

非常规天然气

陆相页岩孔隙类型、特征及油气共聚过程探讨 ——以辽河拗陷西部凹陷为例

黄 潇^{1,2}, 张金川^{1,2}, 李晓光³, 孙 睿^{1,2}, 彭建龙^{1,2}, 隆 帅^{1,2}

(1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083; 2. 地质资源勘查国家级实验教学示范中心, 北京 100083;
3. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010)

摘要:借助岩心描述、氩离子抛光扫描电镜对以辽河拗陷西部凹陷为代表的陆相页岩中不同尺度储集空间类型、特征进行了研究,并探讨了页岩油气的聚集过程。结果表明,研究层段发育溶蚀孔缝、构造缝等有利于页岩油聚集和运移的大孔径孔洞和裂缝。扫描电镜下,研究层段发育无机矿物孔、有机质孔及微裂缝3种微观孔隙类型,其中低成熟度条件下大孔径有机质孔的形成主要与有机酸的溶蚀改造有关。对微裂缝的研究表明,有机质边缘和内部可以发育多种形态裂缝,而有机质内部生排烃裂缝的大量发育则是陆相低成熟度页岩与南方高成熟度页岩的重要区别。研究区陆相页岩有机质正处于生油气高峰阶段,油气共存,聚集机理较为复杂。吸附态页岩气主要赋存于有机质和黏土矿物内外表面,溶解态页岩气则主要在原油的携带下逐渐在整个页岩段的宏观、微观孔隙中富集,并将油气在页岩层段的聚集过程分为以生物气聚集、油气微观聚集、油气宏观聚集和页岩层段富集为特征的4个阶段。

关键词:陆相页岩;宏观孔隙;微观孔隙;油气共聚;聚集过程

中图分类号:TE132.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2015)07-1422-11

引用格式:Huang Xiao, Zhang Jinchuan, Li Xiaoguang, *et al.* Pore types and characteristics of continental shale and discussion on the process of oil and gas accumulation: A case study of the Western Sag of Liaohe Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7): 1422-1432. [黄潇, 张金川, 李晓光, 等. 陆相页岩孔隙类型、特征及油气共聚过程探讨——以辽河拗陷西部凹陷为例[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7): 1422-1432.]

0 引言

随着重庆涪陵整装页岩气田的发现和多口高产页岩气井的成功开采,页岩油气作为一种新兴的非常规能源已经在中国多个地区展开了大规模的勘探和试验性开发工作^[1-3]。以辽河西部凹陷为代表的北方陆相含油气盆地,页岩广泛发育,并且有机质含量高,大部分处于油气共生阶段。近年来,国内外在海相页岩微观孔隙方面作了较多工作^[4-7],但对陆相页岩的储集空间研究较少,尤其是陆相页岩大多具有油气共生共存的特点,宏观孔缝及微裂缝对页岩油的聚集和

渗流发挥了重要作用。杨超等^[8]从页岩微观角度研究了辽河拗陷页岩的孔隙特征,初步分析了孔隙空间对油气储渗的影响,但对于影响页岩油聚渗的大孔径孔隙空间则缺少分析和探讨。笔者借助岩心描述、氩离子抛光扫描电镜(FIB-SEM)研究了页岩中不同尺度孔隙空间特征,指出了陆相页岩孔隙类型特点,在此基础上结合辽河拗陷西部凹陷地质情况探讨了油气两相在宏观、微观孔隙中的聚集过程。

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^[9]。西部凹陷是辽河凹陷最大的一个富含油气的凹陷,是古近系“东断西超或东断西翘”的被断层复杂化的复式半地堑断陷^[10]。其由北向南依次分布有牛心坨、台安、陈家、盘山、清水、鸳鸯沟等6个大的次级生油洼陷(图1)^[11]。其古近系自下而上发育房身泡组、沙河街组和东营组,其中沙河街组三段、四段发育大套深湖相、半深湖相页岩,沉积厚度巨大,分布范围广,是凹陷内主要的烃源岩层系之一。通过对沙三段、沙四段页岩油气发育的优质层段146个页岩样品

统计发现,页岩有机质类型以Ⅱ₁型为主,Ⅰ型次之,Ⅲ型较少,干酪根镜检显微组分以腐泥无定形体、藻类体为主,TOC平均值为3.22%,显示其有机质丰度较高;岩石热解产油潜量均值为18.9mg/g,显示页岩含油气性较好;雷84井现场解吸2760~2780m井段3个样品,平均含气量达到6.63m³/t,显示其具有较高的含气量。有机质热演化程度随深度变化,埋深约为2600m达到成熟门限,埋深3500m左右R_o值达到0.7%以上,埋深约为4500m时R_o值达到1.31%,现今页岩大部分处于油气同产阶

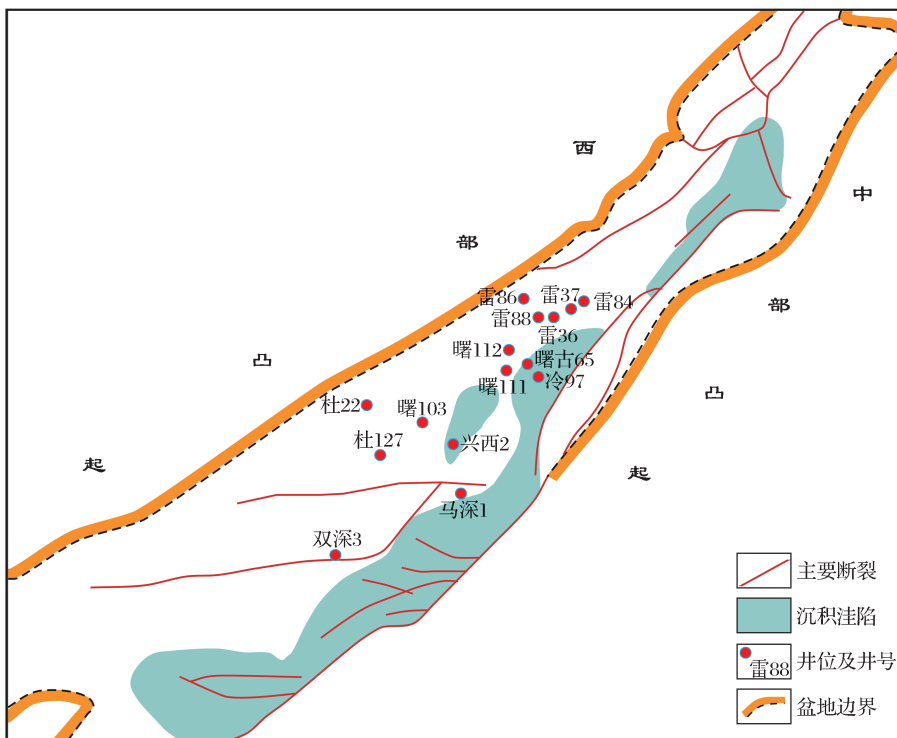


图1 辽河西部凹陷构造简图及井位分布

Fig. 1 The structure diagram of the Western Sag of Liaohe Depression and wells distribution

