

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.2019.0408

程璇, 徐尚, 郝芳, 等. 松辽盆地嫩江组富有机质页岩有机孔隙成因[J]. 地质科技情报, 2019, 38(4): 62-69.

松辽盆地嫩江组富有机质页岩有机孔隙成因

程璇^{1a,1b}, 徐尚^{1a,1b}, 郝芳², 荣辉^{1a,1b}, 杨峰^{1a,1b}, 苟启洋^{1a,1b}, 张爱华^{1a,1b}

(1. 中国地质大学(武汉) a. 构造与油气资源重点实验室; b. 资源学院, 武汉 430074;

2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 热演化程度是影响页岩有机质孔隙形成演化的重要因素, 松辽盆地南部辉绿岩侵入到嫩江组富有机质页岩中, 为研究页岩有机孔隙特征提供了天然实验室。通过氩离子抛光和扫描电镜等实验方法, 初步探讨了研究区低熟富有机质页岩有机孔隙的特征及其成因: 有机孔隙孔径范围为 30~500 nm, 主峰位于 70~130 nm, 以大孔为主, 孔隙形状主要为圆形或次圆形, 呈海绵状聚集分布; 页岩样品中的石英和长石等无机矿物呈点接触, 发育大量无机孔隙, 无机矿物处于早成岩阶段, 但岩浆侵入作用促使有机质进入高热演化阶段并形成大量有机孔隙。国内外典型页岩储层的对比表明, 压实作用对页岩有机孔隙发育特征有着重要影响, 早成岩阶段压实作用较弱, 有机孔隙保存较好, 大孔的数量和比例较高; 中一晚成岩阶段由于埋深较大, 强烈的压实作用使页岩孔隙由大孔向中孔和微孔转化。

关键词: 有机孔隙成因; 富有机质页岩; 岩浆侵入作用; 松辽盆地

中图分类号: P618.12

文献标志码: A

文章编号: 1000-7849(2019)04-0062-08

Origin of Organic Pores in the Organic-Rich Shale of Nenjiang Formation, Songliao Basin, China

Cheng Xuan^{1a,1b}, Xu Shang^{1a,1b}, Hao Fang², Rong Hui^{1a,1b},
Yang Feng^{1a,1b}, Gou Qiyang^{1a,1b}, Zhang Aihua^{1a,1b}

(1a. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education;

1b. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao Shandong 266580, China)

Abstract: The thermal evolution is an important factor affecting the formation and evolution of organic pores in organic-rich shale. The situation of diabase intruding into the organic shale of Nenjiang Formation in the south of Songliao Basin provides a natural laboratory for studying the evolution of organic pores in shale. By means of argon ion polishing and scanning electron microscopy (SEM), we have preliminary investigated the characteristics and origin of the low-mature organic pores of shale in the research area. The organic pore size ranges from 30 to 500 nm, and the peak value is about 70—130 nm, which mainly consists of round or subcircular shape macropore in spongy aggregation distribution. The inorganic minerals such as quartz and feldspar in shale samples are in contact with each other by point and a large number of inorganic pores are developed, which are early diagenetic, but the magmatic intrusions promote the organic matter to enter into the high heat evolution stage and form a large number of organic pores. Contrasting

收稿日期: 2019-03-07

编辑: 禹华珍

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41690134); 国家自然科学基金创新研究群体项目(41821002); 国家自然科学基金青年基金项目(41702155); 国家科技重大专项(2016ZX05034002-003)

作者简介: 程璇(1995—), 女, 现正攻读地质工程专业硕士学位, 主要从事非常规油气方面研究工作。E-mail: 1312316983@qq.com

通信作者: 徐尚(1985—), 男, 副教授, 主要从事油气成藏机理和非常规油气地质方面的研究工作。E-mail: xushang0222@163.com

the research of inside and outside typical shale reservoirs, the compaction has an important influence on the development characteristics of organic pores in shale. The compaction is weak in the early diagenetic stage, and the pores of organic matter are well preserved, with high number and proportion of macropores. In the middle-late diagenetic stage, due to the large burial depth, the strong compaction makes the shale pores transform from large pores to medium pores and micro pores.

Key words: origin of organic pore; organic-rich shale; magma intrusion; Songliao Basin

页岩气是一种自生自储、连续分布的非常规天然气资源,以吸附态、游离态和溶解态赋存于页岩基质、有机质、孔隙和裂缝系统中^[1-3]。我国页岩气资源丰富,约为 $23.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[4],是继美国之后率先实现页岩气资源商业开发的国家。页岩气主要储集在页岩储层的有机孔隙、无机孔隙以及微裂缝中。有机孔隙是页岩储层不同于砂岩和碳酸盐岩等常规储层的最重要特征之一,几乎所有的富有机质页岩都发育了有机孔隙,且有机孔隙对页岩储层起决定性作用^[2,5-12]。目前,关于有机孔隙的成因和来源存在不同观点,包括原生和次生成因、干酪根生一排烃成因^[2,5-6,13-14](即干酪根孔隙)和滞留原油裂解成因^[12,15-16](即沥青孔隙)等。对有机孔隙的成因和来源还存在激烈争议,关于有机孔隙发育程度的控制因素尚不清楚^[17]。

