

引用格式:陶金雨,申宝剑,胡宗全,等.桂北地区下石炭统鹿寨组页岩储层孔隙特征及评价[J].油气藏评价与开发,2022,12(3):437-444.
TAO Jinyu, SHEN Baojian, HU Zongquan, et al. Pore characteristics and evaluation of shale reservoir in Lower Carboniferous Luzhai Formation, northern part of middle Guangxi Depression[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 437-444.
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.03.005

桂北地区下石炭统鹿寨组页岩储层孔隙特征及评价

陶金雨^{1,2,3,4},申宝剑^{1,2,3,4},胡宗全⁵,潘安阳^{1,2,3,4}

(1.中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214126;2.页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室,江苏 无锡 214126;3.国家能源页岩油研发中心,江苏 无锡 214126;4.中国石化油气成藏重点实验室,江苏 无锡 214126;5.中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:桂中坳陷上古生界海相页岩经历了复杂的构造演化和热演化,下石炭统泥页岩系作为页岩气的主力产层,其储层的微观孔隙结构表征与储层孔隙评价是亟待研究的重要内容。通过对野外和岩心样品开展岩石薄片、扫描电镜、全岩X衍射、孔隙度以及等温吸附等试验测试,对桂中坳陷北部下石炭统鹿寨组页岩储层的物质组成和储集孔隙进行了详细表征与评价。研究表明,桂北地区鹿寨组页岩的有机碳含量0.4%~6.6%,有机质处于高成熟—过成熟热演化阶段,石英等脆性矿物含量较高,具备良好的可压裂性。鹿寨组页岩储层的孔隙度平均2.91%,渗透率平均 $0.0079 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于低孔—特低渗—较好突破压力的页岩气储层。页岩储层的储集孔隙有残余粒间孔、晶间孔、粒内溶孔、黏土矿物层间孔和有机孔5种类型,主要的贡献者为黏土矿物层间孔、有机孔和黄铁矿晶间孔,孔径17~65 nm,以小于50 nm的微孔和介孔为主,孔隙之间的连通性较差,孔隙内部具有一定连通性。

关键词:页岩;储层评价;微观孔隙;下石炭统;桂中坳陷
中图分类号:TE122 **文献标识码:**A

Pore characteristics and evaluation of shale reservoir in Lower Carboniferous Luzhai Formation, northern part of middle Guangxi Depression

TAO Jinyu^{1,2,3,4}, SHEN Baojian^{1,2,3,4}, HU Zongquan⁵, PAN Anyang^{1,2,3,4}

(1. Sinopec Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. State Energy Center for Shale Oil Research and Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

4. Sinopec Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

5. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: The upper Paleozoic Marine shale in middle Guangxi Depression, namely Guizhong Depression, has experienced complex tectonic evolution and thermal evolution. As the main production layer of shale gas, the microscopic pore structure characterization and reservoir pore evaluation of the shale in lower Carboniferous need to be studied urgently. Focus on the Lower Carboniferous Luzhai Formation shale reservoir in the northern Guizhong Depression, the material composition and reservoir pores of the shale are characterized and evaluated in detail by rock thin section, scanning electron microscope, Xray diffraction, porosity and isothermal adsorption tests on samples both from fields and cores. The results show that the TOC in the shale of Luzhai Formation is 0.4%~6.6%. The organic matter is in the stage of high mature to over-mature thermal evolution. The content of brittle minerals such as quartz is high, with a good fracturing ability. The shale in Luzhai Formation, with an average porosity of 2.91% and an average permeability of $0.0079 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, is a kind of low porosity, ultra-low permeability and good breakthrough pressure shale gas reservoir. There are five types of pores in the shale reservoir: the residual intergranular pore, intergranular pore, intragranular dissolved pore, clay minerals interlayer pore and organic pore. The main contributors are the clay minerals interlayer pores, the organic pores and the pyrite intergranular pores. The aperture ranges from 17 nm to 65 nm, most of which are microporous or mesoporous with the scale less than 50 nm. The connectivity between the pores is poor and there is a certain connectivity inside the pores.

Keywords: shale, reservoir evaluation, microscopic pores, Lower Carboniferous, middle Guangxi Depression(Guizhong Depression)

收稿日期:2020-11-04。

第一作者简介:陶金雨(1990—),女,博士,副研究员,从事沉积—储层地质研究工作。地址:江苏省无锡市滨湖区蠡湖大道2060号,邮政编码:214126。E-mail: taojinyu.syky@sinopec.com

基金项目:国家自然科学基金联合基金“古生界页岩含气性原生有机质控制作用研究”(U19B6003);国家自然科学基金重大项目“页岩气改造—散失途径与保存条件”(41690133);中国石化科技部项目“四川盆地外围前中生界页岩气资源潜力评价与区带优选”(P19017-4)。

页岩气作为一种非常规天然气资源,受到世界范围的广泛关注^[1-3]。页岩储层评价和孔隙结构评价一直是页岩气地质评价选区、“甜点区”及建产核心区优选的关键,对于实现页岩气高效开发具有重要意义^[4-8]。页岩储层的孔隙结构包括孔隙的孔径、体积、比表面积、连通性等,影响着页岩气的富集^[9-10]。中国广西南盘江及桂中地区上古生界页岩气资源量巨大,约 $12.34 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[11-13],具有页岩气勘探开发的巨大潜力^[14]。目前,桂中地区的非常规页岩气储层研究多集中在宏观的地质条件评价及勘探前景^[10-12, 14],储集孔隙精细表征的研究尚处于空白状态,对页岩气储层的储集孔隙评价很少。为了进一步推进桂中地区上古生界的页岩气勘探工作,通过岩心和野外样品的观察、全岩X衍射、有机碳测定、孔隙度测试及低温氮气吸附等实验手段,从野外采样、岩心观察、薄片鉴定及氩离子抛光扫描电镜不同尺度上,明确研究区鹿寨组优质页岩的物质组成与储集孔隙类型,对桂中地区鹿寨组页岩气储集孔

