

文章编号: 1009-3850(2015)02-0054-06

## 渝东北地区五峰组-龙马溪组黑色页岩储层特征

郭秀梅<sup>1,2</sup>, 王 剑<sup>2</sup>, 杨宇宁<sup>1,2</sup>, 周业鑫<sup>1,2</sup>, 牛丙超<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要: 以渝东北地区浅海陆棚相沉积的五峰组-龙马溪组泥页岩为研究对象, 通过岩石薄片鉴定、矿物含量分析、扫描电镜、物性分析、有机地球化学分析等手段, 剖析了泥页岩的岩相学、矿物学特征、储集空间类型。结果表明, 五峰组-龙马溪组主要有炭质页岩、泥岩、泥质粉砂岩、硅质岩、泥灰岩和斑脱岩 6 种岩相类型。黑色页岩的有机质类型为 I 型干酪根, 有机碳含量较高, TOC 普遍大于 2%, 最大达 7.56%, 平均为 3.09%; 有机质成熟度比较高, Ro 值为 1.65%~2.33%, 基本上处于高成熟-过成熟阶段。矿物成分以石英矿物和黏土矿物为主, 黏土矿物主要为伊利石和伊蒙间层。扫描电镜下观察, 微孔隙主要包括矿物晶间孔、晶内孔、微裂缝以及有机质内微孔等。平均孔隙度为 2.90%, 平均渗透率为  $0.005 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

关键词: 五峰组; 龙马溪组; 页岩气; 储层特征; 渝东北

中图分类号: TE122.2+3

文献标识码: A

页岩气是一种资源量非常巨大的非常规气藏。我国页岩气勘探正处在快速起步阶段。南方上扬子地区广泛分布的下古生界海相富有机质页岩层系厚度大、有机质类型好、丰度高、热成熟度高、脆性矿物含量高、裂缝发育, 是我国海相页岩气勘探的有利地区<sup>[1-10]</sup>。其中, 位于上扬子板块上的渝东北地区是我国页岩气资源战略调查的先导实验区之一。区内上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩层是页岩气勘探的重要目的层系之一。其勘探和研究程度均很低, 属于露头区页岩气资源调查与评价新领域。本文通过对渝东北地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组的野外露头进行分析, 采用常规薄片、X 线衍射全岩分析、电子扫描显微镜、地球化学参数测试等方法, 主要从岩石学特征、矿物组成、地球化学特征, 以及物性特征等方面探讨龙马溪组页岩的微观储层特征, 希望为该地区页岩气的勘探、开发提供地质依据。

### 1 地质背景

研究区位于上扬子板块沙市隐伏断裂以北、城房断裂以南的大巴山冲断带内, 其北侧分别是南秦岭褶皱带、北大巴山推覆褶皱带、南大巴山推覆带, 西北与米仓山褶皱带相连, 西南为川中古陆, 东南与川东高陡褶皱带毗邻(图 1)。早志留世龙马溪期, 上扬子板块处于挤压、褶皱造山过程中, 川西-滇中古陆、汉南古陆扩大, 川中隆起范围不断扩大, 而扬子南缘的黔中隆起、雪峰隆起、苗岭隆起基本相连, 形成了滇黔桂隆起带, 使得中上扬子地区成为分布范围较大的局限-滞留浅海, 沉积了五峰组-龙马溪组黑色页岩<sup>[11-12]</sup>。区域构造主要以高幅抬升及强烈挤压为特点, 五峰组-龙马溪组埋藏浅、变形严重、破坏强烈, 现今构造形态表现为高陡状褶皱<sup>[13]</sup>。