在众多因素中,热成熟度是影响页岩孔隙发育演化的重要因素^[6,9,18-23]。研究表明富有机质页岩在低成熟阶段不发育有机孔隙;随着成熟度增加,在生气高峰期有机孔隙大量发育,孔隙度增加;在过成熟阶段,有机孔隙发生收缩、坍塌,孔隙度降低^[9,19-20,24]。本次研究在松辽盆地南部发现辉绿岩岩浆侵入导致嫩江组低熟富有机质页岩遭受接触热变质作用,于短时间内迅速成熟并产生有机孔隙,为研究富有机质页岩有机孔隙的形成提供了一个天然实验室。

1 区域地质概况

松辽盆地位于中国东北部,面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中—新生代陆相沉积盆地,具有断—坳双重结构^[25]。盆地可划分为7个主要的构造单元:北部倾没区、中央坳陷区、东北隆起区、东南隆起区、西部斜坡区、西南隆起区、开鲁坳陷区^[26-27](图1-A)。

研究区位于开鲁坳陷区,开鲁坳陷基底为晚古生代浅变质岩和同期岩浆岩,基底之上断陷期主要沉积下白垩统义县组、九佛堂组、沙海组和阜新组,坳陷期主要沉积上白垩统泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组和明水组^[28]。本次研究的目的是为嫩江组,其中嫩一段和嫩二段是松辽盆地优质烃源岩^[29]。嫩一段沉积时期,湖盆继承了姚家组

基准面快速上升的发育趋势,沉降速度加快,湖水迅速扩张并几乎覆盖全盆地^[29],盆地中部发育半深湖—深湖相沉积。嫩二段沉积早期,湖盆面积进一步扩大,发生了全盆地规模最大的一次湖侵事件,现今盆地范围内几乎全部为半深湖—深湖区^[30],沉积大面积灰黑色泥页岩,特别在底部形成了全盆地分布的优质油页岩^[31]。开鲁坳陷位于盆地边缘,嫩江组地层后期经历的埋深较浅,有机质成熟度总体较低, R_o 一般为0.5%,有机碳质量分数分布在1.0%~3.0%之间,属于未成熟—低成熟阶段。研究区ZKY2-1井钻遇辉绿岩,厚度20~30 m,主要成分为辉石与基性长石,含少量黑云母、磁铁矿等矿物。辉绿岩下伏地层为嫩一段泥页岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩,厚度约50 m。

2 样品与实验方法

本研究样品取自松辽盆地开鲁坳陷ZKY2-1井钻井岩心,取样深度441 m(图1),对应嫩一段,岩性为灰黑色页岩。对该样品开展了有机地球化学方面的测试,总有机碳(TOC)采用粒径小于0.2 mm的粉末状样品,经酸洗、水洗、烘干后测定总有机碳质量分数(仪器型号:Leco CS230)。将样品粉碎成粉末后进行岩石热解分析(仪器型号:OGE-V1)。成熟度采用油浸物镜测定,观测前将样品加胶水固结、多次预磨、抛光、干燥后油浸观察,并利用标样反复标定仪器(仪器型号:ZEISS Axio Scope, A1)后观察镜下沥青及镜质体情况。

扫描电镜实验采用岩心样品,在样品上取直径为2.5 cm、高度为1.5 cm的类圆柱体岩样,固定于样品台上,放入精研一体机(型号:Leica EM TXP)进行预处理。将制备好的岩样放入氩离子抛光仪器(型号:Leica EM RES102)进行精细抛光(时间4 h,电压4 kV,电流2.2 mA)。处理完成后,将其垂直固定于场发射扫描电镜仪器(型号:MERLIN Compact)载物台上(工作电压2 kV,工作距离4.7 mm),对孔隙、有机质和矿物等进行观察,并表征页岩中孔隙的结构特征。

