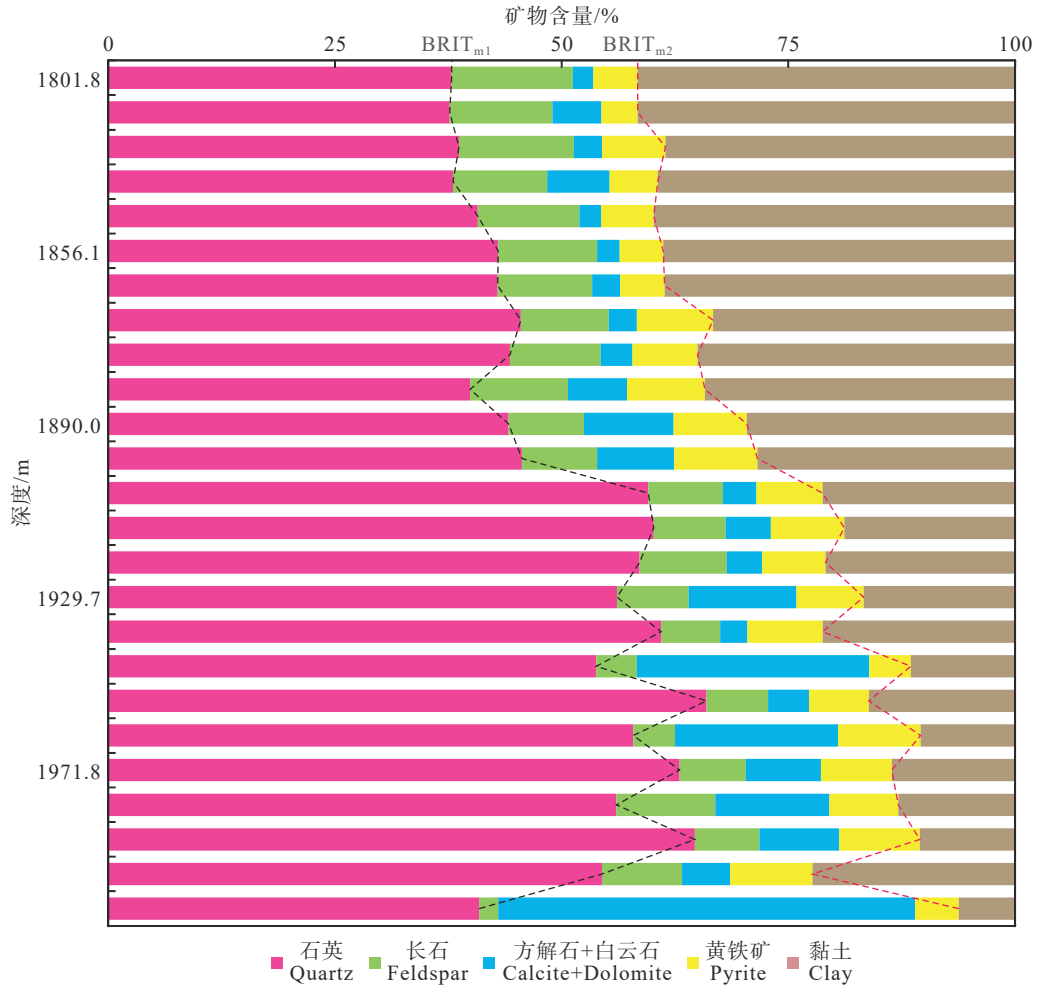


图2 湘张地1井牛蹄塘组页岩矿物组成  
Fig.2 Mineral composition of Niutitang Formation shale in Well XZD-1

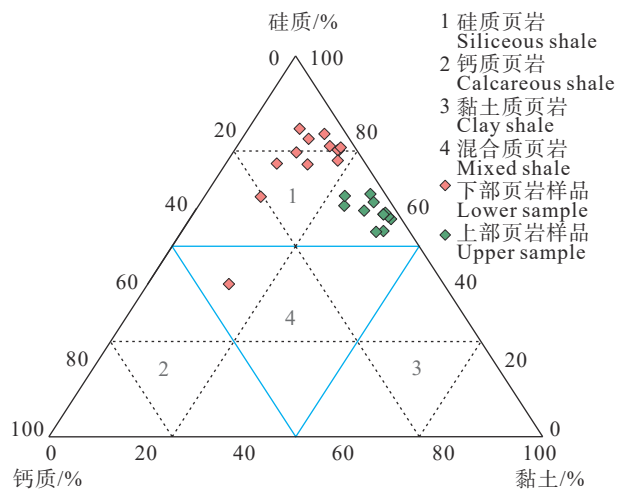


图3 页岩矿物组分三角图  
Fig.3 Ternary diagram of mineral compositions of shale

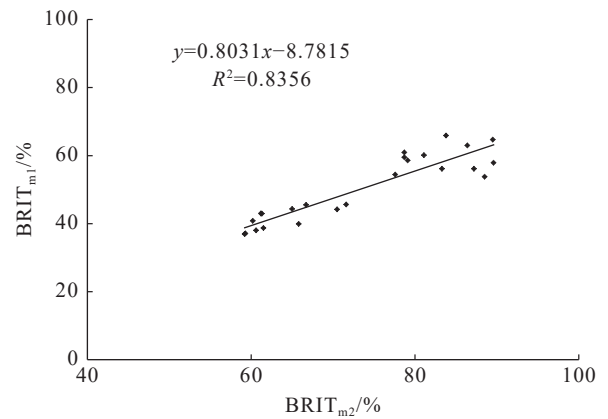


图4 牛蹄塘组页岩脆性指数 BRIT<sub>m1</sub> 与 BRIT<sub>m2</sub> 关系  
Fig.4 Relationship between BRIT<sub>m1</sub> and BRIT<sub>m2</sub> of Niutitang Formation shale

取连续深度下岩石的动态力学参数(王濡岳等, 2016)。两种方法获得的岩石力学参数一般呈线性关系, 动态弹性参数值高于静态, 动、静态参数间存在差异的内部原因为岩石内部存在微裂隙及孔隙流体, 外部原因是散射产生的几何分散、载荷应变幅值及频率的不同(葛洪魁等, 2001), 最终需要将动、静态岩石力学参数进行叠合修正后使用。

本文主要采用地球物理测井法来计算牛蹄塘组页岩的脆性指数, 进而对牛蹄塘组页岩纵向上的脆性特征进行评价。通过声波测井的纵波、横波时差数据计算得到连续深度下的杨氏模量与泊松比分布, 采用弹性参数法计算归一化的杨氏模量和泊松比指数, 并对两者取权值得到脆性指数, 用以表征岩石脆性(Rickman et al., 2008)。相关力学参数与脆性指数计算公式如下:

$$E_d = \frac{\rho_b}{\Delta T_s^2} \left( \frac{3\Delta T_s^2 - 4\Delta T_p^2}{\Delta T_s^2 - \Delta T_p^2} \right) \quad (3)$$

$$\mu_d = \frac{\Delta T_s^2 - 2\Delta T_p^2}{2(\Delta T_s^2 - \Delta T_p^2)} \quad (4)$$

$$E_{Brit} = \frac{E_d - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\mu_{Brit} = \frac{\mu_{max} - \mu_d}{\mu_{max} - \mu_{min}} \times 100\% \quad (6)$$

$$BRIT_e = \frac{E_{Brit} + \mu_{Brit}}{2} \quad (7)$$

式中:  $E_d$ 、 $\mu_d$  分别为基于测井资料计算得到的动态杨氏模量与动态泊松比,  $\rho_b$  为岩石体积密度,  $\Delta T_p$ 、 $\Delta T_s$  分别为测井纵波、横波时差,  $E_{Brit}$ 、 $\mu_{Brit}$  分别为归一化的杨氏模量与泊松比,  $E_{max}$ 、 $E_{min}$  为杨氏模量最大、最小值,  $\mu_{max}$ 、 $\mu_{min}$  为泊松比最大、最小值,  $BRIT_e$  为计算脆性指数。

岩石体积密度  $\rho_b$  与纵波时差  $\Delta T_p$  可由常规测井资料获得, 横波时差  $\Delta T_s$  则需通过阵列声波测井或偶极子声波测井获得, 而出于成本与施工条件考虑, 雪峰地区页岩气探井在施工过程中均选择常规测井, 缺少相应横波时差资料。因此, 本次研究主要采用 Gristensen 建立的纵波、横波时差之间的经验公式, 通过常规测井的纵波时差数据计算得到横波时差数据, 进而完成力学参数与脆性指数的相关计算工作。纵波、横波时差关系式如下:

$$\Delta T_s = \frac{\Delta T_p}{\left[ 1 - 1.15 \frac{\left( \frac{\Delta T_p}{\Delta T_s} \right)^3}{e^{\frac{\Delta T_p}{\Delta T_s}}} \right]^{1.5}} \quad (8)$$

基于常规测井资料, 通过以上方法计算得到湘张地 1 井牛蹄塘组动态杨氏模量( $E_d$ )、动态泊松比( $\mu_d$ )及岩石脆性指数( $BRIT_e$ )纵向上的连续分布数据(图 5), 数据显示, 上部页岩脆性整体高于下部, 且在下部存在一个脆性指数明显降低层段(1935~1976 m), 分别对应较低的杨氏模量与较高的泊松比值。