### 2 岩相特征

研究区五峰组-龙马溪组黑色页岩广泛发育。通过

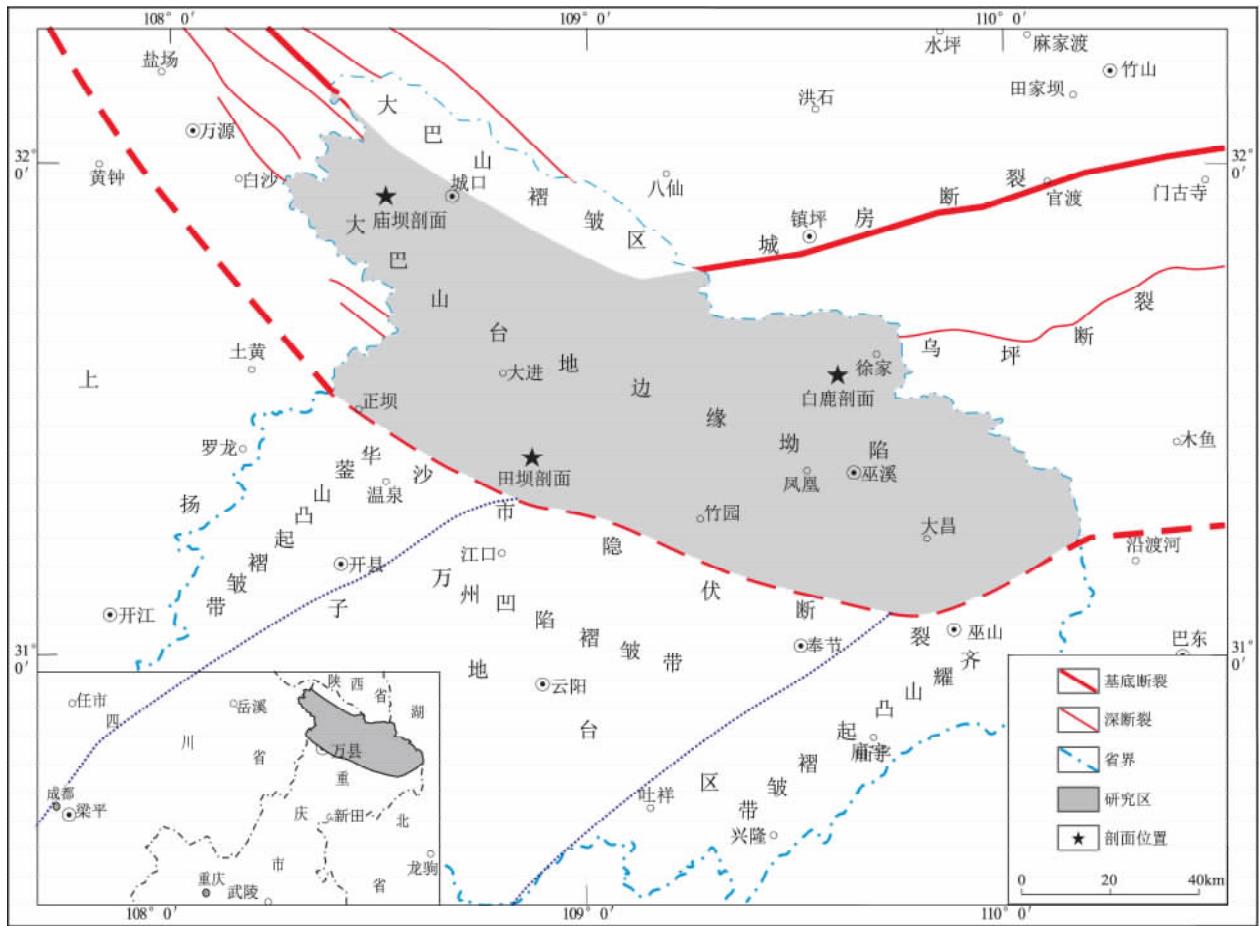


图 1 研究剖面大地构造位置图

Fig. 1 Tectonic setting of the Miaoba , Tianba and Bailu sections in northeastern Chongqing

表 1 渝东北五峰组-龙马溪组岩相种类及其特征

Table 1 Summary of the lithologic types in the Wufeng and Longmaxi Formations in northeastern Chongqing

