

辽河坳陷沙三、沙四段泥页岩微观孔隙特征及其成藏意义

杨超^{1,2}, 张金川^{1,2}, 李婉君^{1,2}, 荆铁亚^{1,2}, 孙睿^{1,2}, 王中鹏^{1,2}, 何伟^{1,2}, 卢亚亚^{1,2}

(1. 中国地质大学 能源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学 海相储层演化与油气富集规律教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:为深入研究辽河坳陷次级凹陷沙河街组三、四段泥页岩储层孔隙特征及成藏意义,选取了5口泥页岩钻井岩心样品进行了氩离子抛光-扫描电镜(FIB-SEM)、氦气吸脱附、X-衍射全岩分析、干酪根镜检及配套有机地化等实验,从微观孔隙结构到成藏意义进行了深入探讨。结果表明,研究层段共存在粒间孔、粒内孔、晶间孔、溶蚀孔、有机孔、微裂缝6种孔隙类型。孔隙发育不仅与沉积压实、胶结、溶解作用相关,另外还与页岩岩性、矿物结构、有机质类型、有机地化等因素密切相关。粘土矿物集合体粒间孔和层间微孔缝对页岩油气的赋存和运移贡献最大,且是页岩储层各向异性(渗透率)的主要控制因素;溶蚀孔及晶间孔次之;有机孔因相对不发育,对页岩油气的渗透贡献较小,但仍然是吸附态页岩油气的主要场所;微裂缝的影响不容忽视,是沟通宏孔与中孔的主要微通道。另外,低熟条件下粘附-结合态有机质中有机孔的大量发现表明粘土矿物对有机质的早期催化生烃起到重要作用,同时,有机质与矿物(主要是粘土矿物)紧密共生的保存特点,也反映了有机质保存形式与油气生成之间的密切关系。实验同时表明无定形体是研究层段生成页岩油气的主要贡献者。

关键词:氩离子抛光-扫描电镜;孔隙特征;油气成藏;沙河街组;辽河坳陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Microscopic pore characteristics of Sha-3 and Sha-4 shale and their accumulation significance in Liaohe Depression

Yang Chao^{1,2}, Zhang Jinchuan^{1,2}, Li wanjun^{1,2}, Jing Tieya^{1,2}, Sun Rui^{1,2}, Wang Zhongpeng^{1,2}, He Wei^{1,2}, Lu Yaya^{1,2}

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education of Marine Reservoir Evolution and Oil and Gas Accumulations, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to further study the pore characteristics of shale reservoir in Sha-3 and Sha-4 (the 3rd and 4th Member of Shahejie Formation respectively) and their accumulation significance in Liaohe depression, samples from 5 wells were chosen to conduct a series of experiments including focused ion beam-scanning electron microscope (FIB-SEM), helium adsorption and desorption, whole rock analysis by XRD, microscopic examination of kerogen and related organic geochemistry experiments. The results show that there are 6 types of pore including intergranular pore, intragranular pore, inter-crystal pore, dissolution pore, organic pore and micro-cracks. Furthermore, development of these pores are not only related to sedimentary compaction, cementation and dissolution, but also closely related to the lithology, mineral fabric, type of organic matter and organic geochemistry. The intergranular pores and interlayer micropores and cracks of clay mineral aggregates make the greatest contribution to the storage and migration of shale oil and gas, and they are also the major controlling factor of the anisotropic (permeability) of the shale reservoir, followed by the dissolution pores and inter-crystal pores. The organic pores contribute the least due to the relatively poor development, but they still plays an important role in storage of absorbed shale oil and gas. Meanwhile, micro-cracks are also negligible in connecting macro-pores and meso-pores. In addition, large amount of organic pores are found in adhesive-combining organic matter with low maturity, indicating that clay minerals play an important role in the early period of hydrocarbon generation. The feature of close symbiosis between organic matter and minerals (mainly clay minerals) also reflects the close relationship between the preservation pattern of organic matter and hydrocarbon generation. The experiments also demonstrate that the amorphous solid is the major contributor to the generation of shale oil and gas in Sha-3 and Sha-4 shale.

Key words: FIB-SEM, pore characteristics, hydrocarbon accumulation, Shahejie Formation, Liaohe Depression

收稿日期:2013-11-20;修订日期:2014-01-20。

第一作者简介:杨超(1988—),男,硕士生,油气成藏机理及非常规油气地质勘探与评价。E-mail:944985906@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41272167);国土资源部全国油气资源战略选区调查与评价专项(2009GYXQ15)。

近年来,北美地区页岩气的蓬勃发展带动了世界页岩气勘探开发热潮,以辽河拗陷为代表的中国北方大面积的陆相及海陆过渡相盆地,泥页岩广泛发育,有机质丰度较高,具备页岩油气生成的物质基础及地化条件。目前辽河拗陷的页岩油气资源调查评价已日渐深入,勘探技术手段也日益成熟,但是在一些地质理论方面还是存在着许多认知障碍,缺乏必要的实验和理论支撑,其中重要的一点就是低熟油页岩的生烃机理及纳米级微观孔隙的研究。相对常规砂岩及碳酸盐储层,泥页岩具有特低孔、特低渗的特点,极强的非均质性导致其微观孔隙结构及网络更加复杂多样,而常规手段在页岩孔隙研究方面适用性不强。近年来,由北美率先使用的氩离子抛光-扫描电镜技术(FIB-SEM)在泥页岩微观孔隙的研究中日益发挥重要作用^[1-4],其使得页岩纳米级孔隙结构得到可视化,在很大程度上弥补了压汞法和吸脱附法在定性研究页岩储层孔隙结构及孔径分布方面的不足。北美主要产气页岩中大量纳米级孔隙特别是有机孔的发现对页岩气赋存状态及生烃机理具有明显的控制和揭示作用。

本文的目的在于通过借助 FIB-SEM、吸脱附实验,在调研国内外典型页岩储层孔隙类型及孔径分布的基础上,对辽河拗陷次级凹陷低熟泥页岩储层孔隙类型进行分类,并结合北美和中国海相典型页岩储层孔隙特征,对比分析微观孔隙发育的主控因素、对页岩气赋存和渗透的影响以及其背后的成藏意义。