#### 4 牛蹄塘组页岩脆性的有效性评价

研究区湘张地 1 井牛蹄塘组基于矿物组分与地球物理测井的岩石力学参数法计算的脆性指数在纵向上的分布差异较大, 且无正相关关系(图 5), 矿物组分法得到的脆性指数  $BRIT_{m1}$  与  $BRIT_{m2}$  均反映出牛蹄塘组页岩整体脆性随深度增加而增大, 下部 1900~1998 m 段脆性最好, 而基于测井资料的岩石力学参数法得到的脆性指数  $BRIT_e$  则呈上高下低的分布趋势, 下部页岩段脆性较低。为验证二者的可靠性, 选取该井牛蹄塘组若干不同深度段岩心样品进行单轴压缩力学实验, 通过实验方法获取页岩静态杨氏模量与泊松比等岩石力学参数, 并将其与上述两种方法获得的脆性指数进行对比分析。

单轴力学实验结果显示, 牛蹄塘组页岩静态杨氏模量( $E$ )为 11.9~24.2 GPa, 平均为 19.5 GPa, 静态泊松比( $\mu$ )为 0.13~0.20, 平均为 0.16, 抗压强度为 115.2~178.8 MPa, 平均为 145.5 MPa(表 1)。根据应力-应变关系曲线, 页岩样品应变多小于 0.8, 总体在低应力时表现为弹性, 高应力时表现为短暂塑性即破裂, 弹性变形占比较大, 且多数样品未发生明显塑性变形即发生破裂, 表明页岩整体脆性断裂特征明显(图 6)。此外, 试验后页岩样品以劈裂式破坏为主, 在主裂缝旁形成较多的微裂纹, 也表现出牛蹄塘组较好的整体脆性与可压裂性。

对比岩石力学实验与地球物理测井资料获取的岩石力学参数发现, 两种方法下的杨氏模量并无正相关关系, 泊松比的正相关性也较差, 相关系数仅为 0.228(图 7), 无法对测井计算参数进行叠合校正, 为验证以上关系在整个研究区是否具有普遍性, 选取区内另一口井 JD 井不同深度段的样品进行岩石力学实验, 得到的力学参数与测井数据计算

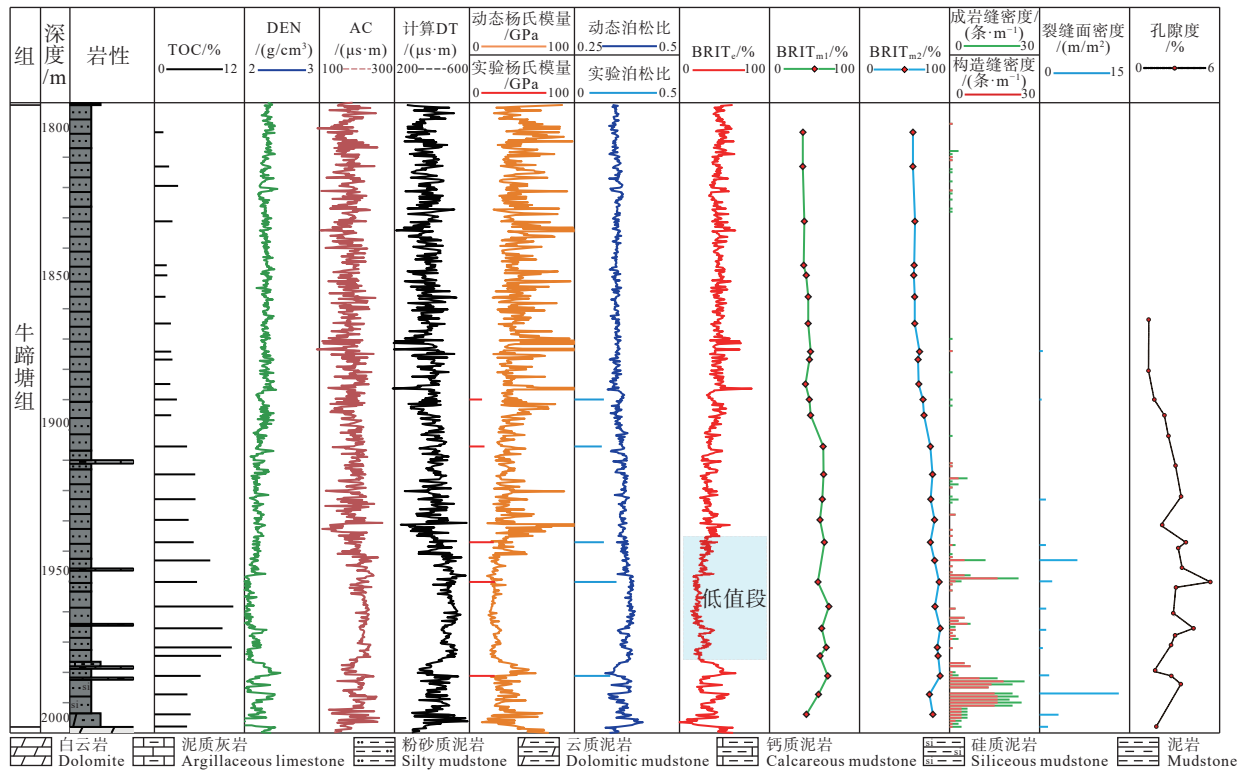


图5 湘张地1井牛蹄塘组岩石力学参数与脆性指数分布

Fig.5 Distribution of rock mechanical parameters and brittleness index of Niutitang Formation in Well XZD-1

表1 岩石单轴压缩实验力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock uniaxial compression test

样号	样品深度/m	所属位置	杨氏模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa
Y14-1	1890.0	上部页岩段	11.9	0.14	143.7
Y19-1	1905.0	上部页岩段	14.4	0.13	120.1
Y20-1	1937.1	下部页岩段	23.0	0.14	169.7
Y23-1	1950.2	下部页岩段	24.2	0.20	115.2
Y26-1	1981.2	下部页岩段	24.0	0.17	178.8

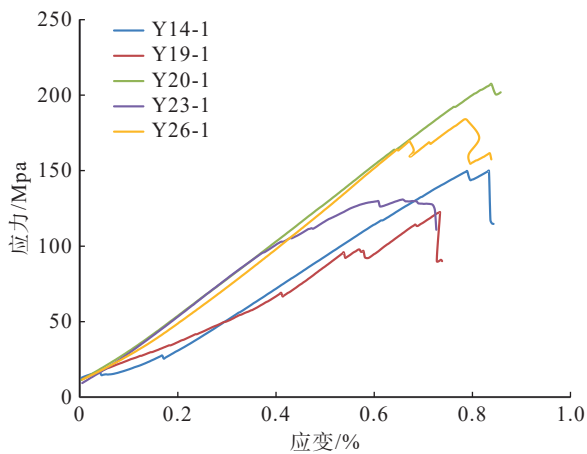


图6 牛蹄塘组页岩试样应力-应变曲线

Fig.6 Stress strain curve of shale samples of Niutitang Formation

的力学参数间亦无明显相关性(图7),因此基于两种岩石力学参数计算的脆性指数存在较大差异。综合分析认为,通过测井数据计算的力学参数与脆性指数在新区应用时需要系统性验证或修正。对于雪峰地区,该方法计算的力学参数与脆性指数主要基于声波时差与岩石密度数据,其与声波及密度曲线具有一定的对应关系,其中,  $E_d$  与声波时差呈负相关关系,而与密度呈正相关,  $\mu_d$  与二者的关系则反之,因此基于该方法的脆性指数  $BRIT_e$  同样与声波时差、密度分别呈负相关与正相关关系。测井声波时差和岩石密度数据均与页岩孔隙度(包含基质孔隙与裂缝孔隙)有直接关系,高孔隙度对应高声波时差与低密度值,样品的常规稳态法孔隙度测试结果显示,湘张地1井牛蹄塘组下部页岩段孔隙



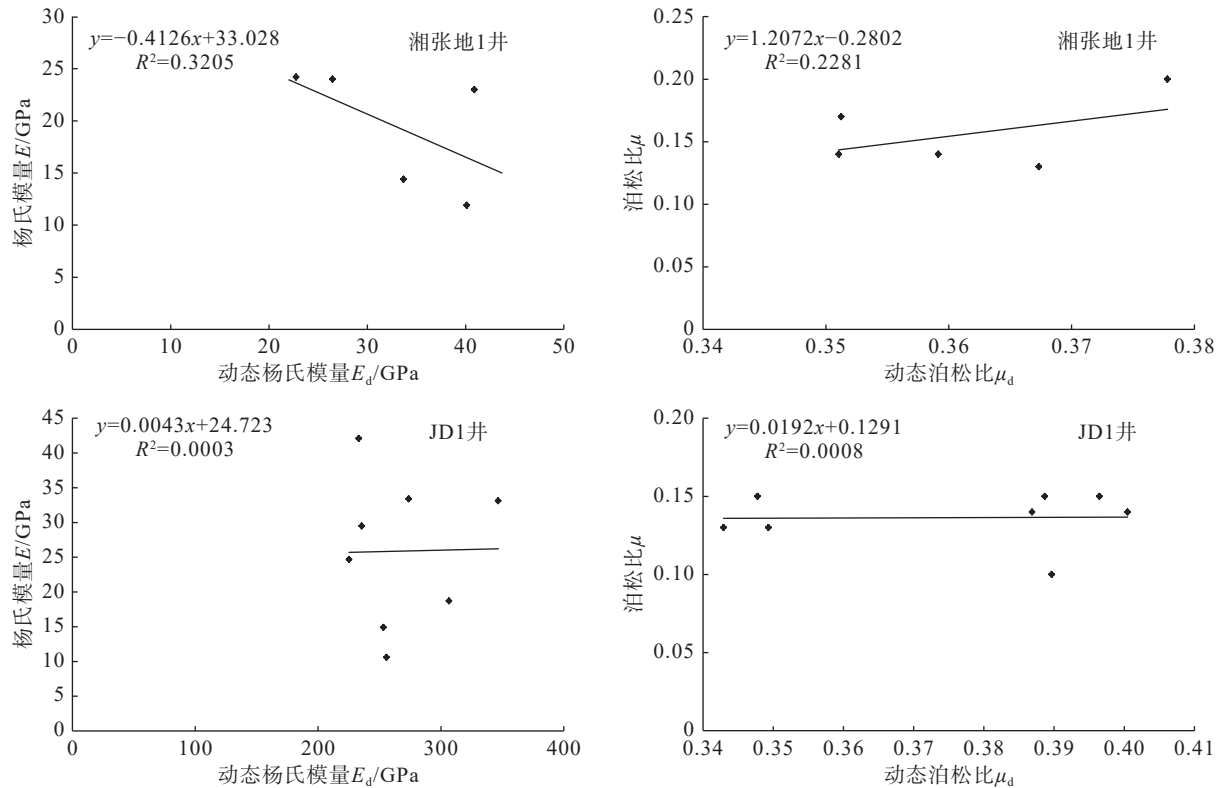


图 7 基于岩石力学实验与测井资料的力学参数关系

Fig.7 Relationship of mechanical parameters based on rock mechanics experiment and logging data