隙进行精细表征与评价,以期今后的页岩气勘探开发提供参考。

1 地质背景

桂中地区位于滇黔桂盆地东北部,地理位置上处于广西中—北部,主体上处于扬子准地台南缘与华南加里东褶皱带的结合部位^[13-15](图1)。海西期由于古特提斯洋张开,桂中坳陷拉张下沉开始接受沉积,经历了多期裂陷和挤压作用的演化,在中泥盆世—早石炭世裂陷阶段,坳陷北部形成了河池—宜州裂陷槽。研究区位于桂中坳陷北部地区河池—宜州断裂附近,地层出露下石炭统鹿寨组(C_1lz),地层厚度 $37 \sim 550 \text{ m}$ ^[12]。鹿寨组沉积的海相页岩层系为主要的页岩气勘探开发层位,优质页岩位于鹿寨组二段(图2)。鹿寨组时期,该地区的主要岩性为灰黑色—黑色硅质页岩、硅质岩,局部灰质含量高,为一套较深水环境的沉积产物^[11](图3)。

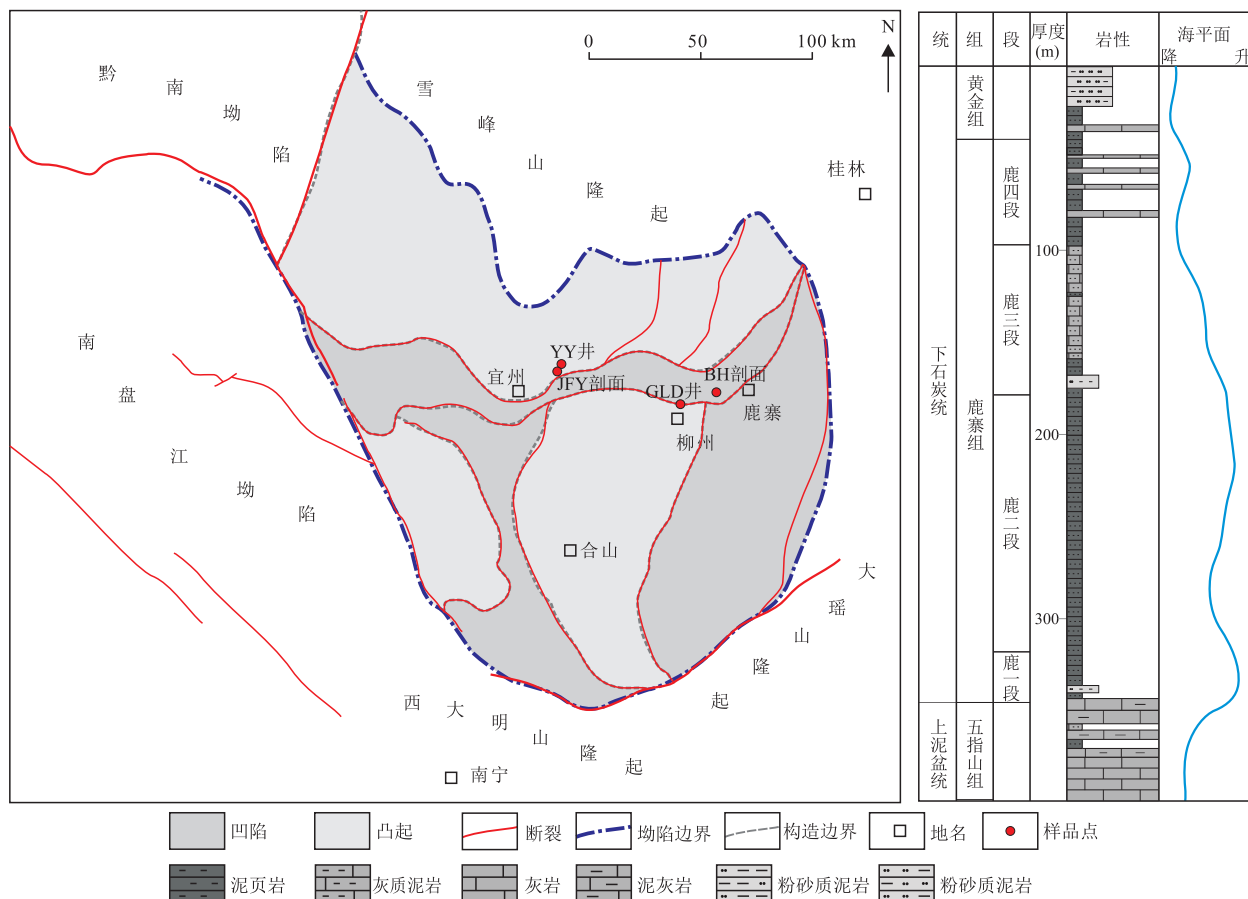


图1 桂中坳陷北部位置与下石炭统鹿寨组综合柱状图

Fig. 1 Location of northern part of middle Guangxi Depression and comprehensive histogram of Lower Carboniferous Luzhai Formation

