

柴达木盆地鱼卡凹陷侏罗系泥页岩地球化学 特征及储集条件 ——以柴页 1 井为例

李浩涵, 任收麦, 郭天旭, 王胜建, 周 志, 徐秋枫

LI Haohan, REN Shoumai, GUO Tianxu, WANG Shengjian, ZHOU Zhi, XU Qiufeng

中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029

Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China

摘要:柴达木盆地北缘鱼卡凹陷发育的侏罗系泥页岩是中国北方陆相页岩气勘探的目的层系之一。为进一步明确鱼卡凹陷侏罗系泥页岩地化-储集条件,系统采集了柴页 1 井泥页岩岩心样品,开展了总有机碳、热解氢指数、镜质体反射率、孔隙度和渗透率、扫描电镜、矿物组成及等温吸附特征实验分析。结果表明,柴页 1 井中侏罗统大煤沟组泥页岩有机质类型和成熟度利于有机质孔隙发育,较高的总有机碳含量利于页岩气富集;粘土矿物的存在虽然抑制了泥页岩微孔隙的发育,但对其吸附能力有促进作用。鱼卡凹陷具有良好的页岩气生成和储集条件,是页岩气勘探的有利地区。

关键词:鱼卡凹陷;页岩气;地球化学;储集条件

中图分类号:P534.52;TE122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2016)02/03-250-10

Li H H, Ren S M, Guo T X, Wang S J, Zhou Z, Xu Q F. Organic geochemistry characteristics and reservoir conditions of Jurassic shale in Yuqia depression of northern Qaidam Basin: A case study of Chaiye-1 well. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(2/3):250-259

Abstract: Yuqia depression in northern Qaidam Basin, as a potential continental shale gas exploration target of Northwest China, is a sedimentary center of Jurassic lacustrine strata with thick dark mudstone and shale layers. Based on such means as the analysis of total organic carbon (TOC), hydrogen index (HI), vitrinite reflectance (R_o), porosity and permeability of shale, scanning electron microscope analysis (SEM), mineral composition and isothermal adsorption features of cores from the well Chaiye-1, the authors investigated natural gas reservoir forming conditions of Yuqia depression. The assessment results show that the organic types and maturity are favorable for the development of organic-matter pores and microfractures. The gas content of Dameigou Formation shale is high because of high TOC content. Clay mineral content has hindered the development of the cracks of the shale but accelerated its adsorption capacity. The shale of the Middle Jurassic Dameigou Formation is thus a significant target of the shale gas exploration in northern Qaidam Basin.

Key words: Yuqia depression; shale gas; geochemistry; reservoir conditions

自页岩气作为一种浅层、低压、易开采的矿物能源得到开发利用以来^[1-2],其理论研究已取得了长足的进步,尤其在区别常规天然气的页岩气储集特征研究方面已发展出多个研究方向^[3-4]。其中,一个

方向是通过有机质特征、矿物特征、物性特征等参数间接描述页岩的储集性能,以不同类型、不同演化程度的有机质及不同矿物类型对微观孔隙的贡献为研究重点;另一个重要方向是通过页岩气储层

收稿日期:2014-12-09;修订日期:2015-07-01

资助项目:中国地质调查局项目(编号:1212011221045、12120113040000)

作者简介:李浩涵(1986-),男,硕士,助理工程师,石油地质学专业。E-mail:akazan@126.com

通讯作者:任收麦(1973-),男,博士,研究员,从事构造地质和页岩气地质研究。E-mail:realshaw@vip.sina.com

宏观、微观的孔缝结构,尤其是纳米级孔隙的体积、空间形态及结构特性直接表征储集能力^[5-8]。因此加强有机质、矿物特征研究,尤其是以有机质孔、矿物成因孔隙为代表的微观孔隙研究,对明确泥页岩中页岩气赋存能力具有重要意义^[9-10]。

就柴达木盆地鱼卡地区侏罗系而言,已有的页岩气地质条件研究多依赖野外地表露头样品,受限于长期风化作用和地表采样方法,所获数据并不能完全真实地反映该地区页岩的地球化学特征和储集条件。笔者以中国西部第一口陆相页岩气参数井——柴页 1 井为依托,首次系统采集了该地区的岩心样品,开展测试分析,在有机质含量、类型、成熟度、矿物组成、微观结构研究的基础上,对柴达木盆地鱼卡地区湖相页岩储集性能影响因素进行了分析,并通过等温吸附实验模拟了该地区泥页岩的含气潜力。

1 区域地质概况

鱼卡凹陷位于柴达木盆地北缘鱼卡-红山断陷带,有效勘探面积约 430km²,区内共发现九龙山背斜、鱼卡背斜、尕秀向斜、鱼卡西部背斜、马海尕秀背斜、路乐河背斜及圆顶山背斜 7 个构造^[11-12]。该区内中生界仅发育侏罗系和白垩系,其中侏罗系为主力页岩层系(图 1)。侏罗系自下而上可划分为小煤沟组、大煤沟组、采石岭组和红水沟组(图 2)。其中下侏罗统小煤沟组为一套河流-三角洲-沼泽-湖泊相灰色砾岩、砂岩、灰黑色泥页岩、炭质页岩、油页岩夹煤层或煤线,与上覆中侏罗统大煤沟组为整合接触,局部地区为不整合接触。中侏罗统大煤沟组岩性主要为灰色、灰绿色、灰黑色泥岩、炭质页岩、黄绿色砂砾岩夹煤层或煤线、菱铁矿层,与下伏小煤沟组为整合接触关系。