度整体高于上部,下部页岩天然裂缝发育程度也高于上部,这导致下部页岩具有整体较高的声波时差与较低的密度值,进而计算的脆性指数呈现下低上高的分布特征(图 5)。研究表明,在应力作用下脆性较高的页岩更易破裂形成裂缝,天然裂缝的发育程度可作为反映页岩脆性的一个重要因素,牛蹄塘组纵向上裂缝发育特征表明基于测井资料获取的力学参数与脆性指数在该区适用性较低。而矿物组分法对脆性的评价主要基于页岩本身脆性矿物含量,避开了孔隙度与密度在脆性指数计算中的影响,该方法计算的脆性指数  $BRIT_{m1}$  与  $BRIT_{m2}$  与天然裂缝发育程度在纵向上的分布规律相似度高(图 5),说明矿物组分法对于该区湘张地 1 井牛蹄塘组页岩的脆性评价可信度更高。

## 5 页岩脆性的影响因素

岩石脆性为岩石力学性质的综合表现,受多重因素共同影响与控制,岩石本身成分与结构是决定脆性的物质基础,其主要受控于沉积环境和成岩演化作用,沉积环境及物源供应等决定着岩石的矿物

组成、分布及有机质含量等特征,沉积速率、成岩演化作用则控制其基质结构、层理结构及孔隙发育(王玉满等, 2016; 张晨晨等, 2016; 蒲泊伶等, 2020)。此外,温度、压力、构造应力等外因也是影响岩石脆性的重要因素。温度、压力会引起岩石物理性质的变化,其主要受埋深所控制,随深度增加,温度、压力相应增加,岩石会发生由脆性向韧性的转变;构造作用则使岩石发生变形、破裂形成断层与裂缝以及带来地下与地表流体的活动等,进而导致原有岩石力学性质发生改变,影响其脆性。研究区寒武系牛蹄塘组页岩形成时代老、成岩阶段晚、基质物性差、经历多期复杂构造运动,其脆性主要受沉积环境、成岩演化、埋深、构造作用等因素控制。

### 5.1 沉积环境

沉积环境的变化是导致矿物组成差异的重要因素,从而造成了岩石脆性差异。研究区牛蹄塘组主要为深水陆棚—盆地相沉积环境,其沉积时期硅藻、海绵、放射虫等硅质生物爆发,导致生物成因的硅质大量富集,并在低能、缺氧的深水还原环境中得以保存(刘安等, 2013; 王传尚等, 2013; 王玉满等,

2016), 其密集分布, 含量超过了该时期陆源碎屑成因的同类矿物。此外, 该沉积环境下黄铁矿也大量发育, 并伴随方解石、白云石等碳酸盐矿物, 对页岩的脆性起重要控制作用, 导致雪峰地区牛蹄塘组脆性整体较高。然而, 牛蹄塘组沉积时期水深变化起伏较大, 由早期的逐渐上升到后期持续降低(图 8), 岩性变化特征所反映出的岩相组合也较为复杂, 早期深水泥质陆棚、硅质陆棚、混积陆棚微相沉积频繁交替, 并伴随较高的古生产力与较好的生物富集保存条件, 后期水深变化幅度减弱, 沉积环境相对

稳定, 以泥质陆棚微相为主, 古生产力有所降低。沉积环境与水体深度的变化, 导致该区牛蹄塘组自生硅质、黄铁矿、碳酸盐等脆性矿物含量自下而上均呈先升高后降低、整体逐渐降低的变化趋势(图 2), 最终形成下部页岩脆性的特征。

## 5.2 成岩演化

不同成岩演化阶段, 页岩的矿物组成、形态、层理结构及孔裂隙发育等存在差异, 其力学性质有所不同。研究发现, 岩石脆性会随成岩阶段的深入与热演化程度的升高而增大(吴晶晶等, 2018), 这主要

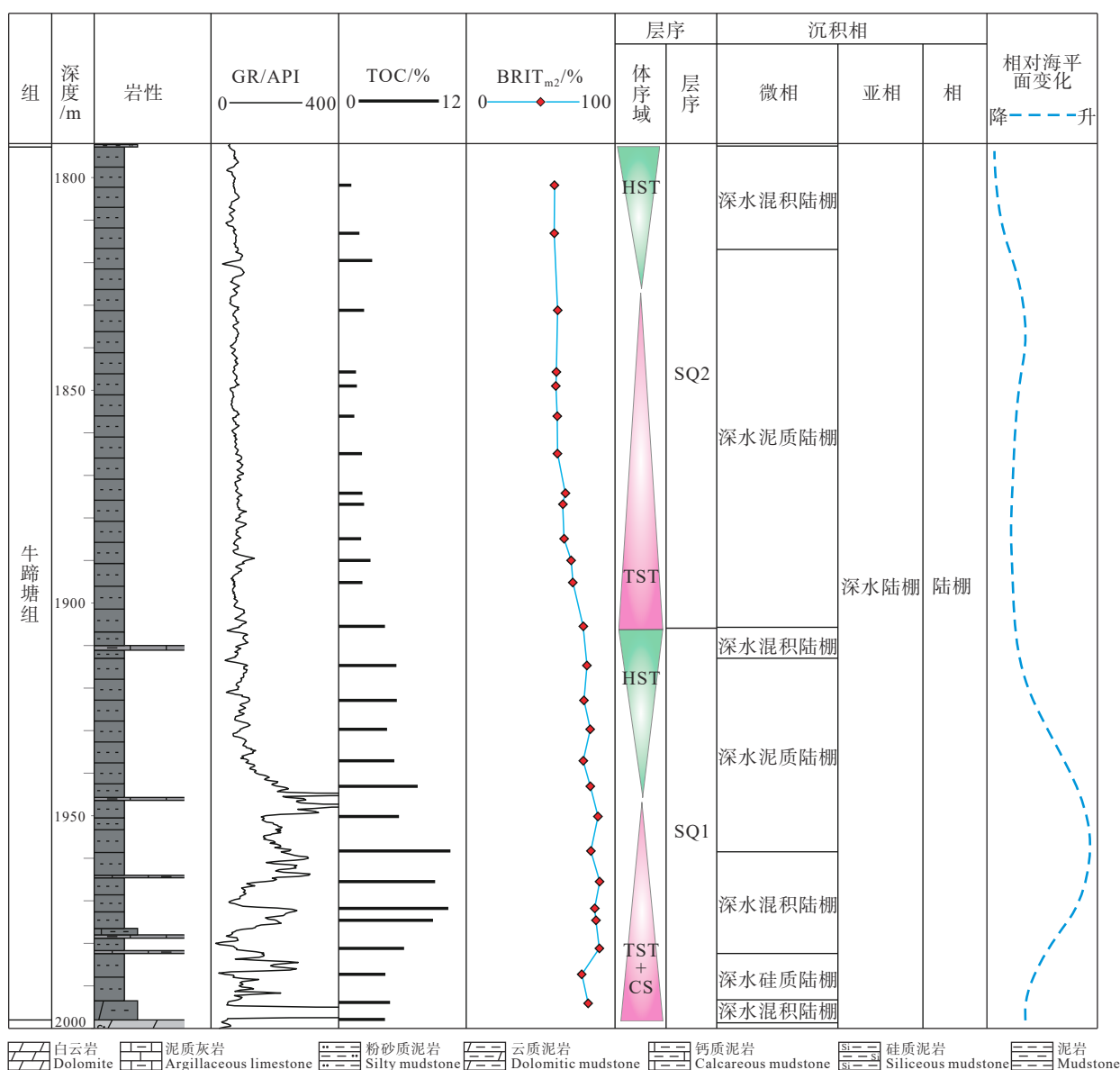


图 8 湘张地 1 井牛蹄塘组沉积环境变化

Fig.8 Sedimentary environment changes of Niutitang Formation in Well XZD-1

是因为随着成岩演化的持续进行, 岩石本身的不稳定矿物会向稳定且更脆的组分转化, 增加了岩石的脆性。此外, 研究区牛蹄塘组页岩有机质含量普遍较高, 有机质在热演化过程中持续的热解或裂解生烃, 导致页岩内部压力不断升高, 当达到或超过岩石破裂压力时, 在其内部会产生大量微孔隙与微裂缝, 使页岩层的力学性质发生改变, 抗压强度下降, 脆性与可压裂性随之增强。有机质镜质体反射率 ( $R_o$ ) 是表征热演化与成岩阶段的关键参数, 雪峰地区牛蹄塘组野外及钻井岩心样品的测试结果显示, 等效镜质体反射率 ( $R_o$ ) 主要为 2.0%~4.0%, 平均为 2.8%, 有机质热演化程度普遍较高, 对应晚成岩阶段。通过对脆性与可压裂性随成岩阶段变化规律的研究发现(吴晶晶等, 2018), 该区牛蹄塘组页岩样品主要集中在脆性与可压裂性整体较高且变化幅度较大的区域, 有利于后期的压裂改造(图 9)。