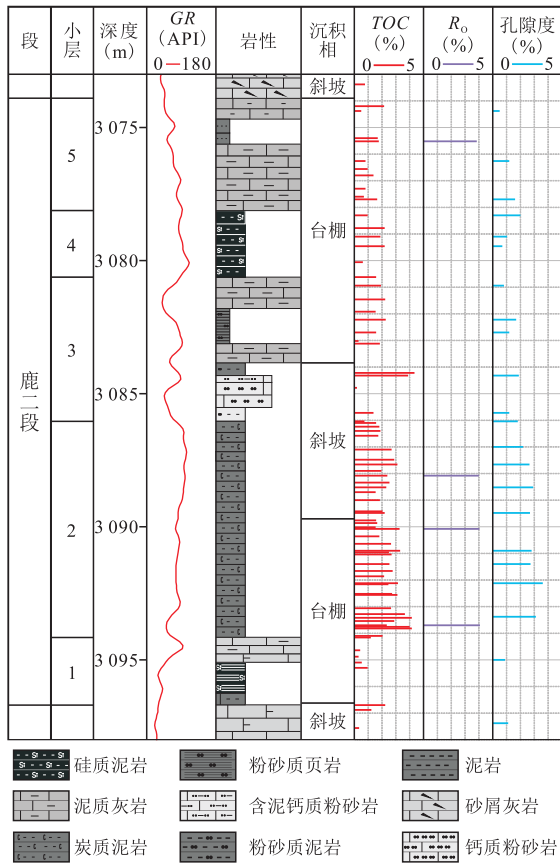


图2 桂中坳陷典型井鹿二段综合柱状图

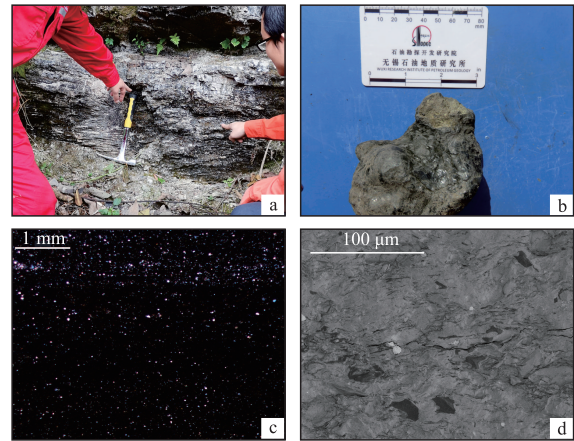
Fig. 2 Comprehensive histogram of C₁L₂ in a typical well in middle Guangxi Depression

2 页岩储层的物质组成

2.1 岩石学矿物学特征

桂北地区页岩受控于独特的“台—槽—丘—盆”沉积体系,主要为浅水的碳酸盐台地与较深水的槽盆相间的沉积格局,属于还原环境。研究区页岩岩性多样,以深灰—灰黑色薄层泥页岩、硅质泥岩、硅质岩、碳质页岩为主,夹深灰色砂屑灰岩、生物碎屑灰岩和粉砂岩,黄铁矿富集。

通过全岩X衍射测定实验,研究区鹿寨组页岩矿物组成以石英和黏土矿物为主,分别占46.36%和33.49%,其次为方解石、黄铁矿、石膏、菱铁矿及重晶石(图4)。其中,石英矿物含量主要分布在30.8%~75.8%,平均50.0%;黏土含量主要分布在6.0%~50.2%,平均26.4%;其次为方解石,平均含量19.7%。其他矿物成分占比均小于5%。通过鹿寨组页岩Al-Fe-Mn元素含量特征分析,结合扫描电



注:a.硅质岩,BH野外露头;b.碳质泥岩岩心照片,富集黄铁矿,YY井3 089.92 m;c.黑色页岩普通岩石薄片(-),水平层理,YY井3 079.46 m;d.黑色页岩氩离子抛光扫描电镜照片,YY井3 087.66 m。

图3 桂中坳陷北部不同尺度的鹿寨组页岩照片

Fig. 3 Photos of shale at different scales of C₁L₂ in northern part of middle Guangxi Depression

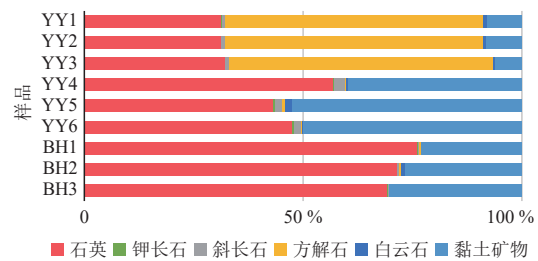


图4 桂中坳陷北部鹿寨组页岩矿物组分

Fig. 4 Mineral constituent of C₁L₂ shale in northern part of middle Guangxi Depression

镜的观察表明,桂中坳陷北部地区鹿寨组页岩中的石英一部分来自陆源碎屑,一部分来源于生物作用(图5)。研究区鹿寨组页岩的脆性矿物含量较高,有利于页岩气的压裂开发。

2.2 地球化学特征

根据研究区钻井岩心鹿寨组底部页岩的地球化学测试结果显示,有机质类型以腐泥组、镜质组和惰质组为主,属于II₁型—II₂型,总有机碳含量(TOC)分布为0.4%~6.6%,平均值2.5%,有机质镜质体反射率(R₀)分布在1.7%~3.9%,平均值达到2.9%,处于高成熟—过成熟的热演化阶段。