岩性	碎屑成分	沉积构造	古生物
黑色页岩	含少量石英细碎屑、硅质碎屑和少许不透明矿物,其中石英细粉屑含量不超过 20%	水平层理发育,页理发育,黄铁矿结核	笔石化石丰富,顺层面不均匀分布
泥岩	水云母、黏土矿物含量较高,成分达 60%,且多含有少量的石英细粉屑或钙质成份	块状层理	见一定数量的笔石,沿层面不均匀分布,随深度的减小,笔石含量大大降低
泥质粉砂岩	碎屑颗粒主要为石英,其次为燧石、白云母、长石,还可见海绿石等;岩屑以泥岩碎屑为主	水平层理(图 3-2)和低角度斜层理,偶见小型交错层理	笔石含量相对较少
硅质岩	细屑石英、放射状玉髓及少量伊利石	水平层理,块状层理	以放射虫、骨针为主,含有笔石
生物灰岩	填隙物为泥质,杂基的质量分数为 35~50%,基底式胶结	部分碎屑呈定向排列	腕足、介形虫、腹足为主,其次为头足类及笔石
斑脱岩	成分较复杂的黏土岩	水平层理	未见生物化石

对研究区内的巫溪田坝西阳村、巫溪白鹿杨柳树村、城口庙坝周家河坝 3 条典型剖面的详细描述与常规薄片鉴定,以及对其它 9 条辅助剖面的观察研

究,认为渝东北五峰组-龙马溪组地层为一套整合于中奥陶统临湘组介壳灰岩之上、下伏于下志留统新滩组碎屑岩之下的黑色细碎屑-泥质沉积岩系。其

中,五峰组主要由下部的黑色薄层状碳质泥(页)岩、硅质泥(页)岩和上部的观音桥段生物灰岩构成。龙马溪组主要为深黑色-灰黑色薄-厚层状的碳质泥(页)岩、硅质泥(页)岩、含粉砂质泥岩,整合于上奥陶统五峰组之上,顶部的灰黑色(含)粉砂质泥岩与以灰绿色厚层粉砂质泥岩为主的下志留统新滩组呈渐变过渡的整合接触关系。主要有黑色炭质页岩、泥岩、泥质粉砂岩、硅质岩、生物灰岩以及少量斑脱岩等6种岩相(表1),其中笔石化石广泛发育。

### 3 地球化学特征

#### 3.1 有机质丰度

研究区西部巫溪田坝剖面中五峰组-龙马溪组底部有机碳含量最大为7.56%,向上减小至1.55%(图2),整个剖面的有机碳含量平均为3.77%。在

白鹿五峰组-龙马溪组黑色页岩剖面中,自下而上有机碳含量的变化趋势一致。底部TOC最大为5.75%,向上减小至0.75%,平均TOC值为3.22%。城口庙坝五峰组-龙马溪组黑色页岩剖面的有机碳含量为0.48%~5.25%,平均为2.97%。垂向上,五峰组至龙马溪组底部,TOC呈逐渐升高的态势,至龙马溪组再往上,TOC转为降低。

#### 3.2 有机质类型与成熟度

根据干酪根中 $\delta^{13}\text{C}$ 测试值,将有机质分为4种类型,划分标准主要参考前人在四川盆地及周边获得的研究成果(表2)<sup>[7,14-16]</sup>。渝东北地区田坝、庙坝、白鹿剖面中的27件样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 测试数据都非常稳定(图3),最大值为-29.7‰,最小值为-31.1‰,平均值为-30.49‰。因此,样品有机质类型主要为腐泥型(I型)。