此外, 页岩的脆性也受层理特征影响, 而层理主要在沉积、成岩作用下形成, 受后期构造作用改造。首先层理面为相对薄弱面, 层理发育的页岩, 其脆性通常会更高; 其次, 层理倾向与倾角对页岩脆性也有一定影响, 受沉积环境与成岩作用控制, 页岩内部矿物趋于平行层理定向排列, 孔隙与裂隙

也有沿层理发育与排列的特性, 这使岩石力学性质存在明显方向性。前人通过研究页岩应力应变曲线各个变化阶段中能量的演化认为, 当页岩层理倾角为  $0^\circ\sim 30^\circ$  时, 其脆性指数变化不明显, 但抗压强度呈现下降趋势; 当层理倾角为  $30^\circ\sim 60^\circ$  时, 脆性大幅升高, 抗压强度持续下降, 当层理倾角超过  $60^\circ$  时, 脆性开始下降, 抗压强度开始上升(张军等, 2017)(图 10)。雪峰地区牛蹄塘组页岩层理产状在平面上变化较大, 但地下一定深度处相对稳定且平缓, 如湘张地 1 井牛蹄塘组页岩层理倾角主要分布在  $8^\circ\sim 15^\circ$ , 层理发育程度也相差不大, 层理造成页岩纵向上的脆性差异较小。

### 5.3 埋深环境

埋深不同会使页岩的脆性产生差异, 其主要体现在对温度与围压的控制, 温度与围压随埋深的增加而升高, 进而带来脆性随深度的变化。围压的升高会导致岩石抗压强度相应增大, 并且抑制岩石内部微裂缝的扩展, 使应力主要集中于少量的主干裂缝之上释放, 对脆性起到一定程度的削弱作用, 也会降低改造缝的复杂程度(李庆辉等, 2012)。通常在低围压条件下页岩破碎程度较大, 破裂形成的裂缝较为复杂, 而高围压下页岩破碎不充分, 形成的

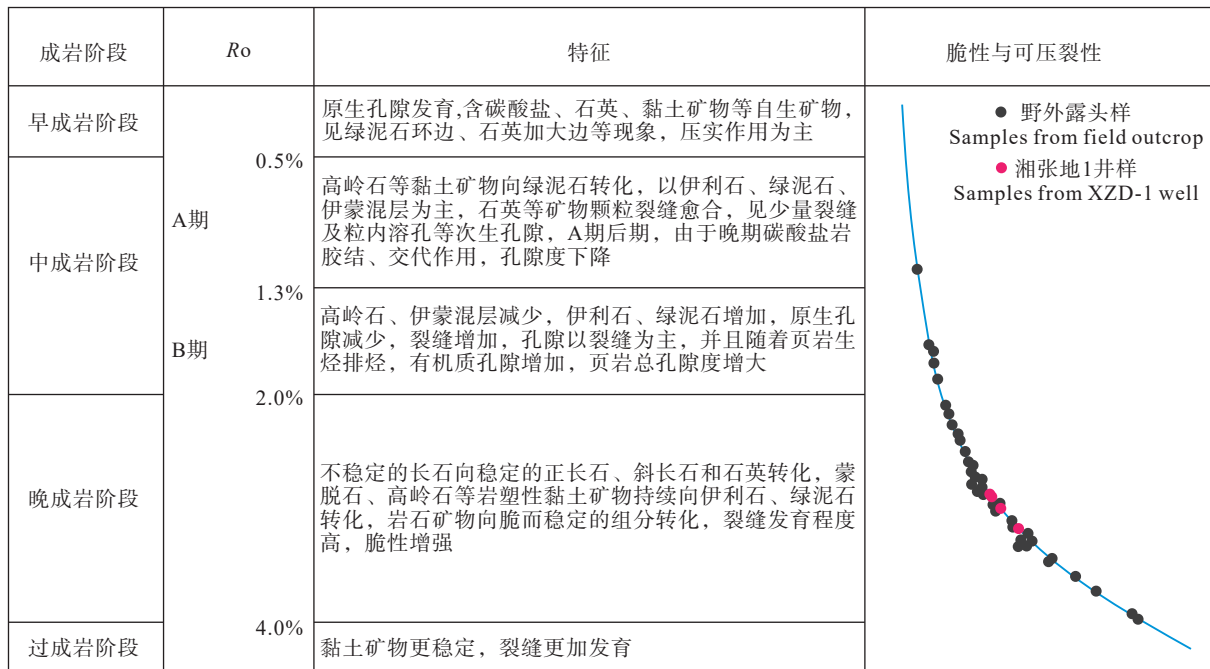


图 9 雪峰地区牛蹄塘组页岩成岩演化阶段特征(据吴晶晶等, 2018 修改)

Fig.9 Characteristics of diagenetic evolution stages of Niutitang Formation shale in Xuefeng region (modified from Wu Jingjing et al., 2018)

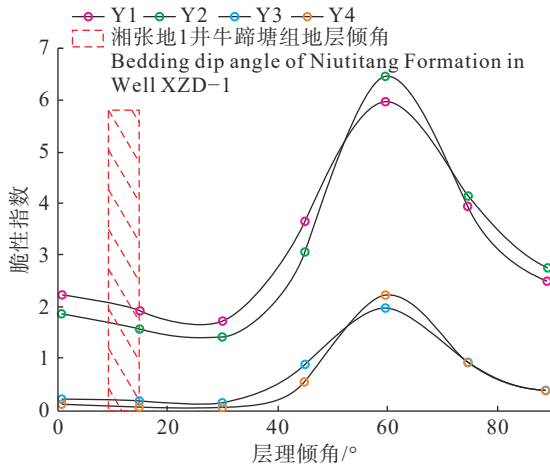


图 10 页岩不同层理倾角与脆性指数关系(据张军等, 2017 修改)

Fig.10 Relationship between different bedding dip angles and brittleness index of shale (modified from Zhang Jun et al., 2017)

裂缝系统较为单一, 裂缝的形成与扩张被限制, 页岩的脆性与可压裂性降低(侯振坤等, 2016)。当围压一定且温度在 200℃ 范围内时, 岩石的泊松比会随温度升高而增大, 杨氏模量则有所降低, 促使岩石发生由脆性向塑性的转变。此外, 研究证明页岩在温度较低时达到抗压极限发生破坏时间较短, 岩样多呈劈裂破坏, 具多缝特征, 而高温时页岩达到抗压极限前塑性变形和剪切破裂较为明显(曾义金等, 2016)。

雪峰地区牛蹄塘组埋深范围主要为 0~4000 m, 由上覆地层产生的围压低于 80 MPa, 地温、压力均具有一定的区域性与纵向性差异, 导致岩石脆性存在相应变化。但对于邻近区或单口井而言, 地温、压力造成的脆性差异不大, 如湘张地 1 井牛蹄塘组埋深 1792.8~1998 m, 由测井资料可知, 其温度分布范围为 50°~60°, 顶底最大温差小于 6°, 且不存在高压地层, 纵向上压差相对较小, 该温度差与压力差对纵向上页岩脆性变化的影响较小, 页岩脆性主要由其他因素所决定。

#### 5.4 构造作用

构造活动对岩石脆性的影响主要表现在 3 个方面: (1) 构造运动易使岩石层发生变形及升降变化, 产状、埋深及构造位置等随之改变, 从而造成区域上岩石脆性的差异。(2) 岩石在构造应力作用下会发生破裂形成断层或裂缝, 并伴生大量微裂隙与微孔隙, 同时, 与成岩作用相关的一些软弱面(层理

等)也会开启, 这些宏观与微观孔裂隙结构破坏了岩石的完整性, 降低了岩石总体的强度, 增强了脆性, 使岩石在后续改造作用下更易形成复杂网状裂缝系统(李庆辉等, 2012; 时贤等, 2014; Gong et al., 2021)。(3) 断层、裂缝的发育会加速地下与地表流体的渗流活动, 导致岩石原有力学性质与脆性发生改变。牛蹄塘组页岩在区域上变形与埋深差异较大, 局部区因剥蚀出露地表或缺失, 同等条件下, 位于构造高部位、地层变形较强的页岩层虽然脆性相对较强, 但其埋深往往较浅, 不利于页岩气的保存, 因此笔者主要考虑具有一定埋深(大于 500 m)且构造相对稳定地区的牛蹄塘组脆性特征。为研究构造运动对单个地区牛蹄塘组脆性的影响, 以湘张地 1 井为例, 该井位于向斜核部, 牛蹄塘组深度范围 1792.8~1998 m, 产状平缓且分布连续(图 1), 页岩脆性差异主要取决于裂缝与孔隙发育情况。通过对岩心、微观薄片及扫描电镜观察发现, 牛蹄塘组纵向上孔缝发育有所差异, 下部页岩的孔缝整体发育程度明显强于上部, 且宏观裂缝发育段对应的微裂缝与微孔隙也相对发育(图 11)。受扫描电镜观察与统计范围限制, 纳米、微米级微裂缝量化难度较大, 本文主要采用岩心上宏观裂缝线密度与微观薄片上裂缝面密度来定量表征天然裂缝发育特征。通过对宏观、微观裂缝密度与脆性指数的相关性分析发现, 牛蹄塘组下部高裂缝发育的页岩段脆性好(图 5), 二者较好的相关性也印证了脆性较高的页岩段在应力作用下更易形成裂缝。此外, 下部页岩中与构造作用相关的孔隙较为发育(如裂缝和断层带附近的碎粒孔), 其对页岩孔隙度贡献较大, 由牛蹄塘组页岩孔隙度与裂缝密度及脆性指数的正相关关系可知(图 5), 孔隙对页岩脆性同样具有一定贡献。