利用图像分析软件(如JMVision)对扫描电镜图像进行处理,统计分析孔隙结构特征,如页岩孔隙

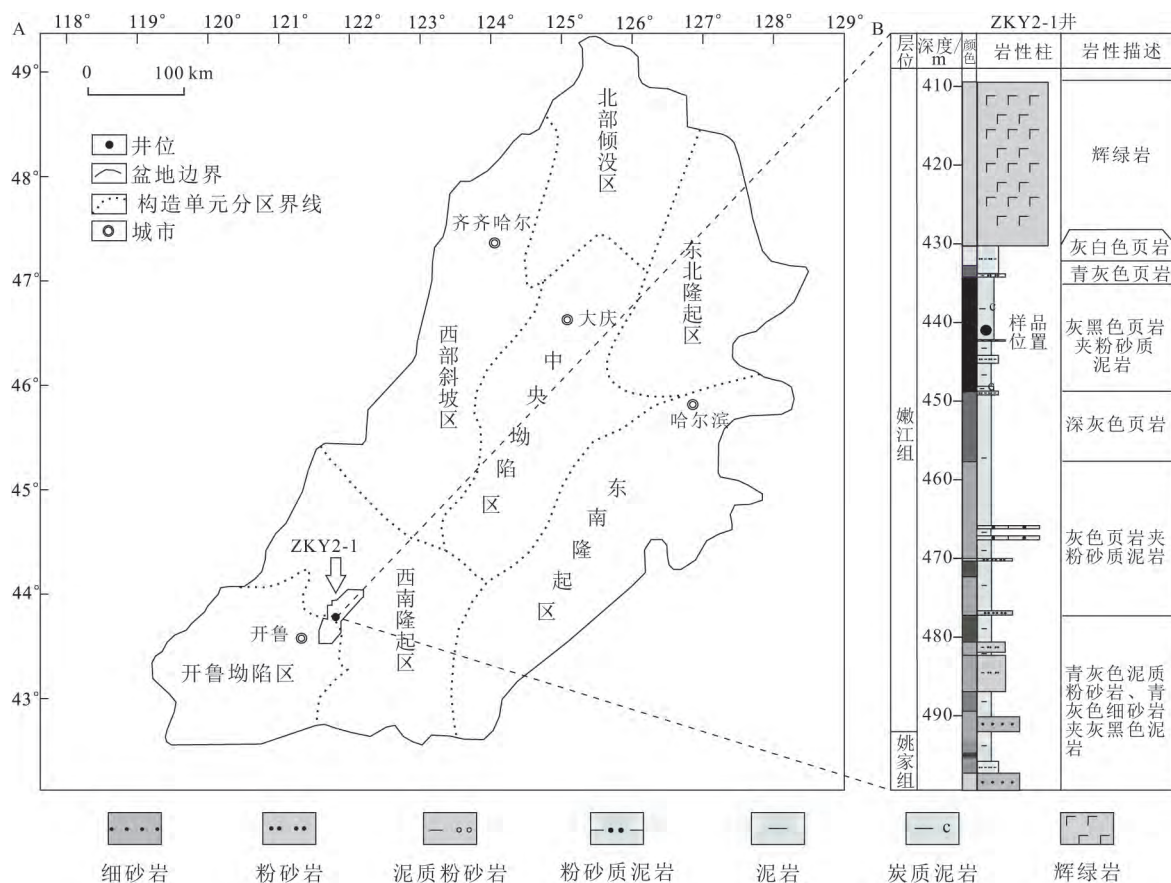


图1 研究区位置及目的层嫩江组钻井地质图

Fig. 1 Drilling geological map of Nenjiang Formation in the study area

面积、孔径和周长等参数。孔径 5 nm 以上的孔隙通过图片各像素点灰度值的不同可自动识别,孔径 5 nm 以下的孔隙通过人工手动识别。

3 结果

3.1 有机地球化学特征

分析测试结果表明,样品总有机碳质量分数

$w(\text{TOC})$ 为 5.03%,热解有机碳质量分数为 4.73%。样品岩石热解最高峰温 $T_{\max}$ 为 338℃,氢指数 HI 为 2 mg/g,由于 $T_{\max}$ 低于 400℃,无法有效分析有机质类型。造成 $T_{\max}$ 过低的原因,一方面是样品处于高过成熟演化阶段,热解实验难以反映其真实数值,例如焦石坝地区五峰组—龙马溪组 $T_{\max}$ 也偏低^[32];另一方面是样品可能受到钻井液有机添加剂等污染物的影响,使 $T_{\max}$ 出现异常低值^[33-34]。

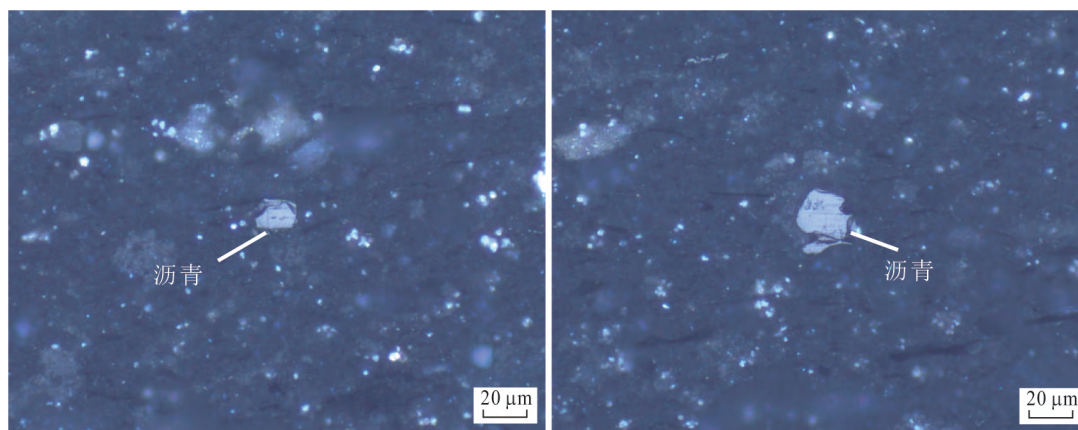


图2 样品成熟度测定沥青显微照片

Fig. 2 Microscopic photographs of bitumen for sample maturity determination

通常采用镜质体反射率 R_o 来表征泥页岩热演化程度,本次研究在显微镜下仅观测到沥青质(图2),沥青的形态呈近圆形,轮廓清晰,充填在矿物粒间孔隙中,大小约为 $20\ \mu\text{m}$,与川东南志留系龙马溪组页岩中沥青的特征相似^[35]。本次研究采用刘德汉等^[36]建立的沥青反射率与等效镜质体反射率换算公式(式(1)),计算得到样品的等效镜质体反射率为 2.37% 。

$$Eq_{VR} = 0.668BR + 0.346 \quad (1)$$

式中: Eq_{VR} 表示等效镜质体反射率; BR 表示沥青反射率。

3.2 有机孔隙特征

在场发射扫描电镜下观察发现,该样品的有机质充填于石英、长石和黏土矿物等骨架矿物形成的粒间孔隙中,呈连续(图3-a)或孤立(图3-c)分布。有机孔隙不规则地分布在有机质内部,孔隙形态主要呈圆形和椭圆形(图3),孔隙直径主要介于 $30\sim 500\ \text{nm}$ 之间,平均约为 $200\ \text{nm}$ 。