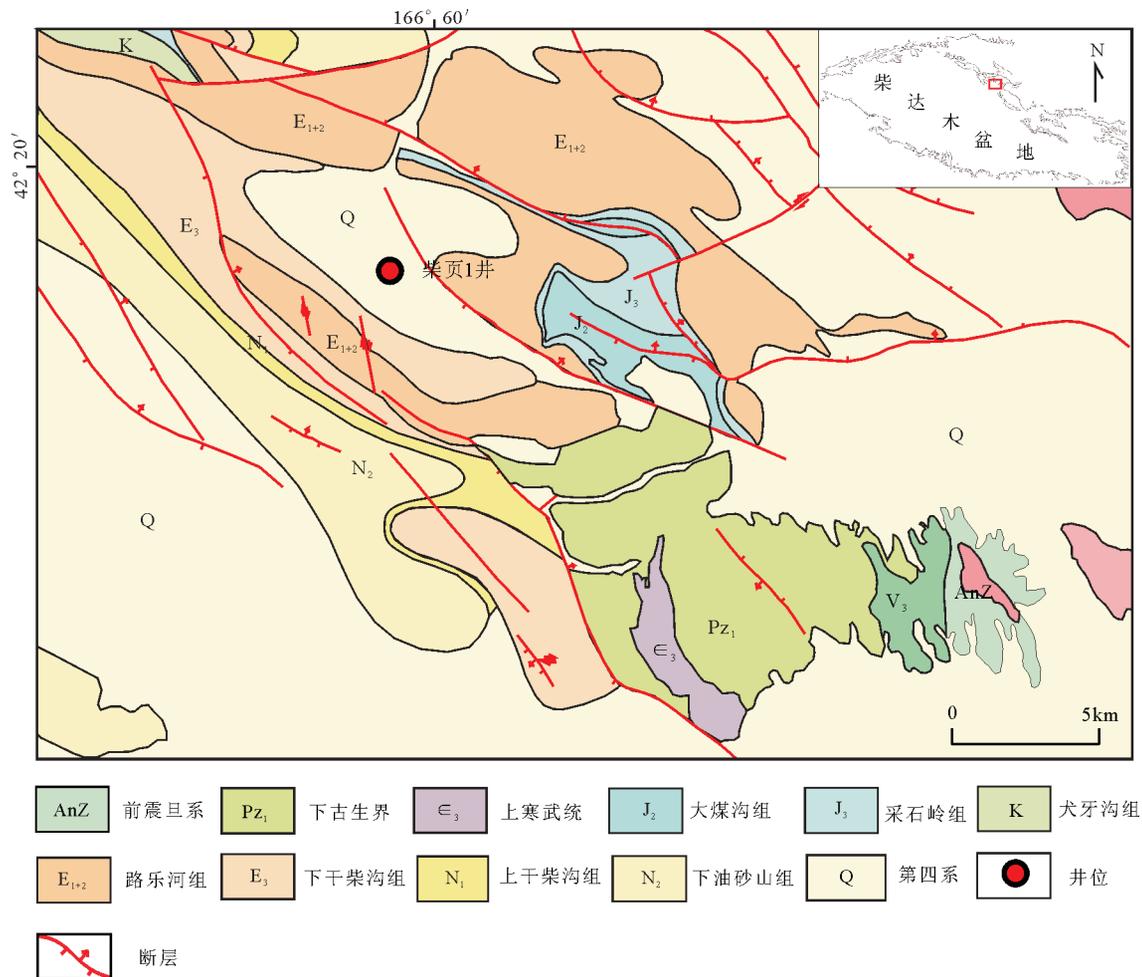


图 1 鱼卡地区地质图

Fig. 1 Geological map of the Yuqia area

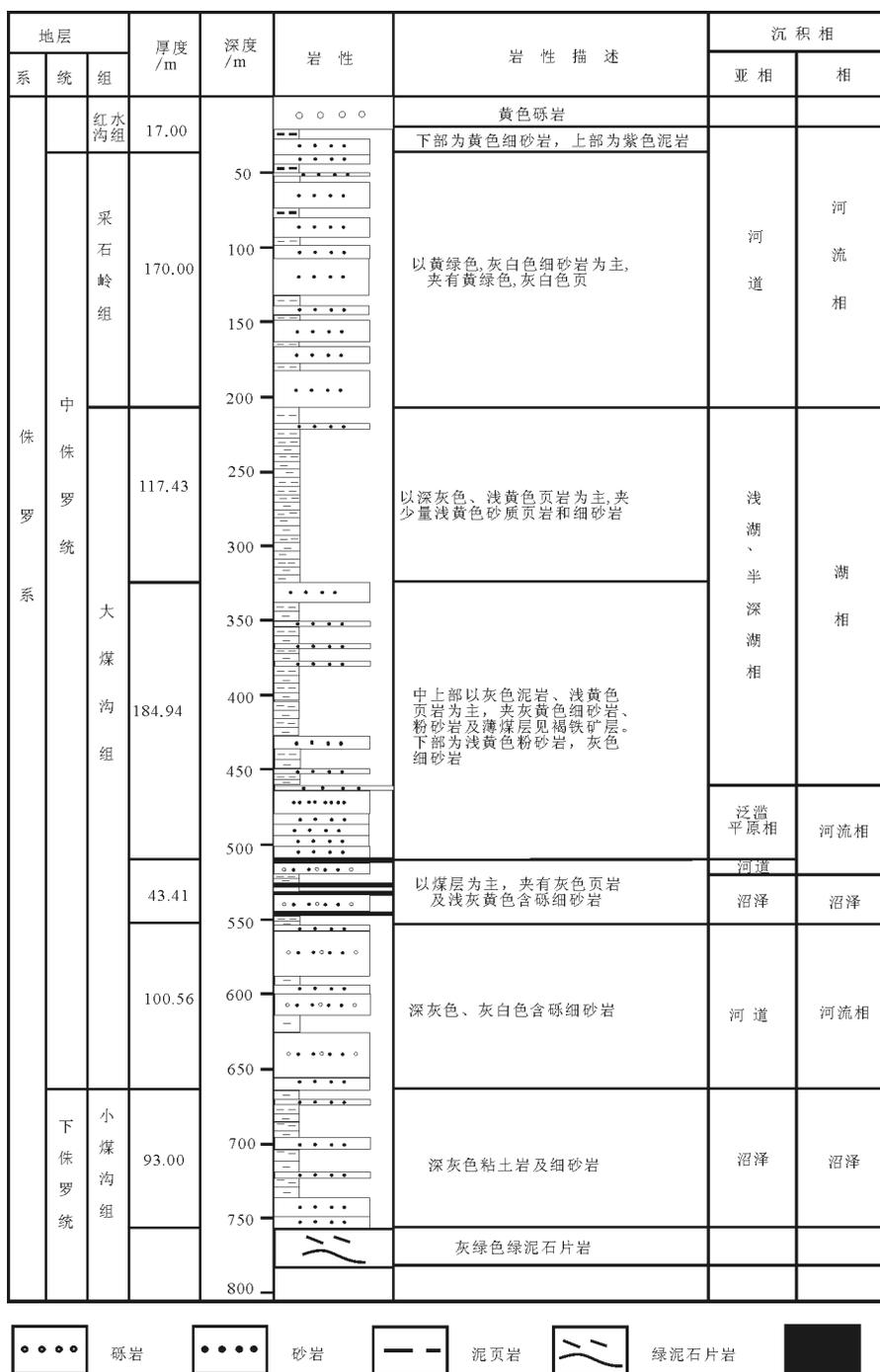


图2 鱼卡地区侏罗系综合柱状图

Fig. 2 Composite columnar section of Jurassic strata in Yuqia area

2 样品采集和测试

柴页1井是针对中侏罗统大煤沟组泥页岩钻探的页岩气参数井,位于鱼卡西部与马海尕秀两构造之间的斜坡部位,斜坡向东南方向抬升,北西方向

平缓(图1)。研究人员采用密闭取心的方式在柴页1井中侏罗统大煤沟组取心136.28m,其中在1900.50~2037.48m井段连续取心133.10m。该段地层岩性以黑色泥页岩、黑色炭质页岩为主,其次为灰黑色粉砂质泥岩、细砂岩,夹薄煤层。页岩呈厚

层状构造,页理发育。

对柴 1 井泥页岩岩心进行了系统分析,共采集样品 108 件。在国家地质实验测试中心对 108 件样品进行了有机地球化学分析,利用 EA2000 型碳硫仪、显微分光光度计、油气工作站分别获得了 TOC、 R_o 、HI 及 T_{max} 数据。在核工业部北京地质研究院利用 Panalytical X'Pert PRO MPD 型 X 衍射仪通过 X-射线衍射方法对 19 件样品进行矿物含量分析,获得了全岩及粘土矿物含量数据;利用 TESCAN-VEGA\LMU 型扫描电子显微镜对 24 件样品开展了电镜扫描,获得了微孔隙照片。