综合各影响因素认为, 稳定的深水陆棚-盆地相的还原沉积环境与晚成岩演化阶段使雪峰地区牛蹄塘组页岩具有整体较高的脆性, 但牛蹄塘组沉积时期水深变化较大、岩相组合复杂, 导致生物成因的硅质、黄铁矿等自生矿物分布极不均匀, 加之裂缝与孔隙发育程度不同的影响, 纵向上脆性存在一定差异, 自下而上大致呈先升高后降低、整体逐渐降低的变化趋势, 下部页岩段同时具有高脆性、高有机质含量、高孔缝发育程度的特征, 为牛蹄

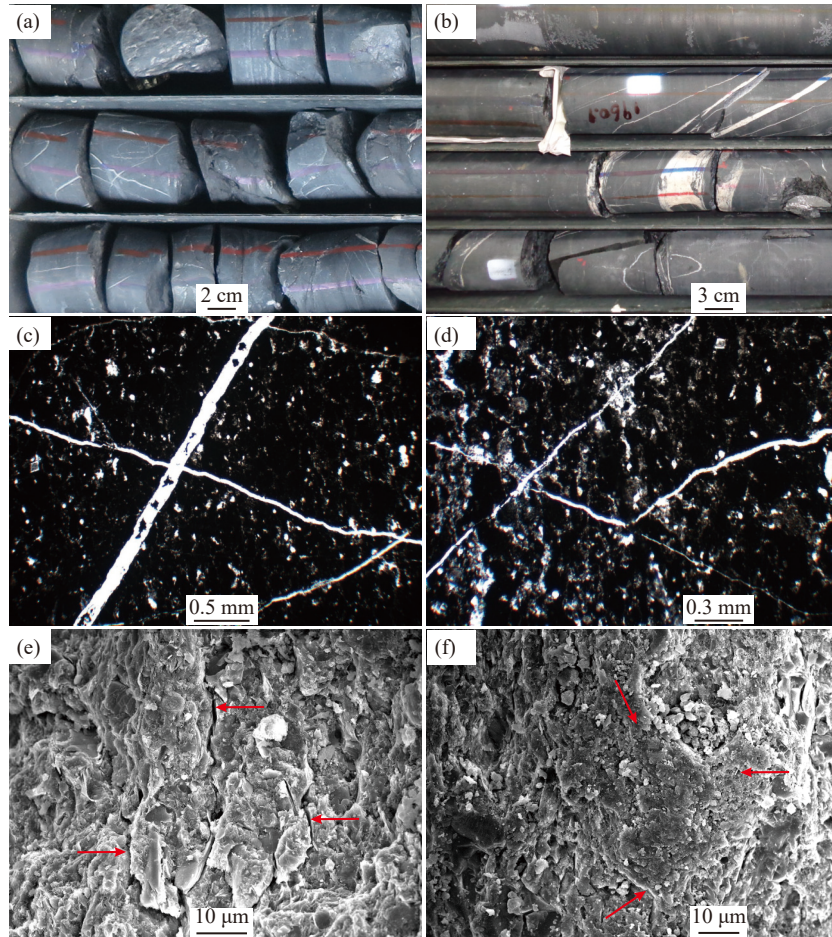


图 11 牛蹄塘组页岩裂缝与孔隙发育特征

a—高角度与低角度构造裂缝, 1990.2 m; b—高角度构造裂缝与低角度成岩缝, 1960.0 m; c、d—岩心裂缝发育段对应的微裂缝, 1990.3 m; e—扫描电镜下的微米级裂缝, 1905.5 m; f—裂缝发育带内的微裂缝与微孔隙, 1974.6 m

Fig.11 Development characteristics of fractures and pores in Niutitang Formation shale

a—High angle and low angle structural fractures, 1990.2 m; b—High angle structural fractures and low angle diagenetic fractures, 1960.0 m; c, d—Microfractures corresponding to the fracture development section of the core, 1990.3 m; e—Micrometer fractures under FE-SEM, 1905.5 m; f—Micro-fractures and micro-pores in the fracture development zone, 1974.6 m

塘组页岩气优质层段。

## 6 讨论

### 6.1 杨氏模量、泊松比在脆性计算中的权重

鉴于矿物组分法脆性评价对湘张地 1 井牛蹄塘组的适用性, 通过基于矿物组分法的脆性指数与单轴压缩实验下的岩石力学参数建立的回归分析发现(图 12), 脆性指数  $BRIT_{m1}$  与杨氏模量  $E$  呈正相关关系, 相关系数为 0.39, 与泊松比  $\mu$  无明显相关性,  $BRIT_{m2}$  与杨氏模量正相关性较好, 相关系数为 0.71, 与泊松比亦呈正相关关系, 未出现其与脆性指数的反比情况, 此外, 对隆起西缘另一口井 JD 井样品进行同样的回归性分析, 结果显示, 脆性指数与

杨氏模量正相关系数高达 0.85, 与泊松比无明显相关性(图 12), 两口井的相似性反映出牛蹄塘组脆性指数与岩石力学参数间的这种相关关系在区内具有一定的普遍性。基于参数的此相关性, 并结合脆性矿物与天然裂缝发育程度对脆性评价的合理性表明, 对于该区牛蹄塘组页岩, 杨氏模量在脆性评价中的权重要高于泊松比, 其对页岩脆性的贡献度更大。此外, 岩石力学参数与脆性指数的相关性也表明, 用基于石英、长石、方解石、白云石和黄铁矿矿物含量的脆性指数  $BRIT_{m2}$  表征与评价页岩脆性要优于  $BRIT_{m1}$ 。

### 6.2 脆性指数、力学参数和 TOC 关系

雪峰地区牛蹄塘组深水陆棚—盆地相沉积环境

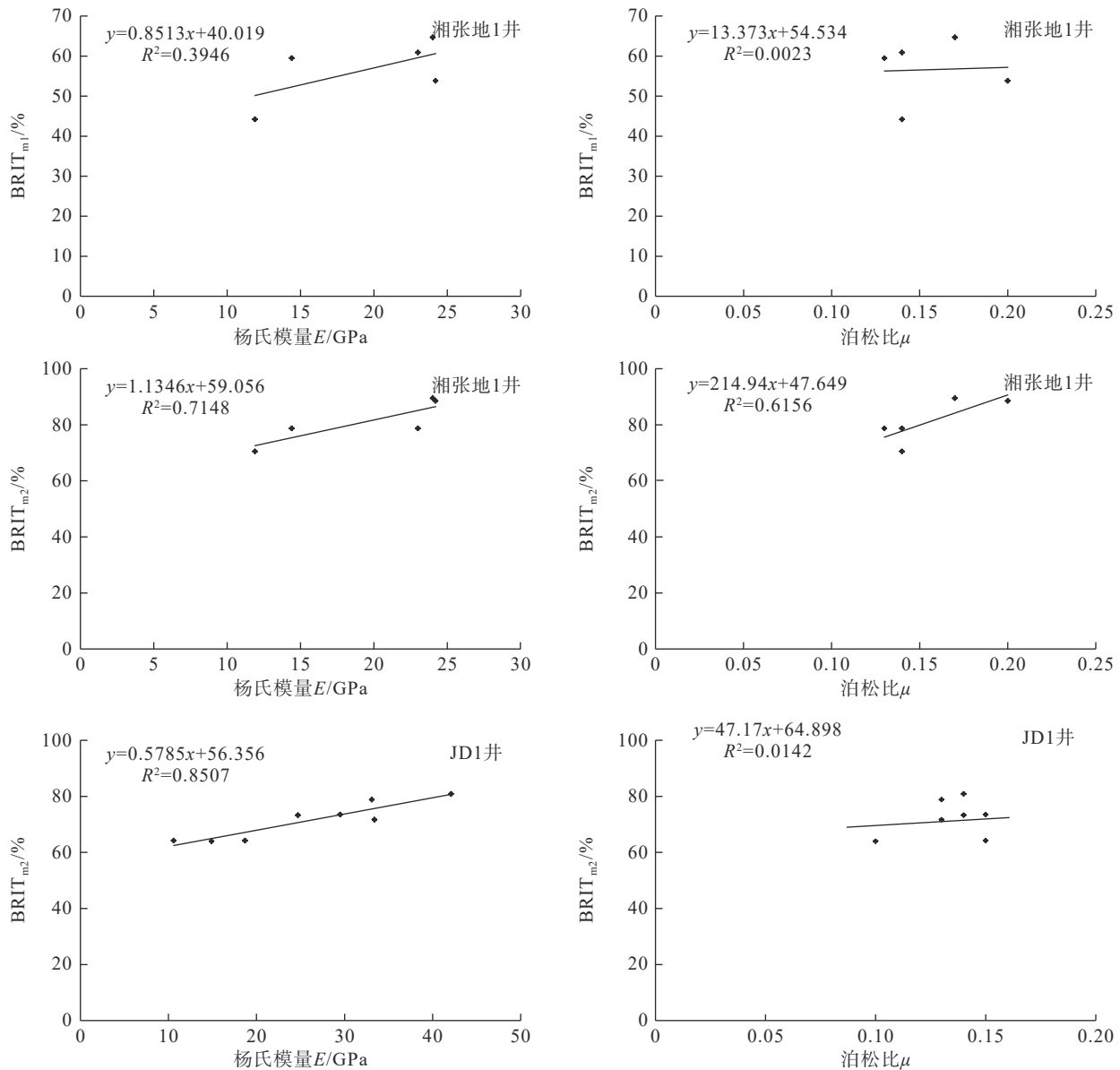


图 12 牛蹄塘组页岩杨氏模量、泊松比与脆性指数关系

Fig.12 Relationship between Young's modulus, Poisson's ratio and brittleness index in Niutitang Formation shale