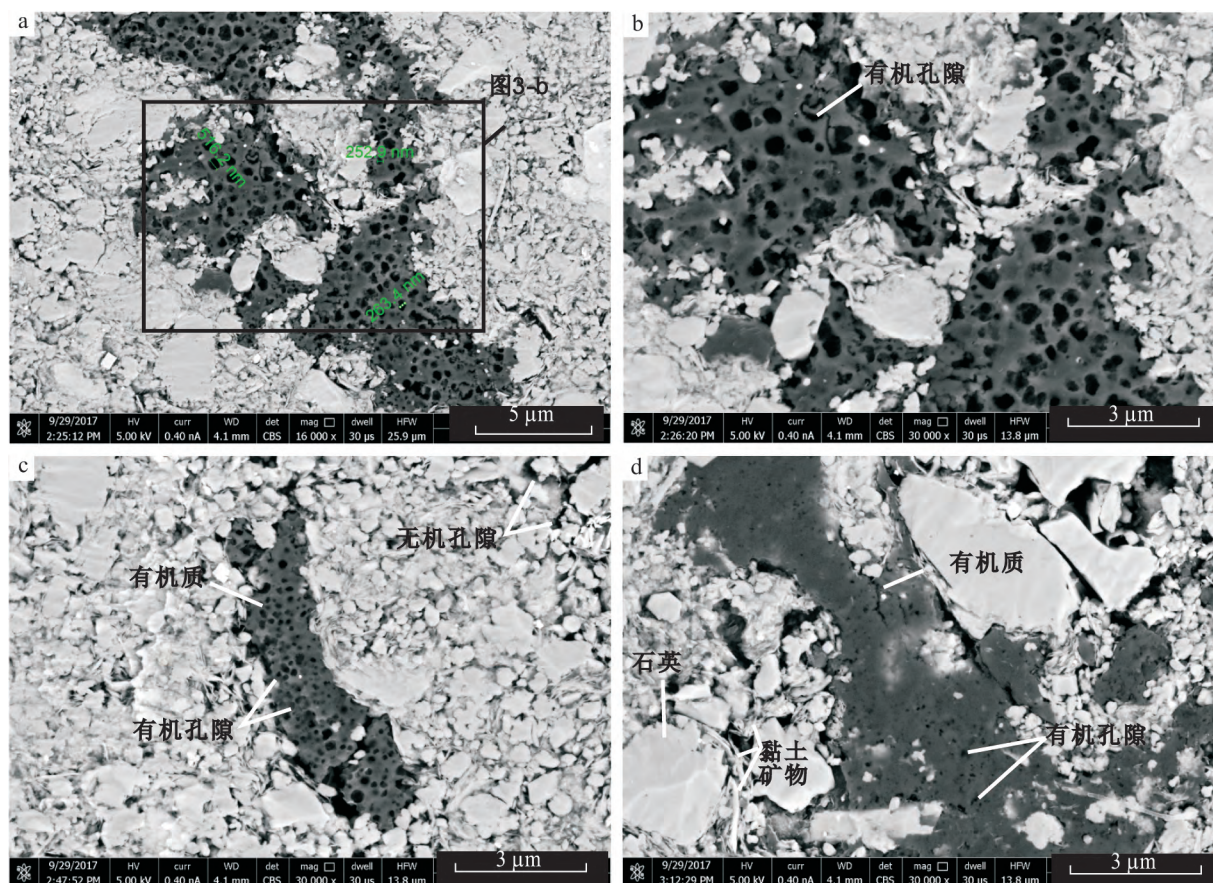


图3 ZKY2-1井典型孔隙照片

Fig. 3 Typical pore photographs of Well ZKY2-1

不同的有机质其孔隙发育程度不同。图3-b中有机质连续分布,面孔率为 25.6% ;图3-c中有机质呈孤立状分布,面孔率较低,为 16.51% ,有机孔隙分布较为均匀,孔隙直径为 $100\sim 500\ \text{nm}$,孔隙多通过管状喉道相互连通,部分孔隙由多个近圆形的小孔隙连接而成,呈不规则棱角状、长条状;图3-d中有机质面孔率仅为 3.26% ,尽管有机孔隙数量较多,但孔径较小,一般小于 $50\ \text{nm}$ 。通过对不同视域下扫描电镜有机孔隙的综合分析表明:该样品有机孔隙的孔径分布呈单峰式,孔径分布范围为 $30\sim 500\ \text{nm}$,主峰位于 $70\sim 130\ \text{nm}$,其中孔径大于 $400\ \text{nm}$ 的孔隙数量约占 5.4% (图4)。

4 讨论

4.1 岩浆热作用促进有机孔隙的发育

研究表明岩浆侵入可以影响有机质泥页岩生烃演化过程^[38-43]。随着距离岩浆侵入体由远及近, R_o 从 0.5% 升高至 4.0% ^[38-42], $w(\text{TOC})$ 呈降低趋势^[40,42],与此同时氯仿沥青“A”质量分数、 T_{max} 、生烃潜量 S_1 和 S_2 等地球化学参数也指示有机质生烃强度存在差异,即靠近侵入岩生烃强度大,远离侵入岩生烃强度小^[40,42](图5)。曹学伟等^[41]基于可溶烃抽提、饱和烃气相色谱等方法研究认为距离侵入岩越近,可溶烃含量越少、碳数越高且主峰右移,表

