

四川盆地川西坳陷三叠系须家河组页岩 有机孔演化及成因

徐亮^{1,2,3}, 杨威^{1,2}, 姜振学^{1,2}, 陈冬霞^{1,4}, 王耀华^{1,2}, 鲁健康^{1,2}, 赵明珠^{1,2}, 李兰^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249; 3. 中国石油西南油气田公司页岩气研究院, 四川成都 610051; 4. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249]

摘要:以川西坳陷须家河组陆相页岩为例,通过场发射扫描电镜与EDS能谱相结合的方法有效识别出固体沥青、镜质体和惰质体三大显微组分,以及油沥青、焦沥青、结构镜质体、无结构镜质体、镜屑体、丝质体、半丝质体、惰屑体、菌类等显微亚组分。扫描电镜下不同类型有机质孔隙发育程度差异大,有机粘土复合体中的固体沥青孔隙最为发育,其次为单独片状分布的固体沥青,镜质体和惰质体孔隙发育较差,主要以残余原生孔隙为主。受显微组分生烃潜力差异的控制,从固体沥青、镜质体到惰质体,三者的碳元素质量百分比依次增大,生烃潜力依次变差,成孔能力也依次变差;受粘土矿物催化作用的控制,随着伊利石含量增加,粘土矿物的比催化活度增加,可促进伊利石附近的固体沥青大量发育孔隙。仿真地层热模拟实验表明,不同有机显微组分孔隙演化差异大:随成熟度增加,固体沥青发育大量蜂窝状孔隙,面孔率不断增大,后期由于生烃枯竭导致面孔率逐渐减小;而镜质体和惰质体的孔隙发育较差,其原生孔隙还随成熟度的增加迅速减少。但镜质体和惰质体中广泛发育的微裂缝连通了沥青孔和其他无机孔,形成了微观孔-缝网络系统,提高了页岩储层的储集和渗流能力。

关键词:成孔能力;显微组分;孔隙非均质性;孔隙演化;页岩;须家河组;川西坳陷;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Evolution and genesis of organic pores in Triassic Xujiahe Formation shale, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

Xu Liang^{1,2,3}, Yang Wei^{1,2}, Jiang Zhenxue^{1,2}, Chen Dongxia^{1,4}, Wang Yaohua^{1,2},
Lu Jiankang^{1,2}, Zhao Mingzhu^{1,2}, Li Lan^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. Unconventional Oil and Gas Science and Technology Research Institute, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
3. Shale Gas Research Institute, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China;
4. College of Geoscience, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: Samples from non-marine organic rich shale in the Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin, were analyzed with field emission scanning electron microscope and EDS energy spectrum. Three maceral components, including solid bitumen, vitrinite and intertinite, as well as microscopic subcomponents such as oil bitumen, tar bitumen, structured vitrinite, unstructured vitrinite, detrital-vitrinite, fusinite, semi-fusinite, detrital-intertinite, and sclerotinite were identified in these organic-rich shale samples. The organic pores of different types vary greatly under scanning electron microscopy: the organic pores develop the best in solid bitumen in organoclay complex, well in individual solid bitumen flakes, and the worst in vitrinite and intertinite mainly with residual primary pores. Controlled by difference in hydrocarbon generation potential, the three macerals have their weight percentages of carbon increasing and hydrocarbon generation and pore-forming potential deteriorating successively from solid bitumen, vitrinite

收稿日期:2020-10-28;修订日期:2022-01-20。

第一作者简介:徐亮(1995—),男,助理工程师,非常规油气储层地质评价。E-mail: 2062198594@qq.com。

通讯作者简介:杨威(1986—),男,博士、副研究员、博士生导师,非常规油气储层地质评价。E-mail: yangw@cup.edu.cn。

基金项目:中国石油大学(北京)优秀青年学者科研启动基金项目(2462020QNXZ004);国家科技重大专项(2016ZX05034001-005,2017ZX050-35002-007)。

to intertinite. Higher content of illite means higher specific catalytic activity, which promotes the development of pores in solid bitumen near the illite. Thermal simulation experiments show that the pore evolution of different macerals varies greatly. With maturity increasing, solid bitumen responds differently from other two maceral groups, it develops a large number of honeycomb pores with increasing cross-sectional porosity, which later gradually decreases due to the exhaustion of hydrocarbon generation. Meanwhile vitrinite and intertinite develop less pores and have their primary pores decreasing rapidly. However, the widely developed microcracks in the latter two groups connect bituminous pores and other inorganic pores, forming a microscopic pore-fracture network and improving the storage and seepage capacity of shale reservoirs.

Key words: pore-forming capacity, maceral, pore heterogeneity, pore evolution, shale, Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

引用格式:徐亮,杨威,姜振学,等.四川盆地川西坳陷三叠系须家河组页岩有机孔演化及成因[J].石油与天然气地质,2022,43(2):325-340. DOI: 10.11743/ogg20220207.

Xu Liang, Yang Wei, Jiang Zhenxue, et al. Evolution and genesis of organic pores in Triassic Xujiahe Formation shale, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 325-340. DOI: 10.11743/ogg20220207.

中国陆相盆地分布范围广,中生界和新生界发育多个陆相泥页岩层系,在四川盆地侏罗系和鄂尔多斯盆地三叠系的多口钻井中均获得了页岩气流,展现出陆相页岩气良好的勘探开发前景^[1-2]。四川盆地川西坳陷须家河组发育大规模优质页岩,陈果^[3]等研究表明须家河组页岩气资源潜力较大,地质资源量约为 $46.451\ 88\times 10^{12}\text{ m}^3$,其中须家河组三段(须三段)和须五段占85%以上。中国石化西南油气分公司在川西坳陷孝泉-丰谷构造带部署的以须五段为主要目的层位的新页HF-1和新页HF-2水平勘探井,分别在须五中亚段获得低产气流和须五下亚段获得工业气流,展现出川西地区须家河组页岩气良好的勘探潜力^[4]。四川盆地须家河组已经成为中国陆相页岩气勘探开发的主力层系之一。与海相页岩相比,多变的沉积微相控制下的陆相页岩其储层孔隙结构更为复杂,对页岩气储集能力影响较大^[5-6]。另外,相对于海相页岩,陆相页岩微观储集空间特征缺乏深入研究,而针对陆相页岩扫描电镜下有机质显微组分的研究更是少之又少。

页岩储层中有机质孔隙的发育具有很强的非均质性^[7-10]。例如,相邻的两片有机质中,一片蜂窝状孔隙极为发育,而另一片不发育孔隙^[7,11];一些有机质内部零星发育大而规则的近圆形孔隙,而另一些发育均匀分布且连通性极好的细密孔隙,甚至出现大孔套小孔的现象^[12-13];在有机质与无机矿物接触的边缘,孔隙往往十分发育,而在远离无机矿物的有机质内部,孔隙则少发育^[13-14]。以前的研究也注意到有机质显微组分差异对其成孔能力的影响,前人大多利用偏光显微镜或自然断面的扫描电镜观察来识别不同显微组分^[15-16],缺少系统研究和直观证据。而且页岩样品经常需要抛

光后观察孔隙以及“偏光显微镜和场发射扫描电镜需要同一视域”也是客观需求,因而需要建立一套简单易行的有机显微组分综合识别方法。

川西坳陷须家河组属于陆相坳陷湖盆沉积,沉积物来源复杂多样,导致形成的页岩内部有机质组分十分丰富。在须家河组页岩中,不同有机质组分的孔隙发育特征尚不明确。笔者以川西坳陷须家河组页岩为研究对象,采用场发射扫描电镜和EDS能谱相结合的手段,建立了一套有机质显微组分综合识别体系,系统分析了陆相页岩不同类型有机质孔隙发育特征,然后通过仿真地层热模拟实验得到了不同有机质显微组分的孔隙演化规律,探讨了有机质差异成孔能力的主控因素,最终建立了不同类型有机质动态综合成孔模式,以期深入认识和评价页岩储层,指导陆相页岩气资源评价和勘探开发。

1 研究区地质概况

川西坳陷位于四川盆地西部,是发育在海相基底上的深坳陷前陆盆地^[17],面积约为 $4\times 10^4\text{ km}^2$ 。川西坳陷经历了印支、燕山、喜马拉雅等多期构造运动,呈北东向展布,东至龙泉山一带,南抵雅安-乐山构造带,西临龙门山冲断带,北达米仓山-大巴山冲断带^[18](图1a)。研究区位于川西坳陷的中部,面积约 $1.1\times 10^4\text{ km}^2$,经历了多期构造运动,受到了周缘构造带的强烈影响,形成复杂的现今构造格局^[17,19]。根据断裂走向和褶皱分布规律,可划分为5个次级构造单元,分别为成都凹陷、梓潼凹陷、孝泉-新场-丰谷构造带、知新场-龙宝梁构造带和龙门山逆冲推覆带(图1b)。

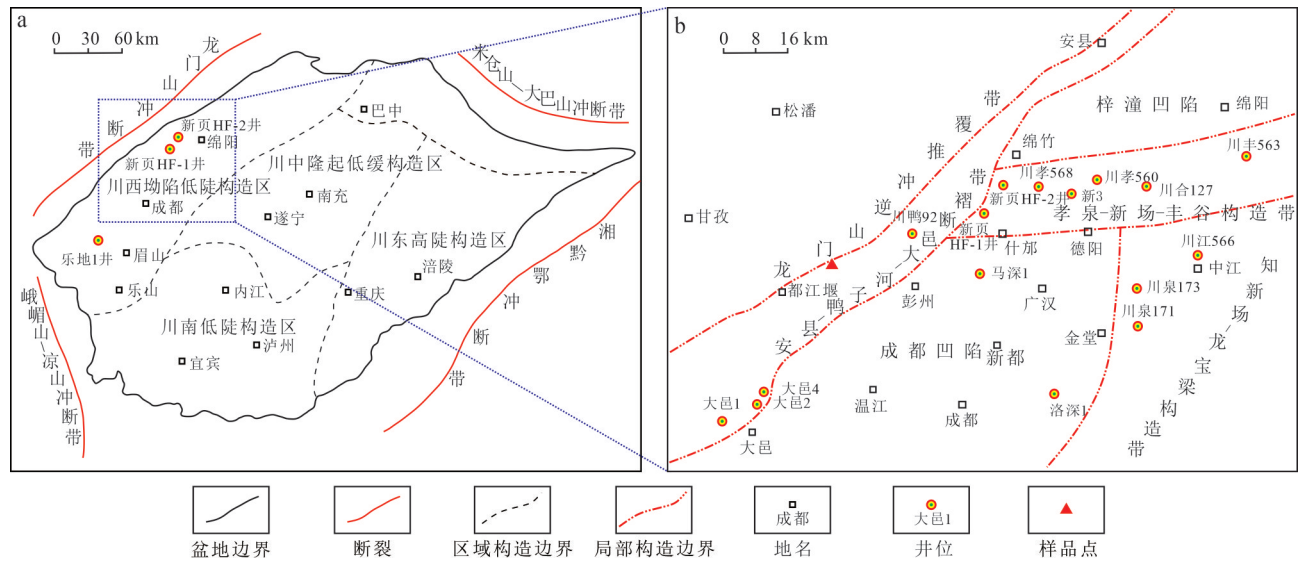


图1 四川盆地川西坳陷构造简图(a)及热模拟样品采样位置(b)

Fig. 1 Diagrams showing the structures (a) and sampling locations (b) (for thermal simulation) in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