1 研究区概况

辽河拗陷位于渤海湾盆地的东北角,是在近东西向古生代向斜背景上发育起来的中新生代叠合盆地^[5],从古到今共发育了古生界、中生界和新生界古近系 3 套泥页岩层系。中生代晚期至新近纪晚期,辽河拗陷经历“拱张、裂陷和拗陷”演化阶段,此段时期的断裂活动将拗陷分为 3 个次级凹陷(西部、东部、大民屯)和 3 个次级凸起(西部、中央和东部凸起)(图 1)。其中,古生界、中生界页岩主要分布在辽河拗陷东部凸起地区,以富集页岩气为特点,而在西部、东部和大民屯三大凹陷内则不发育或分布很局限。新生界古近系泥页岩在上述三大凹陷内分布广、厚度大,但以低熟泥页岩或油页岩为主,本文的研究重点是古近系沙河街组沙三段、沙四段泥页岩。沙三段、沙四段泥页岩主要为深湖、半深湖相泥页岩沉积,并且发育有多套具相当厚度的油页岩。实验统计,沙三段、沙四段泥页岩有机质类型以 I-II₁型为主,III型少见,显微组分以无定形体为主,含少量藻类体和镜质体;有机碳含量相对较高,平均在 2% 以上;虽然埋藏较深(2 500~3 500 m),

但由于沉积时代晚,现今泥页岩仍普遍处于未熟-低熟油阶段,实验统计镜质体反射率 R_o 为 0.25%~0.70%,(平均 0.46%),区内探明的天然气主要为生物热催化过渡带气和低温热解气;矿物组成上以粘土矿物和石英、长石等硅质矿物为主,平均含量分别为 48%和 35%,且粘土矿物中尤以伊蒙混层占绝对比例,达到 70%,为中成岩 B 期;实验测试孔隙度为 3%~8%;油页岩含油率平均为 4 mg/g,最高可达 19 mg/g;钻井岩心发现沙三段、沙四段泥页岩地层裂缝较为发育,多口井的岩心观察过程中均发现了大量构造缝,主要为顺层裂缝以及构造应力产生的构造缝。

2 样品和实验方法

选取了辽河拗陷不同次级凹陷的具有代表性的 5 口井的钻井岩心,共计 5 块样品(图 1;表 1),进行了氩离子抛光扫描电镜实验和氮气吸脱附实验以及配套的有机地化和储层岩矿等相关实验。

本次氩离子抛光-扫描电镜实验采用的仪器是 FEI Quanta200F 场发射扫描电镜,分辨率达到 1.2 nm,放大倍数 25~20 万倍。实验制样步骤与普通扫描电镜的制样步骤基本相似,只是在预处理样品时要使用

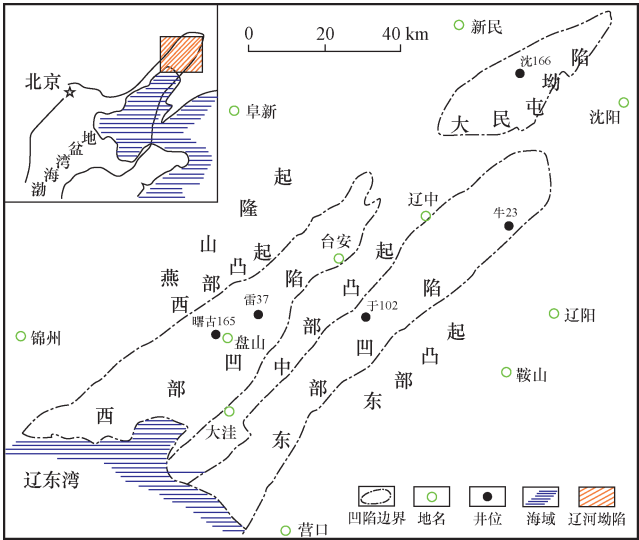


图 1 辽河拗陷构造分区及样品分布
Fig. 1 Structure units of Liaohe depression and sample point distribution

表 1 样品基本情况
Table 1 Information of the samples

井号	井深/m	层位	岩性	TOC/%	R_o /%	构造位置
曙古 165	2 733.5	$E_s^{3(1)}$	深灰色泥岩	2.85	0.68	西部凹陷
雷 37	2 816.8	$E_s^{4(2)}$	油页岩	4.00	0.34	西部凹陷
牛 23	3 373.1	$E_s^{3(2)}$	褐灰色泥岩	5.00	0.63	东部凹陷
于 102	3 210.4	$E_s^{3(2)}$	深灰色泥岩	2.10	0.40	东部凹陷
沈 166	3 005.3	$E_s^{4(2)}$	油页岩	5.70	0.27	大民屯凹陷

氩离子束轰击页岩表面进行精细抛光。实验时的工作距离以 8 ~ 10 mm,电压以 5 ~ 10 kV 为宜。FIB – SEM 相较普通扫描电镜的三维立体成像而言,其二维平面图像虽然在矿物组分形态的表现上稍显不足,但对于纳米级微观孔隙的观察却有着极大的优势。FIB – SEM 为利用原子序数衬度成像,黄铁矿因铁元素的存在在电镜下呈现相对最白色,有机质则因碳元素的低原子序数而呈现最暗色。另外,镜下也可以借助能谱分析(EDS)测定矿物元素组成及含量,进而确定矿物类型。

为了验证 FIB – SEM 镜下观察到的现象和表征页岩微观孔隙结构,特对样品做了比表面测试。目前,针对泥页岩比表面实验用的载气主要有 3 种(N₂,He 和 CO₂)。本实验采用氦气吸脱附,仪器为美国康塔公司 Quadrasorb SI 全自动比表面分析仪,原理为等温吸附的静态容积法,可以实现对孔隙结构参数(比表面、孔容以及孔径大小和分布)的定量测试。

3 孔隙表征

3.1 孔隙类型(FIB – SEM)

借助氩离子抛光 – 扫描电镜实验对辽河坳陷次级凹陷沙三段、沙四段泥页岩样品进行了系列研究。根据孔隙发育介质条件和成因特征对孔隙作如下分类(表 2)。

3.1.1 无机孔特征

1) 粒间孔

粒间孔多为原生孔隙,主要是矿物成岩压实胶结后的剩余空间。受矿物颗粒形态、接触关系以及排列方式的影响,粒间孔排列无规律,散布于基质中,在软

硬矿物颗粒接触孔隙多呈角形(图 2a,b),在层状粘土矿物间多呈线型。虽然经历后期埋藏压实作用,但镜下发现粒间孔径仍多在 100 nm 以上。

2) 粒内孔

粘土矿物层间粒内孔是本次实验中最为广泛发育的孔隙类型(图 2c—e),而其他矿物中较少见(图 2f)。粒内孔的产生与蒙脱石的成岩转化过程(随沉积埋藏转变为伊蒙混层或伊利石)有关。