段,凹陷深部逐渐出现凝析气和原油裂解气^[12]。

2 样品选择及实验方法

为了研究辽河西部凹陷陆相页岩不同尺度孔隙发育类型及特征,选取了多口井进行岩心孔缝特征的观察和描述,并选择了其中5口井沙三段、沙四段页岩进行微观孔隙特征研究,样品的选取也尽量选择颜色相对较黑,有机碳含量相对较高的岩样,样品具体参数见表1。

实验采用的仪器是美国FEI Quanta200F场发射扫描电镜(FIB-SEM),分辨率达到1.2nm,放大倍数为25~20万倍。实验制样需要将样品打磨成约5mm见方,厚度约为1mm的薄片,并将测试观

察面打磨光滑后朝上固定在圆形金属底板上,每个底板固定4个样品,接着利用氩离子束轰击页岩表面进行精细抛光。FIB-SEM利用原子序数衬度成像,黄铁矿因原子序数较高的铁元素而在扫描电镜下呈现相对白色,有机质则因碳元素的低原子序数而呈现相对暗色^[8]。此外,在镜下也可以借助能谱分析(EDS)测定矿物元素组成及相对含量,进而确定矿物种类^[13]。

3 孔隙类型及特征

借助岩心描述和氩离子抛光扫描电镜对辽河凹陷西部凹陷沙三段、沙四段页岩不同尺度孔隙空间进行了系统的分类和研究,将岩心观察中毫米级及

其以上的孔缝作为宏观孔隙,扫描电镜下微米级及其以下的孔缝作为微观孔隙,并根据孔隙发育介质条件和成因特征进行了如下分类(表 2)。

3.1 宏观孔隙特征

页岩的宏观孔隙主要为裂缝和溶蚀孔。裂缝以顺层裂缝以及构造应力产生的构造缝为主。顺层裂缝沿着层理面延伸,主要是由于砂泥互层或者页岩的差异压实造成[图 2(d)—图 2(f)]^[14],其缝宽在 1~5mm 之间。构造缝是由于局部构造作用所形成或与局部构造作用相伴而生的裂缝[图 2(a)—图 2(c),

图 2(f)]^[15],其缝宽在 1~2mm 之间,以高角度裂缝切层发育,可以成为油气垂向运移的重要通道。构造缝在西部凹陷沙三段、沙四段页岩中是最常见也是最主要的裂缝类型,局部由于后期的热液活动受到充填。除此之外,西部凹陷雷家地区在沙三段、沙四段下部发育大面积云质页岩,由于溶蚀作用产生了大量的溶蚀孔,这在多口雷字号井岩心中均可见到。本文实验所观察的雷 84 井和雷 88 井云质页岩岩心中就大量发育次生溶蚀孔隙[图 2(g)—图 2(j)],溶蚀宽度在 5~10mm 之间,可垂直或平行于层理连续发育,并

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

井号	深度/m	层位	岩性	TOC/%	R _O /%
冷 97	3 514.81	Es ₃	深灰色页岩	3.53	0.85
雷 84	2 761.54	Es ₄	灰黑色云质页岩	5.55	0.59
马深 1	3 800.23	Es ₃	深灰色页岩	3.32	0.96
雷 88	2 747.73	Es ₄	深灰色云质页岩	5.10	0.53
曙 111	2 796.82	Es ₄	褐黑色油页岩	6.91	0.62

表 2 储集空间分类及特征
Table 2 The classification and characteristics of reservoir space

孔隙类型		特征	成因	赋存方式	
				页岩油	页岩气
宏观孔隙	顺层裂缝	顺层理面延伸,缝宽毫米级	砂泥互层或者泥岩的差异压实	以游离态为主,兼有吸附态和溶解态	以溶解态为主,兼有吸附态
	构造裂缝	高角度裂缝,切层发育,缝宽毫米级	局部构造作用或大构造伴生裂缝		
	溶蚀孔	孔洞状溶蚀孔可相互连通成为溶蚀缝,毫米级至厘米级	有机质生烃产生的有机酸或地下水中的碳酸溶蚀		
无机矿物孔	粒间孔	呈不规则的多边形,孔径为纳米级	原生压实堆积	以吸附态为主,兼有游离态和溶解态	以吸附态为主,兼有溶解态
	粒内孔	长条状,在黏土矿物内部密集发育,孔径为纳米级、微米级	脱水、黏土转化等成岩作用		
	晶间孔	晶体之间发育,具有一定的连通性,孔径为纳米级	晶体的不紧密堆积或晶格缺陷造成		
	溶蚀孔	以碳酸盐矿物粒间溶蚀居多,孔径为纳米级、微米级	有机质生烃产生的有机酸或地下水中的碳酸溶蚀		
有机质孔		多呈椭圆形或近似圆形,边缘光滑,孔径为纳米级、微米级	有机质脱水、有机酸溶蚀	以吸附态为主,兼有游离态和溶解态	以吸附态为主,兼有溶解态
	有机质边缘收缩缝	沿有机质边缘,长度随有机质变化,缝宽纳米级,长度微米级	有机质脱水排烃导致的有机质整体收缩	以游离态为主,兼有吸附态和溶解态	吸附态和溶解态
	有机质内部生排烃缝	横纵切有机质条带或呈树杈状,缝宽纳米级,长度微米级	有机质生排烃作用		
	黏土矿物成岩收缩缝	散布于页岩基质中并大量发育,缝宽纳米级,长度微米级	脱水、黏土转化等成岩作用		
微裂缝	构造微裂缝	可见矿物被切割,延伸范围广,缝宽为纳米级、微米级	局部构造伴生		以溶解态为主,兼有吸附态

注:页岩气的赋存方式为泡点压力之上,泡点压力之下可为游离态



图 2 岩心宏观孔隙特征

Fig. 2 Macro pore characteristics of drilling cores

(a)曙 111 井,3 276.2m,见明显的断层切割关系;(b)曙 103 井,3 107.4m,高角度裂缝;(c)雷 88 井,2 625.0m,裂缝被方解石填充;(d)曙 112 井,3 197.1m,顺层裂缝被方解石充填;(e)曙 112 井,3 096m,顺层裂缝;(f)雷 84 井,2 625m,顺层裂缝与构造切割缝同时发育;(g)雷 88 井,2 574.1m,白云质页岩见大孔径溶蚀孔;(h)雷 88 井,2 573.1m,溶蚀孔相互连通,呈垂向溶蚀缝;(i)雷 88 井,2 571.2m,垂向溶蚀孔与顺层裂缝同时发育;(j)雷 84 井,2 628.2m,溶蚀孔大面积发育