2 样品和实验分析方法

2.1 实验样品

7件自然样品分别采自于新页 HF-1 井、新页 HF-2 井和乐地 1 井须家河组深灰色-黑色页岩,采样深度为 1 825.45 ~ 2 743.12 m,样品的总有机碳含量(TOC)为 1.06 % ~ 2.47 %,镜质体反射率(R_o)为 1.76 % ~ 2.05 %,表明有机质处于高成熟阶段,干酪根类型均为 III 型。7 件自然样品的粘土矿物含量为 45.26 % ~ 72.78 %,平均为 57.36 %,均为粘土质页岩,粘土矿物中伊利石含量为 18.00 % ~ 39.00 %,平均为 25.86 % (表 1)。

热模拟实验样品采自于四川省都江堰市向峨乡莲花剖面野外露头(图 1 中红色三角形所示位置),为须五段低成熟($R_o = 0.68$ %)页岩,其基本数据见表 2。

2.2 实验分析方法

2.2.1 仿真地层热模拟实验

自从 Connan^[20]和 Waples^[21]提出有机质演化的温度-时间补偿效应以来,热模拟实验已被广泛用于模拟有机质的成熟和演化。在这项研究中,热模拟实验是使用海安石油公司生产的高温高压热模拟设备进行的。在一块野外露头上钻取 7 次,制成柱样(2.5 cm × 10.0 cm)7 个,1 份用于测量 TOC 、 R_o 以及干酪根类型,并作为低演化样品对照组,其余 6 份进行热模拟实验。将用于热模拟实验的样品置于密闭系统中,然后从室温加热至 300,350,400,450,500 和 550 °C,加热速率均为 20 °C/h。达到选定温度后均保持恒定温度 48 h,以确保在热模拟实验过程中样品热解过程得以完全进行。实验过程中使用了水热解法,即在封闭的设备中添加了适量的蒸馏水(占样品质量的 50 %)以补充损失的水。

表 1 四川盆地川西坳陷须五段页岩岩心样品基本数据

Table 1 Basic data of shale cores from the fifth member of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

样品编号	井号	深度/m	TOC /%	R_o /%	干酪根类型	粘土矿物含量/%	伊利石含量/%
HF-02	新页 HF-1 井	2 715.45	2.47	1.96	III 型	51.48	21
HF-05	新页 HF-1 井	2 725.16	2.15	1.93	III 型	45.26	18
HF-12	新页 HF-2 井	2 736.45	1.96	2.05	III 型	53.96	26
HF-16	新页 HF-2 井	2 743.12	1.06	1.91	III 型	65.68	39
LD-05	乐地 1 井	1 825.45	1.23	1.85	III 型	72.78	29
LD-74	乐地 1 井	1 875.32	1.26	1.76	III 型	58.16	25
LD-18	乐地 1 井	1 895.47	2.14	1.95	III 型	54.23	23

表2 四川盆地川西坳陷莲花剖面须五段页岩
热模拟样品基本数据

Table 2 Basic data of shale samples for thermal simulation
from the fifth member of Xujiahe Formation, Lianhua out-
crop, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

样品编号	TOC/%	R_o /%	干酪根类型
X-0	2.24	0.68	Ⅲ型

2.2.2 场发射扫描电镜+EDS能谱

场发射扫描电镜被广泛应用于页岩孔隙形貌研究。实验样品要求块状,确定层理方向后垂直层理面进行氩离子抛光,随后镀金,增强其导电性。然后通过FEI Quanta200F型场发射扫描电镜扫描样品表面,工作电压为10~15 kV,工作距离为8~10 mm,能谱仪为EDAX三元一体化系统,对样品表面放大成像,并通过EDS能谱分析其矿物的元素组成。

3 不同有机质显微组分孔隙发育特征

显微镜检测结果显示,川西坳陷须家河组陆相页岩的有机质显微组分主要由镜质体、惰质体和固体沥青组成。镜质体的含量最高,占总有机质含量的78.63%~88.83%,平均含量为83.17%;惰质体次之,占总有机质含量的9.89%~19.56%,平均含量为14.77%;固体沥青含量最低,占总有机质含量的1.28%~2.91%,平均含量为2.06%(图2)。

3.1 镜质体孔隙发育特征

镜质体是植物的木质纤维组织经过腐殖化作用和

凝胶化作用形成的显微组分的集合^[22-23]。根据植物细胞结构保留程度的差异,可将镜质体分为结构镜质体、无结构镜质体和镜屑体。保存较好的结构镜质体常常保留有原始高等植物的网状纤维结构,明显可见细胞壁和细胞腔(图3a,b),一般无孔隙发育,细胞腔常呈圆形-椭圆形,并呈规律排列,受压力作用,细胞腔常发生变形,呈各种不规则状,如8字形、平行四边形、纺锤形和水滴形,细胞腔常被粘土矿物或脆性矿物所充填(图3a,b)。无结构镜质体经过强烈的凝胶化作用已看不到原始的植物细胞结构,其表面光洁,常见横断微裂缝(图3c,d),偶见零星分布的规则圆形-椭圆形气孔。镜屑体为镜质体碎屑颗粒,由上述结构镜质体和无结构镜质体经过机械破碎或者受构造运动而断裂破坏形成的,因此保留了细胞壁的弧状结构或拱形边界,具有尖锐的棱角,呈星状、弧状以及角状,孔隙不发育(图3e,f)。

3.2 惰质体孔隙发育特征

惰质体是植物的木质纤维组织经过丝炭化作用形成的显微组分的集合^[22-23],形貌上与镜质体不易区分,但形成环境不同。镜质体形成于还原环境^[24],EDS能谱测试中氧的质量百分比比较低,一般小于10%;惰质体形成于氧化环境^[24],氧的质量百分比一般大于10%,且碳的质量百分比高于镜质体,一般为80%~90%。借助EDS能谱能有效区分镜质体和惰质体(图3,图4)。另外,惰质体的高突起也是区别惰质体与其他显微组分的有效标志。须家河组陆相页岩样品中可识别出丝质体、半丝质体、惰屑体和菌类体。

丝质体在扫描电镜下可见完好的原始植物细胞结

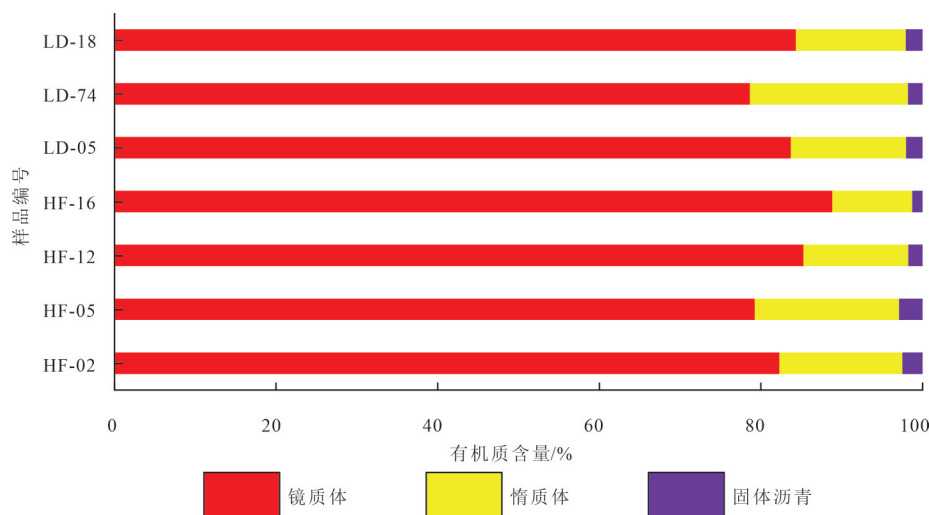


图2 四川盆地川西坳陷须五段页岩有机质显微组分含量

Fig. 2 Maceral contents in organic-rich shale from the fifth member of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

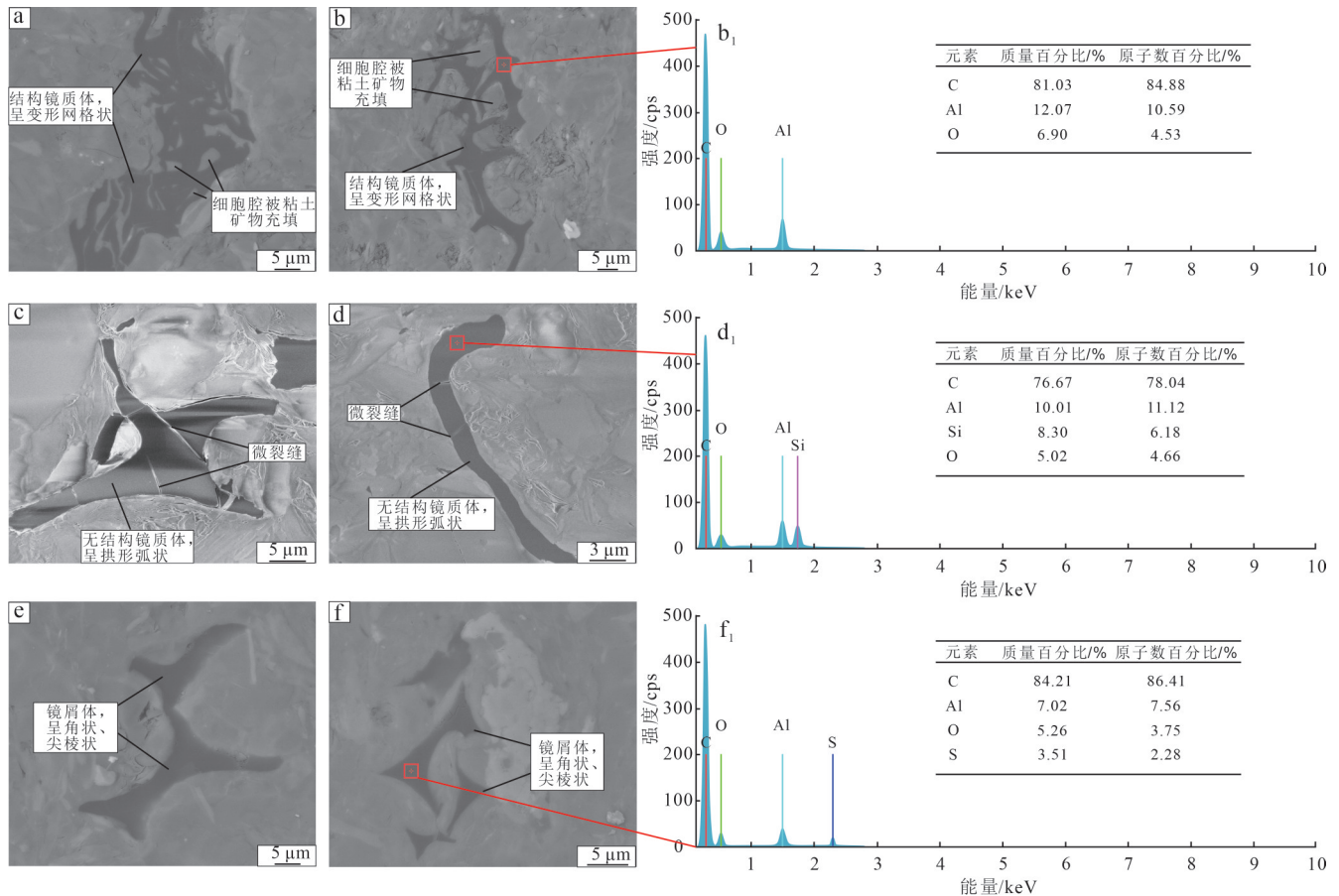


图3 四川盆地川西坳陷须五段页岩镜质体孔隙发育特征

Fig. 3 Characteristics of pores in vitrinites from the fifth member of Xujiache Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

a. 样品 HF-02, 新页 HF-1 井, 埋深 2 715.45 m, 结构镜质体; b. 样品 HF-05, 新页 HF-1 井, 埋深 2 725.16 m, 结构镜质体; c. 样品 HF-02, 新页 HF-1 井, 埋深 2 715.45 m, 无结构镜质体; d. 样品 HF-05, 新页 HF-1 井, 埋深 2 725.16 m, 无结构镜质体; e. 样品 HF-02, 新页 HF-1 井, 埋深 2 715.45 m, 镜屑体; f. 样品 HF-05, 新页 HF-1 井, 埋深 2 725.16 m, 镜屑体; b₁, d₁, f₁. 对应点的能谱图