3) 晶间孔

晶间孔多为晶体生长过程中的不紧密堆积所形成,镜下发现石英、长石以及微球粒状黄铁矿晶簇内存在少量晶间孔缝(图 2g),孔径一般在几纳米至几十纳米。这种孔隙边缘平整,相互之间具有一定的连通性,与北美海相页岩具有可比性。

4) 溶蚀孔

深埋藏下化学不稳定矿物如石英、长石、碳酸盐、粘土矿物等会形成溶蚀孔(图 2h,i),特别是粘土矿物溶蚀孔的发育很普遍。溶蚀孔的发育多与有机质生烃过程有关,烃源岩中可溶有机质在热演化过程中生成的有机酸可以通过提供 H⁺ 和络合金属元素来提高矿物的溶解度、影响矿物的稳定性,进而导致矿物发生溶蚀^[6]。这不仅改善了泥页岩的孔隙状况,同时也改造了烃源岩的比表面。此过程大约发生在 80 ~ 120 °C^[7],对应沙三段、沙四段页岩地层温度区间,因此理论和观察都表明,溶蚀孔发育较普遍。

3.1.2 有机孔特征

研究表明有机质部分以游离态形式存在,部分吸附于粘土矿物的外表面,部分进入到粘土矿物的层间域,因而形成了烃源岩颗粒态、表面吸附态和粘土矿物层间结合态等有机质的不同赋存形式^[6]。与游离态有机质相比,粘附态有机质在氩离子抛光电镜下的表现特征为其赋存形态取决于被粘附的矿物,且颜色较游离态有机质浅。如果粘附于粘土矿物,则一般表现为与粘土矿物之间呈晕状接触,没有清晰的界线,且有机质颜色较浅;如果粘附于石英、长石等脆性矿物,则受脆性矿物格架控制,表现为脆性矿物形态且颜色较浅。镜下发现,沙三段、沙四段有机质主要以与粘土矿物呈粘附 – 结合态的形式存在,有机质的能谱分析(C, O, Si, Al, Ca, Mg, K, Fe)也表明有机质多为粘附 – 结合态(图 3f),且其中常发育有机孔,这种有机孔多呈凹坑状、分散型、孔深较浅,孔径变化范围较大,主要在 5 ~ 150 nm,即多属中、宏孔(图 3a—d),局部孔径较大且边缘有油气侵染迹象的地方(图 3a,d)表现出一定的溶蚀效应,可能是生排烃后留下的孔,与北美典型产油气页岩具有可比性(图 3e)。

表 2 页岩孔隙分类特征

Table 2 Characteristics of shale pores

孔隙类型	成因机制	孔径大小	常见分布特征
粒间孔	矿物颗粒压实堆积,原生孔隙	100 nm ~ 3 μm	多见于软硬颗粒接触处及粘土矿物聚合体间
粒内孔	矿物成岩转化作用	8 nm ~ 1 μm	多见于薄片状粘土矿物
晶间孔	晶体生长过程中不紧密排列	100 nm ~ 3 μm	常见于黄铁矿晶簇中
溶蚀孔	物理、化学溶蚀作用	10 nm ~ 2 μm	常见于粘土、方解石、长石等易溶蚀矿物中
有机孔	有机质生排烃过程中引爆作用或酸性溶蚀作用	5 nm ~ 250 nm	多见于粘附态有机质中
微裂缝	微应力或沉积间断作用	50 nm ~ 3 μm	常呈狭长条带或锯齿状分布在矿物内或呈大型贯通式裂缝分布于基质中