且相互连通成为溶蚀缝,其长度达到 20~30mm。

3.2 微观孔隙特征

除了页岩中的宏观孔隙,微米级和纳米级的孔隙也是页岩中油气主要的储集空间^[16-17]。通过对大量文献调研,前人往往根据孔隙成因将页岩微观孔隙分为无机成因孔(矿物质孔)、有机质孔和微裂缝,而对无机成因孔往往又根据发育位置或成因不同分为粒间孔、粒内孔、晶间孔、溶蚀孔等类型^[5,6,8,18]。微观孔隙中 1 μ m~1mm 为微米级孔隙,1nm~1 μ m 为纳米级孔隙,对纳米级孔隙进一步分为 100~1 000nm 的超大孔、50~100nm 的大孔、10~50nm 的中孔、2~10nm 的小孔和 1~2nm 的极小孔 5 级^[6]。

目前国外许多学者^[19]将有机质也作为一种矿物进行研究和分析,但有机质孔隙的发育与其他矿物具有一定的区别,因此笔者将页岩的微观孔隙分为无机矿物孔、有机质孔和微裂缝 3 个大类,并通过 FIB-SEM 镜下观察,将辽河坳陷西部凹陷沙三段、沙四段页岩微观孔隙按照其成因类型进行如下分类和描述。

3.2.1 无机矿物孔特征

(1)粒间孔。粒间孔主要发育在石英、长石等脆性较好、抗压实作用较强的结晶矿物晶体之间以及绿泥石、蒙脱石、伊利石等黏土矿物间[图 3(a),图 3(c),图 3(d)]。结晶矿物粒间孔多呈不规则的

多边形,孔径多在 100~200nm 之间,属于纳米级超大孔[图 3(a),图 3(d)],而黏土矿物粒间孔则多呈线状,孔径较小为纳米级小孔至极小孔。粒间孔多为原生孔隙,一般经后期压实胶结作用孔隙空间逐渐减少,但镜下观察研究层位页岩粒间孔压实变形不明显。

(2)粒内孔。粒内孔主要发育于黏土矿物内部,由于黏土矿物多成层状生长,层与层之间往往产生大量微小的孔缝[图 3(b),图 3(d)],后期成岩作用下层间孔缝逐渐增大^[20],其宽度大多在数十纳米至数百纳米,长度可达数微米,并由于内比表面积大成为页岩气吸附的优势场所。

(3)晶间孔。晶间孔发育在石英、长石、黄铁矿等结晶矿物中,往往是由于晶簇生长过程中晶体的不紧密堆积或晶格缺陷造成。镜下观察黄铁矿大量发育并常常与有机质伴生[图 3(e)],黄铁矿晶间孔径分布在数纳米至数百纳米之间,涵盖纳米级小孔到超大孔,这些孔隙之间具有一定的连通性[图 3(f)],有利于油气的运移。

(4)溶蚀孔。本文实验还观察到大量的溶蚀孔,可分为粒间溶蚀孔和粒内溶蚀孔。粒间溶蚀孔在雷 84 井和雷 88 井的云质页岩中最为常见,溶蚀位置主要发生在方解石、白云石等碳酸盐矿物粒间^[21],

溶蚀孔通常孔径较大且形状极为不规则[图 3(h), 图 3(i)],主要为微米级孔隙。粒内溶蚀孔在矿物晶体内部发育[图 3(c)],主要为纳米级中孔至小孔,偶可见微米级的孔隙[图 3(g)]。有机质生烃过程中所产生的有机酸和地下水中溶解的碳酸是造成溶蚀孔发育的主要原因^[20],溶蚀孔的发育使得页岩的孔隙空间得到增加,改善了其储集油气的能力。

3.2.2 有机质孔特征

镜下观察发现有机质孔多呈椭圆形或近似圆形,也有呈哑铃形等多种形态,以纳米级孔隙为主,孔径在 20~500nm 之间,部分孔孔径可达 1~3 μm [图 4(a)—图 4(c)],极个别孔能达到 5 μm [图 3(d)]。有机质作为一种矿物同其他无机矿物

一样,在成岩过程中会发生脱水收缩等现象,除此之外有机质孔的形成更多的是由于有机质生烃过程中产生的有机酸和酚类物质^[20],这些物质对有机质具有溶解作用并加速有机质孔的形成^[22]。初始有机质孔多数独立发育且孔径非常微小,后可由于有机酸强烈的溶蚀改造使得孔径逐渐增大达到微米级别 [图 4(a),图 4(b)],这些经溶蚀改造的有机质孔形状极不规则,但边缘较为圆滑。镜下有机质孔还包含一种特殊类型,即古生物化石有机质孔[图 4(c)]中的古生物化石为硅藻,其孔隙的发育与古生物自身骨架和腔体的结构密切相关^[23],孔隙发育密集且平均孔径能达到微米级别,是一种优质的油气储集空间。