加之该时期生物的繁盛,使得有机质与生物成因硅质大量富集并有效保存,扫描电镜观察下,牛蹄塘组页岩有机质以沥青质体为主,多与大量石英、长石、黄铁矿等矿物交互共生(图 13),这些与生物有关的矿物多呈隐晶或微晶结构,晶形发育程度不一,雏晶、半自形晶和自形晶均有,硅质含量高,整体分布相对均一,局部成密集条带状或团簇状,在镜下视野范围内,其所占比例较大,尤其是有机质含量高的页岩样品,其含量远超过同类陆源矿物。因此,对于该区牛蹄塘组页岩,有机质含量一定程

度上可指示硅质、黄铁矿等脆性矿物的含量,这在 TOC 与矿物组分法脆性指数之间的正相关关系中也体现,二者相关系数达 0.75(图 14)。一般认为,有机质脆性弱、塑性强,在外力作用下易被压实或发生塑性变形充填矿物粒间孔隙,削弱页岩的脆性,而该区牛蹄塘组下部页岩具有高 TOC、高脆性、高裂缝发育程度特征,反映出与有机质共生或伴生的脆性矿物对页岩脆性的贡献率远大于有机质本身对塑性的贡献率。

此外,由 TOC 与岩石力学参数的趋势线可知,

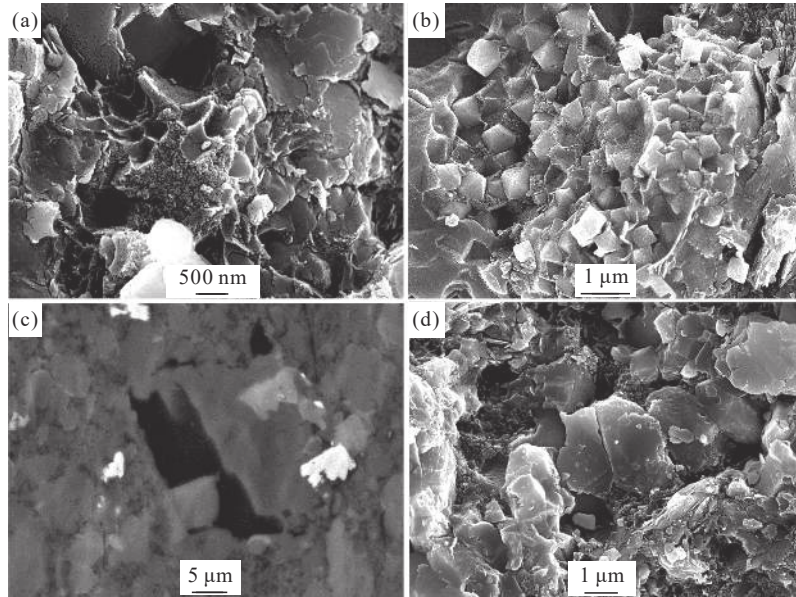


图 13 有机质与自生石英、长石、黄铁矿等矿物共生

a—有机质与石英交互共生, 1905.5 m; b—有机质与黄铁矿共生, 1943.1 m; c—有机质与碳酸盐矿物共生, 1965.5 m; d—有机质与石英、长石、黄铁矿、伊利石共生, 1937.1 m

Fig.13 Organic matter coexists with authigenic quartz, feldspar and pyrite

a—Organic matter coexists with authigenic quartz, 1905.5 m; b—Organic matter coexists with pyrite, 1943.1 m; c—Organic matter coexists with carbonate minerals, 1965.5 m; d—Organic matter coexists with quartz, feldspar, pyrite and illite, 1937.1 m

TOC 与杨氏模量、泊松比均呈正相关关系, 与杨氏模量相关性较好, 相关系数高达 0.89, 而与泊松比的相关性较差(图 15), 这种相关性差异也表明, 生物成因的自生脆性矿物对杨氏模量的贡献大于有机质对泊松比的贡献, 而杨氏模量对页岩脆性的影响大于泊松比, 最终导致页岩的 TOC 越高, 脆性越好。

### 6.3 脆性表征方法的适用性分析

为进一步探究矿物组分与地球物理测井方法对整个研究区牛蹄塘组页岩脆性表征的适用性, 在湘张地 1 井脆性评价的基础上, 分别选取雪峰隆起西缘 JD1 井与东缘 XD1 井进行相应分析(图 16)。

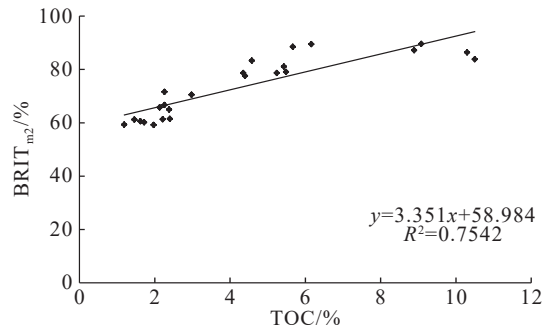


图 14 牛蹄塘组页岩 TOC 与脆性指数关系

Fig.14 Relationship between TOC and brittle index of Niutitang Formation shale

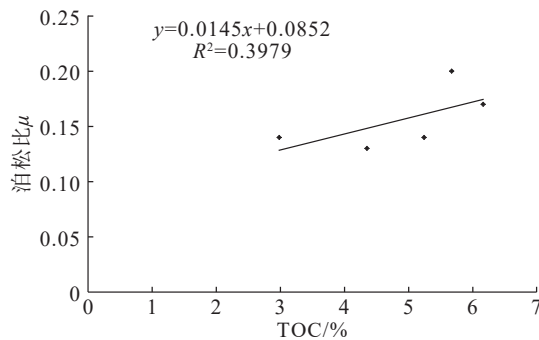
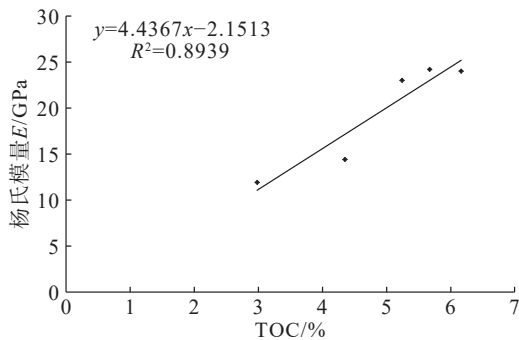


图 15 牛蹄塘组页岩 TOC 与岩石力学参数关系

Fig.15 Relationship between TOC and rock mechanical parameters of Niutitang Formation shale