在青海油田勘探开发研究院实验中心利用 Ultra Pore-400 型孔隙度测定仪和 DX-07G 型渗透率测定仪对 12 件样品进行物性分析,获得了孔隙度和渗透率数据。在柴页 1 井钻探现场由国家地质实验测试中心 FID 离子火焰检测器测得含气量数据 17 个,由中国地质大学(北京)利用排水取气法测的含气量数据 14 个。在河南理工大学煤及煤层气实验室使用兰德缪尔法对 19 件样品进行了等温吸附实验,获得了等温吸附气量。

3 泥页岩有机地球化学特征

泥页岩中有机质丰度是油气生成的物质基础,

其大小和体积规模决定了页岩气储量的大小。有机质类型是其质量指标,不同类型的原始有机质具有不同的油气生成潜能及孔隙发育程度。成熟度是干酪根演化程度的重要指标参数,影响页岩气的资源潜力^[13]。

3.1 总有机碳含量

TOC 含量与泥页岩的生气率和吸附气量呈正相关关系,进而影响页岩气的资源丰度和资源潜力^[14-15]。在相同的温压条件下,富有机质的页岩较贫有机质的页岩具有更多微孔隙空间,能吸附更多天然气。根据前人研究成果,泥页岩 TOC 达到 0.5% 即可以作为产气页岩的下限,而较为有利的产气页岩 TOC 应大于 2.0%^[16]。

柴页 1 井 108 件泥页岩样品 TOC 值分布在 0.30%~10.0% 之间,绝大部分超过了 0.5% 的产气页岩下限值,其中 58% 的样品的 TOC 大于 2%。总体来看,TOC 含量较高,达到较好烃源岩级别,具有良好的生成页岩气物质基础。纵向上,1920m 以上层段 TOC 含量较低,最高值不到 2.0%,而在 1920~1980m 井段灰黑色炭质泥岩 TOC 为一峰值层段,最高可达 10% 左右(图 3),其对应含气量也较高,最高可达 3.23m³/t,为最有利的页岩气赋存层段。