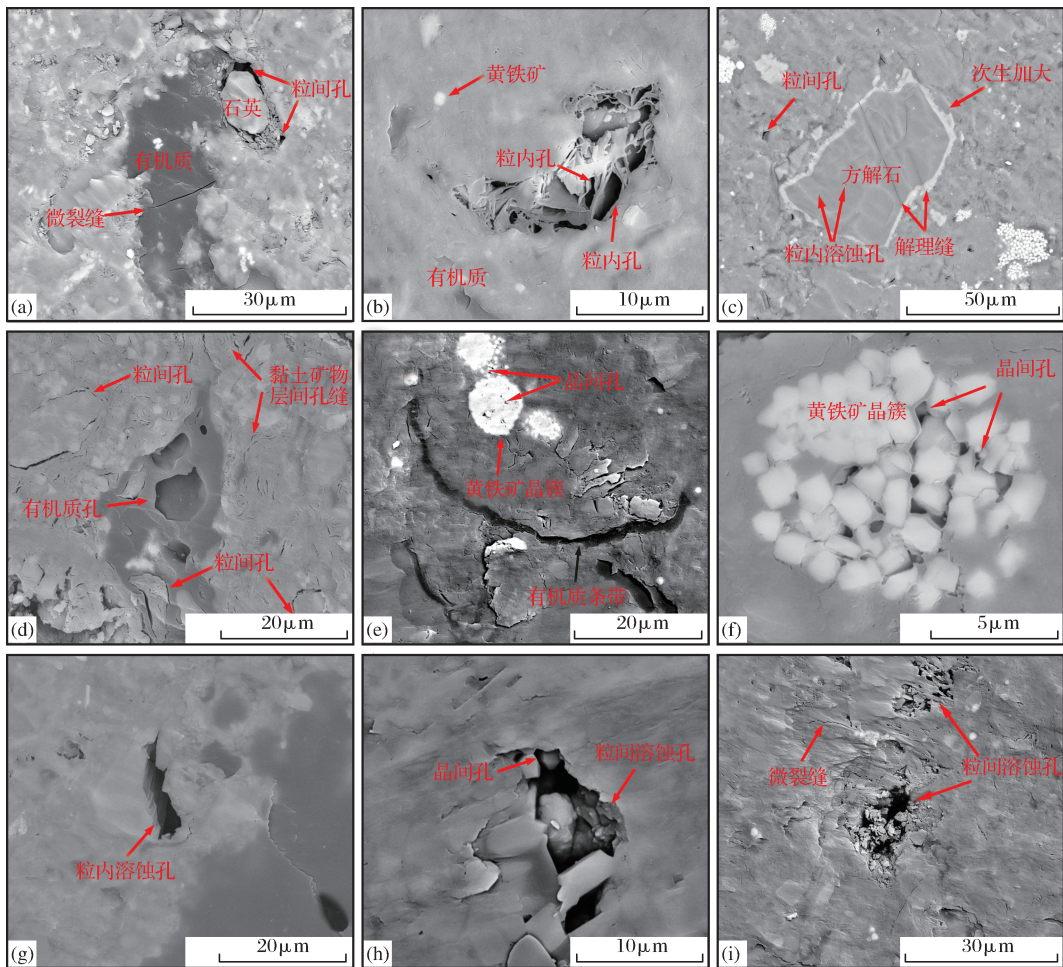


图 3 无机矿物孔特征

Fig. 3 Characteristics of inorganic mineral pores

(a)、(d)马深 1 井;(b)、(c)冷 97 井;(e)、(f)雷 84 井;(g)曙 111 井;(h)、(i)雷 88 井

3.2.3 微裂缝发育特征

镜下观察的微裂缝主要有有机质边缘收缩缝、有机质内部生排烃缝、黏土矿物成岩收缩缝、构造微

裂缝 4 种类型。有机质内部可以发育有机质孔,除此之外镜下观察发现有机质还可以在其周缘和内部发育多种形态的裂缝。有机质边缘缝是本文实验中

最为常见的一种微裂缝类型[图 5(a)—图 5(c)],一般是由于有机质在成岩或有机质生烃过程中脱水、排烃等作用导致有机质整体收缩,在边缘与其他矿物之间形成的微裂缝,通常延伸范围只局限于有机质边缘,但可以在有机质周边断续发育[图 5(b)],其宽度在100~800nm 之间,长度随有机质而变化,通常在 10 μ m 以上,偶可见有机质边缘缝继续延伸[图 5(c)],可能是由于后期构造作用形成。有机质边缘收缩缝可以成为有机质内部孔隙与基质孔隙沟通的桥梁。同时,在有机质内部还观察到大量裂缝发育[图 3(a),图 5(d)—图 5(f)],研究表明这种裂缝的成因主要与有机质生排烃有关,有机质大量生烃时内部局部压力会很快增大,当压力达到一定程度超过了有机质的承受能力就会发生瞬时的排烃作用,从而在有机质内部产生裂缝,而这种裂缝在中国南方高成熟度的海相页岩中却很少见到^[23-26],Cur-tis 等^[27]通过对比美国多个盆地页岩的孔隙特征发

现有有机质内部裂缝只大量出现在处于生油窗的页岩中,这说明高成熟度下有机质内部的生排烃缝已经被闭合,可能是由于沉积、构造、成岩等作用而丧失了一部分储集空间。镜下观察,有机质内部生排烃缝可沿着有机质条带的延展方向延伸[图 5(d)],长度达到 100 μ m 以上,也可横切有机质条带[图 5(e),图 3(a)],并与有机质边缘收缩缝连通,长度在 40 μ m 以上,还可发育成树杈状[图 5(f)],有机质内部裂缝的产生有利于有机质内部孔隙空间与外部孔隙空间的连通。除了有机质内部发育裂缝,还可以在石英、方解石等晶体中发现解理缝[图 3(c)]。黏土矿物成岩收缩缝主要是蒙脱石向伊利石的成岩转化过程中体积大量收缩所形成的裂缝[图 5(h),图 5(i)],宽度通常在 50~300nm 之间,长度在 1 μ m 以上。微构造裂缝产生的原因与宏观裂缝类似[图 5(g)],但裂缝宽度通常在数百纳米至数微米之间,延伸距离较长,常常超出视野范围。

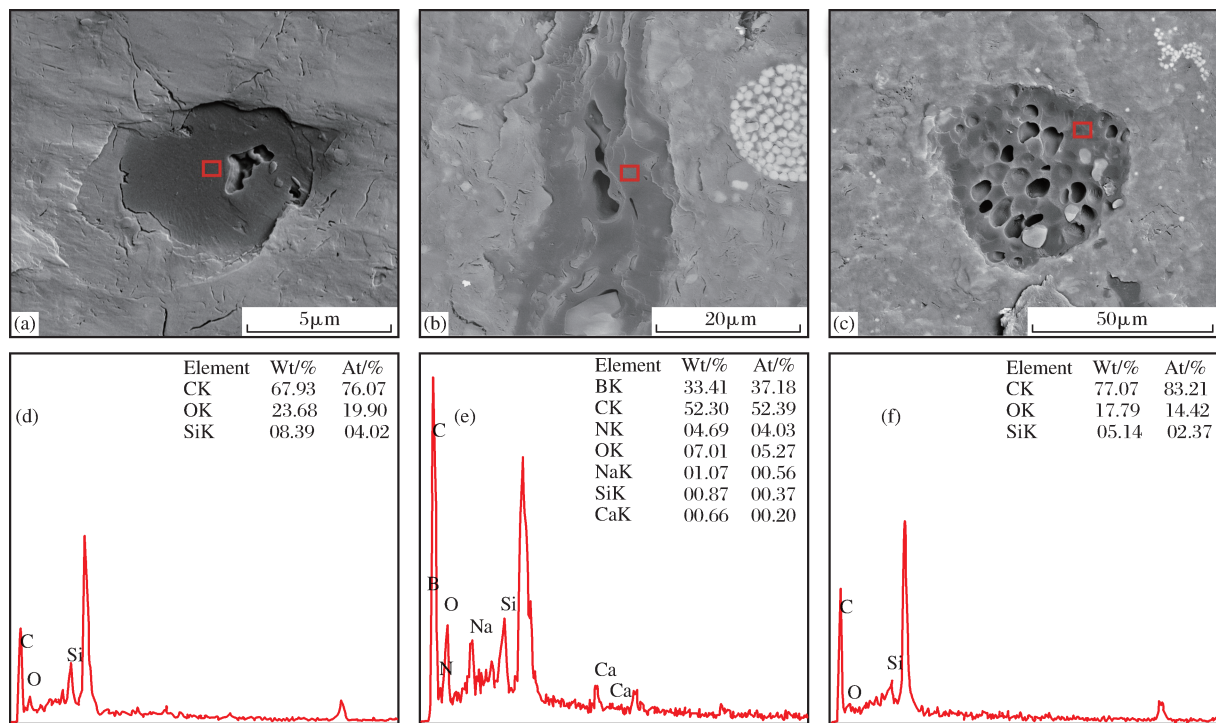


图 4 有机质孔赋存特征
Fig. 4 Characteristics of organic pores
(a)雷 84 井;(b)冷 97 井;(c)雷 88 井