构,呈网络状或筛网状,细胞腔也常被粘土矿物或其他矿物充填(图4b),受压实影响,丝质体也常会发生变形甚至破裂,形成弧状或拱形结构,在变形处往往形成不规则孔隙(图4b),整体孔隙不发育。半丝质体的细胞结构由于细胞壁呈膨胀接触而模糊不易区分,细胞腔由于膨胀挤压而变小,可见少量气孔、残余孔隙和微裂缝(图4a,b)。与镜屑体类似,惰屑体是在镜下无法辨认细胞结构的惰质体碎屑颗粒,具有尖锐的棱角,呈弧状或角状(图4c,d)。菌类体通常呈规则的浑圆状,突起异常高(图4d,f,h),边缘致密不发育孔隙,中部零星可见月牙状收缩孔(图4d)。菌类体常沿微裂缝呈定向分布,有时也呈团簇状分布(图4e—g)。

3.3 固体沥青孔隙发育特征

固体沥青属于原始干酪根在生烃过程中转化形成的次生有机质,常出现在生油窗和气窗成熟期^[25],既包括固态的烃类也包括焦沥青。根据其在有机质

演化阶段出现的先后顺序,可分为前油沥青、后油沥青以及焦沥青^[26-27]。前油沥青被认为是在未熟—低熟阶段,由于干酪根向烃类转化过程中的早期产物,搬运距离短,存在于干酪根附近^[28],孔隙一般不发育或少发育。后油沥青则被认为是原油经过一定距离的运移以及降解作用而存在的固体沥青^[28]。后油沥青形成的成熟度较高,但还未达到原油裂解生气的阶段^[25],因此孔隙也不是很发育。前油沥青和后油沥青在扫描电镜下较难区分,可以统称为油沥青^[29]。焦沥青属于不可溶有机质,是油沥青进一步裂解生气后残留下来的固体沥青,发育大量蜂窝状孔隙,分布均匀且连通性较好。

与镜质体和惰质体不同,固体沥青最显著的特征是无固定的颗粒形状,其分布形式主要由周围矿物之间的空间形状决定^[25],呈充填状,条带状,形似胶结物,孔隙最为发育,孔径 20~50 nm 不等(图 5a—d)。有机粘土复合体也是固体沥青的一种广泛存在形式,

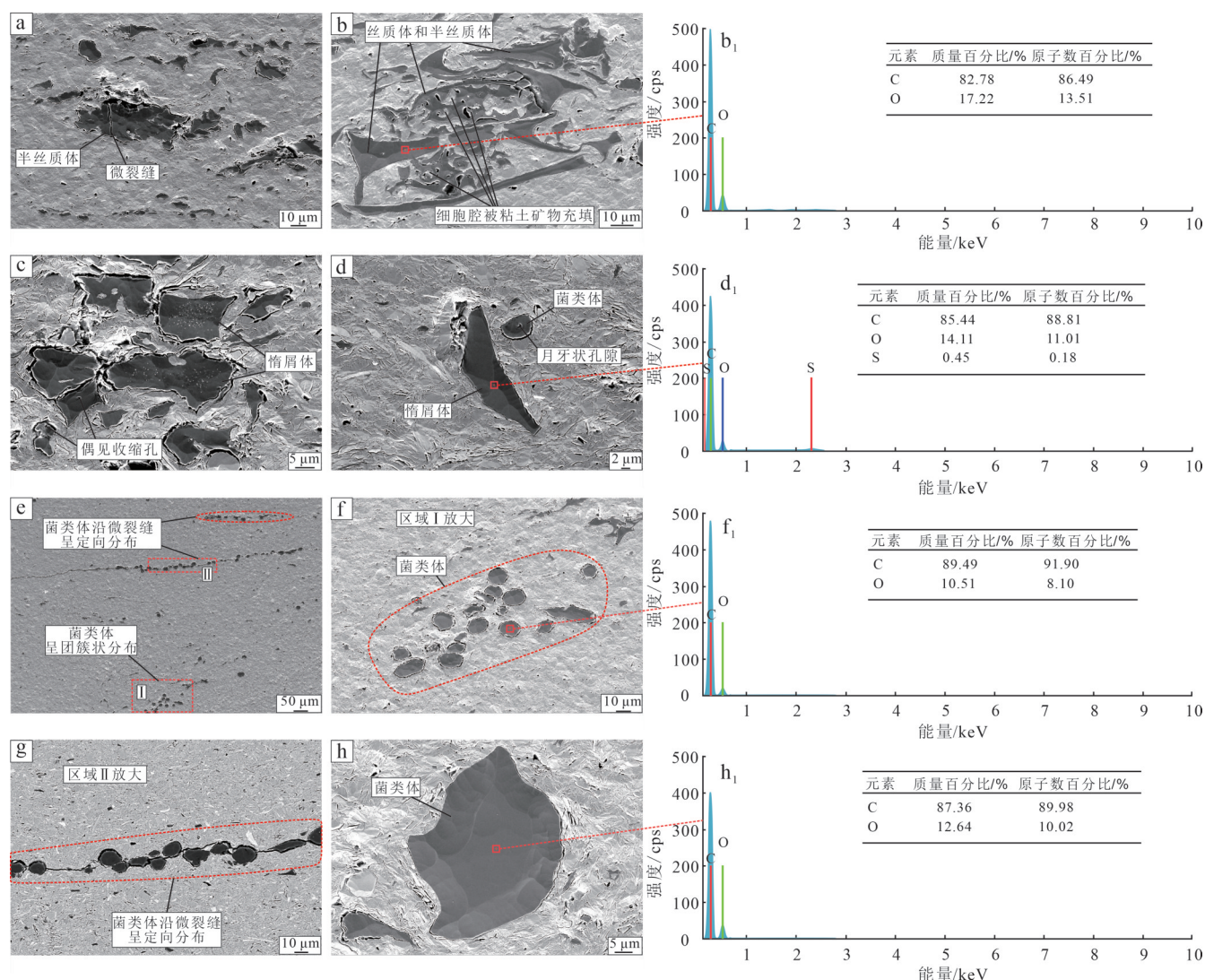


图4 四川盆地川西坳陷须五段页岩惰质体孔隙发育特征

Fig. 4 Characteristics of pores in intertinites from the fifth member of Xujiache Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin
a. 样品 HF-12, 新页 HF-2 井, 埋深 2 736.45 m, 半丝质体; b. 样品 HF-16, 新页 HF-2 井, 埋深 2 743.12 m, 丝质体与半丝质体共存; c. 样品 HF-12, 新页 HF-2 井, 埋深 2 736.45 m, 惰屑体; d. 样品 HF-16, 新页 HF-2 井, 埋深 2 743.12 m, 菌类体与惰屑体共存; e. 样品 HF-16, 新页 HF-2 井, 埋深 2 743.12 m, 菌类体; f. 图 e 中区域 I 放大; g. 图 e 中区域 II 放大; h. 样品 HF-16, 新页 HF-2 井, 埋深 2 743.12 m, 菌类体; b₁, d₁, f₁, h₁ 对应点的能谱图

研究表明,在泥页岩中有超过 70 % 的有机质与粘土矿物相结合,以有机粘土复合体的形式保存下来^[30-31]。有机粘土复合体中的有机质几乎全部为固体沥青,但与大片孤立分布的固体沥青不同,有机粘土复合体中的固体沥青具有细粒结构,呈斑点状、不连续的小片状分布(图 5e—h)。有机粘土复合体中固体沥青的孔隙十分发育,呈不规则蜂窝状,孔径可达 50 nm,其中的粘土矿物多为丝状伊利石,以及带状或小块状绿泥石,与丝状伊利石相接触的固体沥青孔隙尤为发育。

3.4 显微组分综合识别标志

由上述可知,镜质体与惰质体可以通过扫描电镜镜下形态与固体沥青区别开来,而镜质体与惰质体两

者可以通过惰质体具有高突起,以及两者 EDS 能谱中碳、氧元素质量百分比差异来区分。在此基础上,笔者统计了不同类型有机质的化学成分。固体沥青的碳元素质量百分比介于 35 % ~ 75 %,其中无孔隙或少孔隙的油沥青,碳元素含量偏低,其质量百分比介于 50 % ~ 60 %;孔隙发育的焦沥青碳元素含量偏高,说明前者随着成熟度的升高还有排烃生孔的潜力,后者为生孔后的残余固体沥青;而有机粘土复合体中的固体沥青碳元素含量更低,其质量百分比介于 35 % ~ 50 %,很可能与粘土矿物的催化作用有关(图 6)。镜质体的碳元素质量百分比分布在 75 % ~ 85 %,惰质体的碳元素质量百分比最高,一般为 80 % ~ 90 % (图 3, 图 4)。一般地,碳元素质量百分比的测值越高,说明生烃潜力越

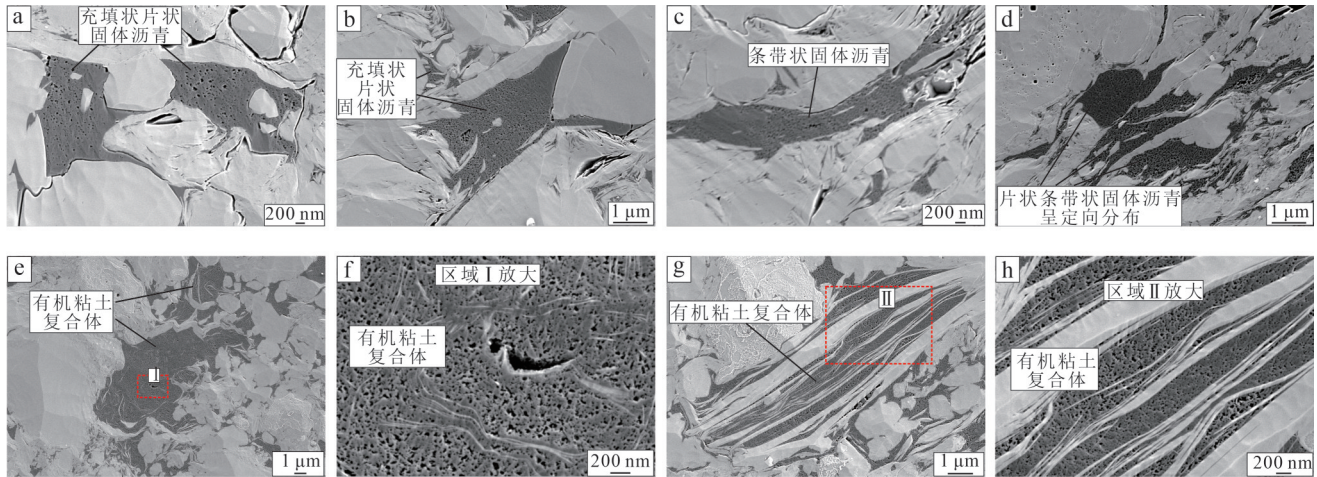


图5 四川盆地川西坳陷乐地1井须五段页岩固体沥青孔隙发育特征

Fig. 5 Images showing the characteristics of pores in solid bitumen from the fifth member of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

a. 样品 LD-05,埋深 1 825.45 m,片状固体沥青; b. 样品 LD-74,埋深 1 875.32 m,片状固体沥青; c. 样品 LD-18,埋深 1 895.47 m,条带状固体沥青; d. 样品 LD-18,埋深 1 895.47 m,条带状固体沥青; e. 样品 LD-18,埋深 1 895.47 m,有机粘土复合体; f. 图 e 中区域 I 放大; g. 样品 LD-18,埋深 1 895.47 m,有机粘土复合体; h. 图 g 中区域 II 放大