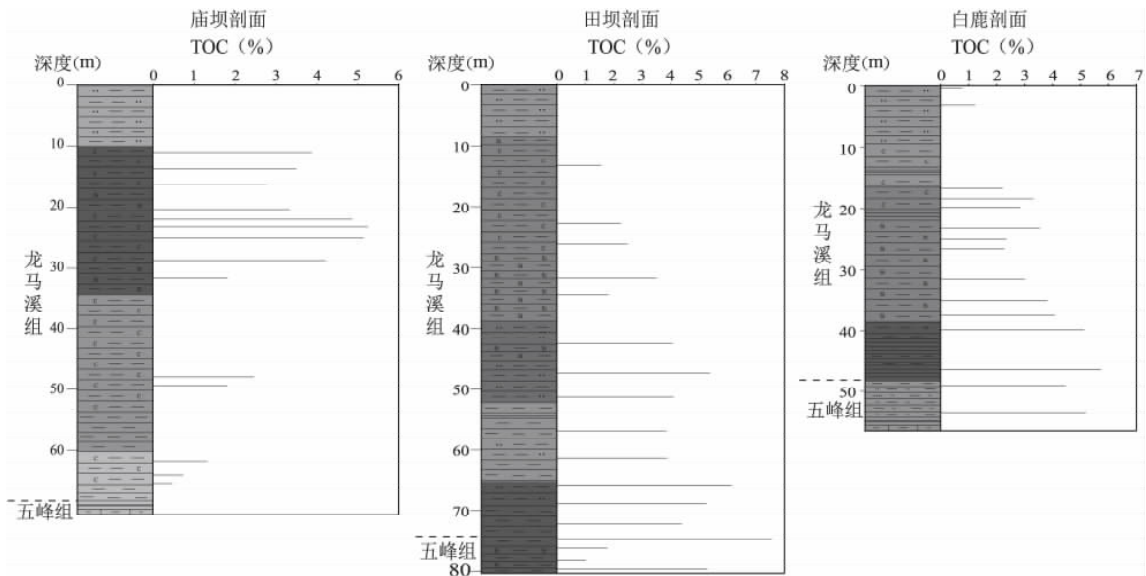


图2 渝东北龙马溪组泥(页)岩有机碳含量(TOC)纵向分布图

Fig.2 Vertical distribution of total organic carbon contents (TOC) in the mudstones (shales) from the Longmaxi Formation in northeastern Chongqing

表2 烃源岩干酪根碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )划分标准

Table 2 Classification of the kerogens according to  $\delta^{13}\text{C}$  values for the samples from northeastern Chongqing

干酪根类型	腐泥型(I型)	腐殖腐泥型(II <sub>1</sub> 型)	腐泥腐殖型(II <sub>2</sub> 型)	腐泥型(III型)
划分标准	$\leq -28\text{‰}$	$-28\text{‰} \sim -26.5\text{‰}$	$-26.5\text{‰} \sim -25\text{‰}$	$\geq -25\text{‰}$

渝东北五峰组-龙马溪组黑色页岩的热演化程度总体较高,平面与稍有变化,但垂向上变化相对稳定。如研究区东部巫溪白鹿剖面, $R_o$ 介于1.65%~2.03%,平均为1.92%,垂向上 $R_o$ 较为稳定,处于高-过成熟阶段。中部巫溪田坝地区,富有机质页岩成熟度为2.03%~2.33%,平均为2.20%,

整体处于过成熟阶段早期。而位于研究区西部的城口庙坝剖面,其富有机质页岩成熟度为1.08%~1.32%, $R_o$ 平均为1.22%,整体处于成熟阶段,该现象在研究区较为罕见<sup>[17]</sup>。

### 4 矿物组成特征

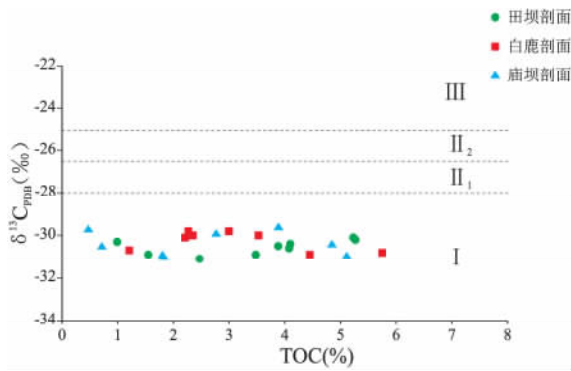


图3 渝东北地区五峰组-龙马溪组干酪根碳同位素分布  
Fig.3  $\delta^{13}C$  vs. TOC diagram for the shales from the Wufeng and Longmaxi Formations in northeastern Chongqing