4 讨论

4.1 孔隙的生成及其连通性

辽河拗陷西部凹陷是典型的拉张型断陷盆地,在沉积物不断沉积的过程中,盆地也在不断地拉张沉降,但总体来讲宏观孔隙中顺层裂缝的形成要早

于构造裂缝,而溶蚀孔缝的形成时间最晚,主要是在成岩阶段形成。微观孔隙中原生粒间孔形成时间最早,在成岩过程中逐渐减少,但与此同时矿物质孔隙开始逐渐形成,早成岩阶段 B 期黏土矿物层间粒内孔和结晶矿物晶间孔开始形成^[20],中成岩阶段 A 期有机质在成熟过程中纳米级的有机质孔开始形成并

产生有机酸,在有机酸的腐蚀作用下微小的有机质孔和后期形成的结晶矿物粒间孔可进一步增大。随着有机质成熟脱水和生烃量的不断积累,有机质边缘收缩缝和有机质生排烃缝开始逐渐形成,黏土矿物的成岩收缩缝也是在这个时期形成。总体来讲,

微观孔隙中除了原生粒间孔外大致在同一时期形成,这有利于油气从有机质向外运移,而宏观孔缝形成的时间相对较晚,但由于辽河拗陷西部凹陷富有机质页岩现正处于生油气的高峰阶段,宏观孔缝在油气的运移过程中也会起到一定的作用。

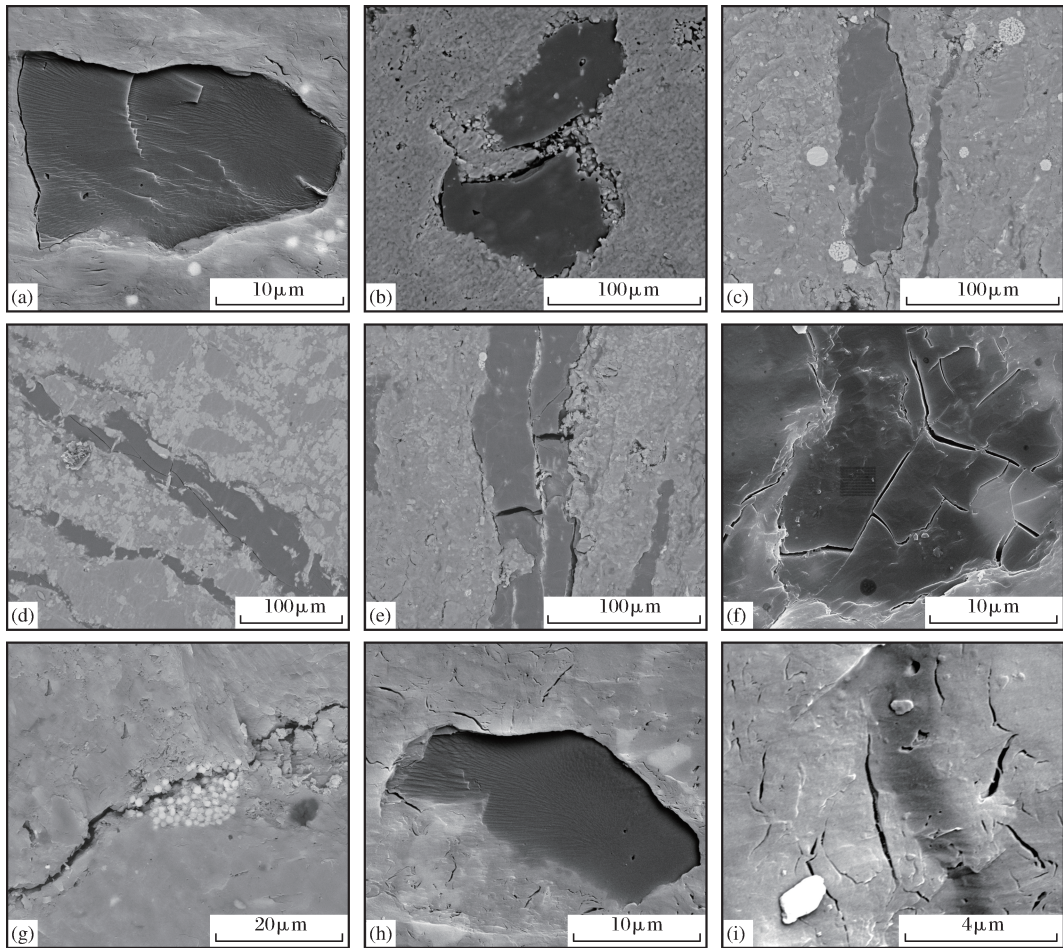


图 5 微裂缝特征

Fig. 5 Characteristics of micro-cracks

(a)、(h)雷 84 井;(b)曙 111 井;(d)、(e)雷 88 井;(f)冷 97 井;(g)、(i)马深 1 井

通过岩心观察可以发现,宏观孔隙之间的连通性较好,高角度构造缝的发育连通了构造缝和顺层缝,由于溶蚀缝多数垂向发育,与顺层缝也具有一定的连通性(图 2)。扫描电镜下观察发现,粒内孔、晶间孔、有机质孔相对独立发育,与其他类型孔隙连通性相对较差,但同一黏土矿物粒内孔之间[图 3(b)]、同一晶簇不同晶间孔之间具有一定的连通性[图 3(f)],经有机酸溶蚀改造的有机质孔之间也可相互连通[图 4(a),图 4(b)]。溶蚀孔的连通性较好尤其是粒间溶蚀孔,不仅可以连通粒间孔甚至可以沟通部分晶间孔隙[图 3(h),图 3(i)]。微观孔隙中微裂缝具有最好的连通性,有机质边缘收缩缝和有机质内部生排烃

缝可以很好地沟通有机质内部和基质粒间孔[图 5(e)],黏土矿物成岩收缩缝可以在一定程度上沟通黏土矿物粒内孔与基质粒间孔,有机质周围生长的成岩收缩缝还可进一步沟通有机质[图 5(h),图 5(i)],有利于有机质的排烃。构造微裂缝可以连通裂缝所经过的所有孔隙空间[图 5(c),图(g)],是所有孔隙类型中连通性最好的一种类型,特别是对石油这种大分子流体的运移具有重要的作用。