差^[32-33],这与本研究观察到的不同显微组分孔隙发育程度的差异基本吻合。即孔隙发育程度为有机粘土复合体中的固体沥青>片状固体沥青>镜质体>惰质体。所以通过EDS能谱中碳、氧元素质量百分比差异也能大致区分固体沥青、镜质体和惰质体。不同有机质显微组分综合识别标志见表3。

通过图6来进一步说明不同有机质显微组分综合识别标志的应用情况。图6a中两片有机质都呈无定形充填状,可以判断为固体沥青。左边孔隙十分发育,右边无孔隙,EDS能谱显示左边固体沥青碳元素质量百分比为68.19%,高于右边固体沥青的56.89%,故左边为焦沥青,右边为油沥青。图6b中间为条带状有机质,孔隙不发育,突起较高,可大致判断为惰质体,EDS能谱显示中间无孔有机质碳元素质量百分比为

86.02%,确定为惰质体,其细胞壁变形严重不易区分,进一步综合判断为半丝质体。图6c中间也为不发育孔隙的条带状有机质,图6d为c的局部放大,可见无孔有机质边缘发育细密小孔隙,两个能谱点的碳元素质量百分比为75.12%和76.38%,突起较低,细胞壁和细胞腔不易区分,可以综合判断为无结构镜质体。图6d中放大的有机粘土复合体可见丝状的伊利石和带状、小块状的绿泥石。图6c中固体沥青的碳元素质量百分比为61.54%,图6d有机粘土复合体中的固体沥青碳元素质量百分比为46.92%,碳元素含量最低,也印证了前面的观点,即有机粘土复合体中的固体沥青生烃能力最强,孔隙发育最多,碳元素质量百分比最低。图6e可以通过低突起和孔隙发育判断中间有机质为固体沥青,通过高突起和椭圆状判断右上方和左

表3 四川盆地川西坳陷须五段页岩不同有机质显微组分综合识别标志

Table 3 Comprehensive identification indexes for different macerals in organic-rich shale from the fifth member of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

显微组分	亚组分	扫描电镜下特征	EDS能谱特征(元素质量百分比/%)
镜质体	结构镜质体	黑色,网格状,具细胞结构,致密均匀无孔隙,突起较低	C: 75 ~ 85 O: <10
	无结构镜质体	黑色,条带状,无细胞结构,致密均匀,边缘发育少量孔隙,横断微裂缝,突起较低	
	镜屑体	黑色,呈星状、弧状以及角状,致密均匀,偶见椭圆形孔隙,突起较低	
惰质体	丝质体	灰黑色,网格状,具细胞结构,胞腔大,偶见细密孔隙,突起高	C: 80 ~ 90 O: >10
	半丝质体	灰黑色,具残留丝质体结构,可见少量残余孔隙,突起高	
	惰屑体	灰黑色,与镜屑体相似,呈星状、弧状以及角状,突起高	
	菌类体	灰黑色,突起异常高,呈椭圆形,中部零星可见椭圆形收缩孔	
固体沥青	油沥青	黑灰色,无固定形状,充填状,形似胶结物,突起极低,偶见收缩孔	C: 50 ~ 60 O: <15
	焦沥青	黑灰色,无固定形状,充填状,形似胶结物,突起极低,蜂窝状孔隙	

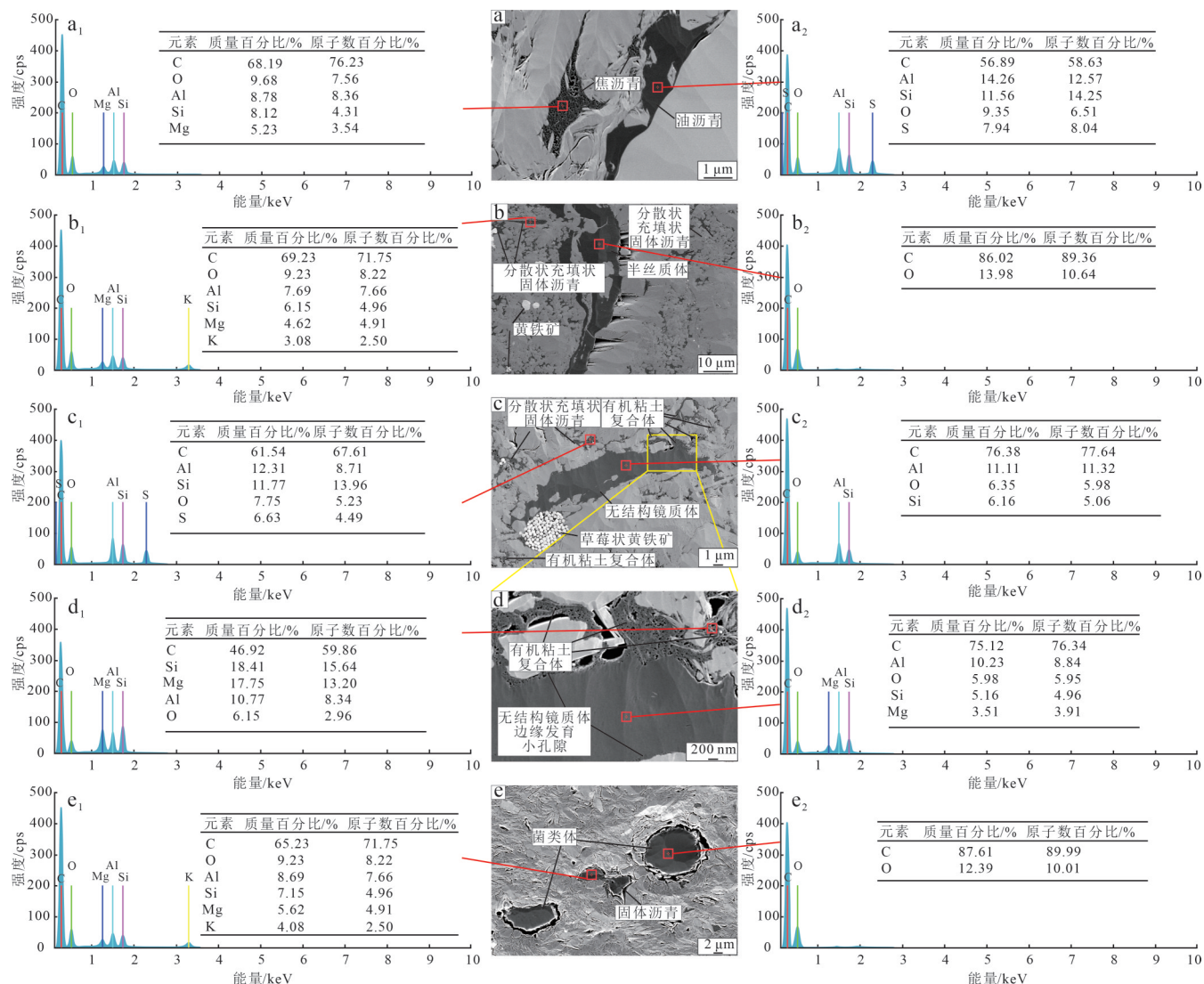


图6 四川盆地川西坳陷须五段页岩不同显微组分综合识别图

Fig. 6 Comprehensive identification charts for different macerals in organic-rich shale from the fifth member of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

a. 样品 LD-05, 埋深 1 825.45 m, 油沥青与焦沥青共存; b. 样品 LD-74, 埋深 1 875.32 m, 半丝质体与固体沥青共存; c. 样品 LD-18, 埋深 1 895.47 m, 无结构镜质体与有机粘土复合体共存; d. 图 c 的局部区域放大; e. 样品 LD-18, 埋深 1 895.47 m, 菌类体与固体沥青共存; a₁—e₂. 对应点的能谱图

下方有机质为菌类体。EDS 能谱显示图 6e 中菌类体的碳元素质量百分比为 87.61%, 固体沥青的碳元素质量百分比为 65.23%, 也和综合识别标志基本一致。

4 不同显微组分孔隙演化特征

前述不同有机质显微组分的孔隙发育特征是基于自然样品的, 其 R_o 集中在 1.7%~2.0%, 处于高成熟阶段, 只能反映该阶段的孔隙发育特征, 有很大局限性。因此, 笔者采用低熟页岩样品, 通过仿真地层热模拟实验, 重塑了不同类型有机质孔隙动态演化全过程。本研究采用 Sweeney 和 Burnham^[34] 中的“Easy R_o ”方法

来计算热模拟实验中的热成熟度, 300, 350, 400, 450, 500 和 550 °C 对应的 Easy R_o 值分别为 0.92%, 1.23%, 1.56%, 1.89%, 2.12% 和 2.51%。

4.1 固体沥青孔隙演化特征

将热模拟样品进行扫描电镜观察, 随机选取视域下的固体沥青, 观察其孔隙发育特征。

通过软件 Image Pro Plus (IPP) 对扫描电镜下有机质和有机质孔隙分别进行提取 (图 7d₁—h₁ 和 d₂—h₂), 并计算页岩中有机质包括面孔率、等效圆直径、周长面积比及主流孔隙直径在内的 4 种孔隙结构特征参数^[35-36]。