3 页岩储层微观孔隙

页岩的孔隙可分为大孔(直径大于50 nm)、介孔

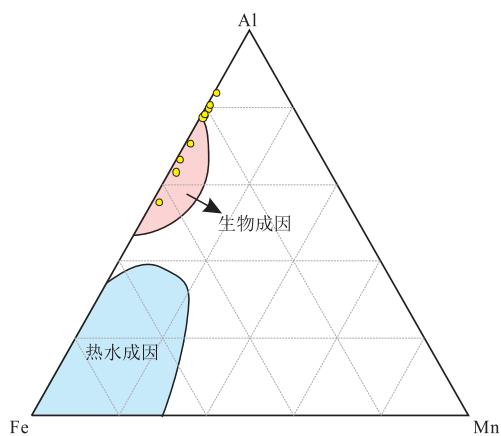


图5 鹿寨组页岩Al-Fe-Mn三角图解

Fig. 5 Al-Fe-Mn triangular diagram of shale in C_1Lz

(直径介于2~50 nm)、微孔(直径小于2 nm)^[16]。通过普通岩石薄片和氩离子抛光扫描电镜的观察,桂北地区鹿寨组海相页岩的储层孔隙空间发育残余粒间孔、晶间孔、粒内溶孔、黏土矿物层间孔和有机孔5种储集孔隙类型(图6)。

3.1 残余粒间孔

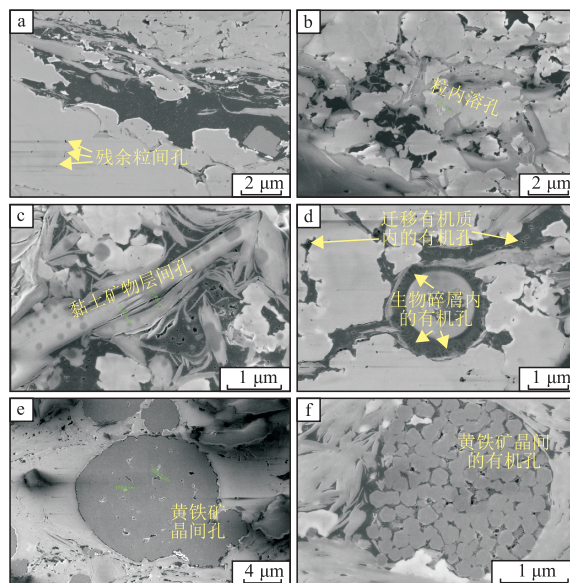
由于成岩压实与胶结作用的改造,下石炭统鹿寨组优质页岩中发育粒间孔隙。但是多数粒间孔被沥青充填,仅残余少量粒间孔。残余粒间孔一般分布于石英颗粒之间,而且大部分为生物成因的硅质,而不是陆源的石英碎屑。残余粒间孔的孔径一般在60~500 nm,属于纳米级大孔,形态呈棱角状,近三角形、多边形,部分粒间孔压实强烈,成狭长的条形分布(图6a)。

3.2 粒内溶孔

粒内溶孔是在地下酸性水作用下,溶蚀长石及碳酸盐等易溶矿物而产生的次生孔隙,主要分布在碳酸盐颗粒内部^[17]。通过扫描电镜的观察,研究区鹿寨组优质页岩中的粒内溶孔的孔径一般为50~130 nm,属于纳米级大孔,形态呈圆形和椭圆形,方解石中的溶蚀孔隙通常沿着解理发育(图6b)。

3.3 黏土矿物层间孔

当页岩孔隙水呈碱性时,随着埋深增加,蒙脱石在向伊利石转化的过程中体积减小,从而产生微裂(孔隙)^[18]。研究区鹿寨组优质页岩广泛发育黏土矿物层间孔,常平行于伊利石或者云母片层间,也有一



注:a.残余粒间溶孔,灰黑色硅质页岩,GLD井1914.50 m;b.粒内溶孔,黑色硅质页岩,JFY野外露头样;c.黏土矿物层间孔,黑色硅质页岩,BH野外露头样;d.有机孔,黑色硅质页岩,BH野外露头样;e.黄铁矿内晶间孔,黑色硅质页岩,GLD井1928.50 m;f.黄铁矿晶间的有机孔,灰黑色硅质页岩,GLD井1933.60 m。

图6 桂中坳陷北部下石炭统鹿寨组页岩SEM微观孔隙

Fig. 6 SEM micropores of shale in C_1Lz of northern part of middle Guangxi Depression

些黏土矿物与黄铁矿、石英或方解石颗粒杂乱堆积后,形成了支撑结构从而有利于层间孔的保存。黏土矿物的层间孔呈线状分布,宽度大小不一,主要分布在15~120 nm,也可见一些微米级大孔(图6c)。部分层间孔被沥青全充填、半充填,在充填的沥青中同样可见有机孔。

3.4 有机孔

通过本次样品的观察研究,发现桂中坳陷下石炭统鹿寨组优质页岩层段发育有大量的有机孔,且其成因有两种:迁移有机质内孔隙和原地有机质内孔隙(图6d)。迁移有机质(即沥青)内的有机孔,是指在石油充注阶段的无机矿物孔隙(主要为粒间孔)被沥青充填后,沥青内部发育的孔隙;原地有机质内的有机孔,是指成烃生物在演化过程中,其内部沿着骨架支撑形成的孔隙^[19-20]。研究区页岩内有机孔以迁移有机质内孔隙为主,原地有机质内孔隙少见。有机孔的孔径分布范围很广,在8~2400 nm,常见百纳米级大孔,且孔隙内连通性好。因为迁移有机质内的有机孔没有无机矿物充填,也缺少地层水和无机矿物的胶结,因此,可为页岩气提供大量的储集空