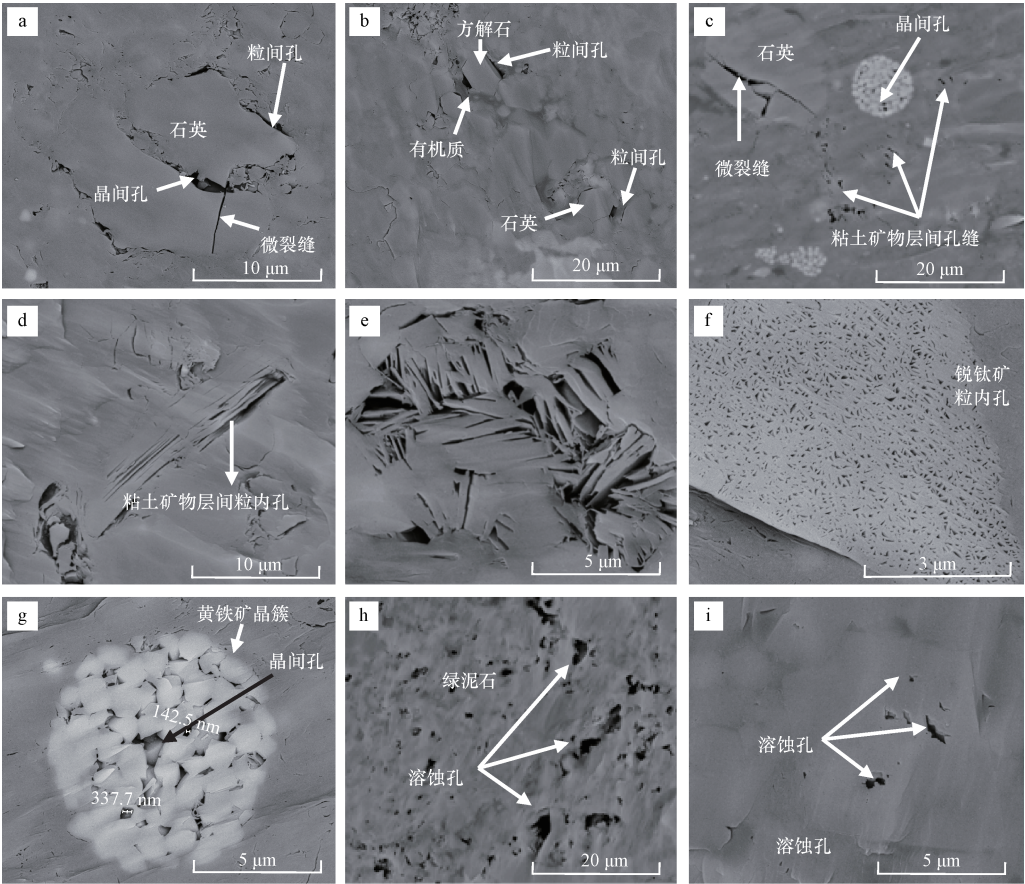


图2 无机孔赋存特征

Fig. 2 Occurrence characteristics of inorganic pores

a. 于102井; b. 雷37井; c. 曙古165井; d. 牛23井; e, f, g. 曙古165井; h. 沈166井; i. 牛23井

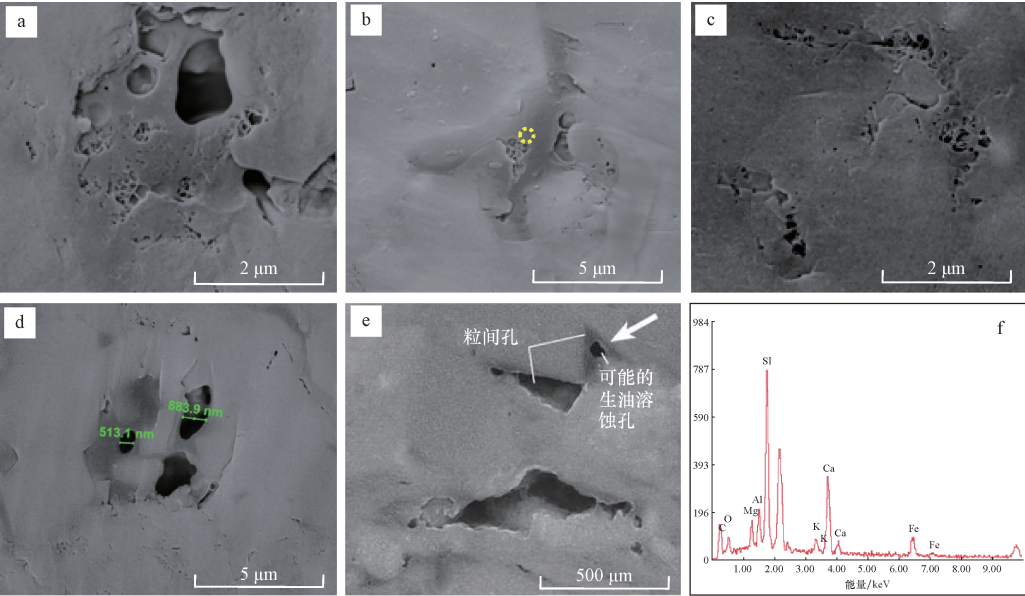


图3 有机孔赋存特征

Fig. 3 Occurrence characteristics of organic pores

a, b. 雷37井; c, d. 牛23井; e. 皮尔索尔地层, $R_o = 0.78\%$; f. b处能谱

3.1.3 微裂缝特征

本次实验中微裂缝大量发育,微裂缝多呈明显的

锯齿状弯曲,并且延伸性较好,长度多在2 μm,宽度在20~700 nm。根据裂缝延伸程度可分为小型晶内微裂缝(图4a)和大型贯通式微裂缝(图4b)。微裂缝常表

现为粘土矿物裂开缝(图4c,d)、脆性矿物裂开缝(图2a,c,图4a)或粘土矿物与脆性矿物接触缝(图4e)。另外在有机质中也较常见(图4c),这在一定程度上也反映了宏观上裂缝多发育在高脆性矿物含量及高有机质丰度的页岩段。研究表明,宏观尺度裂缝的形成主要与岩石脆性、地层孔隙压力、差异水平压力、断裂和褶皱等因素相关,而微观尺度张力测试的模拟则在一定程度上反映了微裂缝受制于矿物的结晶作用以及有机质的生烃作用^[8]。

3.2 孔隙结构(吸脱附实验)

鉴于场发射扫描电镜观察范围太小,致使结果可能存在一定的局限性,而吸脱附实验则能从宏观上对页岩的微观孔隙结构进行定性反映和定量表征。这里需要明确的是:①吸附是由孔壁的多分子层吸附和在孔中凝聚两种因素产生,而脱附仅由毛细管凝聚所引起。②吸附时首先发生多分子层吸附,只有当孔壁上的吸附层达到足够厚度时才能发生凝聚

现象。③脱附回线的产生要求孔隙呈开放状态。④脱附回线的滞后现象是多孔介质的普遍特性,实际就是相同 p/p_0 下吸附的不可逆性造成的。⑤借鉴微观材料学的研究成果,根据吸脱附曲线形态可以识别吸附类型,根据回线中段分离曲线坡度及形状可以划分孔隙形态^[9]。

首先,5块样品的吸脱附曲线形态(图5a)不属于Brunauer^[10]划分的任一类型,而是呈现出多种吸附类型的混合形式,即起始段形态反映为粘土矿物和有机质的单层或多层吸附,而分离的中段表明存在毛细凝聚现象,暗示中孔及大孔的存在,吸附微弱,计算的BJH孔径分布(图5b)也证实了这一点。其次,脱附回线的滞后现象表明孔隙呈开放状态,表明孔隙之间具有一定连通性。再者,根据吸脱附曲线分离段的坡度近平行这一特征,推断样品孔隙主要以尖劈或平行板状形式存在。结合沙三段、沙四段泥页岩矿物组成可知沙三段、沙四段泥页岩主要以粘土矿物的层间粒内孔为主,这与FIB-SEM镜下观察到的现象一致。