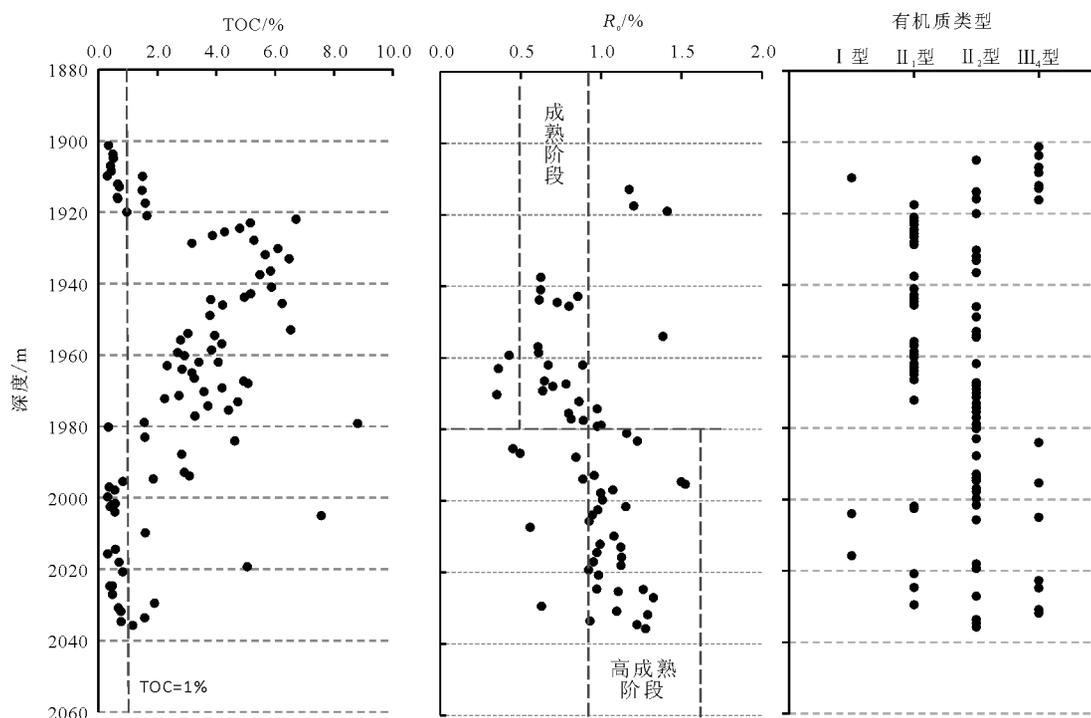


图 3 柴页 1 井地化参数随深度变化

Fig. 3 Distribution of geochemical parameters in the shale of Chaiye-1 well

3.2 有机质类型

根据干酪根类型指数分类标准,柴页1井有机质类型以II₁和II₂型为主(占总样品数的80%以上)(图4),少量为I型或III型,反映了陆相有机质来源。其中,1920m以上层段泥页岩样品II₂和III型均有分布,1920~2000m层段则以II₁和II₂型为主(图3)。现有研究成果也表明,腐泥型有机质在生烃过程中更容易产生微孔隙,具有较好的页岩气吸附能力^[17],可作为良好的页岩气储层。

3.3 有机质成熟度

77件泥页岩岩心样品的 R_o 分布在0.35%~1.52%之间,均值0.92%。纵向上, R_o 随深度加深而明显增大(图3)。在1940m井深, R_o 大于0.5%,考虑到有机质的类型,该层段有机质热演化进入成熟生油阶段;在1980m井深, R_o 大于1.0%,有机质热演化进入高成熟生凝析油气阶段,而II₂型干酪根在该阶段更易生气;最深处 R_o 最高值达1.52%,有机质热演化进入过成熟生湿气阶段。总体上,柴页1井大煤沟组泥页岩有机质处于成熟-高成熟阶段,鉴于柴页1井有机质类型主要以II₁和II₂型为主,因此在1940~1980m层段,有机质利于生油、生气,而在井深大于1980m的层段,热演化程度对天然气生成更为有利。

4 泥页岩储集条件分析

4.1 物性特征

柴页1井侏罗系泥页岩12块样品的物性统计结果表明,其孔隙度分布在0.8%~13.9%之间,平均值2.8%,渗透率分布在 $0.032 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 0.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,绝大多数样品渗透率低于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。相对于致密砂岩气储层的孔渗性能(渗透率小于 $0.1 \times$

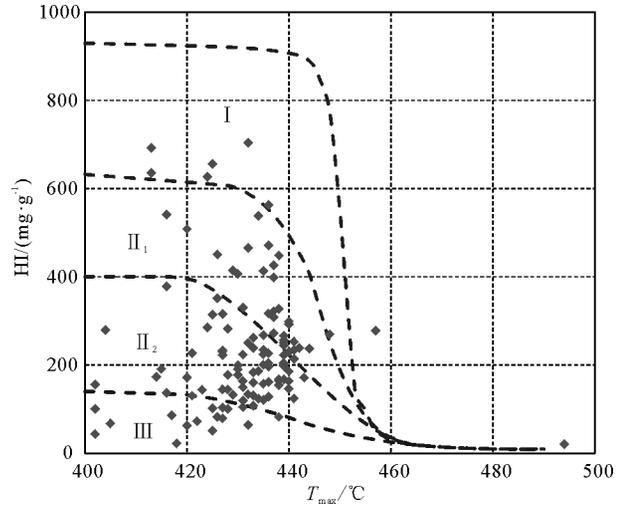


图4 柴页1井有机质类型判别图

Fig. 4 The identification of organic matter type of Chaiye-1 well

$10^{-3} \mu\text{m}^2$)^[18-19],柴达木盆地侏罗系泥页岩表现为较低的孔隙度和渗透率(图5)。

4.2 矿物组成特征

50件泥页岩样品矿物成分X衍射分析结果显示,除个别样品外,粘土矿物含量普遍较高,介于22.1%~82.7%,平均含量达57.1%,其他主要成分为石英(0%~85.6%,平均29.8%)和菱铁矿(0%~23%,9.95%)。部分样品含有少量长石和方解石,极个别样品可检测出黄铁矿和文石(图6)。

粘土矿物含量较高是造成柴页1井页岩样品孔渗性能较差的主要原因。但在部分层段,脆性矿物含量(石英+长石+方解石)也较高,在1990~2040m段平均可达35%左右,对后期的压裂改造形成裂缝较为有利^[20]。

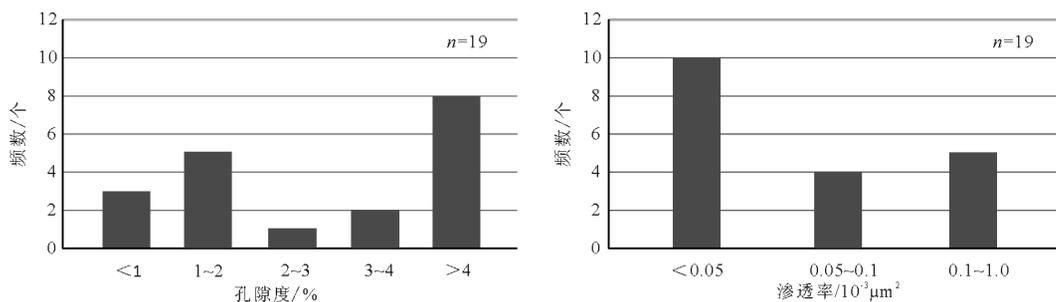


图5 柴页1井孔隙度和渗透率分布直方图

Fig. 5 Frequency distribution of porosity and permeability in the shale of Chaiye-1 well