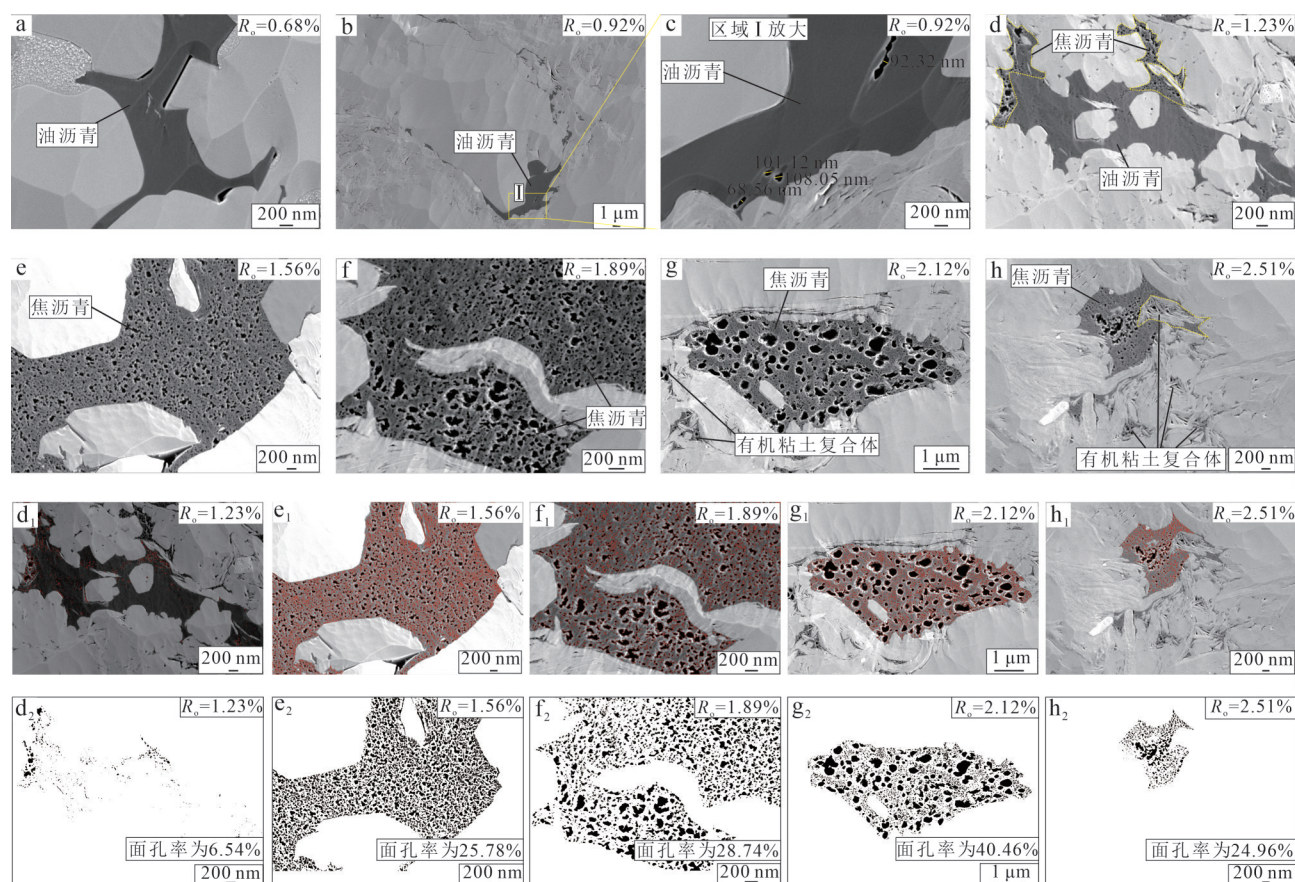


图7 四川盆地川西坳陷须五段页岩热模拟样品固体沥青孔隙演化SEM图版

Fig. 7 SEM images showing the pore evolution in solid bitumen in shale samples from the fifth member of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin during thermal simulation

a—h. 页岩热模拟样品固体沥青孔隙演化SEM图版; d₁—h₁, d₂—h₂. 用IPP软件提取的d—h的有机质和有机质孔隙

面孔率(Φ)是指孔隙面积与基质面积之比,反映有机质孔隙总体发育情况。结果显示, $R_o=0.68\%$ 时,固体沥青不发育孔隙,此时的固体沥青主要为油沥青,面孔率为0(图7a); $R_o=0.92\%$ 时,固体沥青发育零星收缩孔,可能是气态烃逸出时形成的,仍为油沥青,面孔率为0.90%(图7b,c); $R_o=1.23\%$ 时,油沥青的边缘开始焦化,气态烃排出蜂窝状孔隙,内部部分发育小孔,面孔率为6.54%(图7d,d₁,d₂); $R_o=1.56\%$ 时,焦沥青发育大量蜂窝状孔隙,面孔率为25.78%(图7e,e₁,e₂); $R_o=1.89\%$ 时,焦沥青为主,有机粘土复合体大量发育,面孔率为28.74%(图7f,f₁,f₂); $R_o=2.12\%$ 时,蜂窝状孔隙十分发育,可见孔隙融合现象^[12-13],面孔率为40.46%,达到最大值(图7g,g₁,g₂); $R_o=2.51\%$ 时,面孔率为24.96%,有减小趋势(图7h,h₁,h₂)。

等效圆直径(ECD)是指对一个不规则的有机质孔统计其平均直径。结果表明,随演化程度增加,等效圆直径先增大后减小,最大值出现在 $R_o=2.12\%$ 时,与面孔率的变化规律一致(图8a—e)。

单个孔隙直径提供的面积累计求和,当某一孔径对应的累计面积为总面积的50%时,该孔径即为主流孔隙直径(DOMsize)。在 $R_o=1.23\%$ 时,主流孔隙直径为45 nm,表明孔隙多发育为小孔;在 $R_o=1.89\%$ 时,值为62 nm,明显较 $R_o=1.23\%$ 变大,表明孔隙明显增大;在 $R_o=2.12\%$ 时,值为182 nm,达到最大值; $R_o=2.51\%$ 时,值为57 nm,较 $R_o=2.12\%$ 变小,同样体现出了先增大后减小的趋势,与面孔率和等效圆直径的变化规律一致(图8k)。

周长面积比(POA)是指单个孔隙周长和面积的比值,是二维空间内的比表面积。周长面积比越大,反映有机质孔隙越复杂。在 $R_o=1.23\%$ 时,周长面积比分布范围集中为0.18~0.20 nm⁻¹;在 $R_o=1.56\%$ 时,集中在0.12~0.14 nm⁻¹,较 $R_o=1.23\%$ 减小,主要因为油沥青向焦沥青转化,内部也出现均匀的蜂窝状孔隙;在 $R_o=1.89\%$ 时,集中在0.14~0.16 nm⁻¹,开始增大;在 $R_o=2.12\%$ 时,集中在0.25~0.30 nm⁻¹,达到最大,主要由于焦沥青孔隙十分发育,出现孔隙融合现象,孔

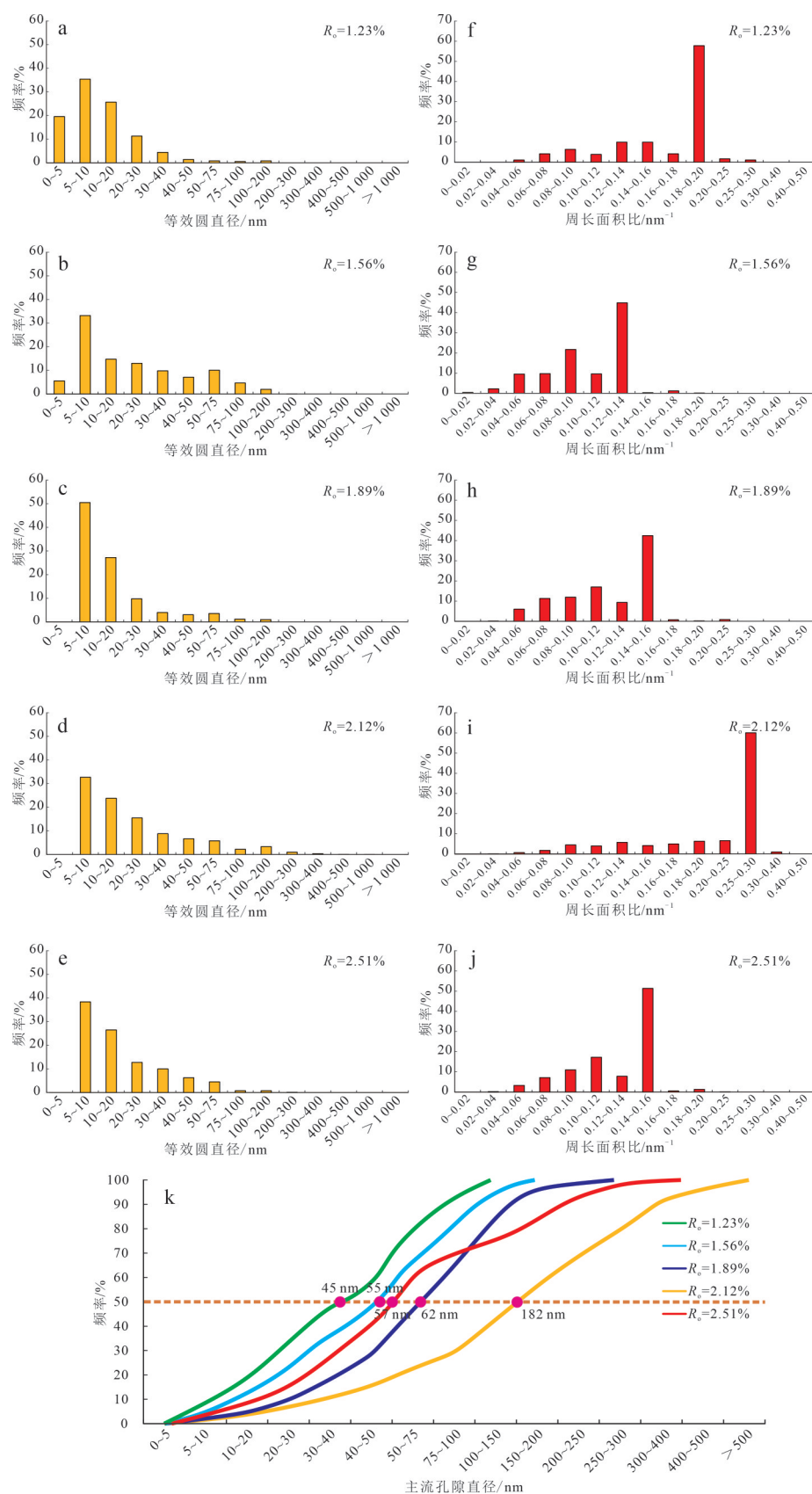


图8 四川盆地川西坳陷须五段页岩热模拟样品固体沥青的特征参数演化图版

Fig. 8 Evolution charts showing characteristic parameters for solid bitumen in shale samples from the fifth member of Xujiache Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin during thermal simulation

a—e. 固体沥青的等效圆直径变化柱状图; f—j. 固体沥青的周长面积比变化柱状图; k. 固体沥青的主流孔隙直径变化曲线

隙复杂程度增加;在 $R_o=2.51\%$ 时,集中在 $0.14\sim 0.16\text{ nm}^{-1}$,再次减小,主要由于生烃萎缩,大孔坍塌^[37-38],小孔保留下来,导致复杂程度变低(图8f—j)。

4.2 镜质体和惰质体孔隙演化特征

将热模拟样品进行扫描电镜观察,随机选取观察到的镜质体与惰质体,观察其孔隙发育特征。整体上看,随着演化程度增加,镜质体和惰质体孔隙并不发育,可见少量零星的孔隙(图9a,e,f—i)。 $R_o<0.5\%$ 时,镜质体和惰质体还保留有高等植物的原始细胞结构,且细胞结构尚未被充填和破坏; $0.5\%<R_o<1.2\%$ 时,镜质体和惰质体胞腔被无机矿物和烃类充填或半充填(图9a,b,g),镜质体和惰质体孔隙降到最低。在垂向压实或侧向挤压的作用下,丝质体和结构镜质体易发生变形,一些未被充填的细胞腔由于挤压变形导致细胞腔的空间压缩,形成新月形、三角形孔隙(图9a,b,f—g)。 $1.2\%<R_o<2.4\%$ 时,无结构镜质体微裂缝增加,且开度变大(图9c,d);菌类体中部出现圆形—椭圆形孤立孔隙,并有逐渐增大的趋势,且菌类体与周围矿物之间的微裂缝增大(图9h,i)。 $R_o>2.4\%$ 时,无结构镜质体微裂缝广泛发育,甚至出现破碎现象

