

您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

移动扫码阅读

贾立龙,舒建生,姜在炳,等.黔西海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征研究[J].煤炭科学技术,2021,49(10):201-207. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.10.027

JIA Lilong, SHU Jiansheng, JIANG Zaibing, *et al*. Study on formation conditions and reservoir characteristics of marine-terrigenous facies coal measures shale gas in western Guizhou[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10):201-207. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.10.027

黔西海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征研究

贾立龙,舒建生,姜在炳,张东亮,王 博,杜天林,朱文侠
(中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077)

摘 要:为深入研究黔西海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征,针对毕节大方背斜区域的龙潭组富有机质泥页岩,采用了总有机碳质量分数(TOC)、镜质体反射率(R_o)、岩石热解、X-射线衍射、薄片鉴定、高压压汞、比表面积及联合孔径等测试分析方法,研究了海陆过渡相龙潭组富有机质泥页岩的有机质特征、矿物组成及孔隙发育特征。研究结果表明:该区龙潭组泥页岩单层厚度薄(平均1.8~2.8 m),与煤层频繁互层,累计厚度大,泥地比平均达 70%;泥页岩有机碳质量分数较高(0.23%~22.10%,平均 3.51%,主要分布 1%~7%);有机质热演化程度高,均处于过成熟阶段(R_o为2.67%~3.06%,平均 2.85%),生气充分;较高的有机质丰度、较充分的生气过程为页岩气成藏提供了有利基础;矿物组成主要由黏土构成(48.4%~81.6%,平均 66.3%),次为石英(7.4%~27.2%,平均16.5%),方解石、白云石、菱铁矿、黄铁矿等矿物质量分数较少,总体为 2%~7%;黏土矿物以伊/蒙混层为主(73.0%~94.0%,平均 85.1%),绿泥石次之(2.0%~23.0%,平均 10.5%),含少量伊利石(1.0%~7.0%,平均3.5%),部分样品含极少量高岭石,脆性指数平均 27%,天然裂隙发育及人工造缝扩展条件较同区海相页岩差;区内龙潭组泥页岩表现出典型的低孔、低渗特征,有效孔隙度平均3.66%,渗透率平均 0.005 6×10^{-3} μm^2,孔隙度与黏土质量分数表现出正相关关系,与脆性矿物质量分数之间则表现出负相关关系;泥页岩孔隙为开放型纳米级孔隙,其中介孔提供了泥页岩主要的孔隙空间和表面积,孔容平均 0.019 88 cm^3/g,孔表面积平均 10.861 31 m^2/g,为页岩气吸附、储集提供了有利条件。

关键词:海陆过渡相;煤系页岩气;有机质特征; 成藏条件;储层特征
中图分类号:TE122 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2021)10-0201-07

Study on formation conditions and reservoir characteristics of marine-terrigenous facies coal measures shale gas in western Guizhou

JIA Lilong, SHU Jiansheng, JIANG Zaibing, ZHANG Dongliang, WANG Bo, DU Tianlin, ZHU Wenxia
(1.*Xi'an Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an* 710077, *China*)

Abstract: In order to intensive study on formation conditions and reservoir characteristics of marine-terrigenous facies coal measures shale gas, a variety of test and analysis were carried out on the shale of Longtan Formation in Dafang anticline area of Western Guizhou, including total organic carbon content(TOC), vitrinite reflectivity(R_o), rock-eval pyrolysis, X-ray diffraction, thin section identification, mercury intrusion porosimetry, analysis of surface area and pore size distribution. The results show that the thickness of the shale is thin (1.8~2.8 m on average), and it is frequently interbedded with the coal seam. But the cumulative thickness is large, and the mud land ratio is more than 70% on average. The shale has a high organic carbon content(0.23%~22.10%, 3.51% on average, mainly distributed in 1%~7%), organic matter type is Ⅲ. Vitrinite reflectivity(R_o) is 2.67%~3.06%, 2.85% on average, which mean they are in the over mature stage and organic matter gas is relatively sufficient. High organic matter abundance and sufficient gas generation process provide favorable basis for shale gas accumulation. Shale is mainly composed of clay minerals(48.4%~81.6%, 66.3% on average), which are mainly composed of illite/smectite interstratified clay(73.0%~94.0%, 85.1% on average), followed by chlorite(2.0%~23.0%, 10.5% on average), with a

收稿日期:2021-04-18;**责任编辑**:曾康生
基金项目:陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2021JQ-234);中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2018XAYMS05)
作者简介:贾立龙(1987—),男,宁夏青铜峡人,助理研究员,硕士。E-mail:jialilong@126.com

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

small amount of illite(1.0%~7.0%,3.5% on average),and some samples contain only tiny amounts of kaolinite. Quartz content distribution is next(7.4%~27.2%,16.5% on average). The content of calcite,dolomite,siderite,pyrite and other minerals are less,which are generally in the range of 2%~7%.The average brittleness index is 27%.which mean the conditions of natural fracture development and artificial fracture expansion are worse than that of marine shale in this area. The shale of Longtan Formation in the area shows typical characteristics of low porosity and permeability. It's average effective porosity is 3.66% and permeability is 0.005 6×10^{-3} μm^2.Porosity has a positive correlation with clay content,while brittle mineral content has a negative correlation. The pores of shale are open nanoscale pores,among which the mesopores provide the main pore space and surface area of shale,with an average pore volume of 0.019 88 cm^3/g and an average pore surface area of 10.861 31 m^2/g. Mesopores provide favorable conditions for shale gas adsorption and storage.