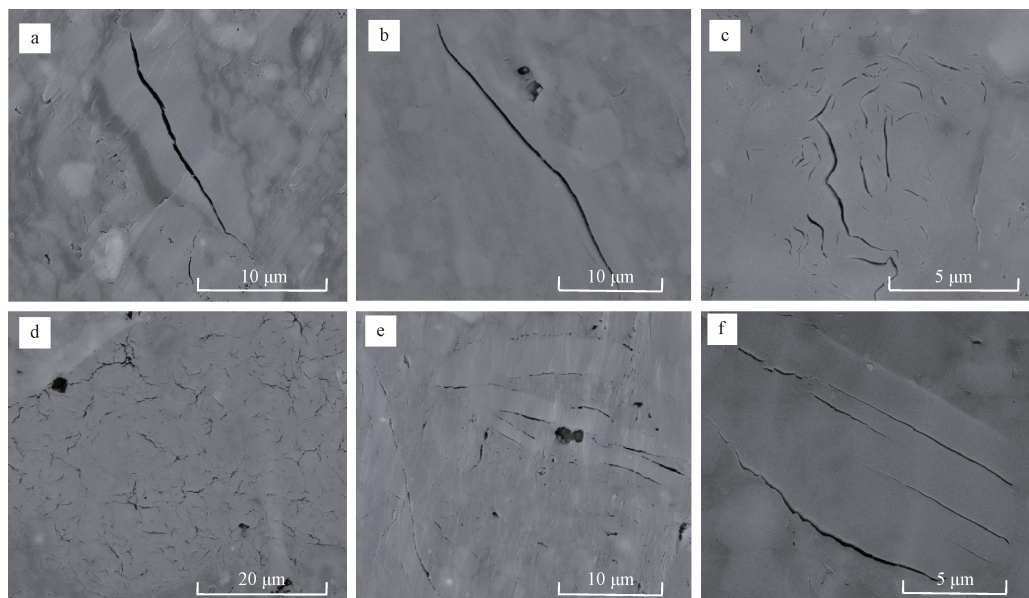


图4 微裂缝赋存特征

Fig. 4 Occurrence characteristics of micro-cracks

a, e. 沈166井; b, c. 曙古165井; d, f. 雷37井

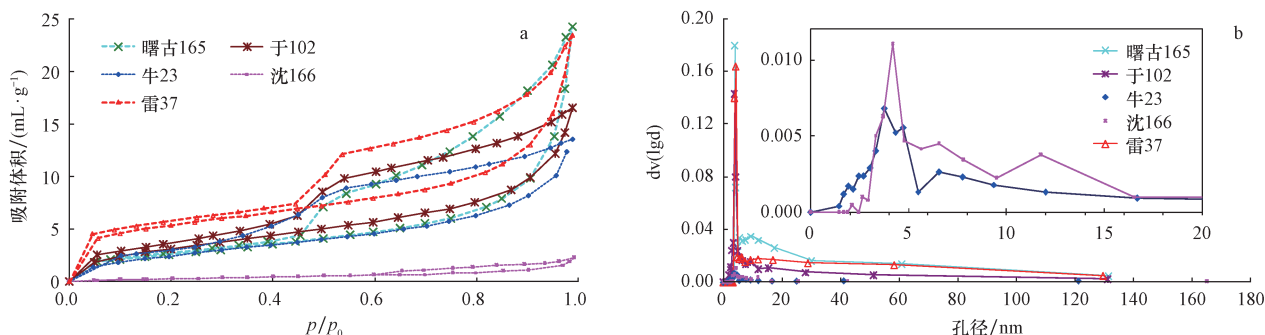


图5 样品吸脱附曲线(a)及BJH孔径分布(b)

Fig. 5 Adsorption and desorption curve (a) and BJH pore size distribution (b)

4 讨论

4.1 孔隙发育主控因素

辽河坳陷次级凹陷沙三段、沙四段泥页岩随构造、沉积环境变迁,成岩演化经历了独有的阶段和多种成岩作用,直接影响到沙三段、沙四段泥页岩微观孔隙的形成和演化。研究表明,不同地区、不同地质条件下的泥页岩微观孔隙发育类型不同(表 3),这与页岩矿物组构、物化特性、干酪根类型、有机地化特征有关系,同时受沉积环境、埋深以及地层温压等外因的影响。其中干酪根类型及有机地化特征主要决定着有机孔的发育,而矿物组构(图 6a)、物化特性(图 6b)主要决定无机孔的发育。

海相页岩一般沉积时代较早,有机质演化生烃多已达成熟和过成熟阶段,矿物组成上多富含石英、长石

等硅质矿物以及方解石等钙质矿物,而贫粘土矿物,这就造成有机孔和矿物粒间孔较发育,而主要以粘土矿物为赋载体的粒内孔则相对不发育。沙三、沙四段泥页岩主要发育于陆相湖盆环境,泥页岩矿物组成中的粘土矿物含量普遍高于海相泥页岩,含量为 40%~60%;硅质矿物含量(石英、长石等)则相对较低,为 30%~40%;脆性矿物含量则相对较少,一般在 10%以下。较高的粘土矿物含量是粒内孔的主要贡献者,而较低的有机质演化成熟度是有机孔相对不发育的主要原因。另外,深埋藏下的溶蚀作用也导致溶蚀孔的大量发育。

4.2 孔隙类型对页岩油气赋存和渗透的影响

页岩基质孔隙网络由一系列微米-纳米级孔组成,这些微纳米孔连同天然裂缝组成了页岩气赋存和渗流的位置及通道。孔隙大小是决定页岩气赋存状态的关键,在大的孔隙中气体以游离态为主,在小的孔隙

表 3 中美典型页岩储层主要发育孔隙类型及主要参数

Table 3 Main pore types and corresponding parameters of typical shale reservoirs in China and America

时代	地层名称	孔隙类型	岩性	干酪根类型	TOC/%	R _o /%
K ₂	Eagle Ford	粒内孔和有机质孔 ^[11]	钙质页岩	II	1.4~5.0	2.0
J ₂	Haynesville	粒间和粒内孔为主 ^[11]	钙质-粘土页岩	II	1.5~4.0	2.2~3.0
C ₁	Barnette	有机孔和黄铁矿微球粒间孔为主	硅质页岩	II	2.0~7.0	1.0~2.1
D	Woodford	有机孔为主,粒间、粒内孔次之 ^[11]	硅质页岩	II	1.0~14.0	1.1~3.0
K ₂	Lewis	有机孔和粒间孔 ^[11]	粉砂质页岩	III	0.5~2.5	1.6~1.9
D	Marcellus	有机孔为主,少量粒内孔 ^[11]	粘土质页岩	II	0.5~4.0	1.5~3.0
C ₁	Fayetteville	粒内孔和有机孔 ^[11]	粘土质页岩	II	4.0~9.3	1.0~4.0
D	New Albany	粒间和粒内孔 ^[11]	炭质页岩	II	1.0~25.0	0.4~0.8
D	Antrim	粒内孔 ^[11]	炭质页岩	I	0.3~24.0	0.4~0.6
Є _{1n}	上扬子牛蹄塘组	粒间孔为主,少量有机孔	硅质页岩	I-II	0.5~9.0	1.6~4.0
Sl ₁	上扬子龙马溪组	有机孔和粒间孔为主 ^[12-13]	钙质页岩	I-II	1.0~7.0	1.2~3.5
T ₃	鄂尔多斯延长组长 7、长 9 段	粒内、粒间孔为主,少量有机孔 ^[14]	粘土质页岩	II	0.8~5.0	0.5~1.1
K ₂	松辽盆地青山口组	粒内孔为主,少量有机孔 ^[15]	粘土质页岩	I-II	1.0~5.0	0.7~1.0
E _s	辽河坳陷沙三、沙四段	粒内、粒间孔为主,少量有机孔	粘土质页岩	I-II	2.0~6.0	0.8~1.3