4.2 页岩油气共聚过程

辽河拗陷西部凹陷沙三段、沙四段页岩有机质类型以偏生油的腐泥型干酪根或混合型干酪根为主,成熟度 R_o 值大多在 0.5%~1.0%之间,正处于

生油的高峰阶段,伴随石油还有大量的天然气产生(图 6)。在原始地层中这些天然气或者溶解在石油中,或者吸附在有机质或黏土等矿物表面,很少有游

离态,只有当地层压力低于泡点压力时,储层中才会出现游离态天然气。因此这种情况下油气的聚集和渗流规律显然不同于南方海相高成熟度的页岩。

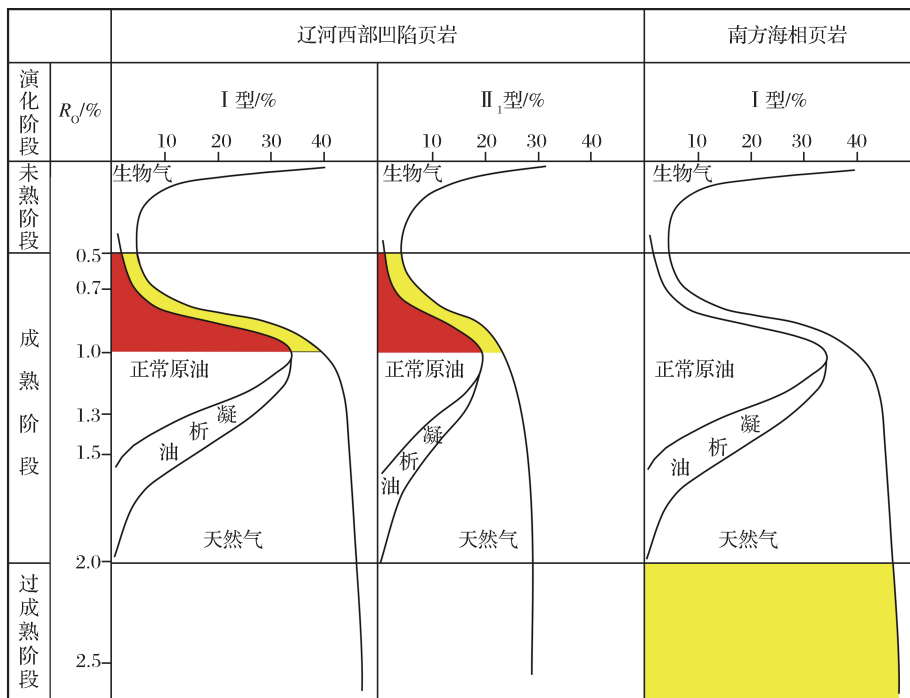


图 6 辽河西部凹陷及南方典型页岩生烃阶段^[30]

Fig. 6 Hydrocarbon generation stage of Western Sag of Liaohe Depression and Southern Typical shale

页岩生烃的最初阶段主要是浅埋藏条件下微生物发酵形成的生物气,随后有机质在时间和温度的作用下生成原油和天然气,前期形成天然气首先被有机质和紧邻有机质的矿物表面吸附^[28],当吸附气量达到饱和时,则溶解进入原油,与原油一起储集和运移。于是,根据油气相态、赋存方式以及聚集空间的不同,将页岩油气在页岩层段中的聚集过程分为 4 个阶段(图 7):

第一阶段(生物气聚集):此阶段以大量的溶解态生物成因气的聚集为特征。生物气是浅埋藏条件下,未熟—低熟的泥质沉积物中甲烷生成菌在厌氧环境下新陈代谢的产物^[29]。这一阶段地层大量含水,原生粒间孔隙发育,有机质孔和黏土矿物粒内孔尚未形成,生物成因的天然气主要以溶解态赋存于地层水中,当天然气生成量足够大时,可以游离态存在于粒间孔中,部分天然气可吸附在原始有机质表面[图 7(a)]。

第二阶段(油气微观聚集):此阶段以页岩油和页岩气用不同的方式在微观孔隙中的聚集为主要特征。页岩埋深达到 2 600m 以深,有机质进入生油生气的高峰阶段。这一阶段生成的大量天然气首先

被有机质自身吸附,随后以溶解态进入原油并在原油的携带下充填有机质中的纳米级孔隙和有机质内部生排裂缝;随着油气的不断产生,在压力的驱动下,原油呈活塞式驱替运移进入有机质边缘裂缝和有机质周边的无机矿物粒间孔、微溶蚀孔、晶间孔、成岩收缩缝等孔隙空间。同时在岩石矿物表面对天然气的吸附未饱和的情况下,由于矿物表面对天然气吸附的作用力远大于液态油分子对天然气溶解的作用力,溶解在原油中天然气可重新解吸并尽力饱和和矿物表面尤其是黏土矿物对天然气的吸附,这时吸附态和溶解态的天然气是一个再平衡的过程,且只要天然气在原油中的溶解没有达到饱和状态,就不会出现游离态天然气^[31]。这个阶段有机质内部裂缝和边缘裂缝对原油从有机质内部顺利地进入基质孔隙起到了重要的作用[图 7(b),图 7(c)]。

第三阶段(油气宏观聚集):此阶段以溶解有大量天然气的原油在宏观孔隙中的聚集为主要特征。页岩中宏观尺度的构造缝、大孔径溶蚀孔缝逐渐被原油饱和,地层孔隙中原有的地层水被逐渐驱替。这一阶段油气的聚集规律与常规油气类似[图 7(d)]。

第四阶段(页岩层段富集):此阶段以富有机质

页岩层段油气向非烃源岩层段的运移为主要特征。这里的非烃源岩层段包括贫有机质层段的页岩和页岩的致密夹层。由于湖相页岩的总有机碳纵向非均质性较强,富有机质层段生成的页岩油气会通过微裂缝或构造缝向紧邻的贫有机质层段的页岩运移。其次,西部凹陷陆相页岩岩性纵向非均质性较强,页岩中经常会出现粉砂岩、粉砂质页岩、泥质粉砂岩或者碳酸盐岩等致密夹层,原油在充满页岩内部孔隙后会在压力作用下通过宏观和微观的裂缝逐渐向夹层运移,并最终具有较高的含油饱和度。这一阶段的聚集过程与致密油气类似[图 7(e)]^[32]。