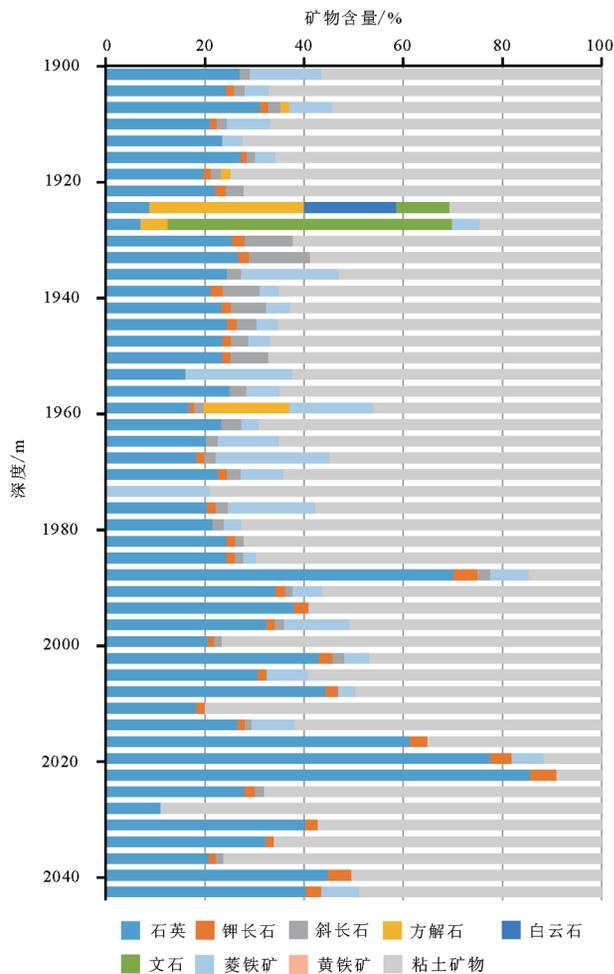


图 6 柴页 1 井泥页岩矿物组成条形图

Fig. 6 Mineral composition and percentage content of Chaiye-1 well

4.3 储集类型

柴页 1 井泥页岩储集空间类型多样,包括构造裂缝、层间页理缝、泥质中的微裂缝和孔隙、有机质孔隙、岩石骨架晶间孔、粘土矿物粒间孔等。

4.3.1 构造裂缝

构造裂缝是由于局部构造作用而形成的裂缝,按发育规模又可分为巨型裂缝、大型裂缝、中型裂缝、小型裂缝和微裂缝^[21]。柴页 1 井以中小型裂缝和微裂缝为主,缝宽 1~5mm,高角度缝长度可达 5~15cm(图 7-a),断面可见相对滑动造成的镜面构造。

4.3.2 层间页理缝

层间页理缝指具剥离线理的平行层纹层面间的孔缝,一般是强水动力条件的产物,由一系列薄层页岩组成,页岩间页理为力学性质薄弱的界



图 7 柴页 1 井裂缝发育特征

Fig. 7 Crack types of Chaiye-1 well

a—黑色炭质泥岩中的裂缝(1972m);b—层间页理缝(1937.5m)

面,极易剥离^[22]。柴页 1 井纹层状粉砂质页岩发育大量顺层的页理缝,缝宽低于 0.3mm,为页岩气富集提供了良好的储集空间(图 7-b)。

4.3.3 微裂缝和孔隙

扫描电镜发现,柴页 1 井泥页岩中的有机质颗粒、骨架矿物、粘土矿物都能发育微裂缝。颗粒内部的微裂缝一般比较平直,缝长 5~20 μm,曲折度较小,少有胶结物充填。颗粒间的微裂缝呈锯齿状弯曲。存在微裂缝的区域,岩石脆性指数较高,易形成微裂缝网络,从而成为页岩中微观尺度上油气渗流的主要通道(图 8-a)。

4.3.4 有机质孔隙

有机质孔是指有机质内的孔隙,主要呈圆形、椭圆形或不规则状,大小在 1 μm 以下^[23],而有机质颗粒间缝隙可达几十微米,一般认为有机质孔主要受热演化程度的控制,随着热演化程度的增加,有机质转化成烃类,从而产生有机质孔^[24-27]。柴页 1 井 1900m 井深处页岩有机质孔隙大量发育,孔径介于 0.1~0.2 μm 之间(图 8-b),有机质颗粒间的缝隙长 5~50 μm 不等(图 8-c)。