Key words:marine-terrigenous facies; coal measures shale gas; organic characteristics; formation conditions; reservoir characteristics

0　引　　言

我国页岩气资源发育于海相页岩、陆相页岩以及海陆过渡相页岩中[1],广泛分布于南方、华北—东北和西北地区[2]。其中,南方地区是当前我国页岩气研究、开发的重点地区,主要发育下寒武统、下志留统、下泥盆统海相页岩,石炭—二叠系海陆过渡相页岩,以及古生界陆相富有机质页岩[2]。以往对于南方地区页岩气的研究主要集中于上奥陶统五峰组(O_3w)—下志留统龙马溪组(S_1l)海相页岩气,取得了丰富的成果,并在四川盆地成功实现了商业性开发[3]。但在海相页岩气取得突破的同时,对于海陆过渡相煤系非常规天然气研究仍以煤层气为主,页岩气的研究则相对缺乏[4]。二叠系龙潭组作为西南地区最重要的含煤地层,除煤层群蕴含丰富的煤层气资源外,广泛发育的富有机质泥页岩提供了另外可能的天然气资源,与煤层气共同构成了潜在的煤系气藏[1-2]。

近年来在川黔滇湘地区,针对龙潭组煤系气进行了初步探索研究,在泥页岩层位获得了不同程度的气显示[4-9],尤其在六盘水都格获得了突破[10](杨煤参 1 井煤-泥岩合压共采获得稳定工业气流),显示了贵州省龙潭组页岩气良好的资源前景。煤系页岩受到成煤环境控制,具备较强的非均质性特征,系统研究其赋存的地质特征是实现后期开发的重要基础。针对海陆过渡相煤系页岩气研究相对不足的情况,面向黔西地区含煤地层龙潭组所蕴含的非常规天然气资源,选取毕节大方背斜区域龙潭组海陆过渡相煤系泥页岩,采用总有机碳质量分数(TOC)、镜质体反射率(R_o)、岩石热解、X 射线衍射、铸体薄片、高压压汞、比表面积及联合孔径(氮气吸附)等分析手段,对龙潭组页岩气成藏条件和储层特征进行了研究,作为煤系气资源综合研究的补充,为本区龙潭组煤系气综合探查与开发提供借鉴。

1　区域地质概况

黔西毕节大方地区在区域上属于黔中隆起,自寒武世晚期开始至二叠世无造山运动[4,11],基本处于稳定构造环境,断层、褶皱发育。研究区所处的大方背斜定型于燕山运动,总体为北北东向褶皱。区内地层沉积主要受频繁的海进、海退影响,从中奥陶世至中晚石炭世隆起为陆导致地层缺失沉积,晚古生代晚期至中生代早期接受沉积后,中生代晚期的白垩纪、新近纪又一次上升为陆,缺失沉积。二叠系地层在区内大面积出露,地层由老到新依次为茅口组(P_1m)、峨眉山玄武岩组($P_2\beta$)、龙潭组(P_2l)、长兴组/大隆组(P_2c/P_2d)。龙潭组是贵州省主要含煤地层,为一套海陆交互相、多旋回沉积组成的含煤岩系,地层岩性组合由灰~深灰、灰黑色泥岩、砂质泥岩、炭质泥岩,灰色、深灰色粉砂岩,煤层群及少量灰色、褐灰色细砂岩构成。该区该组地层厚度 190~300 m,平均约 230 m;发育煤层 16~36 层,累计厚度平均约 19 m;(砂质、碳质)泥岩累计厚度大,平均 160 m,泥地比平均高达 70%。不同于海相页岩单层厚度大、横向分布连续、均质性较好的特点,龙潭组富有机质泥页岩总体呈薄层形式与煤层等其他岩层频繁互层、横向连续性差,3 m 以下单层厚度占据主导地位(图 1),平均厚度仅 1.8~2.8 m。与煤层气共同形成本区龙潭组海陆过渡相组合型煤系气藏。