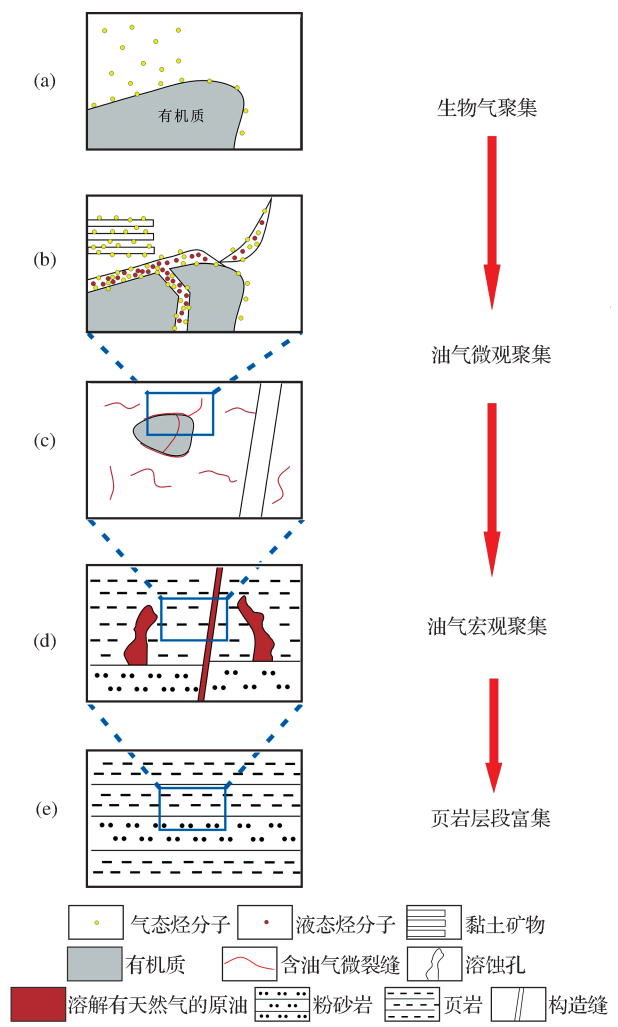


图 7 陆相页岩油气聚集阶段模式

Fig. 7 Model of accumulation stage of continental shale oil and gas

5 结论

(1) 辽河拗陷西部凹陷页岩发育溶蚀孔、构造缝、顺层缝等有利于页岩油聚集和运移宏观大孔径孔洞和裂缝,且宏观孔缝之间的连通性相对较好。

(2) 西部凹陷页岩发育无机矿物孔、有机质孔和微裂缝 3 种微观孔隙类型,无机矿物孔包括粒间孔、粒内孔、晶间孔、溶蚀孔。其中低成熟度条件下大孔径有机质孔的形成主要与有机酸的溶蚀改造有关。微裂缝主要包括有机质边缘收缩缝、有机质内部生排烃缝、黏土矿物成岩收缩缝和构造微裂缝,而有机质内部生排烃裂缝的大量发育则是陆相低成熟度页岩与南方高成熟度海相页岩的重要区别,且对沟通有机质内部和基质粒间孔起到了重要作用。

(3) 与南方高程度海相页岩气不同,研究区陆相页岩有机质大多处于生油高峰阶段,并伴生大量天然气,页岩油与页岩气在页岩中同时赋存,聚集机理较为复杂。吸附态页岩气主要赋存于有机质和黏土矿物内外表面,溶解态页岩气则主要赋存于原油中,并在原油的携带下由有机质孔缝—无机矿物孔缝—溶蚀孔、构造缝—非烃源岩层段的过程,逐渐在整个页岩段富集,于是将油气在页岩层段的聚集过程分为以生物气聚集、油气微观聚集、油气宏观聚集和页岩层段富集为特征的 4 个阶段。

参考文献 (References):

[1] Dong Qingquan, Liu Xiaoping, Li Hongxiang, *et al.* Formation conditions of shale oil reservoir in the second member of Kongdian Formation in southern Kongdian area, Huanghua Depression[J]. *Natural Gas Geosciences*, 2013, 24 (1): 188-198. [董清源, 刘小平, 李洪香, 等. 黄骅拗陷孔南地形成条区孔二段页岩油藏件分析[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(1): 188-198.]

[2] Gao Gang, Liu Xianyang, Wang Yinhui, *et al.* Characteristics and resources potential of the oil shale of Chang 7 layer in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 140-146. [高岗, 刘显阳, 王银会, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 段页岩油特征与资源潜力[J]. *地质前缘*, 2013, 20(2): 140-146.]

[3] Zhou Qinghua, Song Ning, Wang Chengzhang, *et al.* Geological evaluation and exploration prospect of Huayuan shale gas block in Hunan Province[J]. *Natural Gas Geosciences*, 2014, 25(1): 130-140. [周庆华, 宋宁, 王成章, 等. 湖南花垣页岩气区块地质评价与勘探展望[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(1): 130-140.]

[4] 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.

[5] Chalmers G R, Marc Bustin R, Power I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: Examples from