(图9e);菌类体周围的矿物开始脱落,微裂缝进一步增大(图9j)。

尽管镜质体和惰质体在整个演化过程中孔隙发育较差,但其微裂缝的发育却贯穿整个过程。随演化程度增加,镜质体和惰质体内部微裂缝大量发育,宽度也进一步增大(图9a₁—e₁),有机质与周围矿物之间的微裂缝也不断增大(图9f₁—j₁),有机质和粘土矿物中发育的微裂缝连通沥青孔隙和其他无机孔隙,形成孔隙—微裂缝网络系统,大大提高页岩储层的储集和渗流能力,进而提高页岩气产量,是须家河组页岩成为优质储层的关键因素之一。

5 有机质差异成孔能力及机理

5.1 显微组分生烃潜力差异

在川西坳陷须家河组页岩中,3种显微组分成孔能力存在明显差异,固体沥青的生孔能力最强,其次为镜质体,惰质体最差。结合有机质的生烃产孔理论^[39-40],孔隙发育程度的差异本质上与不同组分有机质的生烃潜力密切相关。前人研究表明,以腐泥组和

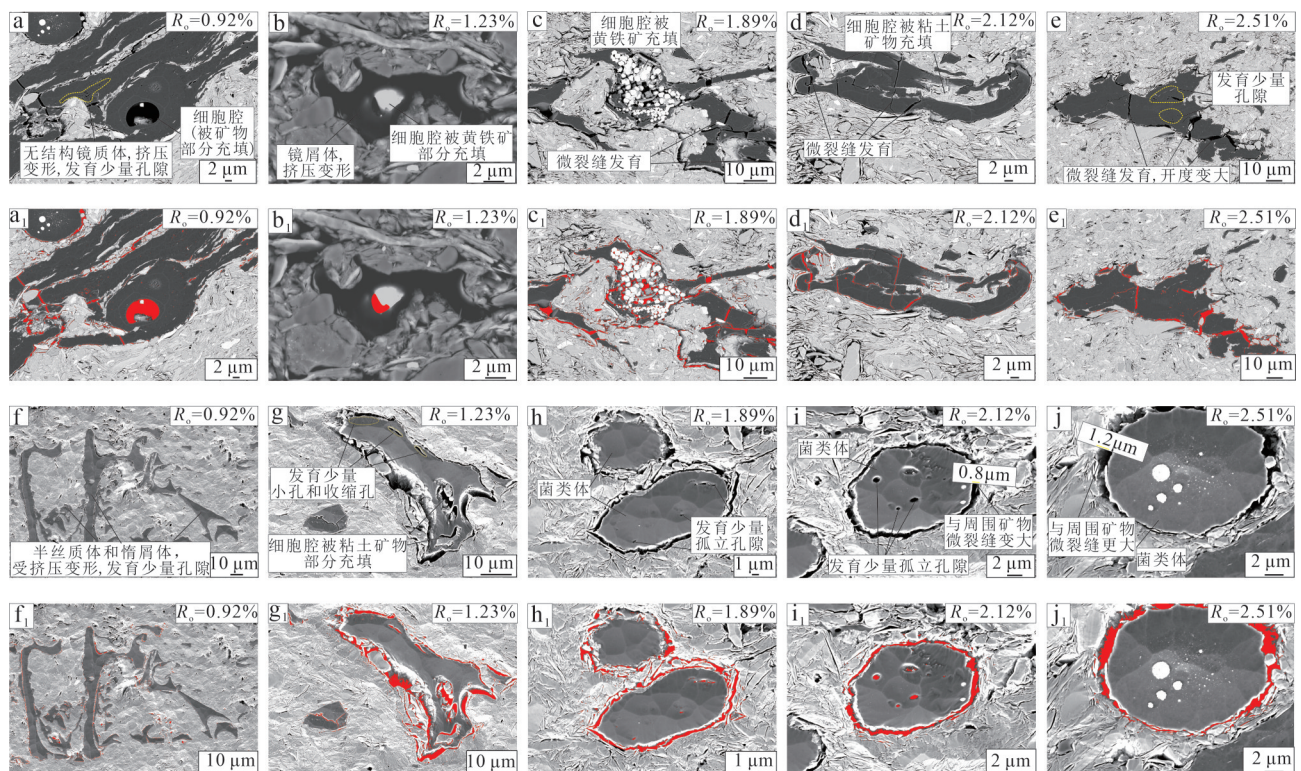


图9 四川盆地川西坳陷须家河组页岩热模拟样品镜质体和惰质体孔隙演化SEM图版

Fig. 9 SEM images showing the pore evolution in vitrinites and intertinites from shale samples from the fifth member of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin during thermal simulation

a—e. 镜质体孔隙演化SEM图版, a₁—e₁. 用IPP软件提取的a—e的孔隙; f—j. 惰质体孔隙演化SEM图版, f₁—j₁. 用IPP软件提取的f—j的孔隙

壳质组为主要母质的生烃潜力最大;镜质组主要为生气组分^[23,41];而惰质体既不能生气也不能生油,但又不同于一般的“死碳”^[23,42];固体沥青作为次生有机质有进一步裂解生气产孔的潜力^[43-48],因此生烃潜力要强于镜质体和惰质体。

有机质的氢、碳元素含量是判断生烃潜力的直接指标。在场发射扫描电镜下利用能谱仪无法直接测出氢元素含量,因此笔者仅利用能谱测量的碳元素质量百分比的高低来间接反映有机质生烃潜力的差异^[32-33],碳元素质量百分比含量越高,说明生烃潜力越差。从固体沥青、镜质体到惰质体,其碳元素的质量百分比依次升高,生烃潜力依次变差,其成孔能力也依次变差。

随机选取热模拟样品在镜下观察到的有机质,识别显微组分类型,统计其平均面孔率。结果表明(图10),不同显微组分成孔能力差异大。镜质体和惰质体生烃潜力差,虽然经历了完整的热演化过程,但其孔隙依然不发育,面孔率变化不大,均小于5%。固体沥青生烃潜力好,在热演化过程中表现出极好的成孔能力,面孔率先快速增大,最高达35.42%,然后出现减小的趋势。这也印证了前人的结论^[42]。

5.2 粘土矿物催化作用

有机粘土复合体中的固体沥青孔隙发育特征已被广泛描述^[7,12]。在川西坳陷须家河组陆相页岩中,有机粘土复合体广泛发育,其中多数固体沥青都发育蜂窝状孔隙,尤其是分布在伊利石周围的固体沥青,其孔隙发育程度明显高于与其他粘土矿物共存的固体沥青(图5e—h)。前人研究表明,与其他无机矿物相比,粘

土矿物更易催化有机质生烃产孔^[14,49-54]。粘土矿物催化作用可归结为两个过程:①干酪根向碳氢化合物转化时会产生有机酸,有机酸促进高岭石向伊利石转化^[55];②高岭石或蒙皂石向纤维状伊利石转化的过程中,通过对水分子的吸附和解离为固体沥青加氢裂解提供 H^+ ^[55],这两个过程是相辅相成的。随着高岭石向伊利石转化,伊利石含量不断增加,使微区的比催化活度增加^[55],促进固体沥青进一步生烃产孔。此外,其他与有机质相接触的无机矿物(如黄铁矿),对烃类排出及孔隙形成也有一定的催化作用。

7个自然样品的有机质平均面孔率与其粘土矿物含量、伊利石含量均呈良好的正相关关系,相关系数 R^2 分别为0.77和0.83,表明粘土矿物确实对有机质孔隙发育有一定的催化作用(图11a),而有机质平均面孔率与伊利石含量具有更强的正相关关系(图11b),进一步说明了在粘土矿物中起催化作用的主要是伊利石,这与前人的研究基本一致^[49-55]。

6 不同类型有机质动态综合成孔模式

总结上述不同类型有机质孔隙演化特征,结合成岩作用发展规律,建立了页岩储层有机质孔隙演化模式(图12)。总体而言,固体沥青孔隙随着成熟度增加,呈现出先增加后减小的趋势;镜质体和惰质体的孔隙演化规律相似,都随着成熟度的增加迅速减小。

当 $R_o < 0.5\%$ 时,页岩处于未成熟阶段,该阶段页岩储层孔隙最为发育,沉积物还未完全固结,颗粒之间的孔隙较大,镜质体和惰质体还保留有高等植物的原始细胞结构,细胞结构尚未被充填和破坏,固体沥青在

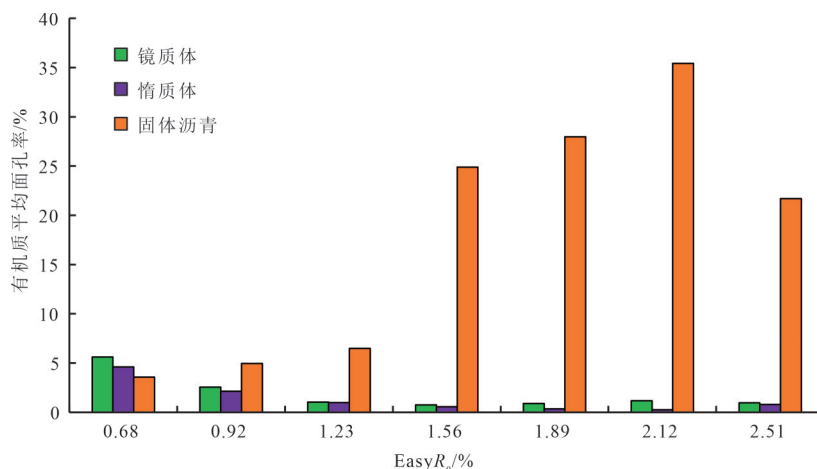


图10 四川盆地川西坳陷须家河组页岩热模拟样品不同有机质显微组分平均面孔率统计

Fig. 10 Average cross-sectional porosity statistics of different maceral groups in shale samples from the fifth member of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin during thermal simulation

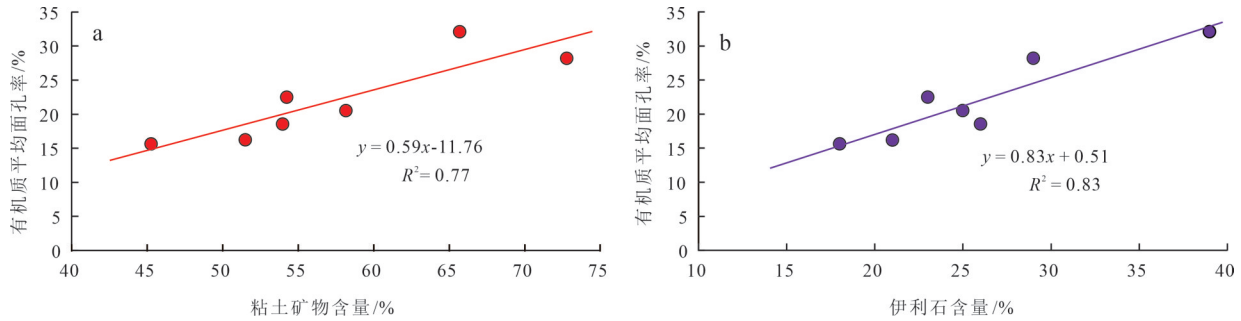


图 11 四川盆地川西坳陷须五段页岩岩心样品有机质平均面孔率关系图版

Fig. 11 Average cross-sectional porosity vs. clay mineral content or illite content in organic-rich shale samples from the fifth member of

Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

a. 有机质平均面孔率与粘土矿物含量关系; b. 有机质平均面孔率与伊利石含量关系

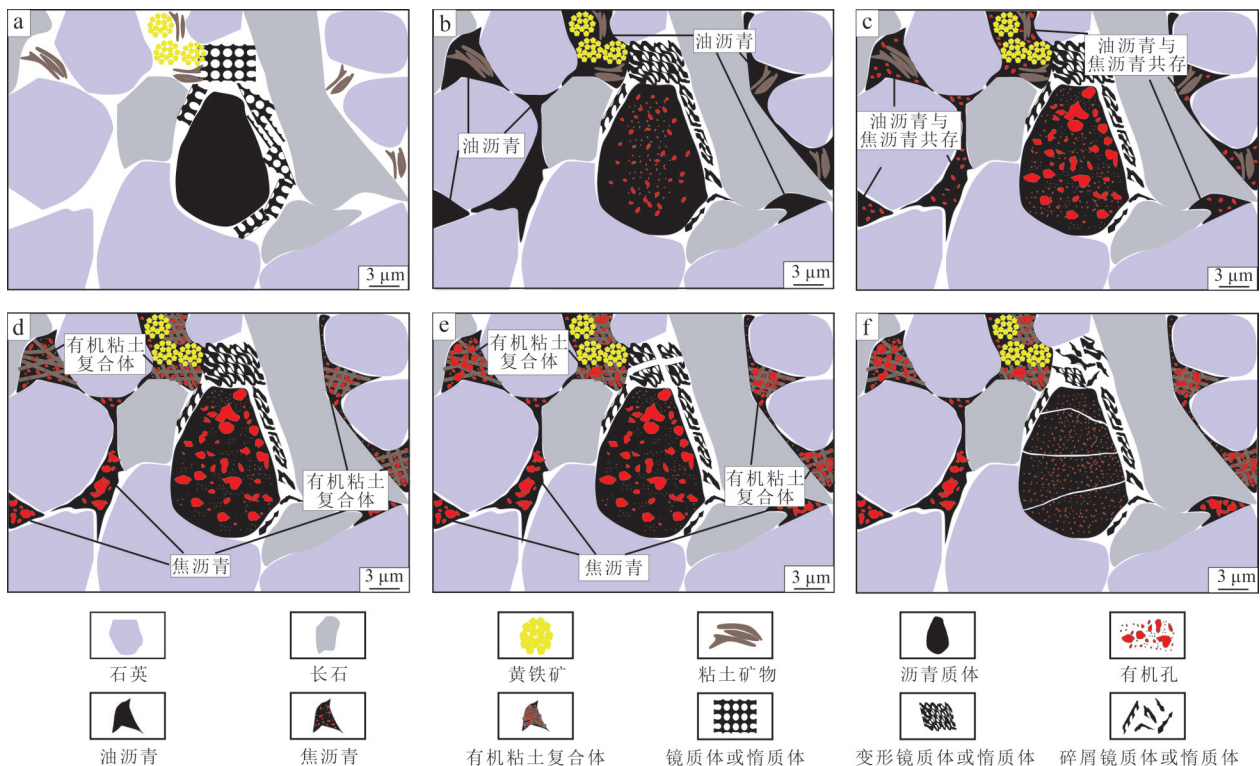


图 12 四川盆地川西坳陷须五段页岩不同类型有机质动态综合成孔模式

Fig. 12 Dynamic composite pore generation patterns in different types of organic matter in shale from the fifth member of

Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

a. $R_o < 0.5\%$, 镜质体和惰质体保留原始细胞胞腔; b. $R_o = 0.92\%$, 沥青质体生孔, 油沥青充填矿物晶间孔, 孔隙不发育, 丝质体和结构镜质体发生变形; c. $R_o = 1.23\%$, 油沥青和焦沥青共存, 蜂窝状孔隙发育; d. $R_o = 1.89\%$, 焦沥青为主, 有机粘土复合体大量发育, 蜂窝状孔隙十分发育; e. $R_o = 2.12\%$, 焦沥青和有机粘土复合体大量发育蜂窝状孔隙, 无结构镜质体微裂缝增加且开度变大; f. $R_o = 2.51\%$, 沥青质体和焦沥青发育更多微孔, 无结构镜质体微裂缝广泛发育甚至出现破碎现象

这个阶段还未产生,对页岩储层的影响不大(图 12a)。

当 $0.5\% < R_o < 1.2\%$ 时,页岩处于未成熟-低成熟阶段,此时的固体沥青主要为油沥青,普遍孔隙不发育,是干酪根生成的液态石油凝固所致,可以看见少量收缩孔。镜质体和惰质体胞腔也被无机矿物和烃类充填或半充填,孔隙降到最低,在垂向压实或侧向挤压的

作用下,丝质体和结构镜质体易发生变形,可形成新月形、三角形孔隙(图 12b)。

当 $1.2\% < R_o < 1.6\%$ 时,页岩处于成熟阶段,此时油沥青和焦沥青共存,油沥青的边缘开始焦化,气态烃开始排出,蜂窝状孔隙发育,油沥青内部部分发育小孔。随着成熟度继续增加,油沥青内部也发育密密麻

麻的蜂窝状孔隙,气态烃大量排出,油沥青已经向焦沥青转变(图12c-d)。

当 $1.6\% < R_o < 2.4\%$ 时,页岩处于高成熟-过成熟阶段,石油裂解大量生气,此时主要以焦沥青为主,有机粘土复合体大量发育,蜂窝状孔隙十分发育,可见孔隙融合,大孔套小孔现象^[12-13]。无结构镜质体微裂缝增加,且开度变大(图12d-e)。

当 $R_o > 2.4\%$ 时,由于成熟度过高,出现有机质石墨化现象,生烃逐渐枯竭,生成的气体逸散导致微纳米孔隙得不到气源支撑而产生坍塌^[37-38],原始干酪根和焦沥青发育更多的微孔,无结构镜质体微裂缝广泛发育,甚至出现破碎现象(图12f),孔隙度出现减小的趋势。

7 结论

1) 川西坳陷须家河组陆相页岩的有机质显微组分以镜质体为主,其次为惰质体和固体沥青。通过扫描电镜和EDS能谱可以有效识别出这3种显微组分。镜质体以结构镜质体为主,其次为无结构镜质体和镜屑体;惰质体可识别出丝质体、半丝质体、惰屑体以及菌类体;固体沥青最显著的特征是无固定的颗粒形状,其分布形式主要由周围矿物之间的空间形状决定,呈充填状。

2) 孔隙在固体沥青中最发育,少量孔隙分布在结构镜质体、丝质体、半丝质体以及菌类体中。不同类型有机质孔隙发育程度为有机粘土复合体中的固体沥青>片状固体沥青>镜质体>惰质体。

3) 有机质差异成孔能力的主控因素可归结为两种:生烃潜力差异和粘土矿物催化作用。受生烃潜力的差异控制,从固体沥青、镜质体到惰质体,三者的碳元素质量百分比依次增大,生烃潜力依次变差,成孔能力也依次变差;受粘土矿物催化作用的控制,随着伊利石含量不断增加,粘土矿物的比催化活度增加,可促进伊利石附近的固体沥青发育孔隙。

4) 热模拟实验表明,固体沥青孔隙随成熟度增加,面孔率呈现出先增加后减小的趋势;镜质体和惰质体的孔隙演化规律相似,面孔率都随着成熟度的增加迅速减小。

5) 镜质体和惰质体在演化过程中孔隙发育较差,但微裂缝却广泛发育,有机质和粘土矿物中的微裂缝连通沥青孔隙和其他无机孔隙,形成孔-缝网络系统,提高页岩储层的储集和渗流能力,是须家河组页岩成为优质储层的关键因素之一。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,杨智,王红岩,等. “进源找油”:论四川盆地非常规陆相大型页岩油气田[J]. 地质学报, 2019, 93(7): 1551-1562.
Zou Caineng, Yang Zhi, Wang Hongyan, et al. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Jurassic unconventional continental giant shale oil & gas field in Sichuan basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(7): 1551-1562.
- [2] 王香增,高胜利,高潮. 鄂尔多斯盆地南部中生界陆相页岩气地质特征[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 294-304.
Wang Xiangzeng, Gao Shengli, Gao Chao. Geological features of Mesozoic continental shale gas in south of Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 294-304.
- [3] 陈果,刘弼行,李洪玺,等. 四川盆地上三叠统须家河组陆相页岩气资源潜力分析[J]. 天然气技术与经济, 2019, 13(5): 21-29.
Chen Guo, Liu Gehang, Li Hongxi, et al. Resource potential of continental shale gas in Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2019, 13(5): 21-29.
- [4] 田杨,朱宏权,叶素娟,等. 川西坳陷须家河组油气成藏主控因素及模式——以孝泉-丰谷构造带须家河组五段为例[J/OL]. 地球科学: 1-15 [2020-11-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20200831.1611.006.html>.
Tian Yang, Zhu Hongquan, Ye Sujuan, et al. Main controlling factors and models of hydrocarbon accumulation in the source of Western Sichuan Depression—Taking Xu 5th member of Xujiahe Formation in Xiaquan-Fenggu structural belt as an example [J/OL]. Earth Science: 1-15 [2020-11-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20200831.1611.006.html>.
- [5] 左如斯,杨威,王乾右,等. 川西坳陷须家河组陆相页岩岩相控制下的微观储集特征[J]. 特种油气藏, 2019, 26(6): 22-28.
Zuo Rusi, Yang Wei, Wang Qianyou, et al. Lithofacies-control microscopic reservoir characterization of the continental shale in the Xujiahe Formation of western Sichuan Depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(6): 22-28.
- [6] 张瀛涵,李卓,刘冬冬,等. 松辽盆地长岭断陷沙河子组页岩岩相特征及其对孔隙结构的控制[J]. 石油实验地质, 2019, 41(1): 142-148.
Zhang Yinghan, Li Zhuo, Liu Dongdong, et al. Lithofacies characteristics and impact on pore structure of the Shahezi Formation shale, Changling Fault Depression, Songliao Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(1): 142-148.
- [7] Gao F L, Song Y, Li Z, et al. Lithofacies and reservoir characteristics of the Lower Cretaceous continental Shahezi Shale in the Changling Fault Depression of Songliao Basin, NE China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 98: 401-421.
- [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] 马中良,郑伦举,徐旭辉,等. 富有机质页岩有机孔隙形成与演化的热模拟实验[J]. 石油学报, 2017, 38(1): 23-30.
Ma Zhongliang, Zheng Lunju, Xu Xuhui, et al. Thermal simulation experiment on the formation and evolution of organic pores in organic-rich shale[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1): 23-30.
- [10] 高玉巧,蔡潇,张培先,等. 渝东南盆缘转换带五峰组—龙马溪组页岩气储层孔隙特征与演化[J]. 天然气工业, 2018, 38(12): 15-25.