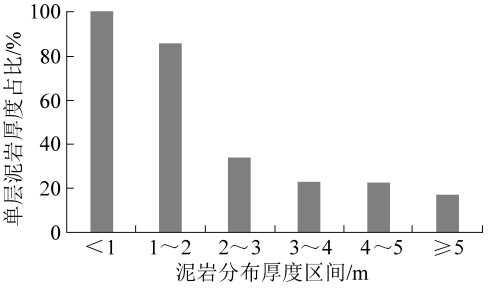


图 1　泥页岩单层厚度区间分布频率

Fig.1　Interval distribution frequency of shale single layer thickness

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

2　煤系泥页岩有机质特征

有机质丰度、热演化程度等是国内外页岩气勘探与评价的重要参数[12]。本次在大方背斜区域采集泥页岩样品,利用 ZJ294 总碳分析仪按照 GB/T 19145—2003《沉积岩中总有机碳的测定》、ZJ287 油气评价仪按照 GB/T 18602—2012《岩石热解分析》标准、ZJ257 偏光显微镜按照 SY/T 5163—2018《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》、ZJ280 按照 SY/T 5124—2012《沉积岩中镜质体反射率测定方法》,分析了泥页岩总有机碳(TOC)、镜质体反射率(R_o)、干酪根显微组分及类型等有机质特征。

结果分析表明(图 2、表 1),龙潭组泥页岩总有机碳质量分数(TOC)为 0.23% ~ 22.10%,平均 3.51%,分布区间主要集中于 1.0% ~ 7.0%,占比 81%。区内除煤层外的富含有机质岩层主体为泥岩和砂质泥岩,尽管碳质泥岩有机质质量分数更高,但其主要在煤层顶底板呈薄层(<0.5 m)少量分布。受成煤环境影响,海陆过渡相泥页岩 TOC 质量分数总体高于区域上的海相泥页岩(牛蹄塘组普遍<5%,龙马溪组普遍<3%,打屋坝组主要分布于 0~2%)[13-16],龙潭组泥页岩表现出更好的生烃物质基础,I_H 为氢指数;S_1+S_2 为生烃潜量。