- the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1099-1119.
- [6] Nie Haikuan, Bian Ruikang, Zhang Peixian, *et al.* Micro-types and characteristics of shale reservoir of the Lower Paleozoic in southeast Sichuan Basin, and their effects on the gas content [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 331-343. [聂海宽, 边瑞康, 张培先, 等. 川东南地区下古生界页岩储层微观类型与特征及其对含气量的影响[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 331-343.]
- [7] Yang Chao, Zhang Jinchuan, Tang Xuan. Microscopic pore types and its impact on the storage and permeability of continental shale gas, Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 240-250. [杨超, 张金川, 唐玄. 鄂尔多斯盆地陆相页岩微观孔隙类型及对页岩气储渗的影响[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 240-250.]
- [8] Yang Chao, Zhang Jinchuan, Li Wanjuan, *et al.* Microscopic pore characteristics of Sha 3 and Sha 4 shale and their accumulation significance in Liaohe Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 286-294. [杨超, 张金川, 李婉君, 等. 辽河坳陷沙三、沙四段页岩微观孔隙特征及其成藏意义[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 286-294.]
- [9] Yang Xin, Zhen Jianjing, Wang Xiaofeng, *et al.* Origin of nature gas and gas filling pattern in west sag, Liaohe Depression [J]. Natural Gas Geosciences, 2011, 22(6): 1015-1020. [杨鑫, 郑建京, 王晓锋, 等. 辽河坳陷西部凹陷天然气成因类型与成藏模式[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 1015-1020.]
- [10] Mu Deliang, Meng Weigong, Li Cheng, *et al.* Structural style and hydrocarbon accumulation in the steep slope zone of faulted basin: An example from the western sag of the Liaohe Depression, the Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 635-642. [慕德梁, 孟卫工, 李成, 等. 断陷盆地陡坡带构造样式与油气聚集——以渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷陡坡带为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 635-642.]
- [11] Zhang Zhen, Bao Zhidong, Tong Hengmao, *et al.* Sedimentary facies and facies model of the 3rd member of Shahejie Formation in the western sag, Liaohe fault basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(3): 387-397. [张震, 鲍志东, 童亨茂, 等. 辽河断陷西部凹陷沙三段沉积相及相模式[J]. 高校地质学报, 2009, 15(3): 387-397.]
- [12] Li Nin, Ren Zuowei, Li Cheng. An integrated evaluation on petroleum geology of the deep reservoirs in the west sag of Liaohe Basin, China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(6): 9-15. [李琳, 任作伟, 孙洪斌. 辽河盆地西部凹陷深层石油地质综合评价[J]. 石油学报, 1999, 20(6): 9-15.]
- [13] Clayton T, Pearce R B. Rapid chemical analysis of the $<2\mu\text{m}$ clay fraction using an SEM/EDS technique [J]. Clay Minerals, 2007, 42(4): 549-562.
- [14] Zeng Lianbo. Fracture characteristics of Eocene low-permeable reservoirs in Leijia Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(2): 167-169. [曾联波. 雷家油田下第三系低渗透储层裂缝特征[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 167-169.]
- [15] Gong Lei, Zeng Lianbo, Li Juan, *et al.* Features of fractures in shallow-to mid-depth reservoirs the Nanxiang Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 778-784. [巩磊, 曾联波, 李娟, 等. 南襄盆地安棚浅、中层系特低渗透储层裂缝特征及其与深层系裂缝对比[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 778-784.]
- [16] Zhao Pei, Li Xianqing, Tian Xingwang, *et al.* Study on micro-pore structure characteristics of Longmaxi Formation shale gas reservoirs in the southern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(6): 947-956. [赵佩, 李贤庆, 田兴旺, 等. 川南地区龙马溪组页岩气储层微孔隙结构特征[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(6): 947-956.]
- [17] 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.
- [18] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(10): 1921-1938.
- [19] Passey Q R, Bohacs K, Esch W L, *et al.* From Oil-Prone Source Rock to Gas-Producing Shale Reservoir-Geologic and Petrophysical Characterization of Unconventional Shale Gas Reservoirs [C]. CPS/SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition in China held in Beijing, China, 8-10 June 2010. doi: 10.1118/131350-MS.
- [20] Zhu Xiaomin. Sedimentary Petrology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 48-153. [朱筱敏. 沉积岩石学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 48-153.]
- [21] Wei Xiangfeng, Liu Ruobing, Zhang, Tingshan, *et al.* Micro-pores structure characteristics and development control factors of shale gas reservoir: A case of Longmaxi Formation in XX area of southern Sichuan and northern Guizhou [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 1048-1059. [魏祥峰, 刘若冰, 张廷山, 等. 页岩气储层微观孔隙结构特征及发育控制因素——以川南一黔北 XX 地区龙马溪组为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 1048-1059.]
- [22] 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.
- [23] Yang Feng, Ning Zhengfu, Hu Changpeng, *et al.* Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 301-311. [杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 等. 页岩储层微观孔隙结构特征[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 301-311.]
- [24] Han Shuangbiao, Zhang Jinchuan, Brian Horsfield, *et al.* Pore types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic shale in Southeast Chongqing [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(3): 247-253. [韩双彪, 张金川, Brian Horsfield, 等. 页岩气储层孔隙类型及特征研究——以渝东南下古生界为例[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 247-253.]
- [25] Liang Xing, Zhang Tingshan, Yang Yang, *et al.* Microscopic pore structure Lower Cambrian Qiongzhusi and its controlling factors of overmature shale in formation, northern Yunnan and Guizhou Provinces of the China [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 18-26. [梁兴, 张廷山, 杨洋, 等. 滇黔北地区

- 筇竹寺组高演化页岩气储层微观孔隙特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 18-26.]
- [26] Guo Xusheng, Li Yuping, Liu Ruobing, *et al.* Characteristics and controlling factors of micro-pore structures of Longmaxi shale play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 34(6): 9-16. [郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2011, 34(6): 9-16.]
- [27] Curtis M E, Cardott B J, Sondergeld C H, *et al.* The development of organic porosity in the Woodford shale as a function of thermal maturity[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition Held in San Antonio, Texas: USA, 8-10, October, 2012.
- [28] Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Accumulation mechanism and distribution of shale gas[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18. [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.]
- [29] Gao Yang, Jin Qiang, Shuai Yanhua, *et al.* Genetic types and accumulation conditions of biogas in Bohaiwan Basin[J]. Natural Gas Geosciences, 2011, 22(3): 409-414. [高阳, 金强, 帅燕华, 等. 渤海湾盆地生物气成因类型与成藏条件[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 409-414.]
- [30] Yang Wanli, Li Yongkang, Gao Ruiqi, *et al.* Types and evolution model of continental source materials of the Songliao Basin[J]. Science China, 1981, 24(8): 1000-1008. [杨万里, 李永康, 高瑞祺, 等. 松辽盆地陆相生油母质的类型与演化模式[J]. 中国科学, 1981, 24(8): 1000-1008.]
- [31] Qin Jishun, Li Aifen. Petroleum Reservoir Physics[M]. Beijing: Petroleum University Press, 2001: 158-170. [秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 北京: 石油大学出版社, 2001: 158-170.]
- [32] Li Jianzhong, Guo Bincheng, Zheng Min, *et al.* Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 607-615. [李建忠, 郭彬程, 郑民, 等. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 607-615.]

Pore Types and Characteristics of Continental Shale and Discussion on the Process of Oil and Gas Accumulation: A Case Study of the Western Sag of Liaohe Depression

HUANG Xiao^{1,2}, ZHANG Jin-chuan^{1,2}, LI Xiao-guang³, SUN Rui^{1,2}, PENG Jian-long^{1,2}, LONG Shuai^{1,2}

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Geological Resources Exploration, Beijing 100083, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin 124010, China)

Abstract: Based on core description, ion beam-scanning electron microscope (FIB-SEM), pore types and characteristics of different scale of continental shale which is represented by the western sag of Liaohe Depression were studied, and the accumulation process of shale oil and gas in the pores was discussed. The results show that the development of large pores like dissolution pores and cracks, tectonic cracks helps the accumulation and migration of oil in the study interval. What's more, inorganic mineral pore, organic pore and micro-cracks were discovered by FIB-SEM, and the formation of the large organic pores is related to the dissolution of the organic acid in the condition of low maturity. Meanwhile, the results show that a variety of micro-cracks are developed in the edge and internal of the organic matter. The extensive development of organic internal cracks is actually the main difference between low maturity continental shale and southern high maturity marine shale. The continental organic in the study area is in the peak of oil generation with a large number of natural gases, and the oil and gas existed at the same time so that the accumulation mechanism is relatively complex. The inner and outer surface of organic and clay plays an important role in the storage of absorbed shale gas, and the dissolved shale gas is mainly stored in the crude oil. The oil-carried gas fills the pores in the shale interval which shares a high oil and gas saturation. Finally, the migration processes are divided into four stages, i. e., bio-gas accumulation, oil and gas micro accumulation, oil and gas macro accumulation and shale interval accumulation.

Key words: Continental shale; Macro pore; Micro pore; Oil and gas accumulation together; Accumulation process