间;而原地有机孔在演化过程中继承了原始生物体结构,孔隙多具有一定定向性,而且常伴随无机矿物发育,因此,孔径、孔隙分布与连通性均不如前者。

3.5 黄铁矿晶间孔

鹿寨组海相页岩富集大量的黄铁矿,矿物含量最高可达18%。镜下常见莓状黄铁矿集合体,直径大多在3~10 μm,且晶间常被有机质充填。研究区黄铁矿晶间孔分布在22~544 nm,100 nm左右的晶间孔最为常见(图6e)。成岩早期的黄铁矿内晶间孔较大,伴随成岩作用与热演化过程,黄铁矿晶粒不断生长、成岩压实不断加剧,导致晶间孔减小。在油气充注阶段,当沥青进入黄铁矿集合体后,黄铁矿晶间也可见部分有机孔(图6f)。

4 页岩储层微观孔隙结构与孔隙评价

4.1 物性

桂中北部地区鹿寨组优质泥页岩段($TOC > 2\%$)具有高石英、低黏土、低碳酸盐矿物的组成特征。北美地区页岩气储层孔隙度大部分分布在1%~10%,主要产层为2%~6%,渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。YY井鹿寨组下段部分泥页岩样品破碎严重,碳含量高,本次研究采用无锡所自主研发的岩石样品总体积测定系统,测定不规则页岩样品的孔隙度数据。结合前人发表的研究成果(表1)可知,研究区下石炭统优质页岩的钻井统计平均孔隙度在0.36%~5.83%,平均为2.91%,渗透率介于 $(0.00038 \sim 0.134) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.0079 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。部分样品由于裂缝发育导致渗透率超过 $15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,突破压力为12.51~47.90 MPa^[21]。

表1 桂中坳陷北部下石炭统页岩储层物性数据平均值
Table 1 Average values of physical properties of shale reservoirs in lower Carboniferous of northern part of middle Guangxi Depression

井	层位	孔隙度(%)	渗透率($10^{-6} \mu\text{m}^2$)	出处
QY2井	C ₁	2.36	9.1	文献[22]
DY1井	C ₁	4.96		文献[23]
CY1井	C ₁	1.82	3.3	文献[24]
HY1井	C ₁	4.49	18.7	文献[12]
DY2井	C ₁ l _z	4.04		文献[25]
YY井	C ₁ l _z	1.39	8.0	本次研究
GLD井	C ₁ l _z	1.37	0.7	本次研究

桂中坳陷北部地区具有低孔隙度、特低渗透率以及中等—好突破压力的特点。可见桂中坳陷北缘下石炭统页岩具有较好的储集物性。

YY井与GLD井样品测得的孔隙度范围分别为0.5%~3.6%和0.9%~2.2%,明显低于文献值中该地区其他井位和剖面样品的孔隙度。据推测,本次研究中样品孔隙度偏低,可能是研究区位于宜山断裂带附近,局部地区的热演化程度很高,导致有机质炭化,基本不发育有机孔(图3d);在GLD井中常见多组硅质岩脉和后期构造改造所形成的构造裂缝(图7),裂缝均为全充填,过强的构造运动破坏了原始的储层结构,使得页岩内孔隙连通性变差。

4.2 储层孔隙结构

氮气吸附实验可以定量分析相对较小的页岩孔隙特征^[17]。通过N₂吸附试验可知(图8),鹿寨组页岩的具有一定的吸附能力,最大吸附量介于2.750~7.623 mL/g,平均5.763 mL/g。随着总有机质含量的



图7 硅质岩脉(GLD井C₁l_z,1936.05 m)
Fig. 7 Siliceous vein(Well-GLD, C₁l_z, 1936.05 m)

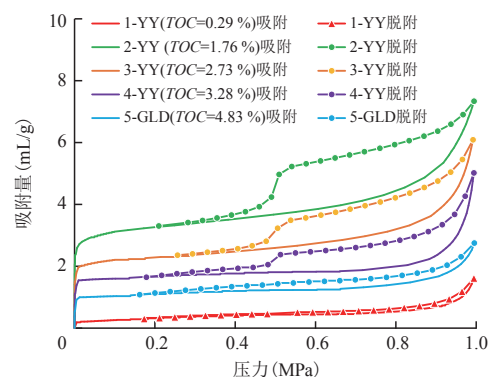


图8 桂中坳陷北部鹿寨组页岩氮气等温吸附曲线
Fig. 8 Adsorption isotherm of shale in C₁l_z of northern part of middle Guangxi Depression

增加,样品的初始和最大吸附量明显减小,滞后回环幅度明显降低。大部分样品的回环形态为H3型,表明发育狭长形孔隙;样品GLD46的回环形态为H4型,表明样品中多为微—介孔。结合氩离子抛光扫描电镜的观察,认为鹿寨组页岩孔隙空间的主要贡献来自于黏土矿物层间孔和有机孔,局部发育黄铁矿晶间孔。

研究区鹿寨组页岩微孔的孔体积平均为0.003 2 mL/g,约占总孔体积的32%(表2)。介孔的孔体积所占比例最大,约44%,平均为0.004 5 mL/g;大孔的孔体积相对较小,平均为0.002 2 mL/g,约占总孔体积的24%。由此可见,鹿寨组页岩储层主要发育介孔,其次是微孔,大孔的贡献率最低。根据IUPAC(国际纯粹与应用化学联合会)分类的孔宽分布统计,鹿寨组页岩样品的孔径集中在17~65 nm,以小于50 nm的微孔和介孔为主,渗透率分布介于 $(0.38 \sim 1.15) \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$,孔隙连通性较差。