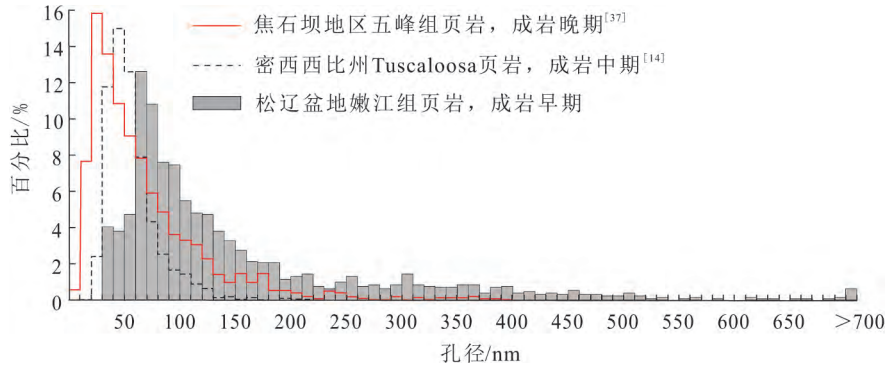


图 4 不同成岩阶段孔径分布对比图

Fig. 4 Diagram of pore size distribution in different diagenetic stages

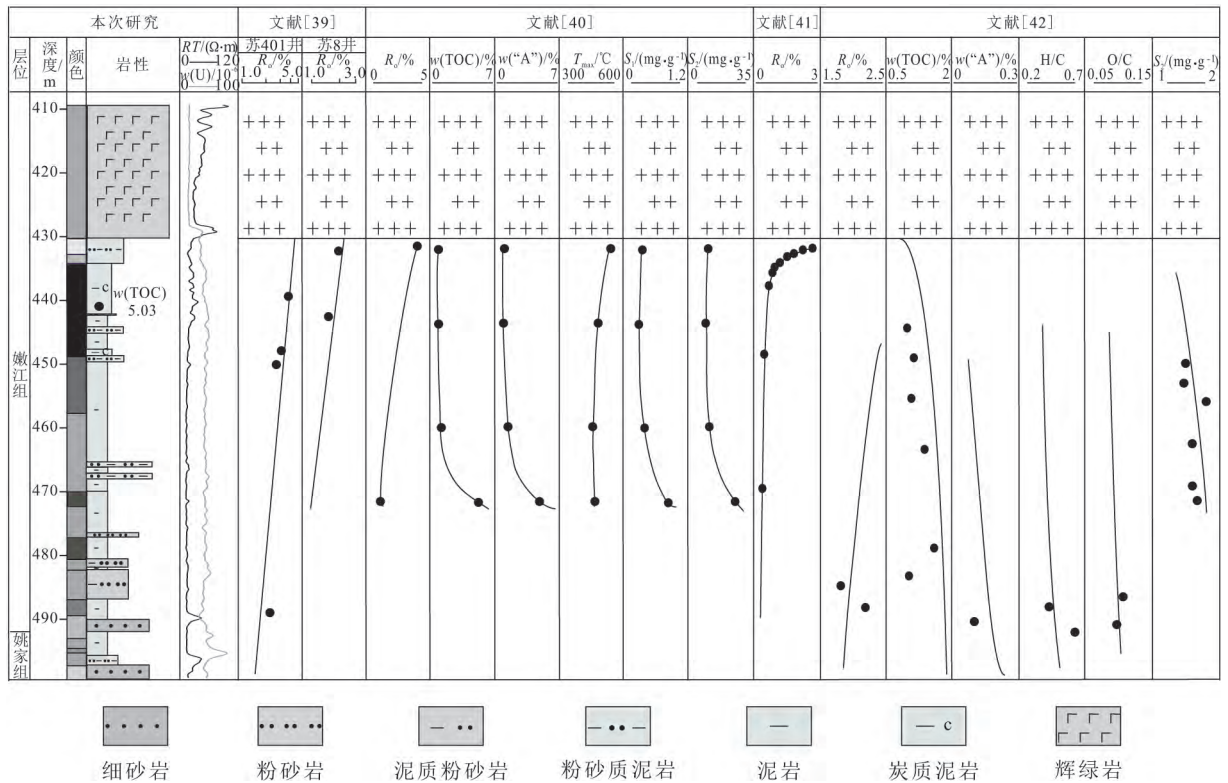


图 5 岩浆侵入体附近围岩有机地球化学参数分布

Fig. 5 Distribution of organic geochemical parameters of surrounding rock near magmatic intrusion

明岩浆侵入体促使烃源岩生烃、烃类裂解并向远离侵入岩体方向运移。

研究区嫩一段主要为半深湖—深湖相泥页岩， $w(\text{TOC})$ 较高(1%~5%)，但热演化程度较低(R_o 小于0.5%)。扫描电镜结果显示泥页岩样品中无机矿物颗粒呈点接触、粒间孔隙保存良好(图3)，表明其压实作用较弱，处于早成岩阶段，与原始低热演化程度相符。此外，研究区在地质历史时期发育多期岩浆侵入事件^[44]，ZKY2-1井在嫩一段钻遇厚层辉绿岩(图1，深度410~430 m)。本次研究选取的样品距离辉绿岩侵入体约11 m， R_o 约为2.37%，属