4.3.5 岩石骨架晶间孔

柴页 1 井岩石骨架矿物的孔隙主要为菱铁矿、石英等形成的纳米级孔隙,此外还有矿物解理缝、

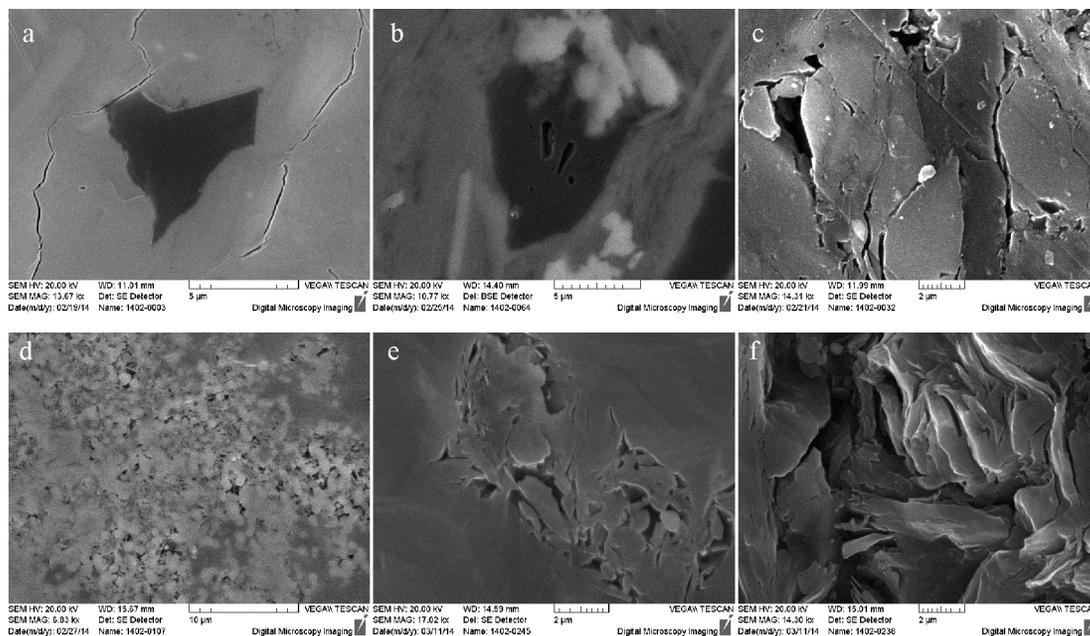


图8 柴页1井典型孔隙类型

Fig. 8 Characteristics of micro-pores in Chaiye-1 well

a—泥质中的微裂缝(1910.0m); b—有机质孔隙(1937.1m); c—块状炭质沥青间的孔隙(1943.8m);
d—矿物骨架间孔隙(1962.1m); e—块状石英颗粒间孔隙(1909.0m); f—片状伊利石间孔隙(1908.5m)

晶间隙、晶内孔等(图8-d,e)。岩石骨架矿物孔隙通常分布较零散,孔隙之间不连通或者连通性较差,其纳米尺度的溶蚀孔、晶间孔、晶间缝等也可作为页岩气的储集空间。

4.3.6 粘土矿物粒间孔

柴页1井样品中粘土矿物以伊蒙混层和高岭石为主,其间发育大量的粒间孔隙(图8-f)。伊利石呈薄层片状或纤维状,片层之间发育明显的狭缝形

孔或楔形孔。纤维状伊利石沿石英表面生长,具有一定的粘土桥连接片体。部分可见多个粘土矿物溶蚀孔呈线状排列,连通有机质孔和矿物质孔,在某种程度上具有微裂缝的作用。

5 含气性分析

5.1 等温吸附能力

等温吸附实验是评价页岩气吸附能力的基础

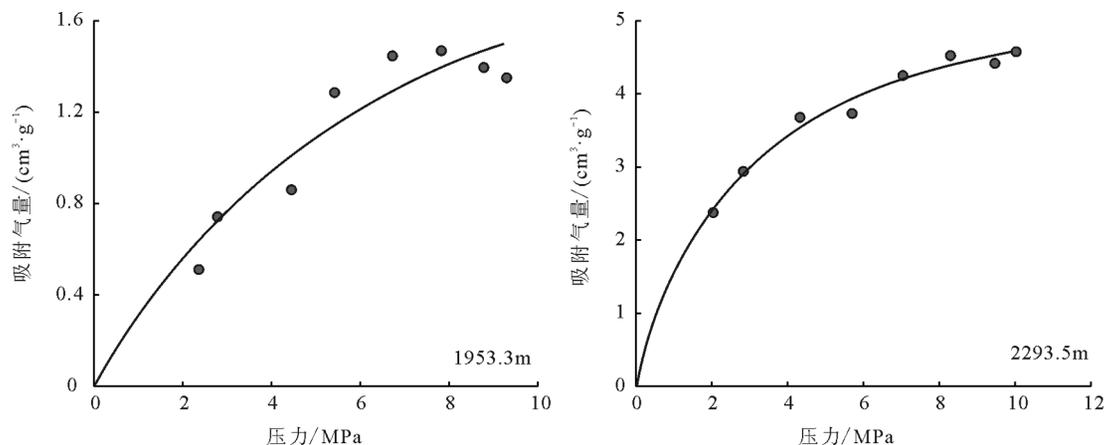


图9 柴页1井泥页岩等温吸附曲线

Fig. 9 Isothermal adsorption curves of shale in Chaiye-1 well

性数据。利用 Langmuir 等温吸附实验方法对柴页 1 井 19 件泥页岩样品的吸附性能进行测定(图 9),得到等温吸附曲线,并根据 Langmuir 公式(1)计算出了等温吸附气量。

Langmuir 模型的数学表达式为:

$$V = \frac{abp}{1 + bp} \quad (1)$$

式中, V 为气体的吸附量(m^3/t); a 为 Langmuir 体积,表示最大吸附量(m^3/t); b 为 Langmuir 结合常数,反映了吸附速率与脱附速率的比值, $b=1/P_L$; P_L 为 Langmuir 压力,表示吸附量为最大吸附量一半时的压力(MPa^{-1}); p 为气体压力(MPa)。

结果表明,该井泥页岩样品吸附气量为 $0.55\sim 5.93\text{m}^3/\text{t}$,平均为 $1.53\text{m}^3/\text{t}$ 。在井深 2293.5m 处时吸附气量达到最大值 $5.93\text{m}^3/\text{t}$,对应的 Langmuir 压力为 2.88MPa ,证明该层段具有较强的页岩气吸附能力(表 1)。

5.2 含气量解析

柴页 1 井在井深 1900.50m 处钻遇目的层大煤沟组,采用密闭取心的方式,在目的层段取心 136.28m,岩心岩性以灰黑色炭质泥页岩为主,夹灰色细砂岩、深灰色泥质粉砂岩、灰白色中砂岩及煤层。利用多种方法对柴页 1 井的密闭岩心进行了现场含气性解析,其中煤层含气量为 $1.78\sim 6.08\text{m}^3/\text{t}$,砂岩含气量为 $0.09\sim 3.79\text{m}^3/\text{t}$,炭质泥岩 $0.13\sim 3.23\text{m}^3/\text{t}$,显示了较好的含气性。