- Gao Yuqiao, Cai Xiao, Zhang Peixian, et al. Pore characteristics and evolution of Wufeng-Longmaxi Fms shale gas reservoirs in the basin-margin transition zone of SE Chongqing[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(12): 15-25.
- [11] Curtis M E, Cardott B J, Sondergeld C H, et al. Development of organic porosity in the Woodford shale with increasing thermal maturity[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 103: 26-31.
- [12] 纪文明, 宋岩, 姜振学, 等. 四川盆地东南部龙马溪组页岩微一纳米孔隙结构特征及控制因素[J]. *石油学报*, 2016, 37(2): 182-195.
- Ji Wenming, Song Yan, Jiang Zhenxue, et al. Micro-nano pore structure characteristics and its control factors of shale in Longmaxi Formation, southeastern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(2): 182-195.
- [13] Guo H J, He R L, Jia W L, et al. Pore characteristics of lacustrine shale within the oil window in the Upper Triassic Yanchang Formation, southeastern Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 91: 279-296.
- [14] Milliken K L, Rudnicki M, Awwiller D N, et al. Organic matter-hosted pore system, Marcellus Formation (Devonian), Pennsylvania[J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(2): 177-200.
- [15] 焦淑静, 张慧, 薛东川, 等. 泥页岩有机显微组分的扫描电镜形貌特征及识别方法[J]. *电子显微学报*, 2018, 37(2): 137-144.
- Jiao Shujing, Zhang Hui, Xue Dongchuan, et al. Morphological structure and identify method of organic macerals of shale with SEM[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2018, 37(2): 137-144.
- [16] 张慧, 焦淑静, 庞起发, 等. 中国南方早古生代页岩有机质的扫描电镜研究[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(4): 675-680.
- Zhang Hui, Jiao Shujing, Pang Qifa, et al. SEM observation of organic matters in the Eopaleozoic shale in South China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 675-680.
- [17] 李智武, 刘树根, 林杰, 等. 川西坳陷构造格局及其成因机制[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(6): 645-653.
- Li Zhiwu, Liu Shugen, Lin Jie, et al. Structural configuration and its genetic mechanism of the West Sichuan depression in China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2009, 36(6): 645-653.
- [18] 邹云. 川西坳陷合兴场、东泰、罗江地区构造演化及断裂活动期次[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- Zou Yun. Tectonic evolution and fracture stage in Hexingchang, Dongtai and Luojiang Area of The Western Sichuan Depression [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [19] 何鲤, 段勇, 罗潇, 等. 川西坳陷上三叠统层序地层划分新方案[J]. *天然气工业*, 2007, 27(2): 6-11+145.
- He Li, Duan Yong, Luo Xiao, et al. New scheme of sequence stratigraphic division for Upper Triassic in Western Sichuan Depression[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(2): 6-11+145.
- [20] Connan J. Time-temperature relation in oil genesis[J]. *AAPG Bulletin*, 1974, 58(12): 2516-2521.
- [21] Waples D. Time and temperature in petroleum formation: application of Lopatin's method to petroleum exploration[J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 64(6): 916-926.
- [22] 程克明, 王铁冠, 赵师庆, 等. 烃源岩的地球化学及演化特征[M]. 北京: 石油勘探开发研究院, 1989.
- Cheng Keming, Wang Tieguan, Zhao Shiqing, et al. Geochemistry and evolution characteristics of source rocks[M]. Beijing: Research Institute of Petroleum Exploration and Development, 1989.
- [23] Jiang Y F, Zhao L, Zhou G Q, et al. Petrological, mineralogical, and geochemical compositions of Early Jurassic coals in the Yining Coalfield, Xinjiang, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 152, 47-67.
- [24] 张慧, 焦淑静, 李贵红, 等. 非常规油气储层的扫描电镜研究[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 87-88.
- Zhang Hui, Jiao Shujing, Li Guihong, et al. Scanning electron microscopy study of unconventional oil and gas reservoirs [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 87-88.
- [25] Mastalerz M, Drobnicka A, Stankiewicz A B. Origin, properties, and implications of solid bitumen in source-rock reservoirs: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 195: 14-36.
- [26] Jacob H. Disperse solid bitumen as an indicator for migration and maturity in prospecting for oil and gas[J]. *Erdol Kohle*, 1985, 38: 365-374.
- [27] Curiale J A. Origin of solid bitumens, with emphasis on biological marker results[J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10(1-3): 0-580.
- [28] Loucks R G, Reed R M. Abstract: Scanning-electron-microscope petrographic evidence for distinguishing organic-matter pores associated with depositional organic matter versus migrated organic matter in mudrocks[J]. *Geology Transactions*, 2014, 3: 51-60.
- [29] 高凤琳. 陆相页岩储层特征及其对含气性的影响——以长岭断陷沙河子组页岩为例[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- Gao Fenglin. Reservoir characteristics of continental shale and its influences on gas-bearing properties: A case study of Shahezi Shale in the Changling Fault Depression[D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2019.
- [30] 余和中和, 谢锦龙, 王行信, 等. 有机粘土复合体与油气生成[J]. *地学前缘*, 2006, 13(4): 274-281.
- Yu Hezhong, Xie Jinlong, Wang Xingxin, et al. Organoclay complexes in relation to petroleum generation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(4): 274-281.
- [31] 蔡进功, 宋明水, 卢龙飞, 等. 烃源岩中有机黏粒复合体——天然的生烃母质[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(3): 123-131.
- Cai Jingong, Song Mingshui, Lu Longfei, et al. Organo-clay complexes in source rocks— a natural material for hydrocarbon generation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(3): 123-131.
- [32] 高凤琳, 宋岩, 梁志凯, 等. 陆相页岩有机质孔隙发育特征及成因——以松辽盆地长岭断陷沙河子组页岩为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(9): 1030-1044.
- Gao Fenglin, Song Yan, Liang Zhikai, et al. Development characteristics of organic pore in the continental shale and its genetic mechanism: a case study of Shahezi Formation shale in the Changling fault depression of Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(9): 1030-1044.
- [33] 焦淑静, 张慧, 薛东川. 三塘湖盆地芦草沟组页岩有机显微组分扫描电镜研究[J]. *电子显微学报*, 2019, 38(3): 257-263.
- Jiao Shujing, Zhang Hui, Xue Dongchuan. SEM study on organic macerals of shale in Lucaogou Formation Santanghu Basin [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2019, 38(3): 257-263.
- [34] Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1990, 74(10): 1559-1570.
- [35] 孙寅森, 郭少斌. 基于图像分析技术的页岩微观孔隙特征定性及定量表征[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(7): 751-763.
- Sun Yinsen, Guo Shaobin. Qualitative and quantitative characterization of shale microscopic pore characteristics based on image analysis technology [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(7): 751-763.

- [36] 余徐润, 周亮, 荆彦平, 等. Image Pro Plus 软件在小麦淀粉粒显微图像分析中的应用[J]. 电子显微学报, 2013, 32(4): 344-349.
Yu Xurun, Zhou Liang, Jing Yanping, et al. Application of image-pro plus in analysis of wheat starch granule microscopic image[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2013, 32(4): 344-349.
- [37] 吴松涛, 朱如凯, 崔京钢, 等. 鄂尔多斯盆地长7湖相泥页岩孔隙演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 167-176.
Wu Songtao, Zhu Rukai, Cui Jinggang, et al. Characteristics of lacustrine shale porosity evolution, Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 167-176.
- [38] Gao F, Song Y, Li Z, et al. Pore characteristics and dominant controlling factors of overmature shales: A case study of the Wangyinpu and Guanyintang Formations in the Jiangxi Xiuwu Basin[J]. Interpretation, 2018, 6(2): T393-T412.
- [39] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [40] Cander H. Sweet spots in shale gas and liquids plays: prediction of fluid composition and reservoir pressure[R]. Search and Discovery Article 40936, 2012.
- [41] Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- [42] 敖卫华, 黄文辉, 姚艳斌. 鄂尔多斯盆地北部煤系有机显微组分特征与生烃潜力[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(增刊1): 91-97.
Ao Weihua, Huang Wenhui, Yao Yanbin. Macerals' characteristics and hydrocarbon generation potential of coal-bearing series in the northern Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(S1): 91-97.
- [43] 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 1-7.
Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, Zhang Shuichang, et al. Successive generation of natural gas from organic materials and its significance in future exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 1-7.
- [44] 刘伟, 王振奇, 叶琳, 等. 渤中坳陷优质烃源岩有机质丰度下限标准[J]. 断块油气田, 2020, 27(6): 725-728.
Liu Wei, Wang Zhenqi, Ye Lin, et al. Lower limit standard of organic matter abundance of high quality source rocks in Bozhong Depression[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(6): 725-728.
- [45] 鹿坤, 李长春, 周峰, 等. 东濮凹陷北部低有机质丰度烃源岩高效成藏机理[J]. 断块油气田, 2021, 28(4): 470-474.
Lu Kun, Li Changchun, Zhou Feng, et al. Mechanism of high efficient reservoir formation of low abundance source rocks in the north of Dongpu Depression[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(4): 470-474.
- [46] 邱振, 韦恒叶, 刘翰林, 等. 异常高有机质沉积富集过程与元素地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 931-948.
Qiu Zhen, Wei Hengye, Liu Hanlin, et al. Accumulation of sediments with extraordinary high organic matter content: Insight gained through geochemical characterization of indicative elements[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 931-948.
- [47] 杨雨, 罗冰, 张本健, 等. 四川盆地地下寒武统筇竹寺组烃源岩有机质差异富集机制与天然气勘探领域[J]. 石油实验地质, 2021, 43(4): 611-619.
Yang Yu, Luo Bing, Zhang Benjian, et al. Differential mechanisms of organic matter accumulation of source rocks in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation and implications for gas exploration fields in Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(4): 611-619.
- [48] 鲍芳, 俞凌杰, 芮晓庆, 等. 页岩中有机质孔隙非均质性的微观结构及电镜—拉曼联用研究[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 871-879.
Bao Fang, Yu Lingjie, Rui Xiaoqing, et al. Microstructure and SEM-Raman study of organic matter pore heterogeneity in shale[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(5): 871-879.
- [49] 张士万, 孟志勇, 郭战峰, 等. 涪陵地区龙马溪组页岩储层特征及其发育主控因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 16-24.
Zhang Shiwan, Meng Zhiyong, Guo Zhanfeng, et al. Characteristics and major controlling factors of shale reservoirs in the Longmaxi Fm, Fuling area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 16-24.
- [50] 高玉巧, 蔡潇, 何希鹏, 等. 渝东南盆缘转换带五峰组—龙马溪组页岩压力体系与有机孔发育关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 662-674.
Gao Yuqiao, Cai Xiao, He Xipeng, et al. Relationship between shale pressure system and organic pore development of Wufeng-Longmaxi Formation in marginal conversion zone of Southeastern Chongqing Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 662-674.
- [51] 祝庆敏, 卢龙飞, 潘安阳, 等. 湘西地区下寒武统牛蹄塘组页岩沉积环境与有机质富集[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 797-809.
Zhu Qingmin, Lu Longfei, Pan Anyang, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment of the Lower Cambrian Niutitang Formation shale, western Hunan Province, China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(5): 797-809.
- [52] 陆亚秋, 梁榜, 王超, 等. 四川盆地涪陵页岩气田江东区块下古生界深层页岩气勘探开发实践与启示[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 241-250.
Lu Yaqiu, Liang Bang, Wang Chao, et al. Shale gas exploration and development in the Lower Paleozoic Jiangdong block of Fuling gas field, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 241-250.
- [53] 聂海宽, 张柏桥, 刘光祥, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气高产地质原因及启示——以涪陵页岩气田 JY6-2HF 为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 463-473.
Nie Haikuan, Zhang Baiqiao, Liu Guangxiang, et al. Geological factors contributing to high shale gas yield in the Wufeng-Longmaxi Fms of Sichuan Basin: A case study of Well JY6-2HF in Fuling shale gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 463-473.
- [54] 田鹤, 曾联波, 徐翔, 等. 四川盆地涪陵地区海相页岩天然裂缝特征及对页岩气的影响[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 474-483.
Tian He, Zeng Lianbo, Xu Xiang, et al. Characteristics of natural fractures in marine shale in Fuling area, Sichuan Basin, and their influence on shale gas[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 474-483.
- [55] 王行信, 蔡进功, 包于进. 粘土矿物对有机质生烃的催化作用[J]. 海相油气地质, 2006, 11(3): 27-38.
Wang Xingxin, Cai Jingong, Bao Yujin. Catalysis of clay mineral to organic matter in hydrocarbon genesis[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(3): 27-38.

(编辑 张亚雄)