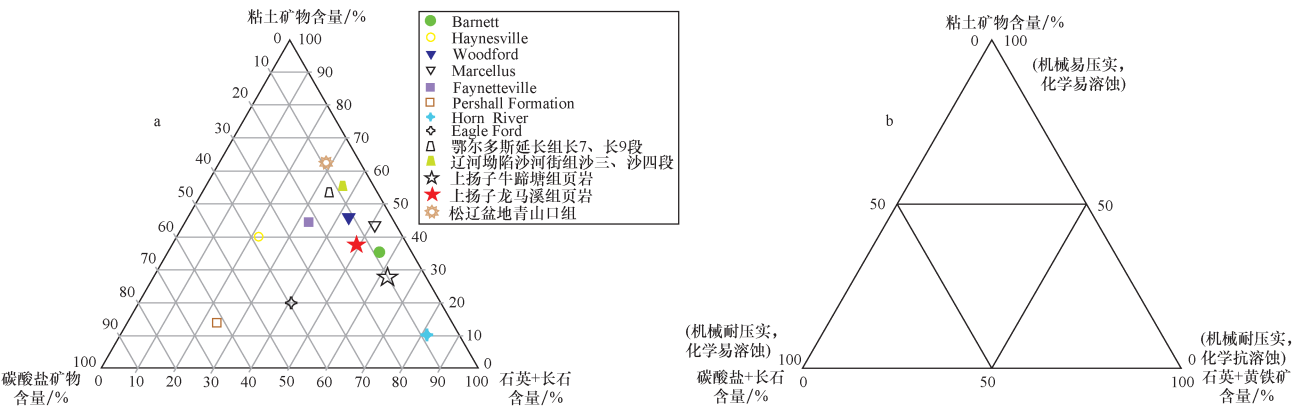


图 6 中美主要页岩气层段矿物组成(a)及物化特性(b)^[11]

Fig. 6 Mineral composition(a) and physical-chemical properties(b) of typical shale reservoirs in China and America

中以吸附态形式存在^[16]。本次实验的 BET 累积比表面积(图 7b)和 BJH 累积孔容曲线(图 7a)也表明微中孔提供了绝大部分的孔隙存储空间,暗示吸附气的含量相对较高,现场解吸实验也证实了这一点。

不同孔隙类型具有不同的孔径特征(表 2)。粒间孔发育在矿物颗粒接触处,多为中宏孔,是页岩油和游离态页岩气赋存的理想场所。特别是发育于伊蒙混层聚合体间的粒间孔,其内部具开放型纸房子构造^[17],具有大量连通性很好的孔隙空间,能为气体导流提供微观运移通道,同时增强气体渗透能力。但是鉴于深埋藏条件下,原生粒间孔不甚发育,其贡献可能不会太大。

粘土矿物层间粒内孔普遍发育,多为微中孔,主要是吸附态页岩油气的赋存空间。不同粘土矿物对甲烷的吸附能力不同,且蒙脱石 > 伊蒙混层 > 高岭石 > 绿泥石 > 伊利石^[18],这与粘土矿物的微观孔隙结构(晶体内部结构、聚合体形态及粒度)有关。粘土矿物颗粒直径几百纳米至几微米,细小的颗粒具有极大的比表面积。另外,伊蒙混层中通常发育大量层间微孔缝以及一定数量的溶蚀孔,无疑会大大增加粘土矿物的内表面积,增强吸附能力。另一方面,粘土矿物的层状及卷曲状结构是引起页岩各项异性的主要因素,即沿层理方向渗透性要比垂直方向好。再者,粘土矿物表面多附着一层薄水膜,具有一定的亲水性,对油气的赋存和运移可能会有一定的阻碍作用。但总体来看,无机孔特别是粘土矿物层间粒内孔巨大的内表面积是改善和提高泥页岩的储集性能的主要贡献者。

大量实验已证实页岩的吸附能力与页岩的有机碳含量之间存在明显的正相关关系^[19],这与有机质内部庞大的纳米级有机孔及干酪根大分子聚合态结构间微孔隙有很大关系^[20]。另外,有机孔之间并不是孤立存在,而是存在某种程度上的连通性^[21],当然前提是有机质含量要足够高。再加上有机孔大部分为亲油气的,因此,较高的有机质丰度对应较高的页岩气吸附能力,而富含有机孔并且具备较好连通性的干酪根孔隙

网络可以使气体顺利突破渗流阈值在页岩储层中形成导流微通道,提高页岩的渗透率。

本次实验发现的大量延伸性较好的弯曲状或锯齿状的微裂缝,不仅提供了页岩油气赋存的空间,而且也作为页岩油气运移提供了有效的微输导通道。在微观尺度上起到沟通分散型粒间孔和粒内孔的作用,为整个泥页岩储层孔隙网络的构建搭建了桥梁。北美生产实践已证明微裂缝发育的地方,页岩油气产量往往也越高,即使是被胶结物充填的缝对后期压裂诱导裂缝的延伸仍会起到促进作用。

4.3 有机孔背后的生烃机制

4.3.1 粘土矿物的催化生烃作用

有机质与粘土矿物共生现象很普遍,大量研究也证实,粘土矿物与有机碳含量关系密切,有机质常吸附于粘土矿物的表面,且粘土矿物和有机碳含量一般呈正相关关系^[22]。与南方海相页岩游离态有机质发育的网络状、大孔型孔隙不同,辽河坳陷次级凹陷陆相沙三段、沙四段页岩中游离态有机质基本不发育有机孔(图 8a,b),而在有机质与粘土矿物共生处较多见(呈粘附或结合态),且多呈圆形、凹坑状、分散型。如果从现在产油气的事实来解释的话,既然有油气的产生就应该有生烃有机孔的存在。而镜下观察的游离态有机质在低成熟度条件下基本不发育有机孔,那么发育有机孔的吸附-结合态有机质在生烃过程中必然发挥了重要作用。同时也表明,在低熟条件下粘土矿物对干酪根生烃起到某种程度上的催化作用,直接验证了前人关于粘土矿物催化有机质生烃的研究结果^[23]。另外,EDS 元素组成表明与蒙脱石呈结合态的有机质比与伊利石和高岭石呈结合态的有机质较发育有机孔,即不同粘土矿物对有机质生烃的催化活性是不同的,且蒙脱石催化生烃效果相对较好。事实上,在鄂尔多斯盆地延长组深湖-半深湖相页岩(图 8c,d)以及中国南方海相页岩(图 8e,f)甚至是北美海相页岩(图 8g,h)中,同样发现了大量与粘土矿物呈吸附-结