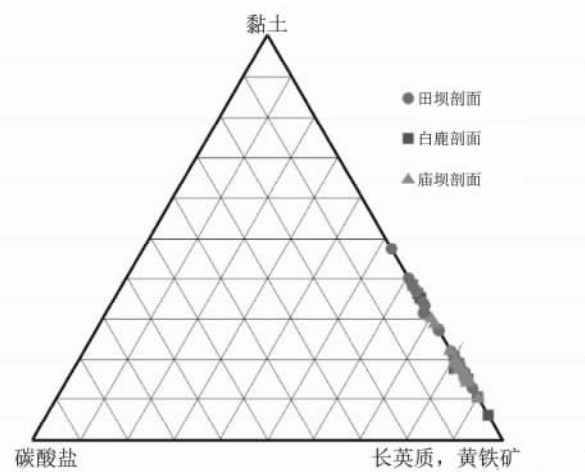


图4 渝东北地区五峰组-龙马溪组矿物含量分布图  
Fig.4 Triangular diagram of the mineral compositions in the shales from the Wufeng and Longmaxi Formations in northeastern Chongqing

岩石的矿物组成、有机碳含量和有机质成熟度是页岩储层发育的3个重要因素。对渝东北地区五峰组-龙马溪组剖面45件样品的全岩X射线衍射分析数据统计表明(图4),庙坝、田坝、白鹿地区五峰组-龙马溪组黑色页岩黏土含量平均值分别为18.5% (10.5%~30.3%)、26.7% (10.8%~40%)、20.6% (6.2%~38.3%);石英含量平均值分别为68.4% (51%~85.4%)、61.6% (42.6%~88.2%)、62.4% (43.6%~79.4%);长石含量平均值分别为5.9% (0~12.8%)、8.3% (0~17.2%)、8.1% (3.9%~14%)。碳酸盐类矿物含量极少,仅有两件样品中碳酸盐矿物含量达到了1.2%,表明五峰组-龙马溪组为浅海陆棚沉积环境。这种还原环境对有机质的保存和富集有利,为页岩气的形成提供了良好条件<sup>[7]</sup>。

黑色页岩的黏土矿物主要以伊利石和伊利石-

蒙脱石间层为主,含有少量的绿泥石和绿泥石-蒙脱石间层,伊利石-蒙脱石间层型黏土矿物含量占黏土矿物总量的33%~88%之间,平均值为68%;伊利石含量占黏土矿物总量的12%~67%之间,平均值为30.4%;绿泥石占黏土矿物总量的0.7%,而绿泥石-蒙脱石间层型黏土矿物在黏土矿物总量中的比重不足0.5%(图5)。

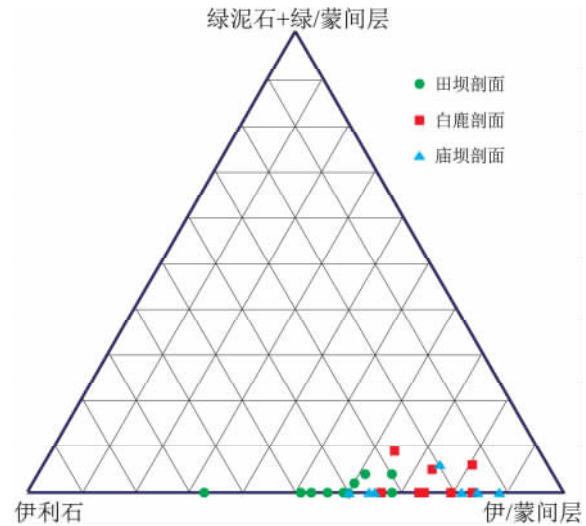


图5 渝东北地区五峰组-龙马溪组黏土矿物相对含量分布图  
Fig.5 Triangular diagram of the clay mineral contents in the shales from the Wufeng and Longmaxi Formation in northeastern Chongqing