于过成熟演化阶段，该样品有机孔隙的成因与岩浆侵入导致低熟富有机质页岩进入生烃演化阶段有关。

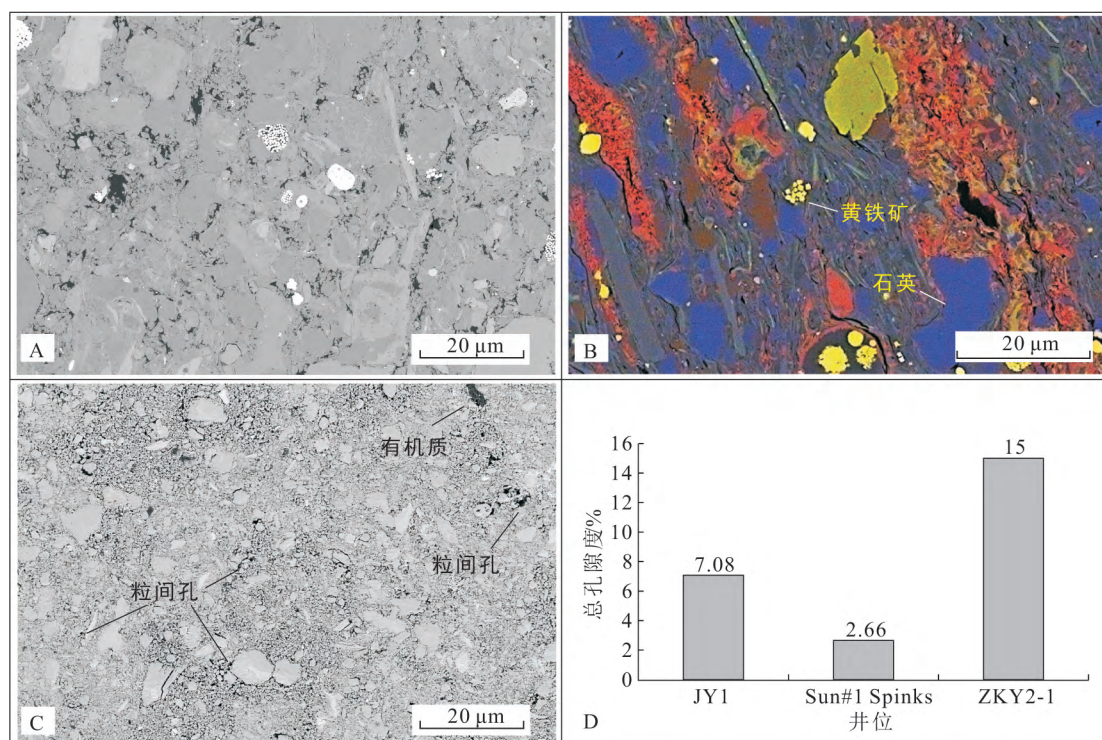
4.2 不同成岩阶段孔隙特征

四川盆地焦石坝地区JY1井五峰组页岩等效镜质体反射率2.2%~3.5%^[37,45-49]，处于晚成岩阶段。密西西比州西部地区Sun #1 Spinks井Tuscaloosa marine shale(TMS)页岩埋深约为3 300 m， R_o 为0.74%~0.81%^[14,50]，处于生油窗内，对应中成岩阶段。松辽盆地开鲁凹陷ZKY2-1井嫩江组相页岩有机质成熟度较低， R_o 一般约为0.5%，属

于未成熟—低成熟阶段。与此同时,扫描电镜照片揭示石英、长石等无机矿物间多呈点接触(图3),发育大量无机孔隙,孔径最大可达680 nm,表明样品总体处于早成岩阶段,但受岩浆侵入热变质作用影响,有机质快速进入生烃演化阶段。

不同成岩阶段有机孔隙存在明显差异(图4)。晚成岩阶段的JY1井五峰组有机孔隙孔径范围为2~400 nm,主峰位于20~50 nm,以中孔为主。中成岩阶段的Sun #1 Spinks井TMS地层有机孔隙孔径范围为20~220 nm,主峰位于30~70 nm,以中一大孔为主。早成岩阶段的ZKY2-1井嫩江组样品

有机孔隙孔径范围为30~500 nm,主峰位于70~130 nm,以大孔为主。中—晚成岩阶段埋深较大,无机矿物颗粒紧密排列,多呈线接触且破裂变形;石英颗粒次生加大,无机孔隙减少,总孔隙度较低(图6-A,B);与此同时强烈的压实作用使页岩有机孔隙由大孔向中孔和微孔转化,孔隙形态多呈不规则扁圆形^[14,46]。早成岩阶段压实和胶结作用较弱,无机矿物颗粒松散且粒度较小,总孔隙度高达15%;由于岩浆侵入快速升温,有机质进入生烃阶段,发育大量有机孔隙,孔隙形态多呈圆形,大孔数量和比例增加,有机孔隙保存较好(图6-C)。



A. JY1井,焦石坝地区;B. Sun #1 Spinks井,密西西比州西部(据文献^[14]修改);C. ZKY2-1井,松辽盆地;D. 页岩总孔隙度^[14,46]

图6 不同页岩电镜照片与孔隙度对比

Fig. 6 Electron microscopic photographs and porosity of different shales

4.3 其他影响因素

页岩有机孔隙的成因和控制因素复杂,尚未形成统一的认识^[2,5-6,12-17,21,51-53],本次研究探讨了热作用促使页岩有机孔隙发育演化,并结合国内外典型页岩储层对比分析不同埋藏成岩阶段有机孔隙的差异。上文所述有机孔隙的差异除了受压实作用影响外,还可能受以下因素影响。

(1)有机质丰度和类型。焦石坝JY1井五峰组有机质类型主要为I型,少量为II₁型, $w(\text{TOC})$ 介于1.42%~5.28%之间,平均3.31%。密西西比州Sun #1 Spinks井TMS页岩有机质类型主要为II型,少量为III型, $w(\text{TOC})$ 为0.75%~2.85%,平均1.38%。嫩江组有机质类型为I~II型^[29],