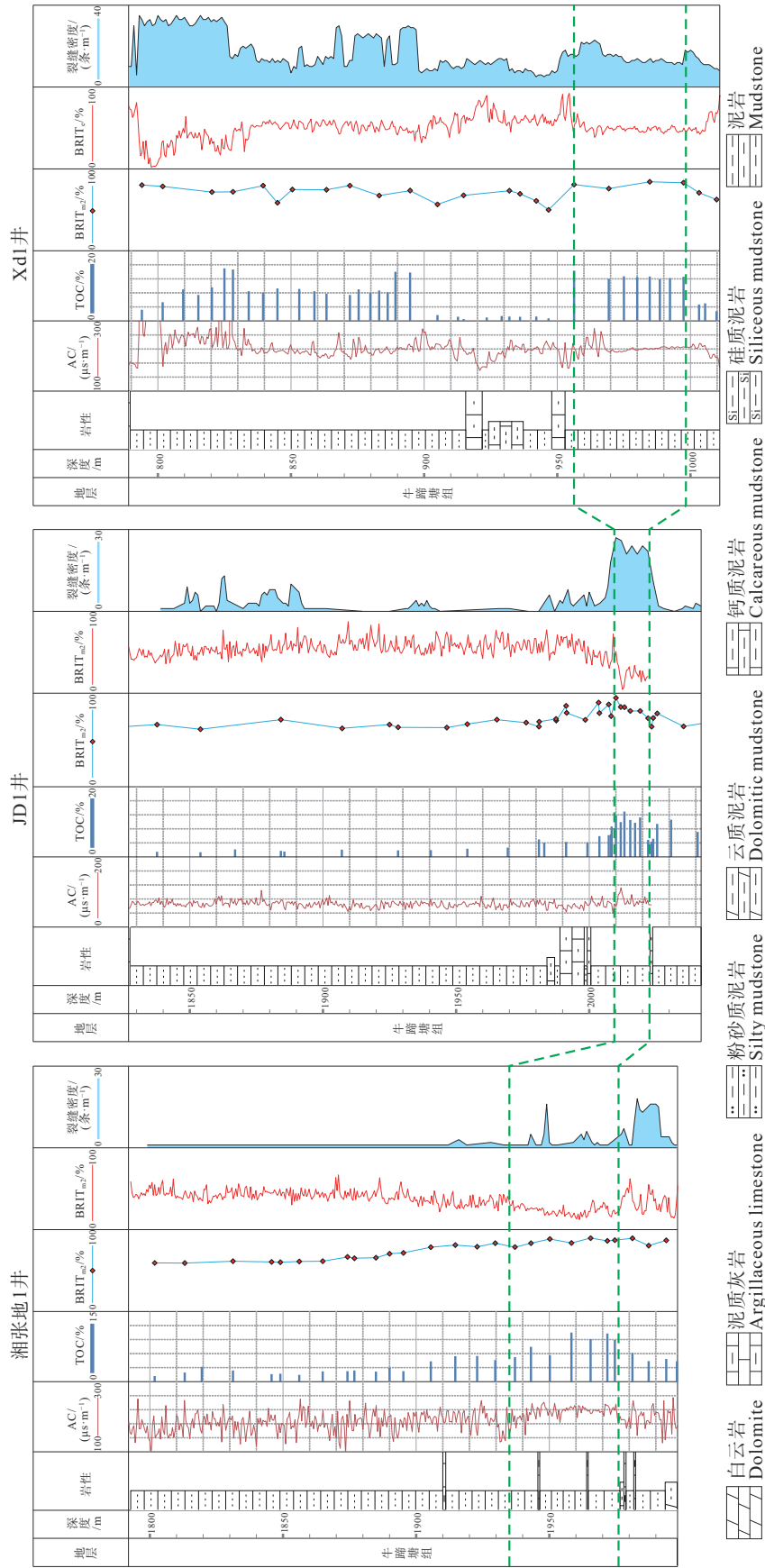


图 16 雪峰地区牛蹄塘组页岩脆性特征的连井分析  
 Fig.16 Continuous well analysis on brittleness of Niutitang Formation shale in Xuefeng region



从分析结果来看,通过两种方法计算得到的脆性指数  $BRIT_{m_2}$  与  $BRIT_c$  在三口井牛蹄塘组纵向上的分布规律大致相似,即下部页岩的脆性指数  $BRIT_{m_2}$  相对较高,而对应的脆性指数  $BRIT_c$  则较低,两者差异较大;同时,与湘张地 1 井情况类似,JD1 井与 XD1 井的  $BRIT_{m_2}$  高值段( $BRIT_c$  低值段)同样对应较高的 TOC 与天然裂缝发育程度,三者之间正相关性较好。综合分析认为,基于矿物组分的脆性指数对雪峰地区寒武系牛蹄塘组页岩的脆性评价具有较好的适用性,且可信度较高,而基于测井声波时差数据计算的脆性指数可靠性较差。此外,雪峰隆起东缘 XD1 井牛蹄塘组的上部也存在一个脆性指数高值段,整体呈现上下部高、中部低的脆性分布特征,对应的 TOC 值与天然裂缝发育程度亦具有相似趋势。不同地区的这种脆性差异可能与沉积环境相关,隆起西缘湘张地 1 井与 JD1 井主要为深水陆棚—棚外斜坡相沉积,而东缘 XD1 井则过渡至盆地相沉积,由西向东沉积水体深度逐渐加大,富硅生物得以更好保存,生物成因的硅质矿物及有机质更为富集。同时,对于隆起东缘的盆地相区,牛蹄塘组中上部地层沉积时期的水体深度有一个由浅变深的显著变化过程,对应的矿物组成与有机质含量也发生较大变化,这在隆起西缘的深水陆棚—斜坡相区表现并不明显,从而导致了脆性指数纵向上的分布趋势差异。

## 7 结 论

(1) 矿物组分法对该区牛蹄塘组页岩的脆性评价较为适用,对湘张地 1 井的脆性评价结果显示:牛蹄塘组页岩脆性整体较高,脆性指数  $BRIT_{m_2}$  为 59.2%~93.8%,平均 74.4%,下部页岩段脆性最好。

(2) 雪峰地区牛蹄塘组页岩脆性受沉积环境、成岩演化、埋深、构造作用等多因素影响。稳定的深水陆棚—盆地相沉积环境与晚成岩演化阶段决定了页岩整体脆性较高,该环境下生物成因的硅质、黄铁矿等脆性矿物较为富集,并受沉积时的水体深度变化影响自下而上呈现先升高后降低、整体逐渐降低的含量趋势,导致页岩脆性及天然裂缝的发育程度具有相似的纵向变化规律。

(3) 岩石力学参数与脆性指数之间的相关性表明,杨氏模量对页岩脆性的贡献度大于泊松比,在

脆性评价中的权重更高。

(4) 牛蹄塘组页岩中生物成因的自生脆性矿物同有机质含量具有良好的正相关关系,其对页岩脆性的贡献大于有机质本身对页岩塑性的贡献,导致高 TOC 页岩段脆性更好。

## References

- Bai Daoyuan, Tang Fenpei, Li Bin, Zeng Guangqian, Li Yinmin, Jiang Wen. 2022. Summary of main mineralization events in Hunan Province[J]. *Geology in China*, 49(1): 151–180 (in Chinese with English abstract).
- Bowker K A. 2007. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. *AAPG Bulletin*, 91(4): 523–533.
- Deng Dafei, Mei Lianfu, Shen Chuanbo, Liu Zhaoqian, Tang Jiguang, Fan Yuanfang. 2014. Major factors of accumulation and destruction mechanisms of marine strata related hydrocarbon in the northern margin of the Jiangnan–Xuefeng Uplift[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(5): 1466–1477 (in Chinese with English abstract).
- Diao Haiyan. 2013. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoir[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3300–3306 (in Chinese with English abstract).
- Fang Dazhi, Zeng Hui, Wang Ning, Zhang Yong. 2015. Study on high production factors of high–pressure shale gas from Haynesville shale gas development data[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 37(2): 58–62 (in Chinese with English abstract).
- Fu Yongqiang, Ma Faming, Zeng Lixin, She Chaoyi, Chen Yan. 2011. Key techniques of experimental evaluation in the fracturing treatment for shale gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 31(4): 51–54 (in Chinese with English abstract).
- Ge Hongkui, Chen Yu, Lin Yingsong. 2001. Microscopic mechanism of difference between static and dynamic elastic parameters of rock[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 25(4): 34–36 (in Chinese with English abstract).
- Gong L, Wang J, Gao S, Fu X F, Liu B, Miao F B, Zhou X P, Meng Q K. 2021. Characterization, controlling factors and evolution of fracture effectiveness in shale oil reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 203: 108655.
- He Jianhua, Ding Wenlong, Wang Zhe, Lan Baofeng, Zhao Jinli, Zhao Dong. 2015. Main controlling factors of fracture network formation of volume fracturing in shale reservoirs and its evaluation method[J]. *Geological Science and Technology Information*, 34(4): 108–118 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zhenkun, Yang Chunhe, Wei Xiang, Wang Lei, Wei Yuanlong, Xu Feng, Wang Hu. 2016. Experimental study on the brittle characteristics of Longmaxi Formation shale[J]. *Journal of China Coal Society*, 41(5): 1188–1196 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yanran, Xiao Zhenghui, Jiao Peng, Qin Mingyan, Yu Ye, Wang Xikai, Cao Taotao. 2018. Comparison of factors for shale gas accumulation in Niutitang formation wells in northwestern Hunan and its implications[J]. *Journal of Central South University (Science*