## 5 孔隙特征

泥岩中的孔隙和微裂缝使之成为天然气的储层。根据孔隙大小可将泥(页)岩中的孔隙分为两种类型:微孔隙( $d > 0.75\mu m$ )和纳米级孔隙( $d < 0.75\mu m$ )<sup>[18]</sup>。通过扫描电镜研究发现,五峰组-龙马溪组泥页岩中纳米级孔隙、微孔隙和微裂缝十分发育(图6)。常见以下孔隙类型:有机质内溶孔和有机质与矿物间微孔(图6a);石英晶间微孔隙,孔隙直径多半 $< 2\mu m$ (图6b);黏土矿物如伊利石和伊蒙混层间絮凝引起的微孔隙,孔隙直径宽 $< 1\mu m$ (图6c);石英、长石晶内的溶孔,孔隙直径 $0.01 \sim 2\mu m$ (图6d);硅藻体腔孔(图6e);莓状黄铁矿颗粒内部晶体之间的孔隙(图6f),在这些孔隙及颗粒边缘存在残余的有机物质;龙马溪组页岩中微裂缝发育,发育在伊利石矿物层间(图6g)、黏土矿物与脆性矿物之间(图6h)以及构造作用形成的挤压裂缝(图6i)。

白鹿剖面五峰组-龙马溪组泥(页)岩7个样品

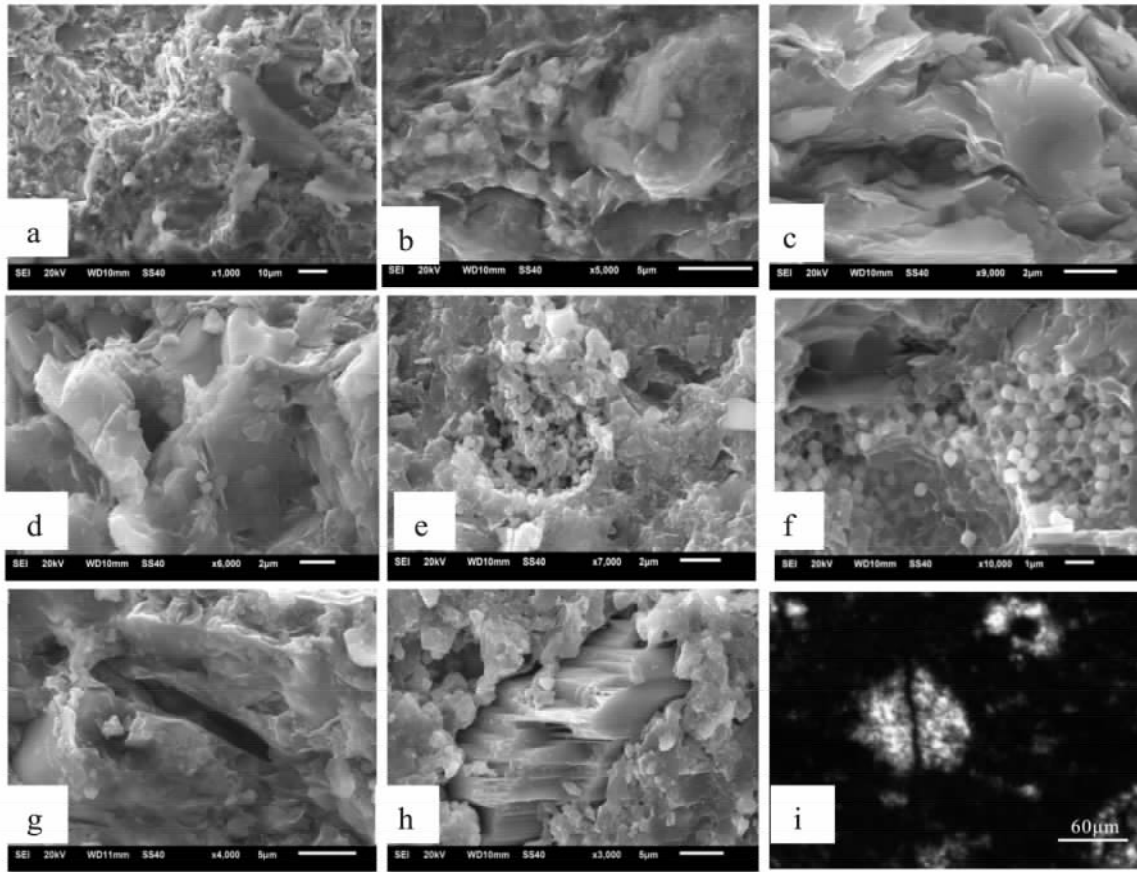


图6 渝东北五峰组-龙马溪组页岩微孔隙和微裂缝特征

a. 有机质团块内的孔隙, 孔隙大小为  $5 \sim 100 \text{ nm}$ , 白鹿龙马溪组底部; b. 石英矿物晶粒间的孔隙, 孔隙大小为  $50 \sim 100 \text{ nm}$ , 白鹿龙马溪组底部; c. 伊利石矿物间的孔隙, 孔隙大小为  $0.3 \sim 1 \mu\text{m}$ , 白鹿龙马溪组顶部; d. 长石矿物表面的溶蚀孔, 孔隙大小为  $20 \sim 500 \text{ nm}$ , 庙坝五峰组; e. 硅藻体腔孔, 形如筛状, 孔径大小在  $100 \text{ nm}$  左右, 庙坝龙马溪组底部; f. 莓状黄铁矿晶粒间的间隙, 孔隙大小为  $100 \sim 200 \text{ nm}$ , 白鹿剖面龙马溪组底部; g. 伊利石矿物层间裂缝, 白鹿五峰组顶部; h. 黏土矿物与脆性矿物之间的裂缝, 庙坝龙马溪组顶部; i. 构造作用形成的挤压裂缝, 庙坝五峰组底部

Fig. 6 Micropores and microfissures in the shales from the Wufeng and Longmaxi Formations in northeastern Chongqing