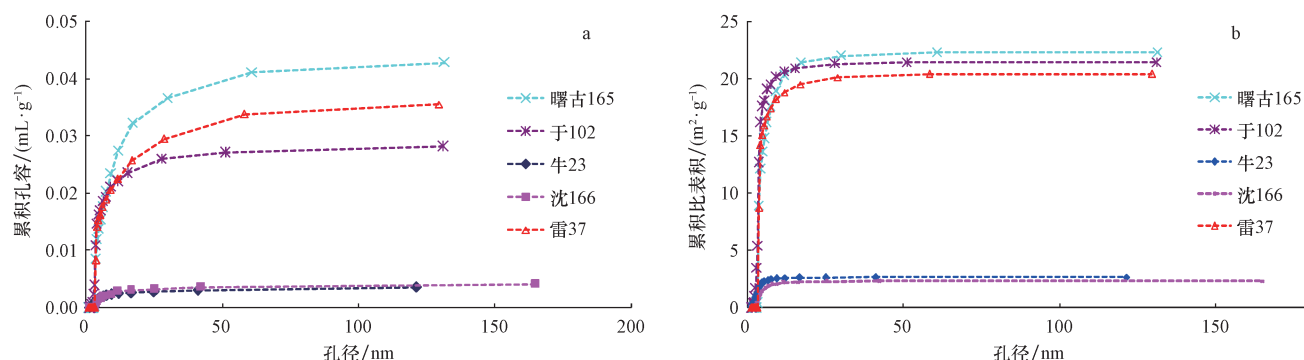


图7 累积孔容(a)和累积比表面(b)

Fig. 7 The cumulative volume(a) and the cumulative surface area(b)

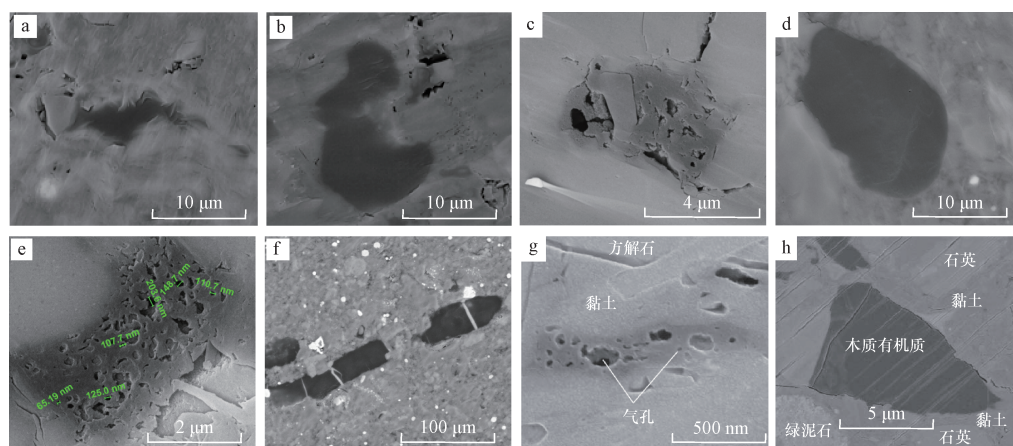


图8 不同沉积相泥页岩有机质中有机孔的赋存和发育特征

Fig. 8 Occurrence and development characteristics of organic matters in shale of different sedimentary facies

a, b. 辽河坳陷沙河街组; c, d. 鄂尔多斯盆地延长组长7段; e, f. 南海相龙马溪组; g, h. 北美海相

合态的有机质,且其中也发育有机孔,只是有机孔的发育状况因成熟度的提高而呈现出网络状、大孔、深孔型。至此,辽河坳陷沙三段、沙四段泥页岩有机孔的产生就可以解释为,在低熟条件下,早熟有机质在粘土矿物的催化作用下生排烃,一方面自身会形成有机孔,反过来有机质生烃过程产生的酸使得粘土矿物发生溶蚀产生孔隙,由于有机质呈结合或粘附态存在,所以孔隙多呈较浅的凹坑状。

4.3.2 显微组分生烃贡献

不同显微组分赋存状态存在差异性。镜质组和惰质组以及藻类体同属于形态组分,一般以游离态形式存在,而无定形体一般以粘附态有机质的形式存在^[23-24]。干酪根镜检表明辽河坳陷沙三段、沙四段泥页岩以相对富氢的无定形体为主(约80%),而藻类体、壳质组、镜质体和惰质体的含量很低。据此推断辽河坳陷呈粘附态且发育有机孔的显微组分主要为无定形体,而无定形体本身具有早期生油的特点^[25-26],其不但进入生油门限较早,而且达到生油高峰也较早。因而,推断无定形体是辽河坳陷沙河街组未熟-低熟油气的主要贡献者。

5 结论

1) 辽河坳陷次级凹陷沙三段、沙四段陆相泥页岩储层受沉积环境及地化条件的影响,储层孔隙类型及分布与北美及中国南方不同,主要发育6种孔隙类型,包括粒间孔、粒内孔、晶间孔、有机孔、溶蚀孔和裂缝孔。其中,有机孔受低热成熟度的影响相对不发育,孔径变化范围较大(5~250 nm);而无机孔特别是粘土矿物层间孔和溶蚀孔在深埋藏下最为发育,同时微裂缝也较普遍。

2) 辽河坳陷次级凹陷沙三段、沙四段泥页岩孔隙的成因和形状复杂,形成于沉积和成岩阶段,表现出与沉积压实、胶结、溶解作用相关的成因特征,另外还与页岩岩性、矿物组构、有机质类型、有机地化等因素密切相关。

3) 辽河坳陷次级凹陷沙三段、沙四段泥页岩微观孔隙的大小、形状及连通性对页岩气的赋存和渗透起着至关重要的作用。其中,粘土矿物集合体粒间孔和层间微缝对页岩气的赋存和运移贡献最大,溶蚀孔及晶间孔次之,有机孔因相对不发育,对页岩渗透贡献较小,但仍是吸附态页岩油气的主要场所。