$w(\text{TOC})$ 为1.0%~5.0%。海相和湖相有机质类型和丰度存在差异,有机质进入生烃演化阶段后,有机孔隙的发育演化可能存在差异。

(2)缓慢升温 and 快速升温。典型页岩储层(焦石坝JY1井和密西西比州Sun #1 Spinks井)在地质历史时期经历埋藏升温促使有机质进入生烃演化阶段,升温过程较为缓慢;而本次研究的ZKY2-1井受岩浆侵入影响快速达到高热演化阶段,埋藏缓慢升温 and 岩浆侵入快速升温对有机孔隙形成的影响还需进一步研究。

(3)封闭系统和开放系统。中—晚成岩阶段(焦石坝JY1井和密西西比州Sun #1 Spinks井)页岩物性较差,有机孔隙形成于相对封闭的系统;而早成

岩阶段(松辽盆地 ZKY2-1 井)页岩物性仍然较好,为相对开放的系统,在该条件下有机质快速进入生烃演化阶段,有机孔隙的特征与封闭系统存在差异。

5 结 论

(1)松辽盆地 ZKY2-1 井嫩江组低熟样品发育大量有机孔隙,有机孔隙孔径范围为 30~500 nm,主峰位于 70~130 nm,以大孔为主,孔隙形状主要为圆形或次圆形,呈海绵状聚集分布。

(2)ZKY2-1 井低熟样品有机孔隙的成因与岩浆热侵入作用密切相关。样品中的石英和长石等无机矿物呈点接触,发育大量无机孔隙,对应早成岩阶段;岩浆侵入作用促使有机质进入高热演化阶段(等效镜质体反射率为 2.37%),并形成大量有机孔隙。

(3)成岩演化过程中的压实作用对有机孔隙发育程度和保存具有重要的影响。早成岩阶段压实作用较弱,页岩中的有机孔隙可以得到较好的保存,大孔的数量和比例相对较高;中—晚成岩阶段由于埋深较大,强烈的压实作用导致页岩有机孔隙由大孔向中孔和微孔转化。

参考文献:

- [1] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
- [2] 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(23):26-31.
- [3] 苟启洋,徐尚,郝芳,等.纳米 CT 页岩孔隙结构表征方法:以 JY-1 井为例[J].石油学报,2018,39(11):1253-1261.
- [4] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国页岩气资源勘探潜力[J].天然气工业,2008,28(6):136-140.
- [5] 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(12):848-861.
- [6] 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(4):665-677.
- [7] Slatt R M,O'Brien N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales:Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. AAPG Bulletin,2011,95(12):2017-2030.
- [8] Walls J D,Sinclair S W. Eagle Ford shale reservoir properties from digital rock physics[J]. First Break,2011,29:97-101.
- [9] Chen J,Xiao X. Evolution of nanoporosity in organic-rich shales during thermal maturation[J]. Fuel,2014,129(4):173-181.
- [10] Tian H,Pan L,Zhang T,et al. Pore characterization of organic-rich Lower Cambrian shales in Qiannan Depression of Guizhou Province,Southwestern China[J]. Marine and Petroleum Geology,2015,62:28-43.
- [11] Pan L,Xiao X,Tian H,et al. A preliminary study on the characterization and controlling factors of porosity and pore structure of the Permian shales in Lower Yangtze region,Eastern China[J]. International Journal of Coal Geology,2015,146:68-78.
- [12] Cardott B J,Landis C R,Curtis M E. Post-oil solid bitumen network in the Woodford Shale,USA:A potential primary migration pathway[J]. International Journal of Coal Geology,2015,139:106-113.
- [13] Mastalerz M,Schimmelmann A,Drobnik A,et al. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany Shale across a maturation gradient: Insights from organic petrology, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. AAPG Bulletin,2013,97(10):1621-1643.
- [14] Lu J,Ruppel S C,Rowe H D. Organic matter pores and oil generation in the Tuscaloosa marine shale[J]. AAPG Bulletin,2015,99(2):333-357.
- [15] Bernard S,Horsfield B,Schulz H M,et al. Geochemical evolution of organic-rich shales with increasing maturity: A STXM and TEM study of the Posidonia Shale (Lower Toarcian, northern Germany)[J]. Marine and Petroleum Geology,2012,31:70-89.
- [16] Bernard S,Horsfield B. Thermal maturation of gas shale systems[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences,2014,42(1):635-651.
- [17] Lohr S C,Baruch E T,Hall P A,et al. Is organic pore development in gas shales influenced by the primary porosity and structure of thermally immature organic matter? [J]. Organic Geochemistry,2015,87(3):119-132.
- [18] 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.
- [20] Pommer M,Milliken K. Pore types and pore-size distributions across thermal maturity, Eagle Ford Formation, southern Texas[J]. AAPG Bulletin,2015,99(9):1713-1744.
- [21] Zhao J H,Jin Z J,Jin Z K,et al. Mineral types and organic matters of the Ordovician-Silurian Wufeng and Longmaxi Shale in the Sichuan Basin,China: Implications for pore systems, diagenetic pathways, and reservoir quality in fine-grained sedimentary rocks[J]. Marine and Petroleum Geology,2017,86: 655-674.
- [22] Lucy T Ko,Loucks R G,Zhang T W,et al. Pore and pore network evolution of Upper Cretaceous Boquillas (Eagle Ford-equivalent) mudrocks: Results from gold tube pyrolysis experiments[J]. AAPG Bulletin,2016,100(11):1693-1722.
- [23] Han Y J,Brian H,Richard W,et al. Oil retention and porosity evolution in organic-rich shales[J]. AAPG Bulletin,2017,101(6):807-827.
- [24] Mathia E J,Bowen L,Thomas K M,et al. Evolution of porosity and pore types in organic-rich, calcareous, Lower Toarcian Posidonia Shale[J]. Marine and Petroleum Geology,2016,75: 117-139.
- [25] 秦伟军,郭金瑞. 松辽盆地南部断陷层油气勘探领域[J]. 石油实验地质,2010,32(4):326-329.
- [26] 沈安江. 松辽盆地南部白垩纪层序地层与岩性地层油气藏勘探