有效孔隙度为  $0.08\% \sim 3.42\%$ , 平均为  $0.69\%$ , 渗透率为  $(0.001 \sim 0.054) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 庙坝剖面龙马溪组顶部黑色含炭泥页岩 5 个样品有效孔隙度为  $0.14\% \sim 3.96\%$ , 平均为  $1.08\%$ , 渗透率为  $(0.0001 \sim 0.0004) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均为  $0.0002 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 田坝剖面龙马溪组炭质泥岩 7 个样品有效孔隙度为  $0.33\% \sim 9.11\%$ , 平均为  $4.75\%$ , 渗透率为  $(0.001 \sim 0.008) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均为  $0.003 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

## 6 结论

(1) 五峰组-龙马溪组主要有黑色炭质页岩、泥岩、泥质粉砂岩、硅质岩、生物灰岩以及斑脱岩 6 种岩相。有机碳含量较高, TOC 一般为  $1.33\% \sim 5.35\%$ , 最大达  $7.56\%$ , 平均为  $3.09\%$ , 纵向上由底至顶, TOC 逐渐降低。有机质类型主要为腐泥型 (I 型)。大部分地区五峰组-龙马溪组页岩成熟度

( $R_o$ ) 大于  $2\%$ , 一般为  $1.17\% \sim 3.54\%$ , 平均为  $2.07\%$ , 基本上处于高成熟-过成熟演化阶段。矿物组成以石英、长石、黏土矿物为主, 碳酸盐矿物极少。黏土矿物主要为伊利石和伊蒙间层。

(2) 渝东北地区五峰组-龙马溪组泥(页)岩平均有效孔隙度为  $0.69\% \sim 4.75\%$ , 平均渗透率为  $0.0002 \sim 0.009 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。微孔隙发育, 主要为有机质粒内孔、粒内孔、粒间孔。微裂隙广泛发育, 包括颗粒边缘微裂缝、黏土矿物晶间微裂缝和构造微裂缝。

## 参考文献:

- [1] 聂海宽, 包书景. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484-491.
- [2] 聂海宽, 张金川. 页岩气藏分布地质规律与特征[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(2): 700-708.