6 讨论

6.1 地球化学特征对含气量的影响

研究表明,有机质孔的发育程度与 TOC 含量、有机质类型和成熟度有关^[25-27]:TOC 越高,有机质孔越发育;当 R_o 达到 0.6% 或以上时,有机质孔隙才开始发育,并随着热演化程度增强而增加^[28]。就柴页 1 井而言,页岩含气量和 TOC 的纵向分布证明了二者的正相关关系(图 11):在 1900~1920m 井段,岩性以深灰色泥岩和浅灰色细砂岩互层为主,孔隙较发育,因此虽然 TOC 值较低,但解析气含量较大;在 1920~2000m 井段,岩性基本以黑色、灰黑色泥页岩为主,较高的 TOC 值对应了较高的含气量,二者呈较明显的正相关性;而在 2000~2040m 井段,较高的含气量是煤层影响的结果。由此说明,在有机质类型以 II₁ 和 II₂ 型为主、III 型为辅的前提下,TOC 越高,泥页岩

表 1 柴页 1 井等温吸附实验数据
Table 1 Data of isothermal adsorption
in Chaiye-1 well

深度/m	吸附气量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	Langmuir 压力/MPa
1925.5	1.79	5.95
1937.5	1.25	2.70
1953.3	2.94	7.94
1954.6	0.68	3.06
1958.6	0.71	6.66
1962	2.07	7.56
1963	2.15	9.02
1965	0.93	2.32
1966.5	1.22	3.94
1967.3	1.07	3.70
1971.4	1.66	8.80
1975.5	1.61	9.02
1987.8	0.57	5.05
1997.82	1.08	9.16
2017.08	1.25	3.65
2018.05	0.84	7.03
2023.68	0.55	5.49
2092.9	1.43	8.83
2293.5	5.93	2.88

的含气量也越高。当深度达到 1940m 后, R_o 达到 0.6%,扫描电镜结果也表明,有机质在 1900m 以深地层进入有机质孔隙大量发育阶段,也正对应了含气量较大的井段,最大含气量达到 $3.23\text{m}^3/\text{t}$ 。

6.2 页岩矿物含量对储集性能的影响

柴页 1 井泥页岩样品表现为较低的孔隙度和渗

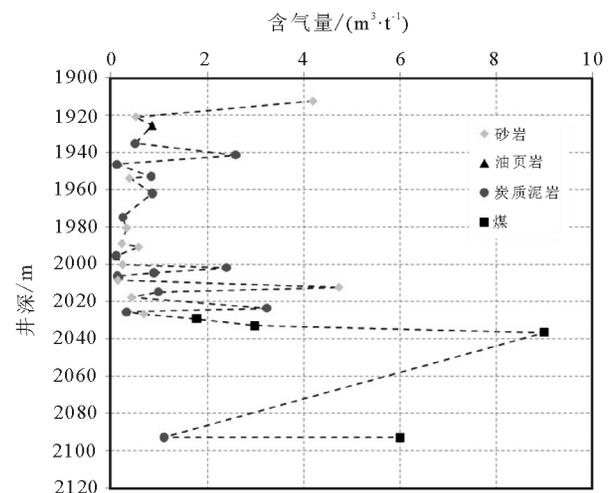


图 10 柴页 1 井页岩气含气量随深度变化
Fig.10 Distribution of shale gas content
in the shale of Chaiye-1 well

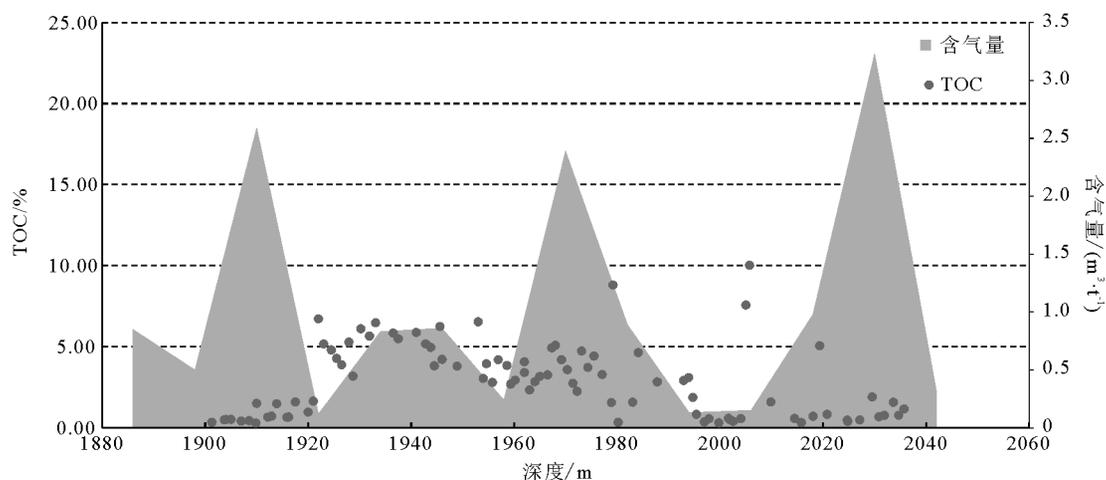


图11 柴页1井TOC与含气量关系

Fig. 11 Gas content versus TOC in various depths of Chaiye-1 well

透率,直接原因是泥页岩中粘土矿物含量较高,影响了泥页岩的脆性。但从另一方面看,较高含量的粘土矿物不但可能增加矿物比表面积,也大大增加了粘土矿物晶间孔隙的体积,虽然不利于游离气的储存,但却增大了泥页岩的吸附能力。据统计,页岩储层中吸附气与游离气占比最为重要,其中吸附气可占总气量的20%~80%^[28-33]。就柴页1井大煤沟组泥页岩而言,当粘土矿物含量低于40%时,样品吸附气量最高仅为1.79m³/t,当粘土矿物含量大于60%时,样品吸附气量普遍较高,最高可达5.93m³/t,证明该地区粘土矿物含量对泥页岩的吸附能力有重要影响。