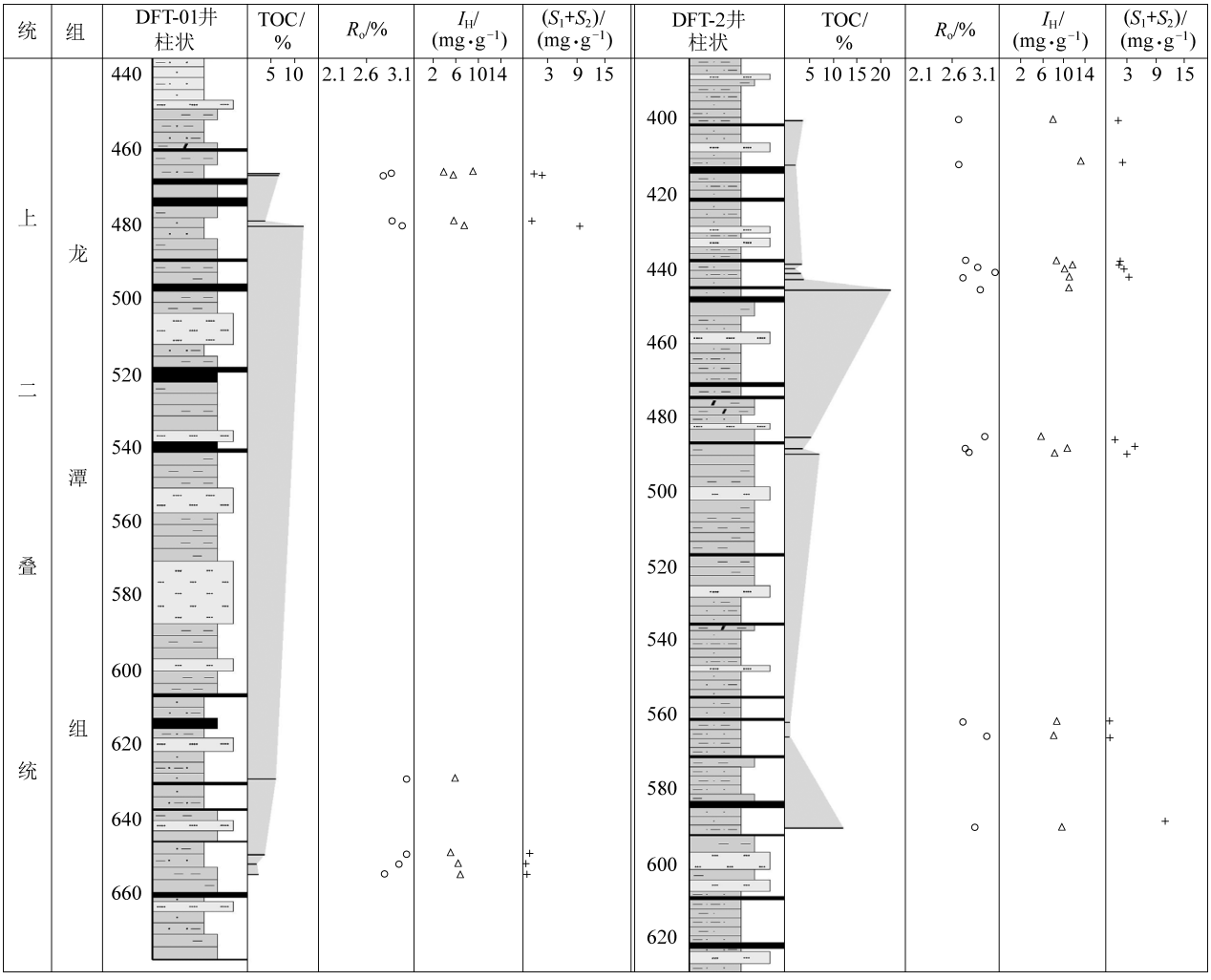


图 2　大方地区 DFT-01、DFT-02 井综合柱状

Fig.2　Synthesis columnar section of well DFT-01, DFT-02 in Dafang area

镜质体反射率 R_o = 2.67% ~ 3.06%,平均2.85%,与埋藏深度存在较好的相关性,表现出随深度增加而逐渐增大的趋势(图 3)。区域上的海相页岩有机质 R_o 分布区间宽泛[13-16],从高成熟(1.3% ~ 2.0%)到变质期(>4%)阶段均有分布(总体处于 2% ~ 4% 的过成熟阶段),这与其埋藏深度差异有关,西南地区海相页岩气的成功开发表明了过成熟演化阶段的页岩气资源潜力。龙潭组泥页岩有机质热演化程度高,处于过成熟阶段,经历了较充分的生气过程,为页岩气成藏提供了有利条件。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

干酪根有机显微组分主要为镜质组正常镜质体,相对丰度为 88%~94%,平均 90.57%;其次为惰质组丝质体,相对丰度为 6%~14%,平均 9.14%;仅少量样品见壳质组孢粉体和角质体,相对丰度仅为 1%(图 2、表 1)。镜检干酪根类型指数-76~-78,同时岩石热解分析显示氢指数(HI)介于2.29~11.10 mg/g,2 种测试结果均一致表明其属于Ⅲ型干酪根,有机母质来源为高等植物,显著区别于海相的Ⅰ型和Ⅱ型。热解生烃潜量(S_1+S_2)介于 0.04~1.88 mg/g,平均 0.36 mg/g,岩石热解最高峰温(T_{max})均大于 550 ℃,表明其生烃潜力不高,与其过成熟的演化阶段一致。

表 1　大方地区龙潭组泥页岩有机地化特征

Table 1　Organic geochemical characteristics of mud shale of Longtan Formation in Dafang Area

井号	采样深度/m	TOC/%	干酪根类型	R_o/%	(S_1+S_2)/(mg·g^{-1})	氢指数 I_H/(mg·g^{-1})
DFT-01	440—640	5.32/1.93~11.81	Ⅲ型	2.91/2.78~3.02	0.32/0.13~0.89	5.53
DFT-02	400—590	4.83/0.76~22.10	Ⅲ型	2.82/2.67~3.06	0.39/0.04~1.88	6.89

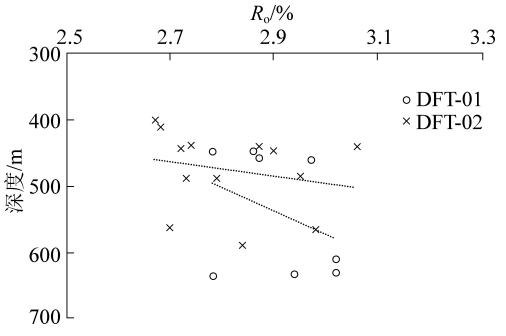


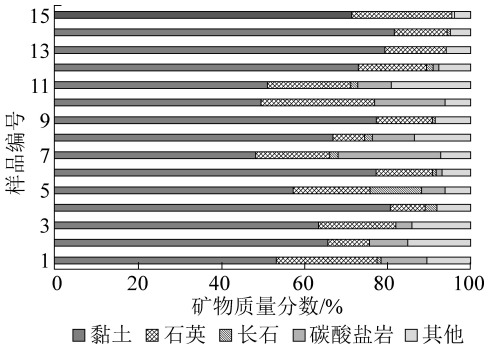
图 3　泥页岩有机质 R_o 与深度关系

Fig.3　Relationship between R_o and depth of mud shale

3　煤系泥页岩岩石矿物特征

页岩的矿物成分较复杂,主要由黏土、石英等碎屑矿物和自生矿物组成,矿物成分不仅对气体吸附产生影响(黏土矿物提供吸附载体),也影响天然微裂隙的发育和人工压裂造缝的效果(脆性矿物影响裂隙的发育和扩展),同时天然微裂隙也是游离气的重要储集空间[12]。本次利用 ZJ207X 射线衍射仪按照 SY/T 5163—2018《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》、ZJ497 偏光显微镜按照 SY/T 5368—2016《岩石薄片鉴定》,分析了龙潭组煤系泥页岩的矿物组成特征(图 4)。