- [3] 李双建,肖开华,沃玉进,等.南方海相上奥陶统-下志留统优质烃源岩发育的控制因素[J].沉积学报,2008,26(5):872-880.
- [4] 王清晨,严德天,李双建.中国南方志留系底部优质烃源岩发育的构造-环境模式[J].地质学报,2008,82(3):289-297.
- [5] 董大忠,程克明,王玉满,等.中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J].石油与天然气地质,2010,31(3):288-299,308.
- [6] 王社教,王兰生,黄金亮,等.上扬子区志留系页岩气成藏条件[J].天然气工业,2009,29(5):45-50.
- [7] 刘树根,王世玉,孙玮,等.四川盆地及其周缘五峰组龙马溪组黑色页岩特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(6):621-639.
- [8] 张金川,聂海宽,徐波,等.四川盆地页岩气成藏地质条件[J].天然气工业,2008,28(2):151-156,179-180.
- [9] WEITE ZENG, JINCHUAN ZHANG, WENLONG DING, et al. Fracture development in paleozoic shale of Chongqing area(South China). Part one: Fracture characteristics and comparative analysis of main controlling factors [J]. Journal of Asian Earth Sciences 2013,75:251-266.
- [10] WEITE ZENG, WENLONG DING, JINCHUAN ZHANG, et al. Fracture development in Paleozoic shale of Chongqing area(South China). Part two: Numerical simulation of tectonic stress field and prediction of fractures distribution [J]. Journal of Asian Earth Sciences 2013,75:267-279.
- [11] 刘宝珺,许效松.中国南方岩相古地理图集[M].北京:科学出版社,1994.
- [12] 牟传龙,周恩恩,梁薇,等.中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J].地质学报,2011,85(4):526-532.
- [13] 龙鹏宇,张金川,李玉喜,等.重庆及其周缘地区下古生界页岩气资源勘探潜力[J].天然气工业,2009,29(12):125-129,153-154.
- [14] 丰国秀,陈盛吉.沥青反射率与镜质体反射率之间的关系[J].天然气工业,1988,8(3):20-24.
- [15] 戴鸿鸣,王顺玉,陈义才,等.油气勘探地球化学[M].北京:石油工业出版社,2000.
- [16] 戴鸿鸣,黄东,刘旭宁,等.蜀南西南地区海相烃源岩特征与评价[M].天然气地球科学,2008,(4):503-508.
- [17] 张志平,程礼军,曾春林,等.渝东北志留系下统龙马溪组页岩气成藏地质条件研究[J].特种油气藏,2012,19(4):25-28,152.
- [18] 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.

## Black shale reservoirs from the Wufeng and Longmaxi Formations in northeastern Chongqing

GUO Xiu-mei<sup>1,2</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, YANG Yu-ning<sup>1,2</sup>, ZHOU Ye-xin<sup>1,2</sup>, NIU Bing-chao<sup>1</sup>

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

**Abstract:** The Wufeng and Longmaxi Formations in northeastern Chongqing are primarily made up of carbonaceous shales, mudstones, muddy siltstones, siliceous rocks, marls and bentonite, of which the black shales occur as the important shale gas reservoirs on a wide range of scales in the study area. The petrography, mineralogy and reservoir spaces of the black shales are treated on the basis of thin-section examination, mineral compositions, SEM, physical properties and organic geochemical signatures. These black shales are characterized by type I organic matter, higher total organic carbon (TOC) contents ranging between 2% and 7.56% with an average of 3.09%, and higher maturity levels of organic matter up to maturity to overmaturity, with Ro values ranging between 1.65% and 2.33%. The mineral compositions contain quartz and clay minerals dominated by illite and interstratified illite-montmorillonite. The porosity comprises intergranular pores, intragranular pores, micro-fissure and micropores, with an average porosity of 2.90% and an average permeability of  $0.005 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ . The results of research may provide geological basis for future exploration of the shale gas in the study area.

**Key words:** Wufeng Formation; Longmaxi Formation; shale gas; reservoir rock; northeastern Chongqing