4) 辽河坳陷次级凹陷沙三段、沙四段有机质以与粘土矿物呈吸附-结合态的赋存形式为主,粘附-结合态有机质中孔隙的大量发现表明粘土矿物特别是蒙脱石对有机质的早期催化生烃起到重要作用。同时,有机质与矿物(主要是粘土矿物)紧密共生的保存特点,反映了有机质保存形式与油气生成之间的密切关系,这是今后需要重要研究的一个课题。

5) 辽河坳陷次级凹陷沙三段、沙四段对生成页岩油气贡献最大的显微组分是无定形体。低熟条件下有机质生油气的特点表明,无论何种类型的干酪根,只要其中含有一定数量的无定形体或藻类体等易早期生油的组分,就可能生成未熟-低熟油气。

参 考 文 献

- [1] Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J, et al. Micro-structural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96 (4): 665-677.
- [2] Nelson P H. Pore-throat sizes in sandstones, siltstones and shale [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93 (3): 329-340.
- [3] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86 (10): 1921-1938.
- [4] Javadpour F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in

- mudrocks (shales and siltstones) [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2009, 48(8): 16–21.
- [5] 周旭红, 李军, 王延山, 等. 辽河坳陷陆上深层天然气勘探潜力研究[J]. *岩性油气藏*, 2011, 23(3): 23–28.
Zhou Xuhong, Li Jun, Wang Yanshan, et al. Study on exploration potential of deep natural gas in Liaohe Depression [J]. *Lithologic Reservoir*, 2011, 23(3): 23–28.
- [6] 朱晓军, 蔡进功. 泥质烃源岩的比表面与有机质关系研究进展及意义[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(3): 375–384.
Zhu Xiaojun, Cai Jingong. Progress and significance of research on relation between specific surface area and organic matter in argillaceous source rocks [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(3): 375–384.
- [7] Schieber J. Common themes in the formation and preservation of intrinsic porosity in shales and mudstones: Illustrated with examples across the Phanerozoic [C]. *Society of Petroleum Engineers Unconventional Gas Conference*, Pittsburgh, Pennsylvania, February 23–25, 2010, SPE Paper 132370, 10.
- [8] Gale J F, Reed R M, Holder J. Natural fractures in the Barnett shale and their importance for hydraulic fracture treatments [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 603–622.
- [9] 严继民, 张启元. 吸附与聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 108–120.
Yan Jimin, Zhang Qiyuan. Adsorption and accumulation [M]. Beijing: Academic Press, 1979: 108–120.
- [10] Braunaer S, Deming L S, Deming W E, et al. On a theory of the vander Waals adsorption of gases [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1940, 62(7): 1723–1732.
- [11] 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.
- [12] 陈文玲, 周文, 罗平等. 四川盆地长芯1井下志留统龙马溪组页岩气储层特征研究[J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 1073–1086.
Chen Wenling, Zhou Wen, Luo Ping, et al. Analysis of the shale gas reservoir in the Lower Silurian Longmaxi Formation, Changxin 1 well, Southeast Sichuan Basin, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(3): 1073–1086.
- [13] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(3): 438–444.
Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Structure characteristics and accumulation significance of nanopores in Longmaxi shale gas reservoir in the southern Sichuan Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(3): 438–444.
- [14] 耳闯, 赵靖舟, 白玉彬, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质泥页岩储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 708–716.
Er Chuang, Zhao Jingzhou, Bai Yubin, et al. Reservoir characteristics of the organic-rich shales of the Triassic YanChang Formation in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 708–716.
- [15] 黄振凯, 陈建平, 薛海涛, 等. 松辽盆地白垩系青山口组泥页岩孔隙结构特征[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(1): 58–65.
Huang Zhenkai, Chen Jianping, Xue Haitao, et al. Microstructural characteristics of the Cretaceous Qingshankou Formation shale, Songliao Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(1): 58–65.
- [16] Clayton J L. Geochemistry of coalbed gas-A review [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35(1/4): 159–173.
- [17] Slatt E M, O'Neal N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shale: contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(12): 2017–2030.
- [18] 吉利明, 邱军利, 夏燕青, 等. 常见黏土矿物电镜扫描微孔隙特征与甲烷吸附性[J]. *石油学报*, 2012, 33(3): 249–256.
Ji Liming, Qiu Junli, Xia Yanqing, et al. Micro-pore characteristics and methane adsorption properties of common clay minerals by electron microscope scanning [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 33(3): 249–256.
- [19] 张雪芬, 陆现彩, 张林晔, 等. 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(6): 597–604.
Zhang Xuefen, Lu Xiancai, Zhang Linye, et al. Occurrences of shale gas and their petroleum geological significance [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(6): 597–604.
- [20] 姚素平, 焦堃, 李苗春, 等. 煤和干酪根纳米结构的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(4): 367–378.
Yao Suping, Jiao Kun, Li Miao Chun, et al. Advances in research of coal and kerogen nanostructure [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(4): 367–378.
- [21] 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.
- [22] 李善营, 于炳松, Dong Hailiang, 等. 青海湖底沉积物的矿物物相及有机质保存研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(6): 493–498.
Li Shanying, Yu Bingsong, Dong Hailiang, et al. The mineralogical phase and preservation of organic matter in sediments of Qinghai Lake [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2006, 25(6): 493–498.
- [23] 王行信, 蔡进功, 包于进, 等. 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 Hangxin, Cai Jingong, Bao Yujin, et al. Catalysis of clay mineral to organic matter in hydrocarbon genesis [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2006, 11(3): 27–38.
- [24] 樊馥, 蔡进功, 徐金鲤, 等. 泥质烃源岩不同有机显微组分的原始赋存态[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 39(3): 434–439.
Fan Fu, Cai Jingong, Xu Jinli, et al. Original preservation of different organic micro-components in muddy source rock. [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 39(3): 434–439.
- [25] 蔡进功, 包于进, 杨守业, 等. 泥质沉积物和泥岩中有机质的赋存形式与富集机制[J]. *中国科学D辑*, 2007, 37(2): 234–243.
Cai Jingong, Bao Yujin, Yang Shouye, et al. Preservation ways and accumulated mechanism in muddy sediment and muddy rocks [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 37(2): 234–243.
- [26] 肖贤明. 显微组分的成烃作用模式[J]. *科学通报*, 1990, 35(3): 208–211.
Xiao Xianming. Hydrocarbon genesis model of macerals [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(3): 208–211.

(编辑 张亚雄)