薄片鉴定结果表明,岩石组成中粒径>0.015 6 mm 的碎屑质量分数占 1%~8%,平均 3.58%,主要以细粉砂为主,粗粉砂次之,呈不均匀分布;少量样品中细粉砂、粗粉砂、极细粉砂均有分布;碎屑主要为石英,其次为泥屑。粒径>0.015 6 mm 的组分主要为黏土矿物和少量长英质细碎屑。根据 X 射线衍射测试结果,矿物构成中黏土质量分数 48.4%~81.6%,平均 66.3%,主要为伊/蒙混层、绿泥石和伊利石,少量样品见高岭石;其中伊/蒙混层相对质量分数 73%~94%、平均 85%,绿泥石相对质量分数 2%~23%、平均 10.5%,伊利石相对质量分数为 1%~7%、平均 3.5%;石英质量分数为 7.4%~27.2%、平均 16.5%,其余少量矿物组成为斜长石、白云石、锐钛矿、菱铁矿和黄铁矿。龙潭组泥页岩脆性指数为 12%~48%,平均 27%。总体上,海陆过渡相龙潭组泥页岩与区域上的海相页岩矿物组成差异明显,海相页岩中脆性矿物质量分数总体达到 50%,黏土矿物质量分数为 19%~46%,龙潭组泥页岩天然裂隙发育和压裂裂隙扩展条件劣于海相页岩。



DFT-01 井样品:1—7 号样采样深度分别为 446.85、459.66、460.98、609.59、629.93、632.37、635.39 m;
DFT-02 井样品:8—15 号样采样深度分别为 401.00、438.83、439.86、486.40、488.40、562.00、566.75、589.55 m

图 4　龙潭组泥页岩矿物分布

Fig.4　Mineral composition distribution of mud shale of Longtan Formation

4　煤系泥页岩孔隙发育特征

复杂的页岩孔隙是页岩气最重要的赋存空间,同时影响着储层的渗流特性,是页岩气研究的关键内容之一。利用 ZJ298 全自动压汞仪按照 GB/T 29171—2012《岩石毛管压力曲线的测定》、ZJ297 比表面积及微孔分析仪按照 SY/T 6154—1995《岩石比表面和孔径分布测定 静态氮吸附容量法》,测试分析了泥页岩孔隙特征(图 5)。测试结果表明,

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

区内泥页岩有效孔隙度隙度为 0.20%~7.74%,平均 3.66%;渗透率(0.001 4~0.007 2)×10^{-3} μm^2,平均 0.005 6×10^{-3} μm^2,属于典型的低孔、低渗特征储层。

表 2　龙潭组富有机质泥页岩黏土矿物组成

Table 2　Clay mineral composition of mud shale of Longtan Formation

样品	黏土矿物组成 /%			
	高岭石	绿泥石	伊利石	伊/蒙混层
1	-	23	4	73
2	-	12	2	86
3	2	5	1	92
4	3	5	7	85
5	-	5	4	91
6	-	7	7	86
7	-	19	3	78
8	-	18	3	79
9	1	2	6	91
10	6	11	2	81
11	-	3	3	94
12	-	19	2	79
13	-	8	5	87
14	-	15	3	82
15	-	6	1	93

根据国际应用和理论化学联合组织孔隙划分类型(微孔<2 nm、介孔 2~50 nm、宏孔≥50 nm)[13],孔径分布及比表面积测试结果显示(图 5):泥页岩孔隙中介孔在总孔隙中占据比例平均超过 65%;总孔容平均0.026 95 cm^3/g,其中微孔的孔容平均 0.011 66 cm^3/g,孔表面积平均 1.542 74 m^2/g;介孔孔容平均 0.019 88 cm^3/g,孔表面积平均 10.861 31 m^2/g;宏孔的孔容平均 0.005 09 cm^3/g,孔表面积平均 0.343 84 m^2/g。泥页岩中介孔在孔容和孔比表面积方面占据主要地位,为页岩气储集提供了有利的条件。

页岩中的孔隙由有机质微孔隙和无机矿物孔隙组成[12],黏土和脆性矿物组成对孔隙产生影响。根据压汞与矿物组分分析,黏土质量分数相对高的 4 号、5 号样在不同孔径范围内汞的增加侵入量普遍大于黏土质量分数较低的 1 号样,增量峰值处于孔径<50 nm 的部分;孔隙度与黏土质量分数呈正相关关系,随着石英、碳酸盐岩等脆性矿物质量分数的增加而减小(图 6)。

氮气吸脱附测试分析结果显示,区内龙潭组泥页岩不同样品间吸脱附曲线有所差异,但总体呈现

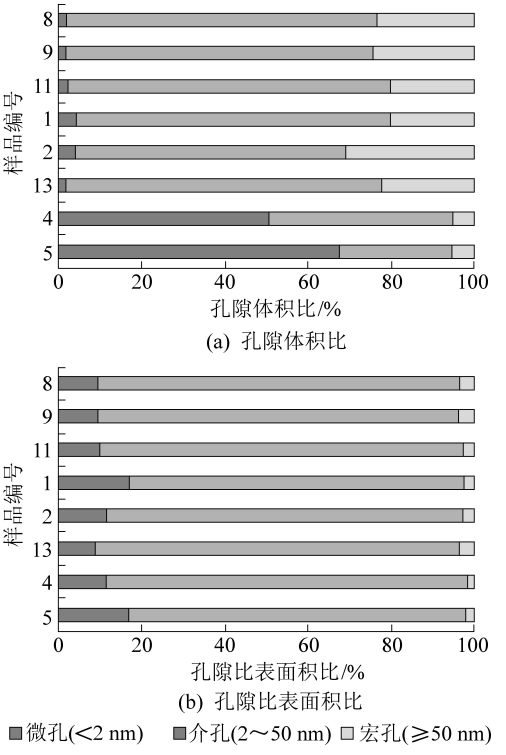


图 5　页岩不同类型孔隙体积、表面积分布

Fig.5　Distribution of pore volume and surface area in different pores of mud shale