页岩中的吸附气主要吸附在有机质和矿物表面,吸附气量主要与页岩的比表面积有关(图9)^[26]。从氮气吸附实验的结果来看,鹿寨组页岩样品的吸附量较低,而且总有机碳含量越高,吸附量越低,比表面积越小,这与龙马溪组页岩明显不同^[19]。总有机碳含量高的样品多来自硅质页岩,大部分有机孔为介孔和微孔,孔隙的比表面积较小,吸附气量较低。而总有机碳含量低的样品大多为碳酸盐矿物含量较高的钙质泥岩和泥质灰岩,且样品的热成熟度很高,有机孔由于成岩压实或有机质裂解消耗而闭合,所以主要的孔隙贡献来自于黏土矿物层间孔,多为线性分布的狭长形孔隙,而且局部发育微米级大孔,导致其孔隙比表面积大于有机孔,因此,吸附气量反而大。

4.3 储层孔隙评价

桂中坳陷下石炭统鹿寨组页岩储层中,主要的储集孔隙类型有残余粒间孔、晶间孔、粒内溶孔、黏土矿物层间孔和有机孔5种。结合页岩矿物成分、地球化学特征、孔隙的氩离子抛光扫描电镜图像分析、物性数据和氮气低温吸附实验结果可知,主要贡献者为黏土矿物层间孔、有机孔和黄铁矿晶间孔。

黏土矿物层间孔受控于颗粒间填隙物、自生黏土矿物的类型和分布。在氮气吸附实验结果中,样品YY3和YY28的比表面积和总孔容相对较高,但层间孔之间的连通性较差,与扫描电镜观测结果相对应,渗透率介于 $(0.79 \sim 134.00) \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$,一些样品的渗透率可以达到 $15.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,说明在黏土层间孔中微裂缝发育。结合页岩样品的地球化学特征,这些样品普遍具有热演化程度高的特点, R_o 达到3.83%~4.05%,在扫描电镜中还可观察到一些收缩缝。随着热演化程度的增加,有机酸为伊利石化提

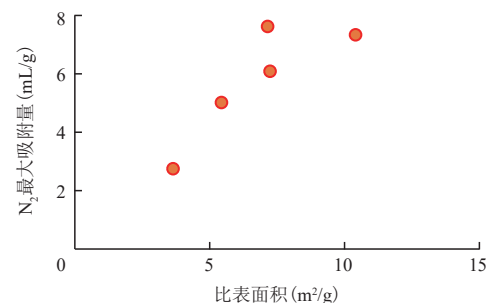


图9 桂中坳陷北部鹿寨组页岩氮气最大吸附量与孔隙比表面积呈正相关关系

Fig. 9 Positive correlation between the maximum N_2 adsorption and pores surface area of shale in C_1 /z of northern part of middle Guangxi Depression

表2 桂中坳陷北部鹿寨组页岩孔隙体积与比表面积统计

Table 2 Statistics of pore volume and surface area of shale in C_1 /z of northern part of middle Guangxi Depression

编号	岩性	深度(m)	TOC (%)	R_o (%)	孔体积(mL/g)				孔体积所占比例			比表面积 (m ² /g)
					微孔	介孔	大孔	总孔容	微孔	介孔	大孔	
1-YY	深灰色泥质灰岩	3 083.01	0.29		0.000 5	0.001 4	0.001 1	0.002 9	15.36	47.44	37.2	1.239
2-YY	深灰色钙质泥岩	3 075.51	1.76	3.83	0.004 9	0.005 6	0.002 0	0.012 6	39.01	44.75	16.24	10.408
3-YY	灰黑色碳质泥岩	3 090.07	2.73		0.003 5	0.004 8	0.002 2	0.010 4	33.14	45.79	21.07	7.238
4-YY	灰黑色碳质泥岩	3 092.51	3.28	4.05	0.002 5	0.002 8	0.003 0	0.008 3	30.05	33.77	36.18	5.436
5-GLD	黑色硅质泥岩	1 875.70	4.83	2.42	0.001 6	0.002 1	0.001 1	0.004 8	33.95	42.86	23.19	3.641
平均值			2.58	3.43	0.002 6	0.003 3	0.001 9	0.007 8	30.30	42.92	26.78	5.592

供了大量钾离子,使伊/蒙混层矿物转化为伊利石^[27],在伊/蒙混层矿物中形成了纳米级微孔—介孔。

鹿寨组页岩储层中的黄铁矿晶间孔常与有机质伴生,多被有机质充填,内部孔隙具有一定的连通性。高有机质含量往往有利于页岩储层中有机孔和溶蚀孔的发育^[28]。桂北地区鹿寨组页岩的有机质以腐泥组、镜质组和惰质组为主,结合SEM图像可知,GLD井页岩样品有机孔以迁移有机质孔隙为主,原地有机质内部缺乏有机孔。氮气吸附实验中样品GLD46以微孔—介孔为主,具有较高的TOC,有机质演化为高成熟晚期,一定程度上反映了有机孔的发育。但渗透率较低,平均不到 $1.0 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$,说明有机孔的连通性较差。