- [M]. 北京:石油工业出版社,2006.
- [27] 汪新文. 中国东北地区中—新生代盆地构造演化与油气关系[M]. 北京:地质出版社,2007.
- [28] 许坤,李瑜. 开鲁盆地晚中生代地层[J]. 地层学杂志,1995,19(2):88-95.
- [29] 席党鹏,李罡,万晓樵,等. 松辽盆地东南区姚家组—嫩江组一段地层特征与湖泊演变[J]. 古生物学报,2009,48(3):556-568.
- [30] 褚喜准,王琪,朱筱敏,等. 松辽盆地南部拗陷期湖盆底形演化及充填序列[J]. 石油学报,2009,30(4):536-541.
- [31] 张顺,付秀丽,张晨晨. 松辽盆地姚家组—嫩江组地层层序及沉积演化[J]. 沉积与特提斯地质,2011,31(2):34-42.
- [32] 史洪亮,王同,陈霞,等. 川南下古生界高演化页岩成熟度指标[J]. 断块油气田,2018,25(1):43-47.
- [33] 张振苓,鄢立言,脱奇,等. 烃源岩热解分析参数 T_{max} 异常值的还原[J]. 石油勘探与开发,2007,34(5):580-584.
- [34] Peters K E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis[J]. AAPG Bulletin,1986,70(3):318-329.
- [35] 仰云峰. 川东南志留系龙马溪组页岩沥青反射率和笔石反射率的应用[J]. 石油实验地质,2016,38(4):466-472.
- [36] 刘德汉,史继扬. 高演化碳酸盐烃源岩非常规评价方法探讨[J]. 石油勘探与开发,1994,21(3):113-115.
- [37] Yang R, Hao F, He S, et al. Experimental investigations on the geometry and connectivity of pore space in organic-rich Wufeng and Longmaxi shales[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017,84:225-242.
- [38] 陈荣书,何生,王青玲,等. 岩浆活动对有机质成熟作用的影响初探:以冀中葛渔城—文安地区为例[J]. 石油勘探与开发,1989,16(1):29-38.
- [39] 何生,陈荣书,兰廷泽. 冀中文安斜坡石炭—二叠纪煤系特征及岩浆热力成烃作用[J]. 地球科学:中国地质大学学报,1992,17(6):699-708.
- [40] 万从礼,金强. 东营凹陷纯西辉长岩对烃源岩异常生排烃作用研究[J]. 地球科学与环境学报,2003,25(1):20-25.
- [41] 曹学伟,胡文瑄,金之钧,等. 临盘油田夏38井区辉绿岩热效应对成烃作用的影响[J]. 石油与天然气地质,2005,26(3):317-322.
- [42] 王民,王岩,卢双舫,等. 岩浆侵入体热作用对烃源岩生烃影响的定量表征:以松辽盆地南部英台断陷为例[J]. 断块油气田,2014,21(2):171-175.
- [43] 宋占东. 阳信洼陷火成岩对烃源岩生烃作用机理研究[D]. 青岛:中国石油大学,2009.
- [44] 王莉,苗志,王树平,等. 松辽盆地南部火山岩识别方法及模式建立[J]. 天然气工业,2007(增刊1):300-302.
- [45] 张晓明,石万忠,徐清海,等. 四川盆地焦石坝地区页岩气储层特征及控制因素[J]. 石油学报,2015,36(8):926-939,953.
- [46] 杨锐,何生,胡东风,等. 焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩孔隙结构特征及其主控因素[J]. 地质科技情报,2015,34(5):105-113.
- [47] Yang R, He S, Hu Q, et al. Pore characterization and methane sorption capacity of over-mature organic-rich Wufeng and Longmaxi shales in the southeast Sichuan Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016,77:247-261.
- [48] 徐勇,吕成福,陈国俊,等. 川东南地区志留系龙马溪组页岩孔隙结构特征[J]. 地质科技情报,2015,34(6):108-115.
- [49] 侯宇光,何生,易积正,等. 页岩孔隙结构对甲烷吸附能力的影响[J]. 石油勘探与开发,2014,41(2):248-256.
- [50] 陈晓智,陈桂华,肖钢,等. 北美 TMS 页岩油地质评价及勘探有利区预测[J]. 中国石油勘探,2014,19(2):77-84.
- [51] Bernard S, Wirth R, Schreiber A, et al. Formation of nanoporous pyrobitumen residues during maturation of the Barnett Shale (Fort Worth Basin)[J]. International Journal of Coal Geology, 2012,103:3-11.
- [52] 胥博文,刘树根,白志强,等. 川西南威远地区龙马溪组页岩储层孔隙发育特征及控制因素分析[J]. 地质科技情报,2017,36(2):70-79.
- [53] 邱嘉文,刘树根,孙玮,等. 四川盆地周缘五峰组—龙马溪组黑色页岩微孔特征[J]. 地质科技情报,2015,34(2):78-86.