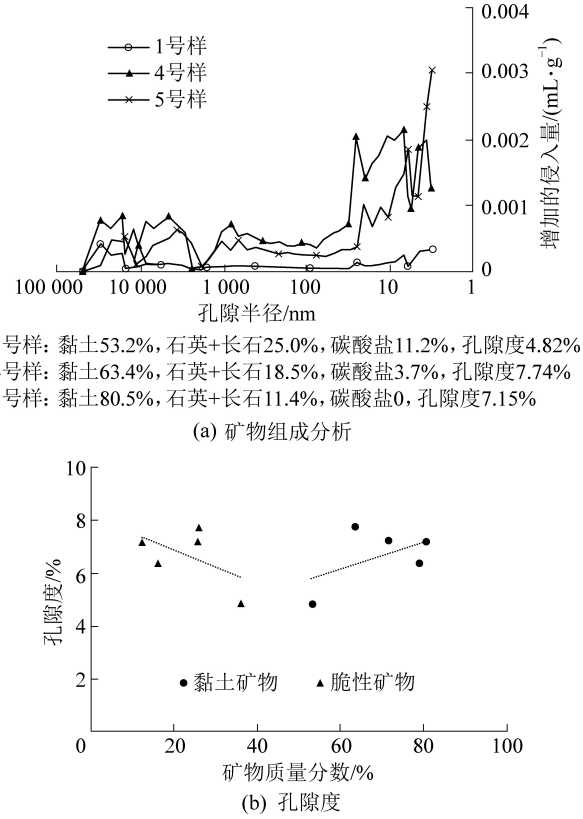


图 6　孔隙与泥页岩矿物质量分数的关系

Fig.6　Relationship between porosity and mud shale mineral content

相同的反 S 型特征(图 7)。吸附曲线在 p/p_0 = 0.05~0.10 出现拐点达到单分子层饱和吸附量,p/p_0 =

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

0.1~0.8 内表现出相对平缓上升、向上凸起的形态；在相对高压区吸附质发生毛细管凝聚，在 p/p_0>0.8 的高压区吸附曲线快速上升；脱附曲线在 p/p_0>0.5 区间呈现快速下降的特征，下降幅度小于吸附曲线，在 0.4<p/p_0<0.5 出现突然下降的拐点，在 p/p_0<0.4 表现出与吸附一致的特征，近似形成滞后回环。总体上反映出泥页岩孔隙主要为开放型的纳米级孔隙，有利于泥页岩中气体的吸附、储集和运移。