- and Technology), 49(9): 2240–2248 (in Chinese with English abstract).
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R. 2007. Unconventional shale–gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north–central Texas as one model for thermogenic shale–gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 91(4): 475–499.
- Li Qinghui, Chen Mian, Fred P W, Jin Yan, Li Zhimeng. 2012. Influences of engineering factors on shale gas productivity: A case study from the Haynesville shale gas reservoir in North America[J]. Natural Gas Industry, 32(4): 54–59 (in Chinese with English abstract).
- Liu An, Li Xubing, Wang Chuanshang, Wei Kai, Wang Baozhong. 2013. Analysis of geochemical feature and sediment environment for hydrocarbon source rocks of Cambrian in west Hunan–Hubei Area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 31(6): 1122–1132 (in Chinese with English abstract).
- Mei Lianfu, Deng Dafei, Shen Chuanbo, Liu Zhaoqian. 2012. Tectonic dynamics and marine hydrocarbon accumulation of Jiangnan–Xuefeng uplift[J]. Geological Science and Technology Information, 31(5): 85–93 (in Chinese with English abstract).
- Miao Fengbin, Peng Zhongqin, Wang Chuanshang, Yue Yong, Wang Zongxin. 2019. Gas–bearing capacity and controlling factors of Niutitang Formation Shale in Well XZD–1, western margin of Xuefeng Uplift[J]. Earth Science, 44(11): 3662–3677 (in Chinese with English abstract).
- Miao Fengbin, Peng Zhongqin, Wang Zongxin, Yu Yuning, Ma Yong, Sui Zhiheng. 2020. Development characteristics and major controlling factors of shale fracture in the Lower Cambrian Niutitang Formation, western margin of Xuefeng Uplift[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 39(2): 31–42 (in Chinese with English abstract).
- Peng Zhongqin, Tian Wei, Miao Fengbin, Wang Baozhong, Wang Chuanshang. 2019. Geological features and favorable area prediction of shale gas in Lower Cambrian Niutitang Formation of Xuefeng ancient uplift and its periphery[J]. Earth Science, 44(10): 3512–3528 (in Chinese with English abstract).
- Pu Boling, Dong Dazhong, Wang Fengqin, Wang Yuman, Huang Jinliang. 2020. The effect of sedimentary facies on Longmaxi shale gas in southern Sichuan Basin[J]. Geology in China, 47(1): 111–120 (in Chinese with English abstract).
- Rickman R, Mullen M, Petre J, Grieser W V, Kundert D P. 2008. 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, Colorado, USA.
- Shi Xian, Cheng Yuanfang, Jiang Shu, Cai Dongsheng, Zhang Tao. 2014. Experimental study of microstructure and rock properties of shale samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 33(S2): 3439–3445 (in Chinese with English abstract).
- Tang Ying, Xing Yun, Li Lezhong, Zhang Binhai, Jiang Shixin. 2012. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability[J]. Earth Science Frontiers, 19(5): 356–363 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chuanshang, Zeng Xiongwei, Li Xubing, Liu An, Bai Yunshan. 2013. The classification and correlation of the Cambrian strata in western Xuefeng Mountain area[J]. Geology in China, 40(2): 439–448 (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 Yuman, Wang Shufang, Dong Dazhong, Li, Xinjing, Huang Jinliang, Zhang Chenchen, Guan Quanzhong. 2016. Lithofacies characterization of Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan[J]. Earth Science Frontiers, 23(1): 119–133 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jingjing, Zhang Shaohe, Cao Han, Sun Pinghe. 2018. Fracability evaluation of shale gas reservoir in Lower Cambrian Niutitang Formation, northwestern Hunan[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 49(5): 1160–1168 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yue, Fan Tailiang, Jiang Shu, Li Yifan, Zhang Junpeng, Ding Huaiyu. 2015. Mineralogy and brittleness features of the shale in the Upper Ordovician Wufeng Formation and the Lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 22(4): 59–63 (in Chinese with English abstract).
- Xia Zunyi, Ma Haiyang, Fang Kun. 2019. Rock mechanical properties and fracability of continental shale in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 41(1): 134–141 (in Chinese with English abstract).
- Xu Ganchuan, Zhong Guanghai, Xie Bing, Huang Tianjun. 2014. Petrophysical experiment–based logging evaluation method of shale brittleness[J]. Natural Gas Industry, 34(12): 38–45 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Junliang, Deng Jingen, Zhang Dingyu, Li Dahua, Yan Wei, Chen Chaogang, Cheng Lijun, Chen Zijian. 2013. Fracability evaluation of shale–gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 34(3): 523–527 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Yijin, Chen Zuo, Bian Xiaobing. 2016. Breakthrough in staged fracturing technology for deep shale gas reservoirs in SE Sichuan basin and its implications[J]. Natural Gas Industry, 36(1): 61–67 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chenchen, Wang Yuman, Dong Dazhong, Guan Quanzhong. 2016. Brittleness characteristics of Wufeng–Longmaxi shale in Changning region, Southern Sichuan, China[J]. Natural Gas Geoscience, 27(9): 1629–1639 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jun, Ai Chi, Li Yuwei, Zeng Jia, Qiu Dezhi. 2017. Brittleness evaluation index based on energy variation in the whole process of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(6): 1326–1340 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Pei, Li Xianqing, Sun Jie, Lai Shouning, Fu Tongyang, Su Guiping, Tian Xingwang. 2014. Study on mineral composition and brittleness characteristics of shale gas reservoirs from the Lower Paleozoic in the Southern Sichuan Basin[J]. Geoscience, 28(2):

- 396-403 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Li Jianzhong, Yang Tao, Wang Shufang, Huang Jinliang. 2016. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43(4): 499-510 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Cheng, Qin Qirong, Zhou Jiling, Hu Dongfeng, Wei Zhihong. 2018. Brittleness evaluation of organic-rich shale in Longmaxi Formation in Dingshan Area, southeastern Sichuan[J]. *Geological Science and Technology Information*, 37(4): 167-174 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 柏道远, 唐分配, 李彬, 曾广乾, 李银敏, 姜文. 2022. 湖南省成矿地质事件纲要[J]. *中国地质*, 49(1): 151-180.
- 邓大飞, 梅廉夫, 沈传波, 刘昭茜, 汤济广, 凡元芳. 2014. 江南—雪峰隆起北缘海相油气富集主控因素和破坏机制[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(5): 1466-1477.
- 刁海燕. 2013. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. *岩石学报*, 29(9): 3300-3306.
- 房大志, 曾辉, 王宁, 张勇. 2015. 从 Haynesville 页岩气开发数据研究高压页岩气高产因素[J]. *石油钻采工艺*, 37(2): 58-62.
- 付永强, 马发明, 曾立新, 余朝毅, 陈艳. 2011. 页岩气藏储层压裂实验评价关键技术[J]. *天然气工业*, 31(4): 51-54.
- 葛洪魁, 陈颀, 林英松. 2001. 岩石动态与静态弹性参数差别的微观机理[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 25(4): 34-36.
- 何建华, 丁文龙, 王哲, 蓝宝锋, 赵金利, 赵冬. 2015. 页岩储层体积压裂缝网形成的主控因素及评价方法[J]. *地质科技情报*, 34(4): 108-118.
- 侯振坤, 杨春和, 魏翔, 王磊, 魏元龙, 徐峰, 汪虎. 2016. 龙马溪组页岩脆性特征试验研究[J]. *煤炭学报*, 41(5): 1188-1196.
- 黄俨然, 肖正辉, 焦鹏, 秦明阳, 余焯, 王玺凯, 曹涛涛. 2018. 湘西北牛蹄塘组探井页岩气富集要素的对比和启示[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 49(9): 2240-2248.
- 李庆辉, 陈勉, Fred P Wang, 金衍, 李志猛. 2012. 工程因素对页岩气产量的影响——以北美 Haynesville 页岩气藏为例[J]. *天然气工业*, 32(4): 54-59.
- 刘安, 李旭兵, 王传尚, 危凯, 王保忠. 2013. 湘鄂西寒武系烃源岩地球化学特征与沉积环境分析[J]. *沉积学报*, 31(6): 1122-1132.
- 梅廉夫, 邓大飞, 沈传波, 刘昭茜. 2012. 江南—雪峰隆起构造动力学与海相油气成藏演化[J]. *地质科技情报*, 31(5): 85-93.
- 苗凤彬, 彭中勤, 汪宗欣, 于玉宁, 马勇, 隋志恒. 2020. 雪峰隆起西缘下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征及主控因素[J]. *地质科技通报*, 39(2): 31-42.
- 苗凤彬, 彭中勤, 王传尚, 岳勇, 汪宗欣. 2019. 雪峰隆起西缘湘张地1井牛蹄塘组页岩含气性特征及控制因素[J]. *地球科学*, 44(11): 3662-3677.
- 彭中勤, 田巍, 苗凤彬, 王保忠, 王传尚. 2019. 雪峰古隆起边缘下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏地质特征及有利区预测[J]. *地球科学*, 44(10): 3512-3528.
- 蒲泊伶, 董大忠, 王凤琴, 王玉满, 黄金亮. 2020. 沉积相带对川南龙马溪组页岩气富集的影响[J]. *中国地质*, 47(1): 111-120.
- 时贤, 程远方, 蒋恕, 蔡东升, 张涛. 2014. 页岩微观结构及岩石力学特征实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 33(S2): 3439-3445.
- 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.
- 王传尚, 曾雄伟, 李旭兵, 刘安, 白云山. 2013. 雪峰山西侧地区寒武系地层划分与对比[J]. *中国地质*, 40(2): 439-448.
- 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.
- 王玉满, 王淑芳, 董大忠, 李新景, 黄金亮, 张晨晨, 管全中. 2016. 川南下志留统龙马溪组页岩岩相表征[J]. *地学前缘*, 23(1): 119-133.
- 吴晶晶, 张绍和, 曹函, 孙平贺. 2018. 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气储层可压裂性评价[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 49(5): 1160-1168.
- 伍岳, 樊太亮, 蒋恕, 李一凡, 张俊鹏, 丁怀宇. 2015. 四川盆地南缘上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩矿物组成与脆性特征[J]. *油气地质与采收率*, 22(4): 59-63.
- 夏遵义, 马海洋, 房堃. 2019. 渤海湾盆地沾化凹陷陆相页岩储层岩石力学特征及可压裂性研究[J]. *石油实验地质*, 41(1): 134-141.
- 徐赣川, 钟光海, 谢冰, 黄天俊. 2014. 基于岩石物理实验的页岩脆性测井评价方法[J]. *天然气工业*, 34(12): 38-45.
- 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 李大华, 闫伟, 陈朝刚, 程礼军, 陈子剑. 2013. 页岩气储层可压裂性评价技术[J]. *石油学报*, 34(3): 523-527.
- 曾义金, 陈作, 卞晓冰. 2016. 川东南深层页岩气分段压裂技术的突破与认识[J]. *天然气工业*, 36(1): 61-67.
- 张晨晨, 王玉满, 董大忠, 管全中. 2016. 川南长宁地区五峰组—龙马溪组页岩脆性特征[J]. *天然气地球科学*, 27(9): 1629-1639.
- 张军, 艾池, 李玉伟, 曾佳, 仇德智. 2017. 基于岩石破坏全过程能量演化的脆性评价指数[J]. *岩石力学与工程学报*, 36(6): 1326-1340.
- 赵佩, 李贤庆, 孙杰, 赖守宁, 付铜洋, 苏桂萍, 田兴旺. 2014. 川南地区下古生界页岩气储层矿物组成与脆性特征研究[J]. *现代地质*, 28(2): 396-403.
- 赵文智, 李建忠, 杨涛, 王淑芳, 黄金亮. 2016. 中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义[J]. *石油勘探与开发*, 43(4): 499-510.
- 钟城, 秦启荣, 周吉玲, 胡东风, 魏志红. 2018. 川东南丁山地区龙马溪组富有机质页岩脆性评价[J]. *地质科技情报*, 37(4): 167-174.