残余粒间孔和粒内溶孔在鹿寨组页岩储层中占比较少,受控于机械压实、固体沥青充填、化学充填、胶结等破坏性成岩作用。鹿寨组页岩样品普遍热演化程度高,且埋深在1 800 ~ 3 100 m,随着有机质热演化达到过成熟,有机质被逐渐消耗,同时矿物的应力挤压作用进一步增强,孔隙多发生变形和闭合。此外,页岩中硅质胶结物主要来自矿物转化作用,矿物的伊利石化等多个过程可以产生微晶石英,陆源石英常见自生或次生的加大边,均可造成了储层的进一步致密化^[28]。

5 结论

1) 桂中坳陷下石炭统鹿寨组页岩主要为深灰—灰黑色薄层泥页岩、硅质泥岩、硅质岩、碳质页岩,矿物组成由硅质、黏土和碳酸盐3种矿物组成,石英矿物含量平均为50.0%,可识别出陆源石英和生物成因硅质,黏土矿物含量平均为26.4%,其次为方解石,平均含量为19.7%。整体脆性矿物含量较高,具备良好的可压裂性。

2) 下石炭统鹿寨组页岩储层的储集孔隙发育残余粒间孔、晶间孔、粒内溶孔、黏土矿物层间孔和有机孔5种类型,其中主要的贡献者为黏土矿物层间孔、有机孔和黄铁矿晶间孔。鹿寨组页岩中的有机孔以迁移有机质孔隙为主,原地有机质内部缺乏有机孔。

3) 下石炭统鹿寨组页岩储层的孔隙度分布在0.36% ~ 5.83%,渗透率为 $(0.000\ 38 \sim 0.134) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于低孔—特低渗—较好突破压力的页岩气储层。该套页岩具有一定的吸附能力,介孔对页岩储层的

贡献最大,孔径为17 ~ 65 nm,局部孔隙内部具有一定的连通性。

参考文献

- [1] LOUCKS R G, RUPPEL S C. Mississippian Barnett shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.
- [2] ABOUELRESH M O, SLATT R M. Shale depositional processes: Example from the Paleozoic Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas, USA[J]. Open Geosciences, 2011, 3(4): 398-409.
- [3] NEWPORT L P, APLIN A C, GLUYAS J G, et al. Geochemical and lithological controls on a potential shale reservoir: Carboniferous Holywell Shale, Wales[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 71: 198-210.
- [4] 刘丽, 闵令元, 孙志刚, 等. 济阳坳陷页岩油储层孔隙结构与渗流特征[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(1): 106-114.
LIU Li, MIN Lingyuan, SUN Zhigang, et al. Pore structure and percolation characteristics in shale oil reservoir of Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(1): 106-114.
- [5] 李站伟, 陈世达, 陶树, 等. 黔西—滇东地区煤岩吸附—解吸特征及其对多层合采的指示意义[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(1): 125-131.
LI Zhanwei, CHEN Shida, TAO Shu, et al. CBM adsorption-desorption characteristics of coal in western Guizhou-eastern Yunnan region and its significance to commingled production[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(1): 125-131.
- [6] 姚双宏, 李学元, 李澎, 等. 巨鹿地区石炭系—二叠系富有机质页岩孔隙结构特征及微观非均质性[J]. 特种油气藏, 2020, 27(4): 41-48.
YAO Shuanghong, LI Xueyuan, LI Peng, et al. Pore structure characterization and micro-heterogeneity of carboniferous-permian organic-rich Shale in Julu[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(4): 41-48.
- [7] 赵迪斐, 郭英海, 朱炎铭, 等. 深蓝海相页岩储层精准评价与开发选层的评价体系问题评述[J]. 非常规油气, 2022, 9(2): 1-7.
ZHAO Difei, GUO Yinghai, ZHU Yanming, et al. Comments on the evaluation system of accurate evaluation and selection of deep marine shale reservoirs[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(2): 1-7.
- [8] 李冠霖, 郭英海, 赵迪斐. 渝西地区龙马溪组下部页岩储层发育特征及其影响因素——以重庆綦江观音桥剖面为例[J]. 非常规油气, 2022, 9(2): 15-25.
LI Guanlin, GUO Yinghai, ZHAO Difei. Development characteristics and influencing factors of shale reservoir in the lower Longmaxi Formation in western Chongqing——Take Guanyinqiao section in Qijiang, Chongqing as an example[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(2): 15-25.
- [9] 兰叶芳, 吴海枝, 任传建, 等. 黔西北燕子口地区五峰组—龙马溪组泥页岩储层特征[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(1): 115-124.
LAN Yefang, WU Haizhi, REN Chuanjian, et al. Shale reservoir characteristics of Wufeng-Longmaxi Formation in Yanzikou area, northwestern Guizhou[J]. Petroleum Geology and