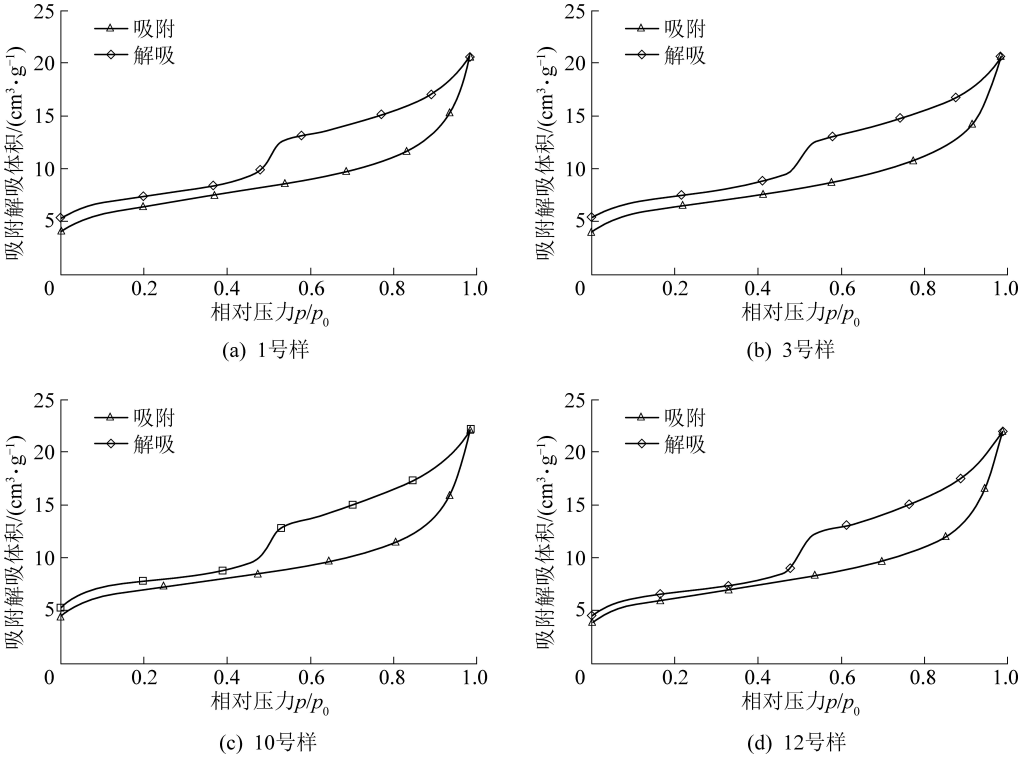


图 7　泥页岩样品吸附-脱附等温曲线

Fig.7　Adsorption-desorption isotherms of mud shale

5　结　　论

1）黔西地区大方背斜区域龙潭组泥页岩单层厚度薄，平均厚度<3 m，呈薄层形式与煤层等其他岩层频繁互层，不利于页岩气单一资源的开发；累计厚度大，泥地比平均达 70%，与煤层气构成潜在的复合型煤系气藏。

2）本区龙潭组泥页岩有机碳质量分数（TOC）较高（平均 3.51%），分布区间宽泛（0.23%~22.10%），总体高于区内海相页岩；干酪根类型均为Ⅲ型；镜质体反射率（R_o）分布区间较窄（2.67%~3.06%，平均 2.85%），均处于过成熟阶段，生气充分；较高的有机质丰度和高热演化程度提供了有利的页岩气成藏条件。

3）泥页岩矿物构成中黏土矿物质量分数较高（48.4%~81.6%，平均 66.3%），主要为伊/蒙混层、绿泥石和伊利石；脆性矿物质量分数相对区内海相页岩较少，脆性指数平均仅 27%，相对不利于天然裂隙发育和后期压裂改造过程中的裂隙扩展。

4）泥页岩属于典型的低孔、低渗特征储层，有效孔隙度 0.20%~7.74%，平均 3.66%；渗透率（0.001 4~0.007 2）×10^{-3} μm²，平均 0.005 6×10^{-3} μm²。孔隙为开放型纳米级孔隙，介孔占据主体地位，贡献了主要的页岩气吸附、储集空间。

参考文献（References）：

[1] 邹才能，董大忠，王社教，等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发，2010，37(6)：641-653.
ZOU Caineng，DONG Dazhong，WANG Shejiao，*et al*. Geological characteristics，formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J].Petroleum Exploration and Development，2010，37(6)：641-653.

[2] 张大伟，李玉喜，张金川，等.全国页岩气资源潜力调查评价[M].北京：地质出版社，2012.

[3] 马永生，蔡勋育，赵培荣.中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J].石油勘探与开发，2018，45(4)：561-574.
MA Yongsheng，CAI Xunyu，ZHAO Peirong. China's shale gas exploration and development：understanding and practice[J]. Petroleum Exploration and Development，2018，45(4)：561-574.

[4] 李　娟，于炳松，夏响华.黔西北地区上二叠统龙潭组泥页岩储层特征[J].地学前缘，2015，22(1)：301-311.
LI Juan，YU Bingsong，XIA Xianghua. The charactersitics of the upper Permian shale reservoir in the northwest of Guizhou Province

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

[J].Earth Science Frontier,2015,22(1):301-311.

[5] 刘 虎,曹涛涛,戚明辉,等.四川盆地东部华蓥山地区龙潭组页岩气储层特征[J].天然气地球科学,2019,30(1):11-26.
LIU Hu,CAO Taotao,QI Minghui,*et al*. Reservoir characteristics of Longtan Formation shale gas in Huayingshan area,eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience,2019,30(1):11-26.

[6] 易同生,周效志,金 军.黔西松河井田龙潭煤系煤层气-致密气成藏特征及共探共采技术[J].煤炭学报,2016,44(1):212-220.
YI Tongsheng,ZHOU Xiaozhi,JIN Jun.Reservoir formation characteristics and coexploration and concurrent production technology of Longtan coal measure coalbed methane and tight gas in Songhe field,western Guizhou[J].Journal of China Coal Society,2016,44(1):212-220.

[7] 易同生,高 为.六盘水煤田上二叠统煤系气成藏特征及共探共采方向[J].煤炭学报,2018,43(6):1554-1563.
YI Tongsheng,GAO Wei.Reservoir formation characteristics as well as coexploration and co-mining orientation of Upper Permian coal-bearing gas in Liupanshui Coalfield[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(6):1554-1563.

[8] 吴忠锐,何 生,何希鹏,等.湘中涟源凹陷上二叠统龙潭组和大隆组海陆过渡相泥页岩孔隙结构特征及对比[J].地球科学,2019,44(11):3757-3772.
WU Zhongrui,HE Sheng,HE Xipeng,*et al*.Pore Structure Characteristics and Comparisons of Upper Permian Longtan and Dalong Formation Transitional Facies Shale in Xiangzhong-Lianyuan Depression[J].Earth Science,2019,44(11):3757-3772.