较美国和中国四川盆地为代表的海相页岩气藏而言,柴达木盆地北缘泥页岩分布规模虽有限,但其暗色泥页岩仍达到相当厚度,较高的有机质含量不但保证了生气的物质基础,适宜的有机质类型和成熟度也使有机质孔隙较为发育,大大提升了泥页岩的含气量。与南方海相泥页岩高脆性矿物含量所不同的是,柴达木盆地北缘泥页岩粘土矿物含量较高,造成脆性较低,但却对页岩吸附性起到了提升的作用,因此认为,柴北缘中侏罗统大煤沟组泥页岩具有较好的勘探潜力。

7 结论

(1)柴北缘鱼卡凹陷柴页1井中侏罗统大煤沟组含炭泥页岩有机质丰度较高,有机质类型以Ⅱ₁和Ⅱ₂型为主,有机质总体上处于成熟-高成熟阶段。

适宜的有机质类型和较高的成熟度有利于有机质孔隙的发育,而其较高的有机质丰度是页岩气富集的物质基础。

(2)柴页1井侏罗统大煤沟组泥页岩中构造裂缝、层间页理缝、泥质微裂缝、有机质孔隙、岩石骨架晶间孔、粘土矿物粒间孔等裂缝孔隙发育,有利于页岩气的储集。

(3)中侏罗统大煤沟组泥页岩孔隙度和渗透率均较低,粘土矿物含量较高是造成其孔渗性能较差的主要原因,但较高的粘土矿物含量也提升了鱼卡地区侏罗系泥页岩的吸附能力。

致谢:感谢青海油田公司勘探开发研究院的甘贵元和赵为永高级工程师在样品采集、测试过程中给予的帮助,感谢中国地质调查局油气资源调查中心包书景研究员在成文过程中给予的指导,对柴页1井钻探现场的各方工作人员一并表示感谢。

参考文献

- [1]Chalmers G R L, Bustin R M, Lower Cretaceous gas shale of North-eastern British Columbia[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2008, 56(1):22-61.
- [2]李新景,胡素云,程克明.北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J].石油勘探与开发,2007,34(4):392-400.
- [3]Nelson R A. Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs: Contributions in Petroleum Geology and Engineering[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985:1-320.
- [4]Chalmers G R, Bustin R M, Power I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and

- field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6):1099-1199.
- [5] Ambrose R J, Hartman R C, Diaz-Campos M, et al. New pore-scale considerations for shale gas in place calculations[C]//SPE 131772, Unconventional Gas Conf., Fed. 23-25, Pittsburgh Pennsylvania, USA, 2010.
- [6] 王玉满, 董大忠, 杨桦, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩储集空间定量表征[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(6): 1348-1356.
- [7] 王杰, 秦建中, 饶丹, 等. 不同类型页岩富集烃气能力模拟实验及微观结构特征研究[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(04): 652-658.
- [8] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [9] 大忠, 邹才能, 李建忠, 等. 页岩气资源潜力与勘探开发前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 324-336.
- [10] 张金川, 边瑞康, 荆铁亚, 等. 页岩气理论研究的基础意义[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 318-323.
- [11] 岳鹏升, 王平, 郁东良, 等. 柴达木盆地北缘下中侏罗统沉积特征及其石油地质意义[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(11): 38-44.
- [12] 汪立群, 罗晓容. 柴达木盆地北缘油气成藏与勘探实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 23-41.
- [13] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale gas system: the mississippian barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [14] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: issue and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [15] Chalmsrs G R, Bustin R M. Lower Cretaceous gas shales of North-eastern British Columbia: geological controls on gas capacity and regional evaluation of a potential resource[C]//AAPG Annual Convention. San Antonio, Texas: AAPG, 2008.
- [16] 陈丽华, 缪昕, 于众. 扫描电镜在地质上的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 45-61.
- [17] 罗小平, 吴飘, 赵建红, 等. 富有机质泥页岩有机质孔隙研究进展[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(1): 50-59.
- [18] Karen E H, Horst Z, Agnes G R, et al. Diagenesis, porosity evolution, and petroleum emplacement in tight gas reservoirs, Taranaki Basin, New Zealand[J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(12): 1003-1025.
- [19] Srevor T M, Harris N B, Elliott W C, et al. Diagenesis of a tight gas sand reservoir: Upper Cretaceous Mesaverde Group, Piceance Basin, Colorado[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 40(4): 48-68.
- [20] Curtis J B. Fractured shale-gas system[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [21] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 219-235.
- [22] 吴元燕, 吴胜和, 蔡正其. 油矿地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [23] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [24] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79: 848-861.
- [25] 王道富, 王玉满, 董大忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩储集空间定量表征[J]. 天然气工业, 2013, 33(07): 1-10.
- [26] 陈尚斌, 夏筱红, 秦勇, 等. 川南富集区龙马溪组页岩气储层孔隙结构分类[J]. 煤炭学报, 2013, 38(05): 760-765.
- [27] 黄振凯, 陈建平, 薛海涛, 等. 松辽盆地白垩系青山口组泥页岩孔隙结构特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 58-65.
- [28] Bustin R M. Gas shale tapped for Big Play[J]. AAPG, 2005, 26(2): 5-7.
- [29] 张雪芬, 陆现彩, 张林晔, 等. 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J]. 地球科学进展, 2010, 25(6): 597-602.
- [30] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [31] Lu X C, Li F C, Watson A T. Adsorption measurements in Devonian shales[J]. Fuel, 1995, 74: 599-603.
- [32] 徐国盛, 张震, 罗小平, 等. 湘中和湘东南坳陷上古生界泥页岩含气性及其影响因素[J]. 成都理工大学学报, 2013, 40(5): 577-587.
- [33] Curtis J B. Fractured Shale-gas Systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.