- Recovery Efficiency, 2021, 28(1): 115-124.
- [10] 周雯,姜振学,仇恒远,等.桂中坳陷下石炭统鹿寨组页岩气成藏条件和有利区预测[J].石油学报,2019,40(7):798-812.
ZHOU Wen, JIANG Zhenxue, QIU Hengyuan, et al. Shale gas accumulation conditions and prediction of favorable areas for the Lower Carboniferous Luzhai Formation in Guizhong depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(7): 798-812.
- [11] 贺训云,姚根顺,贺晓苏,等.桂中坳陷泥盆系烃源岩发育环境及潜力评价[J].石油学报,2011,32(2):89-95.
HE Xunyun, YAO Genshun, HE Xiaosu, et al. An evaluation of depositional environment and potential of Devonian source rocks in Guizhong Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 89-95.
- [12] 毛佩筱,王星星,吴凯凯,等.桂中坳陷西北部下石炭统岩关组泥页岩储层特征研究:以环页1井为例[J].地质科技情报,2018,37(3):169-176.
MAO Peixiao, WANG Xingxing, WU Kaikai, et al. Characteristics of shale gas reservoir in the Lower Carboniferous Yanguan Formation, northwestern Guizhong Depression: A case study of Well Huanye 1[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(3): 169-176.
- [13] 蒋裕强,付永红,谢军,等.海相页岩气储层评价发展趋势与综合评价体系[J].天然气工业,2019,39(10):1-9.
JIANG Yuqiang, FU Yonghong, XIE Jun, et al. Development trend of marine shale gas reservoir evaluation and a suitable comprehensive evaluation system [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(10): 1-9.
- [14] 胡东风,魏志红,刘若冰,等.桂中坳陷下石炭统黑色页岩发育特征及页岩气勘探潜力[J].天然气工业,2018,38(10):28-37.
HU Dongfeng, WEI Zhihong, LIU Ruobing, et al. Development characteristics and shale gas exploration potential of the Lower Carboniferous black shale in the Guizhong Depression[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 28-37.
- [15] 陈粤,黄文芳,梁裕平,等.广西鹿寨地区鹿寨组一段黑色页岩特征及沉积环境分析[J].矿产与地质,2017,31(3):605-612.
CHEN Yue, HUANG Wenfang, LIANG Yuping, et al. Analysis on black shale feature and depositional environment of the first member of Luzhai Formation, Luzhai area of Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2017, 31(3): 605-612.
- [16] 于炳松.页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容[J].地学前缘,2012,19(3):252-258.
YU Bingsong. Particularity of shale gas reservoir and its evaluation[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 252-258.
- [17] 姜涛,金之钧,刘光祥,等.四川盆地元坝地区自流井组页岩储层孔隙结构特征[J].石油与天然气地质,2021,42(4):909-918.
JIANG Tao, JIN Zhijun, LIU Guangxiang, et al. Pore structure characteristics of shale reservoirs in Ziliujing Formation of Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2021, 42(4): 909-918.
- [18] CAO T T, SONG Z G, WANG S B, et al. Characterizing the pore structure in the Silurian and Permian shales of the Sichuan Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 61: 140-150.
- [19] 胡宗全,杜伟,彭勇民,等.页岩微观孔隙特征及源-储关系——以川东南地区五峰组-龙马溪组为例[J].石油与天然气地质,2015,36(6):1001-1008.
HU Zongquan, DU Wei, PENG Yongmin, et al. Microscopic pore characteristics and the source-reservoir relationship of shale: A case study from the Wufeng and Longmaxi Formations in Southeast Sichuan Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2015, 36(6): 1001-1008.
- [20] 胡宗全,王濡岳,刘忠宝,等.四川盆地下侏罗统陆相页岩气源储特征及耦合评价[J].地学前缘,2021,28(1):261-272.
HU Zongquan, WANG Ruyue, LIU Zhongbao, et al. Source-reservoir characteristics and coupling evaluation of lacustrine shale gas in the Lower Jurassic, Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 261-272.
- [21] 毛佩筱.桂中坳陷及周缘上古生界海相页岩气成藏特征分析[D].杭州:浙江大学,2018.
MAO Peixiao. Marine shale gas accumulation characteristics of Upper Paleozoic in Guizhong Depression and its periphery[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [22] 张本杰,秦琴,刘甲,等.黔西南晴页2井旧组页岩特征及勘探意义[J].天然气技术与经济,2016,10(4):19-22.
ZHANG Benjie, QIN Qin, LIU Jia, et al. Shale Characteristics and prospecting significance of Jiusi formation for Qingye 2 Well, SW Guizhou Province[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2016, 10(4): 19-22.
- [23] 卢树藩,何犇,杜胜江.黔南代页1井下石炭统打屋坝组页岩气地质条件及勘探前景[J].中国地质调查,2016,3(4):6-11.
LU Shufan, HE Ben, DU Shengjiang. Geological conditions and exploration prospect of shale gas in Dawuba Formation of Lower Carboniferous of Daiye-1 well in southern Guizhou Province[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(4): 6-11.
- [24] 安亚运,符宏斌,陈厚国,等.黔南下石炭统打屋坝组页岩气储层物性特征及控制因素——以长页1井储层为例[J].贵州地质,2015,32(3):21-29.
AN Yayun, FU Hongbin, CHEN Houguo, et al. Reservoir property and control factors of shale gas of Dawuba Formation, Lower Carboniferous in South Guizhou[J]. Guizhou Geology, 2015, 32(3): 21-29.
- [25] 岑文攀,王瑞湖,徐海,等.广西页岩气勘查现状、存在问题及建议[J].南方国土资源,2018,6(3):40-43.
CEN Wenpan, WANG Ruihu, XU Hai, et al. Current situation, existing problems and suggestions of shale gas exploration in Guangxi[J]. Nanfang Guotu Ziyuan, 2018, 6(3): 40-43.
- [26] 姜振学,唐相路,李卓,等.川东南地区龙马溪组页岩孔隙结构全孔径表征及其对含气性的控制[J].地学前缘,2016,23(2):126-134.
JIANG Zhenxue, TANG Xianglu, LI Zhuo, et al. The whole-aperture pore structure characteristics and its effect on gas content of the Longmaxi Formation shale in the southeastern Sichuan basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 126-134.
- [27] CURTIS M E, SONDERGELD C H, AMBROSE R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96: 665-677.
- [28] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等.页岩气储层的基本特征及其评价[J].天然气工业,2010,30(10):7-12.
JIANG Yuqiang, DONG Dazhong, QIN Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 7-12.

(编辑 尹淑容)