[9] 罗 沙,汪凌霞,石富伦,等.黔西南地区龙潭组煤系页岩气勘探前景[J].科学技术与工程,2017,17(22):162-168.
LUO Sha,WANG Lingxia,SHI Fulun,*et al*.Potentiality exploration of the longtan formation coal shale gas in Southwestern Guizhou province[J].Science Technology and Engineering,2017,17(22):162-168.

[10] 毕彩芹,迟焕鹏,单衍胜,等.水城矿区煤层气储层特征及压裂改造工艺研究[J].煤炭科学技术,2017,45(9):182-187.
BI Caiqin,CHI Huanpeng,SHAN Yansheng,*et al*. Analysis of coalbed methane reservoir characteristics and reconstruction process in Shuicheng Mining Area[J].Coal Science and Technology,2017,45(9):182-187.

[11] 窦新钊,姜 波,秦 勇,等.黔西地区构造演化及其对晚二叠世煤层的控制[J].煤炭科学技术,2012,40(3):109-114.
DOU Xinzhao,JIANG Bo,QIN Yong,*et al*.Structure evolution in west of guizhou area and control to seam in Late Permian.[J]. Coal Science and Technology,2012,40(3):109-114.

[12] 张赞动,贾承造,李相方,等.非常规油气勘探与开发[M].北京:石油工业出版社,2011.

[13] 张 鹏,张金川,刘 鸿,等.贵州下志留统龙马溪组页岩气成藏条件分析[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(9):3085-3092.
ZHANG Peng,ZHANG Jinchuan,LIU Hong,*et.al*. Accumulation conditions of shale gas from Lower Silurian Longmaxi Formation in Guizhou [J]. Journal of Central South University (Natural Science),2016,47(9):3085-3092.

[14] 易同生,高 弟.贵州龙马溪组页岩气储层特征及其分布规律[J].煤田地质与勘探,2015,43(3):22-27.
YI Tongsheng,GAO Di. Characteristics and distribution pattern of shale gas reservoir in Longmaxi Formation in Guizhou Province [J].Coal Geology & Exploration,2015,43(3):22-27.

[15] 王濡岳,龚大建,冷济高,等.黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层发育特征:以岑巩区块为例[J].地学前缘,2017,24(6):286-299.
WANG Ruyue,GONG Dajian,LENG Jigao,*et. al*. Developmental characteristics of the Lower Gambrian Niutitang shale reservoir in Northern Guizhou raea:a case study in the Cengong Block [J]. Earth Science Frontier,2017,24(6):286-299.

[16] 陈 榕,苑 坤,张子亚,等.黔西地区打屋坝组富有机质页岩地球化学特征及其意义[J].石油实验地质,2019,41(1):10-15.
CHEN Rong,YUAN Kun,ZHANG Ziya,*et al*.Geochemical characteristics of organic-rich shale in the Dawuba Formation,western Guizhou Province [J]. Petroleum Geology & Experiment,2019,41(1):10-15.

[17] ROUQUEROL J,AVNIR D,FAIRBRIDGE C W,*et al*. Recommendations for the characterization of porous solids[J]. International Union of Pure and Applied Chemistry,1994,66(8):1739-1758.

[18] 曹代勇,姚 征,李 靖,等.煤系非常规天然气评价研究现状与发展趋势[J].煤炭科学技术,2014,42(1):89-92.
CAO Daiyong,YAO Zheng,LI Jing,*et al*. Evaluation status and development trend of unconventional gas in coal measure [J]. Coal Science and Technology,2014,42(1):89-92.

[19] 肖佃师,赵仁文,杨 潇,等.海相页岩气储层孔隙表征、分类及贡献[J].石油与天然气地质,2019,40(6):1215-1225.
Xiao Dianshi, ZHAO Renwen, YANG Xiao, *et al*. Characterization,classification and contribution of marine shale gas reservoirs [J].Oil & Gas Geology,2019,40(6):1215-1225.

[20] 赵楷棣,傅雪海,张 苗,等.煤系泥页岩有机地球化学特征及生烃潜力评价[J].煤炭科学技术,2019,47(11):182-188.
ZHAO Kaidi, FU Xuehai, ZHANG Miao, *et al*. Evaluation of organic geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of coal measure mud shale[J].Coal Science and Technology,2019,47(11):182-188.

[21] 闫德宇,黄文辉,张金川.鄂尔多斯盆地海陆过渡相富有机质泥页岩特征及页岩气意义[J]地学前缘,2015,22(6):197-206.
YAN Deyu,HUANG Wenhui,ZHANG Jinchuan.Charactersitics of marine-continetal transitional organic-rich shale in the Ordos Basin and its shale gas significance [J]. Earth Science Frontier,2015,22(6):197-206.

[22] 何希鹏,高玉巧,唐显春,等.渝东南地区常压页岩气富集主控因素分析[J].天然气地球科学,2017,28(4):654-664.
HE Xipeng,GAO Yuqiao,TANG Xianchun,*et al*. Analysis of major factors controlling the accumulation in normal pressure shale gas in the southeast of Chongqing[J].Natural Gas Geoscience,2017,28(4):654-664.